



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**STEG-CUBE: SISTEMA HÍBRIDO SOLAR-TERMOELÉTRICO PARA ENERGY
HARVESTING EM CUBESAT**

EDER ANDRADE DA SILVA



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**STEG-CUBE: SISTEMA HÍBRIDO SOLAR-TERMOELÉTRICO PARA ENERGY
HARVESTING EM CUBESAT**

EDER ANDRADE DA SILVA

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Energia e Sustentabilidade.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Javier Gimenez Ledesma

Foz do Iguaçu
2026

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

S586

Silva, Eder Andrade da.

STEG-CUBE: sistema híbrido solar-termoelétrico para energy harvesting em CubeSat / Eder Andrade da Silva. - Foz do Iguaçu, 2026.
237 f.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade. Foz do Iguaçu-PR, 2026.

Orientador: Oswaldo Hideo Ando Junior.

Coorientador: Jorge Javier Gimenez Ledesma.

1. Energia solar. 2. Termoeletricidade. 3. Energy harvesting. 4. CubeSat. 5. Sistemas híbridos. I. Ando Junior, Oswaldo Hideo. II. Título.

CDU 621.383.51

STEG-CUBE: SISTEMA HÍBRIDO SOLAR-TERMOELÉTRICO PARA ENERGY HARVESTING EM CUBESAT

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Energia e Sustentabilidade.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior (UFPB)

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Javier Gimenez Ledesma (UNILA)

Prof. Dr. Cicero Da Rocha Souto (UFPB)

Prof. Dr. João Paulo Pereira do Carmo (USP)

Prof. Dr. Gabriel Augusto Ginja (USP)

Prof. Dr. Márcio Luis Munhoz Amorim (USP)

Foz do Iguaçu, 27 de fevereiro de 2026.

Dedico este trabalho à Lívia, minha filha,
ela é a razão pela qual sempre busco melhorar o mundo ao nosso redor.
Sua luz, amor e curiosidade são minha maior inspiração e motivação.

SILVA, Eder Andrade da. STEG-CUBE: Sistema Híbrido Solar-Termoelétrico Para Energy Harvesting Em CubeSat. 2026. 237 folhas. Tese (Doutorado em Energia e Sustentabilidade) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu.

RESUMO

A crescente demanda por sistemas energéticos mais eficientes e sustentáveis impulsiona o desenvolvimento de tecnologias de Energy Harvesting capazes de recuperar energia residual e aumentar a densidade energética de sistemas autônomos. Neste contexto, esta tese investiga a aplicação de arquiteturas híbridas fotovoltaico-termoelétricas em plataformas CubeSat, caracterizadas por severas restrições de volume, massa e dissipação térmica. O objetivo deste trabalho foi desenvolver e validar experimentalmente a arquitetura híbrida STEG-CUBE, baseada na integração direta entre conversão fotovoltaica e conversão termoelétrica com acoplamento térmico direto. A metodologia combinou modelagem física e eletrotérmica parametrizada, desenvolvimento de arquitetura híbrida de geração e gerenciamento energético e validação experimental em bancada térmica automatizada com aquisição sincronizada de dados térmicos e elétricos. Os resultados experimentais demonstraram aderência entre modelo e comportamento real do módulo termoelétrico, confirmando a dependência térmica dos parâmetros elétricos e a capacidade do sistema de recuperar energia térmica residual durante regimes térmicos transientes. Observou-se contribuição termoelétrica média da ordem de 8% em relação ao canal fotovoltaico e potência média termoelétrica de aproximadamente 65 mW durante relaxamento térmico estrutural. Conclui-se que a integração híbrida fotovoltaico-termoelétrica constitui alternativa tecnicamente viável para aumento da densidade energética útil e robustez operacional em CubeSats. Como impactos da pesquisa, destacam-se o avanço do conhecimento em sistemas híbridos de conversão energética e o desenvolvimento de metodologia experimental aplicável a sistemas de ultra baixa potência. Como implicações práticas, os resultados indicam viabilidade de aplicação em sistemas espaciais compactos, sensores autônomos e sistemas industriais baseados em recuperação de calor residual.

Palavras-chave: Energy Harvesting; Geradores Termoelétricos; CubeSat; Sistema Híbrido Fotovoltaico-Termoelétrico; STEG; Sistemas Autônomos de Energia.

SILVA, Eder Andrade da. STEG-CUBE: Sistema Híbrido Solar-Termoeléctrico para Energy Harvesting en CubeSats. 2026. 237 hojas. Tesis (Doctorado en Energía y Sustentabilidad) – Universidad Federal de la Integración Latinoamericana, Foz do Iguazu.

RESUMEN

La creciente demanda por sistemas energéticos más eficientes y sostenibles impulsa el desarrollo de tecnologías de Energy Harvesting capaces de recuperar energía residual y aumentar la densidad energética de sistemas autónomos. En este contexto, esta tesis investiga la aplicación de arquitecturas híbridas fotovoltaico-termoeléctricas en plataformas CubeSat, caracterizadas por severas restricciones de volumen, masa y disipación térmica. El objetivo de este trabajo fue desarrollar y validar experimentalmente la arquitectura híbrida STEG-CUBE, basada en la integración directa entre conversión fotovoltaica y conversión termoeléctrica con acoplamiento térmico directo. La metodología combinó modelado físico y electro-térmico parametrizado, desarrollo de arquitectura híbrida de generación y gestión energética, y validación experimental en un banco térmico automatizado con adquisición sincronizada de datos térmicos y eléctricos. Los resultados experimentales demostraron concordancia entre el modelo y el comportamiento real del módulo termoeléctrico, confirmando la dependencia térmica de los parámetros eléctricos y la capacidad del sistema para recuperar energía térmica residual durante regímenes térmicos transitorios. Se observó una contribución termoeléctrica media del orden del 8% en relación con el canal fotovoltaico y una potencia termoeléctrica media de aproximadamente 65 mW durante el relajamiento térmico estructural. Se concluye que la integración híbrida fotovoltaico-termoeléctrica constituye una alternativa técnicamente viable para el aumento de la densidad energética útil y la robustez operativa en CubeSats. Como impactos de la investigación, se destacan el avance del conocimiento en sistemas híbridos de conversión energética y el desarrollo de una metodología experimental aplicable a sistemas de ultra baja potencia. Como implicaciones prácticas, los resultados indican viabilidad de aplicación en sistemas espaciales compactos, sensores autónomos y sistemas industriales basados en recuperación de calor residual.

Palabras clave: Energy Harvesting; Generadores Termoeléctricos; CubeSat; Sistema Híbrido Fotovoltaico-Termoeléctrico; STEG; Sistemas Autónomos de Energía.

SILVA, Eder Andrade da. STEG-CUBE: Hybrid Solar-Thermoelectric System for Energy Harvesting in CubeSats. 2026. 237 pages. Thesis (Ph.D. in Energy and Sustainability) – Federal University for Latin American Integration, Foz do Iguaçu.

ABSTRACT

The growing demand for more efficient and sustainable energy systems drives the development of Energy Harvesting technologies capable of recovering residual energy and increasing the energy density of autonomous systems. In this context, this thesis investigates the application of hybrid photovoltaic–thermoelectric architectures in CubeSat platforms, which are characterized by severe constraints in volume, mass, and thermal dissipation. The objective of this work was to develop and experimentally validate the STEG-CUBE hybrid architecture, based on the direct integration between photovoltaic conversion and thermoelectric conversion using direct thermal coupling. The methodology combined physical modeling and parameterized electrothermal modeling, development of a hybrid power generation and energy management architecture, and experimental validation using an automated thermal test bench with synchronized acquisition of thermal and electrical data. Experimental results demonstrated strong agreement between the model and the real behavior of the thermoelectric module, confirming the thermal dependence of electrical parameters and the system capability to recover residual thermal energy during transient thermal regimes. An average thermoelectric contribution of approximately 8% relative to the photovoltaic channel was observed, along with an average thermoelectric power of approximately 65 mW during structural thermal relaxation. It is concluded that hybrid photovoltaic–thermoelectric integration represents a technically viable alternative for increasing useful energy density and operational robustness in CubeSats. As research impacts, the work advances knowledge in hybrid energy conversion systems and introduces an experimental methodology applicable to ultra-low-power systems. As practical implications, the results indicate feasibility for application in compact space systems, autonomous sensors, and industrial systems based on waste heat recovery.

Keywords: Energy Harvesting; Thermoelectric Generators; CubeSat; Hybrid Photovoltaic-Thermoelectric System; STEG; Autonomous Energy Systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Potencial energético da radiação solar em função do comprimento de onda.	13
Figura 2- Fontes de fluxo térmico externo em órbita terrestre.	23
Figura 3- Arquitetura multicamada com detalhamento das interfaces térmicas e estruturais de cada face ativa do sistema.	34
Figura 4- Configurações geométricas de incidência solar utilizadas na análise termo energética orbital do STEG-CUBE: (a) incidência normal; (b) incidência em aresta; (c) incidência em vértice.	37
Figura 5- Variação da resistência elétrica do módulo termoeletrico em função da temperatura média de operação.	42
Figura 6- Tensão de circuito aberto em função do gradiente térmico para temperatura de face fria de 30 °C.	43
Figura 7- Potência elétrica máxima estimada em função do gradiente térmico para diferentes temperaturas de face fria ($T_c = 0\text{ °C}$, 30 °C e 60 °C).	44
Figura 8- Família de curvas potência versus tensão para diferentes gradientes térmicos considerando temperatura nominal de face fria.	44
Figura 9- Arquitetura hierárquica da EPS híbrida baseada em conversão paralela descentralizada.	46
Figura 10- Topologia do conversor boost síncrono com controle MPPT por histerese baseado no TPS61023.	47
Figura 11- Circuito de desconexão ativa de carga para isolamento do buffer fotovoltaico do barramento comum.	47
Figura 12- Estágio de condicionamento e proteção do canal termoeletrico baseado em regulador shunt de precisão.	48
Figura 13- PoC do sistema STEG-CUBE. (a) Modelo conceitual do STEG-CUBE. (b) Protótipo físico ilustrativo com três faces geradoras montadas.	52
Figura 14- Plataforma experimental de caracterização térmica e eletroenergética do sistema STEG-CUBE. (a) Projeto mecânico da bancada experimental desenvolvido para validação termo energética controlada. (b) Bancada experimental construída e utilizada nos ensaios de caracterização do sistema.	54
Figura 15- Estrutura física do protótipo STEG utilizado na validação experimental. (a) Módulo fotovoltaico em silício policristalino com células interconectadas formando área ativa de aproximadamente $78 \times 78\text{ mm}$. (b) Camada estrutural em fibra de vidro recortada a laser utilizada como interface mecânica e dimensional. (c) Camada de isolamento térmico lateral em	

espuma de poliuretano expandido recortada a laser. (d) Módulo termoeétrico Custom Thermoelectric 1261G com folhas de grafite de alta condutividade térmica pré-aplicadas. (e) Dissipador térmico usinado em cobre maciço.....	56
Figura 16- Parametrização operacional do analisador PROVA 200A utilizada nos ensaios experimentais.....	60
Figura 17- Interfaces térmicas padronizadas utilizadas para acoplamento do dispositivo sob teste.....	64
Figura 18- Interface principal de controle térmico e monitoramento em tempo real da bancada experimental.	65
Figura 19- Interface de configuração e calibração (a) Ajuste de PID. (b) Parâmetros de Sensor. (c) Calibração.	66
Figura 20- Dinâmica térmica da bancada de caracterização durante ensaio de excitação térmica controlada.	70
Figura 21- Registro temporal da tensão termoeétrica em função do gradiente térmico aplicado ao módulo.	70
Figura 22- Decaimento do Gradiente Térmico.....	75
Figura 23- <i>V_{oc}</i> Experimental em Função do Gradiente Térmico.	76
Figura 24- Curvas I–V e P–V obtidas durante ciclo experimental de caracterização fotovoltaica.	78
Figura 25- Energia Transferida ao Barramento.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Atendimento aos Requisitos Institucionais de Produção Científica para Defesa....	21
Tabela 2- Comparativo de propriedades termo energéticas das células.	45
Tabela 3- Especificações metrológicas da instrumentação utilizada.....	61
Tabela 4- Resultados médios obtidos para os quatro módulos avaliados.....	79
Tabela 5- Síntese do comportamento eletroenergético do sistema STEG em cenários LEO..	82
Tabela 6- Comparação consolidada: Modelo, Experimento e Sistema Integrado.....	84

LISTA DE SIGLAS

ADC	Analog-to-Digital Converter
AM0	Air Mass Zero
CLA	Centro de Lançamento de Alcântara
CSV	Comma-Separated Values
DC-DC	Direct Current to Direct Current Converter
EH	Energy Harvesting
EPS	Electrical Power System
FF	Fill Factor
I–V	Current–Voltage Curve
LEO	Low Earth Orbit
LIC	Capacitores Híbridos de Íons de Lítio (LIC)
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NTC	Negative Temperature Coefficient (Thermistor)
OPV	Organic Photovoltaic
P–V	Power–Voltage Curve
PID	Proportional–Integral–Derivative (Controller)
PoC	Proof of Concept
Poly-Si	Polycrystalline Silicon
PV	Photovoltaic
RMSE	Root Mean Square Error
RTGs	Radioisotope Thermoelectric Generators
SPS	Self-Powered Systems
STC	Standard Test Conditions
STEG	Solar Thermoelectric Generator
TEC	Thermoelectric Cooler
TEGs	Thermoelectric Generators
TJ	Tripla Junção
Voc	Open Circuit Voltage
ZT	Thermoelectric Figure of Merit

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.2 JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIA	15
1.3 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA	17
1.4 HIPÓTESE DE PESQUISA E CRITÉRIO DE VALIDAÇÃO	17
1.5 PRODUÇÃO CIENTÍFICA VINCULADA À TESE	18
1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DO AMBIENTE LEO EQUATORIAL	23
2.2 FÍSICA DA CONVERSÃO FOTOVOLTAICA	24
2.3 FUNDAMENTOS DA TERMOELETRICIDADE	27
2.4 ESTADO DA ARTE EM SISTEMAS HÍBRIDOS STEG	29
3 ARQUITETURA E MODELAGEM	33
3.1 ARQUITETURA DO SISTEMA	33
3.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO ORBITAIS E ENVELOPE TÉRMICO OPERACIONAL	36
3.3 MODELAGEM TERMO ENERGÉTICA DO SISTEMA STEG-CUBE	38
3.4 MODELAGEM PARAMETRIZADA DO MÓDULO TERMOELÉTRICO	41
3.5 ESTRATÉGIA DE VALIDAÇÃO	44
3.6 ARQUITETURA DO SISTEMA DE ENERGIA (EPS HÍBRIDA)	46
4 DESIGN E DESENVOLVIMENTO	50
4.1 ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL E DE VALIDAÇÃO	52
4.2 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO STEG	54
4.3 SELEÇÃO DOS COMPONENTES DO EPS	57
4.4 INSTRUMENTAÇÃO E INCERTEZA DE MEDIÇÃO	59
4.5 BANCADA DE CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA	62
4.6 METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR	67
4.7 PROTOCOLO DE CARACTERIZAÇÃO	68
4.8 VALIDAÇÃO EM CONDIÇÃO DE PICO TÉRMICO	72
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSISTEMA TERMOELÉTRICO	75
5.2 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSISTEMA FOTOVOLTAICO	77
5.3 ANÁLISE DO SISTEMA INTEGRADO	79
5.4 VALIDAÇÃO DA HIPÓTESE	83
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
6.1 TRABALHOS FUTUROS E PERSPECTIVAS DE EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA	87
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICE A – Capítulo De Livro Indexado	106
APÊNDICE B – Artigo Científico em periódico Qualis A2, FI 3.0 e CiteScore de 6,2	128
APÊNDICE C – Artigo Científico em periódico Qualis A2, FI 3.0 e CiteScore de 6,2	171
APÊNDICE D – Artigo Científico em periódico Qualis A2, FI 3.0 e CiteScore de 6,2	194
APÊNDICE E – Artigo Científico em periódico Qualis A4, FI 2.6 e CiteScore de 6,1	220

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por soluções energéticas eficientes e a busca por inovações tecnológicas impulsionam pesquisas voltadas à redução de perdas energéticas e ao aproveitamento de energias residuais. No âmbito da Ciência, Tecnologia e Inovação, o *Energy Harvesting* (EH) refere-se ao conjunto de técnicas destinadas à captura e conversão de pequenas quantidades de energia disponíveis no ambiente, como calor, vibração, radiação solar ou gradientes térmicos, em energia elétrica utilizável, consolidando-se como uma abordagem estratégica para sustentabilidade energética, permitindo converter energia dissipada em eletricidade útil e potencialmente aumentar a densidade energética de sistemas autônomos.

Nesse contexto, o presente trabalho utiliza o cenário aeroespacial, especificamente plataformas do tipo *CubeSat*, pequenos satélites padronizados baseados em unidades modulares cúbicas denominadas unidades U , nas quais $1U$ corresponde a $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$, desenvolvidos para missões espaciais de baixo custo e utilizados amplamente para experimentos científicos e demonstrações tecnológicas, como ambiente de restrições críticas, caracterizado por volume reduzido, limitações de massa e presença de gradientes térmicos relevantes. Essas características tornam o ambiente espacial particularmente adequado para investigação de tecnologias híbridas de conversão energética.

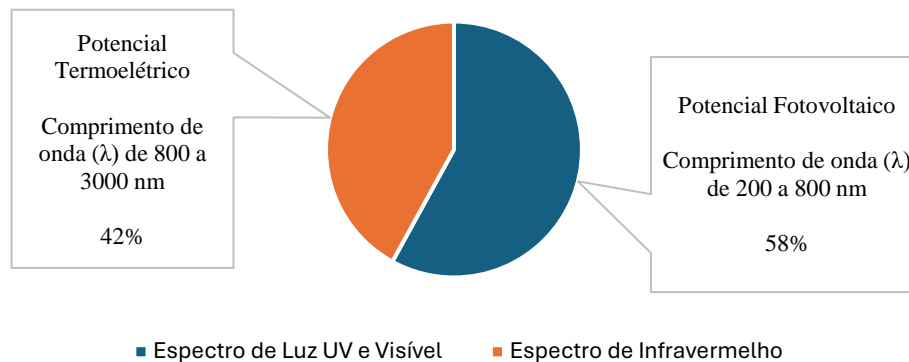
Células fotovoltaicas convencionais, embora dominantes em aplicações espaciais e terrestres, absorvem radiação em diferentes faixas espectrais e convertem apenas parte dessa energia em eletricidade. Uma parcela significativa é inevitavelmente dissipada na forma de calor, resultante de mecanismos físicos como recombinação eletrônica, perdas resistivas internas e absorção de fótons com energia superior ao limiar de conversão elétrica eficiente.

A Figura 1 ilustra a distribuição espectral da radiação solar incidente e a contribuição energética associada às diferentes regiões do espectro eletromagnético. Embora parte da radiação infravermelha contribua para o aquecimento dos dispositivos fotovoltaicos, o potencial de geração termoelétrica não está associado diretamente à radiação infravermelha incidente, mas sim ao gradiente térmico resultante do balanço térmico global do sistema fotovoltaico e de sua interação térmica com o ambiente.

Geradores termoelétricos (*Thermoelectric Generators* – TEGs) convertem diferenças de temperatura em eletricidade por meio do efeito *Seebeck*, permitindo o aproveitamento parcial do fluxo térmico dissipado por dispositivos eletrônicos e sistemas fotovoltaicos (HUEN; DAOUD, 2017; TRITT; BÖTTNER; CHEN, 2008). Dessa forma, o potencial de geração termoelétrica depende diretamente das condições de dissipação térmica, das resistências térmicas do

sistema e da capacidade de manutenção de gradientes térmicos entre superfícies acopladas termicamente.

Figura 1- Potencial energético da radiação solar em função do comprimento de onda.



Fonte: adaptado de (TRITT; BÖTTNER; CHEN, 2008).

Neste cenário, a presente tese desenvolve um sistema híbrido de geração de energia denominado STEG-CUBE, baseado no conceito de *Solar Thermoelectric Generator* (STEG) aplicado a plataformas *CubeSat*. O STEG integra, em uma única estrutura compacta, dispositivos fotovoltaicos (*Photovoltaic* – PV) e módulos termoelétricos (TEG), permitindo explorar simultaneamente a conversão direta da radiação solar em eletricidade e o aproveitamento da energia térmica residual gerada durante o processo de conversão fotovoltaica.

O dispositivo consiste em uma camada fotovoltaica superior, responsável pela conversão da radiação incidente em energia elétrica e pela geração de calor associado às perdas do processo de conversão, e uma camada termoelétrica inferior, acoplada termicamente, projetada para aproveitar o fluxo de calor conduzido a partir do módulo fotovoltaico. A potência total do sistema resulta da soma das potências geradas pelas duas tecnologias, buscando ampliar o aproveitamento energético global da radiação solar incidente.

A literatura apresenta arquiteturas variadas para dispositivos STEG, incluindo arranjos baseados em divisores espectrais e configurações de acoplamento térmico direto. Considerando as severas limitações de espaço, volume e massa das plataformas *CubeSat*, esta pesquisa delimitou seu escopo ao desenvolvimento de um STEG com configuração paralela direta, priorizando simplicidade construtiva, compacidade e viabilidade de validação experimental.

Os satélites artificiais podem operar em diferentes regimes orbitais, classificados principalmente de acordo com sua altitude em relação à superfície terrestre. Entre os mais utilizados destacam-se a *Low Earth Orbit* (LEO), situada aproximadamente entre 160 km e 2.000 km de altitude; a *Medium Earth Orbit* (MEO), tipicamente entre 2.000 km e 35.786 km; e a *Geostationary Earth Orbit* (GEO), localizada a aproximadamente 35.786 km, onde os satélites mantêm posição aparente fixa em relação à superfície terrestre.

Plataformas *CubeSat* são predominantemente operadas em LEO devido ao menor custo de lançamento, maior disponibilidade de oportunidades de inserção orbital como carga secundária e menores requisitos energéticos para operação e comunicação.

O dispositivo foi projetado considerando condições típicas de LEO, incluindo irradiância solar média e ciclos térmicos orbitais. Esses parâmetros foram utilizados como referência para definição dos requisitos de projeto e para a condução dos testes experimentais em bancada.

Diferentemente de abordagens centradas exclusivamente na missão satelital, este estudo concentra-se na tecnologia de conversão energética. A investigação central pode ser sintetizada na seguinte questão científica: como a arquitetura híbrida paralela pode ser otimizada para maximizar a densidade de potência em volumes confinados, utilizando materiais acessíveis para validação experimental de conceito?

Dessa forma, o objetivo desta tese é desenvolver, implementar e validar experimentalmente um módulo híbrido baseado no conceito STEG, otimizado para aplicações em plataformas *CubeSat*, avaliando seu desempenho energético em condições controladas que emulam aspectos relevantes do ambiente orbital.

Para viabilizar a prototipagem dentro das restrições orçamentárias, adotou-se a estratégia de utilização de componentes substitutos. Células de silício policristalino (*Polycrystalline Silicon* – Poly-Si) foram empregadas para emular o comportamento térmico e validar a integração mecânica do sistema, constituindo um cenário conservador em relação ao desempenho esperado de células espaciais de Tripla Junção (TJ).

Em síntese, esta tese apresenta o desenvolvimento tecnológico de um módulo híbrido de EH, validado experimentalmente em bancada sob condições controladas que buscam emular aspectos relevantes do ambiente operacional. Como contribuição científica, o trabalho propõe e valida uma arquitetura híbrida compacta de geração fotovoltaico-termoelétrica otimizada para ambientes com restrições severas de volume e massa, demonstrando experimentalmente o potencial de aproveitamento do fluxo térmico residual em sistemas fotovoltaicos. O trabalho contribui para a área de Energia e Sustentabilidade ao demonstrar experimentalmente a viabilidade da integração híbrida fotovoltaico-termoelétrica como estratégia para aumento do aproveitamento energético em sistemas sujeitos a restrições geométricas severas.

Ressalta-se que os resultados apresentados se referem à validação experimental do conceito híbrido fotovoltaico-termoelétrico em condições controladas de laboratório. Os parâmetros orbitais foram utilizados como referência para definição das condições de contorno de projeto e dos cenários experimentais, não constituindo validação direta em ambiente espacial real.

1.1 OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo geral desta pesquisa foi desenvolver e validar experimentalmente a arquitetura de um micro gerador híbrido do tipo STEG, projetado para maximizar o aproveitamento energético da radiação solar incidente e do fluxo térmico residual associado ao processo de conversão fotovoltaica em sistemas sujeitos a severas restrições de volume e massa. O desenvolvimento foi orientado por parâmetros orbitais típicos, utilizados como condições de contorno de projeto.

Para atingir esse objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Revisar e sistematizar as tecnologias híbridas de EH descritas na literatura científica e em bases de patentes, identificando lacunas no desenvolvimento de dispositivos compactos aplicáveis a sistemas embarcados com elevada restrição geométrica;
- Estabelecer as condições de contorno térmicas e elétricas do projeto, utilizando dados típicos de irradiância solar orbital e perfis térmicos característicos de LEO, como referência para definição dos requisitos operacionais do dispositivo;
- Projetar a arquitetura do sistema STEG, definindo a topologia de integração paralela direta entre o módulo PV e o TEG;
- Desenvolver o protótipo funcional utilizando estratégia de componentes substitutos, viabilizando a construção física e a validação experimental da integração mecânica e térmica entre os subsistemas;
- Realizar a caracterização experimental em bancada, submetendo o protótipo a condições controladas de gradiente térmico e irradiância, obtendo curvas características corrente-tensão (I–V), potência-tensão (P–V) e parâmetros de desempenho do sistema híbrido;
- Validar experimentalmente o modelo tecnológico proposto por meio da comparação entre o desempenho do sistema híbrido desenvolvido e arquiteturas puramente fotovoltaicas, avaliando o impacto na densidade energética útil dentro do domínio experimental investigado.

1.2 JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIA

A relevância deste trabalho insere-se na área de concentração em Energia e Sustentabilidade, abordando a necessidade de aumento do aproveitamento energético em dispositivos de conversão. A revisão sistemática da literatura realizada evidenciou que a aplicação de geradores termoelétricos como fontes complementares de energia em plataformas *CubeSat* ainda é pouco explorada.

Os *CubeSats* atualmente dependem majoritariamente de células solares, com eficiências típicas reportadas na literatura variando entre 16,8% e 32,2%. Entretanto, o desempenho desses dispositivos apresenta redução com o aumento da temperatura de operação, decorrente das características intrínsecas dos materiais semicondutores utilizados. Nesse contexto, dispositivos termoelétricos apresentam potencial aproveitamento parcial do fluxo térmico dissipado pelos sistemas eletrônicos e fotovoltaicos embarcados, desde que exista um gradiente térmico entre superfícies acopladas ao módulo termoelétrico, condição necessária para a conversão termoelétrica baseada no efeito *Seebeck*.

Embora geradores termoelétricos sejam amplamente utilizados em sistemas baseados em radioisótopos (*Radioisotope Thermoelectric Generators* – RTGs) dispositivos que convertem o calor liberado pelo decaimento radioativo de materiais em eletricidade por meio de módulos termoelétricos baseados no efeito *Seebeck*, em satélites de maior porte, sua aplicação em plataformas *CubeSat* permanece limitada. A revisão sistemática conduzida nesta pesquisa identificou trinta e três artigos científicos relevantes, dos quais sete, aproximadamente 21%, utilizaram ferramentas de simulação para avaliação do comportamento térmico dos sistemas. No levantamento tecnológico, entre trinta e quatro patentes analisadas, apenas uma mencionou micro-TEGs, sendo que a maioria se concentrou em melhorias estruturais ou de integração térmica.

Observou-se ainda que a atividade de depósitos de patentes apresentou maior concentração entre os anos de 2016 e 2020, com foco predominante na otimização estrutural e térmica de dispositivos termoelétricos. Entretanto, a análise da literatura científica e do levantamento tecnológico indica a ausência de soluções voltadas especificamente para a utilização de geradores termoelétricos como fontes complementares de energia elétrica em plataformas *CubeSat*. Essa lacuna evidencia uma oportunidade de investigação no desenvolvimento de arquiteturas híbridas capazes de explorar o fluxo térmico residual presente em sistemas fotovoltaicos embarcados. Nesse contexto, TEGs apresentam potencial como alternativa para aproveitamento parcial do calor residual em plataformas *CubeSat* (SILVA, E.A.; et al., 2025).

Dessa forma, a relevância deste trabalho está associada à investigação e validação experimental de estratégias para mitigação das limitações energéticas de *CubeSats* baseados exclusivamente em conversão fotovoltaica. A integração de módulos termoelétricos em configuração paralela ao sistema fotovoltaico permite o aproveitamento parcial do fluxo térmico gerado durante a operação do sistema, contribuindo para o aumento do aproveitamento energético global a partir da conversão parcial do calor dissipado no módulo fotovoltaico, sem necessidade de ampliação da área de captação solar.

A proposta também contribui para o aumento da autonomia energética e da robustez operacional de *CubeSats*, particularmente em cenários com restrições térmicas severas ou em missões

de longa duração. Adicionalmente, o estudo contribui para o avanço das tecnologias de EH, com potencial aplicação em sistemas espaciais e em sistemas terrestres onde exista disponibilidade de fluxo térmico residual.

1.3 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa contribui para o estado da arte ao investigar a integração de células fotovoltaicas e geradores termoelétricos em uma configuração paralela compacta, projetada considerando restrições críticas de massa, volume e condições térmicas associadas ao ambiente orbital. Além da concepção do sistema, destaca-se a metodologia híbrida adotada, que combina modelagem analítica, simulações computacionais e validação experimental em bancada, oferecendo um framework metodológico replicável para projetos autônomos (*Self-Powered Systems – SPS*).

Outra contribuição relevante está associada ao desenvolvimento de uma arquitetura de gerenciamento energético adaptativo, capaz de operar com fontes fotovoltaicas e termoelétricas de forma integrada, permitindo o aproveitamento combinado da energia elétrica gerada a partir da radiação solar e do fluxo térmico residual do sistema.

Esses avanços contribuem para reduzir lacunas identificadas na literatura, como a limitada exploração de TEGs em *CubeSats* e a escassez de soluções híbridas com validação experimental em bancada, posicionando o STEG-CUBE como alternativa tecnológica potencial para aplicações que demandam maior robustez energética em ambientes de alta restrição operacional.

Por fim, os resultados obtidos ampliam o conhecimento teórico-prático em EH, contribuindo para o desenvolvimento de arquiteturas híbridas de conversão energética e possibilitando aplicações em sistemas autônomos terrestres, redes de sensores e infraestruturas críticas, reforçando o caráter interdisciplinar desta pesquisa.

1.4 HIPÓTESE DE PESQUISA E CRITÉRIO DE VALIDAÇÃO

A presente pesquisa fundamenta-se na hipótese de que a integração híbrida entre conversão fotovoltaica e conversão termoelétrica em configuração paralela com acoplamento térmico direto, é capaz de aumentar a densidade energética útil de sistemas de geração aplicados a plataformas *CubeSat*, quando comparada a arquiteturas baseadas exclusivamente em células fotovoltaicas, sob condições térmicas e radiativas compatíveis com LEO.

Essa hipótese baseia-se no fato de que uma fração significativa da potência absorvida pelas células fotovoltaicas não é convertida em energia elétrica, sendo dissipada na forma de calor em decorrência de processos físicos como termalização dos portadores, recombinação não radiativa e perdas resistivas internas. Ao incorporar um gerador termoelétrico ao sistema, parte desse

fluxo térmico pode ser explorada como fonte secundária de conversão energética, potencialmente ampliando a potência elétrica total disponível sem aumento proporcional da área fotovoltaica.

Para fins de validação científica da hipótese proposta, adota-se como métrica principal a densidade energética superficial, definida como a razão entre a potência elétrica total gerada pelo sistema e a área externa disponível para conversão energética, expressa por:

$$D = \frac{P_{tot}}{A} \quad (1)$$

em que:

D Densidade energética superficial (W/m^2);

P_{tot} Potência elétrica total gerada pelo sistema (W);

A área ativa externa disponível para conversão energética (m^2).

Para o sistema híbrido STEG, a potência total é dada por:

$$P_{tot} = P_{PV} + P_{TEG} \quad (2)$$

onde:

P_{PV} corresponde à potência fotovoltaica;

P_{TEG} corresponde à potência termoeletrica.

O critério de validação da hipótese é estabelecido pela comparação direta entre a densidade energética do sistema híbrido e a densidade energética de um sistema puramente fotovoltaico, considerando a mesma área ativa:

$$\Delta D = \frac{D_{STEG} - D_{PV}}{D_{PV}} \quad (3)$$

em que:

D_{STEG} representa a densidade energética do sistema híbrido;

D_{PV} representa a densidade energética do sistema exclusivamente fotovoltaico.

A hipótese é considerada validada se:

$$\Delta D > 0 \quad (4)$$

sob condições térmicas compatíveis com os ciclos orbitais simulados experimentalmente nesta tese.

Esse critério permite estabelecer uma base quantitativa objetiva para a comparação entre arquiteturas híbridas e convencionais, evitando interpretações baseadas apenas em aumento absoluto de potência e privilegiando métricas normalizadas, adequadas a sistemas sujeitos a severas restrições geométricas, como os *CubeSats*.

1.5 PRODUÇÃO CIENTÍFICA VINCULADA À TESE

De acordo com as normativas institucionais vigentes do programa de pós-graduação, a obtenção do título de Doutor requer a comprovação de produção científica diretamente

vinculada ao tema da tese. Entre os requisitos estabelecidos, destaca-se a necessidade de apresentação, aceite ou submissão de pelo menos um trabalho científico em evento técnico-científico qualificado, admitindo-se como equivalência capítulo de livro, bem como o aceite ou publicação de, no mínimo, dois artigos científicos relacionados ao tema da pesquisa. Esses trabalhos devem estar publicados ou submetidos a periódicos classificados no estrato vigente do QUALIS/CAPES como, no mínimo, A4 na área interdisciplinar, ou apresentar fator de impacto JCR igual ou superior a 1,0. Adicionalmente, admite-se como equivalência a esses requisitos o depósito de patente ou o registro de software, desde que vinculados ao tema da tese.

No contexto desta pesquisa, o desenvolvimento do sistema híbrido fotovoltaico-termoelétrico STEG-CUBE resultou na geração de produção científica e tecnológica consistente, incluindo artigos científicos publicados em periódicos indexados internacionais, capítulo de livro técnico-científico, produção técnica de *datasets* científicos e depósito de patente tecnológica. Essas produções sustentam diretamente as metodologias, modelos físicos e resultados experimentais apresentados ao longo desta tese, garantindo rastreabilidade científica, transparência metodológica e reprodutibilidade dos resultados.

Entre as produções científicas publicadas encontra-se a produção bibliográfica na forma de capítulo de livro. O capítulo intitulado ***Review of Energy Harvesting Techniques for the Development of Self-Powered Systems: Methods and Applications***, publicado em 2024 pela Editora Atena, apresenta uma revisão abrangente das principais técnicas de captação de energia residual, incluindo termoeletricidade, piezoeletricidade, acoplamento eletromagnético, radiofrequência e energia solar, com foco na integração dessas tecnologias para desenvolvimento de sistemas autossuficientes. O material encontra-se disponível online por meio do link <https://atenaeditora.com.br/catalogo/download-post/90359>.

Além da produção do capítulo de livro, destaca-se inicialmente o artigo ***Thermoelectric Generators Applied as a Power Source in CubeSats: State of the Art***, publicado na revista *Energies* em 2025 (DOI: <https://doi.org/10.3390/en18010173>). O periódico possui classificação *Qualis* A2 na área interdisciplinar, fator de impacto de 3,0 e *CiteScore* de 6,2. O artigo apresenta uma revisão sistemática sobre a aplicação de geradores termoelétricos como fonte de energia em *CubeSats*, discutindo desafios térmicos, limitações geométricas e oportunidades de integração híbrida fotovoltaico-termoelétrica, constituindo base conceitual direta para a arquitetura STEG-CUBE proposta nesta tese.

Complementarmente, destaca-se o artigo ***Comparative Analysis and Integrated Methodology for the Electrical Design and Performance Evaluation of Thermoelectric Generators (TEGs) in Energy Harvesting Applications***, publicado na revista *Energies* em 2024 (DOI: <https://doi.org/10.3390/en17205176>), igualmente classificado como *Qualis* A2, fator de impacto de

3,0 e *CiteScore* de 6,2. Esse artigo propõe uma metodologia integrada envolvendo modelagem analítica, simulação numérica e validação experimental para dimensionamento e avaliação de desempenho de geradores termoelétricos, incluindo modelagem baseada no efeito *Seebeck* e validação com dados experimentais, abordagem diretamente empregada na modelagem eletrotérmica desenvolvida nesta tese.

Ainda no contexto da revista *Energies*, foi publicado em 2025 o artigo ***Design and Performance Analysis of MPPT Algorithms Applied to Multistring Thermoelectric Generator Arrays Under Multiple Thermal Gradients Art***, (DOI: <https://doi.org/10.3390/en18246613>), também classificado como *Qualis* A2, com fator de impacto de 3,0 e *CiteScore* de 6,2. Esse artigo apresenta análise de desempenho de algoritmos MPPT aplicados a arranjos termoelétricos submetidos a múltiplos gradientes térmicos, fornecendo base metodológica para o desenvolvimento do canal termoelétrico e das estratégias de extração energética implementadas no sistema STEG-CUBE.

No escopo mais amplo da área de EH, destaca-se também o artigo ***Self-Powered System Development with Organic Photovoltaic (OPV) for Energy Harvesting from Indoor Lighting***, publicado na revista *Electronics* em 2024 (DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13132518>), classificado como *Qualis* A4 e fator de impacto de 2,6 e *CiteScore* de 6,1. Esse artigo apresenta o desenvolvimento de sistemas autoalimentados baseados em fotovoltaicos orgânicos para ambientes indoor, contribuindo conceitualmente para a linha de pesquisa em sistemas autônomos de baixa potência e tecnologias híbridas de conversão energética.

No âmbito da produção técnica, destaca-se a disponibilização do *dataset* científico ***Dataset Preprocessing for MPPT Algorithms Simulation and Thermoelectric Generators under Multiple Thermal Gradient Scenarios***, publicado no *IEEE Dataport* em 2025 (DOI: [10.21227/4st1-am88](https://doi.org/10.21227/4st1-am88)). Esse conjunto de dados foi utilizado na validação de algoritmos MPPT e na simulação de cenários térmicos multi-gradiente aplicados a geradores termoelétricos, contribuindo diretamente para a validação numérica apresentada nesta tese.

Adicionalmente, como resultado tecnológico direto desta pesquisa, foi realizado o depósito de patente intitulado Sistema híbrido de captação, gerenciamento e controle térmico de energia para *CubeSats* (STEG-Cube), sob número BR 10 2025 014925 7, depositado em 18 de julho de 2025. A patente descreve a arquitetura híbrida de geração e gerenciamento energético desenvolvida ao longo desta tese, consolidando a contribuição tecnológica aplicada do trabalho.

Como continuidade natural da pesquisa, encontram-se em desenvolvimento produções técnicas e científicas adicionais, incluindo *dataset* avançado de modelagem termoelétrica do módulo *Custom Thermoelectric 1261G* e manuscrito científico referente ao desenvolvimento e validação de bancada automatizada para caracterização de módulos TEG e STEG, com previsão de submissão em 2026.

A Tabela 1 sintetiza o atendimento integral aos requisitos institucionais para defesa do doutorado, evidenciando a produção científica e tecnológica associada diretamente ao desenvolvimento desta tese. Observa-se que os critérios mínimos exigidos pelo programa foram superados, incluindo publicações em periódicos internacionais de elevado impacto, produção técnica com DOI rastreável, desenvolvimento tecnológico protegido por patente e continuidade científica garantida por trabalhos em fase de preparação. Esse conjunto de resultados consolida a relevância científica e tecnológica do presente trabalho e sua aderência às exigências institucionais e aos padrões internacionais de produção acadêmica.

Tabela 1- Atendimento aos Requisitos Institucionais de Produção Científica para Defesa.

Classificação Institucional	Exigência Formal	Produção Associada na Tese	Status	Qualis / FI / Métrica
Produção em Evento Científico	1 trabalho aceito, apresentado ou submetido ou capítulo de livro	Capítulo de Livro — <i>Review of Energy Harvesting Techniques for the Development of Self-Powered Systems: Methods and Applications</i> . Editora Atena, 2024	Atendido	Livro técnico-científico com revisão sistemática
Artigo Científico 1	Publicado ou submetido em periódico $\geq A4$ ou FI ≥ 1	SILVA et al. — <i>Thermoelectric Generators Applied as a Power Source in CubeSats: State of the Art</i> . Energies, 2025	Publicado	Qualis A2 / FI 3.0 CiteScore 6.2
Artigo Científico 2	Produções adicionais vinculadas à tese	SILVA et al. — <i>Comparative Analysis and Integrated Methodology for Electrical Design and Performance Evaluation of TEGs</i> . Energies, 2024	Publicado	Qualis A2 / FI 3.0 CiteScore 6.2
Produção Científica Excedente	Produções adicionais vinculadas à tese	SILVA et al. — <i>Design and Performance Analysis of MPPT Algorithms Applied to Multistring TEG Arrays</i> . Energies, 2025	Publicado	Qualis A2 / FI 3.0 CiteScore 6.2
Produção Científica Excedente	Publicado ou submetido em periódico $\geq A4$ ou FI ≥ 1	SILVA et al. — <i>Self-Powered System Development with OPV for Indoor Energy Harvesting</i> . Electronics, 2024	Publicado	Qualis A4 / FI 2.6
Produção Científica Excedente	Patente equivalente a artigo adicional	Patente — Sistema híbrido STEG-Cube. BR 10 2025 014925 7	Depositada	Propriedade Intelectual Tecnológica
Produção Científica Excedente	Dataset científico com DOI adicional	Dataset IEEE Dataport — MPPT + TEG Multi-Gradiente	Publicado	DOI válido e indexado
Produção Excedente em Continuidade Científica	Trabalhos futuros vinculados à tese	Dataset TEG 1261G + Artigo bancada automatizada STEG	Em preparação	Submissão prevista 2026

Fonte: o autor, 2026.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente tese está estruturada em seis capítulos organizados de forma a refletir a progressão lógica do desenvolvimento científico e tecnológico desta pesquisa. A organização do texto

reflete a metodologia adotada, partindo da fundamentação física dos fenômenos de conversão energética, avançando pela modelagem e construção do protótipo, e culminando na análise e validação experimental dos resultados obtidos.

O Capítulo 2 – Fundamentação Teórica estabelece a base física necessária para a compreensão dos fenômenos de conversão de energia envolvidos. São revisados os princípios da física dos semicondutores aplicados às células fotovoltaicas e os fundamentos termodinâmicos associados ao efeito *Seebeck*. O capítulo aborda ainda o estado da arte das tecnologias de EH híbrido e os aspectos térmicos do ambiente orbital em LEO, utilizados como referência para definição das premissas de projeto.

O Capítulo 3 – Arquitetura e Modelagem apresenta a concepção do dispositivo desenvolvido. São detalhadas as equações do modelo térmico e eletrotérmico e definidas as condições de contorno do projeto, incluindo irradiância e perfis térmicos baseados em dados típicos de LEO. Este capítulo fundamenta a estratégia de validação por substituição tecnológica, estabelecendo a correlação teórica entre o protótipo experimental baseado em células de silício e módulos termoelétricos e o modelo de referência associado a células espaciais de TJ.

O Capítulo 4 – Design e Desenvolvimento descreve a infraestrutura experimental utilizada na pesquisa. São apresentados o projeto da bancada de caracterização térmica e fotovoltaica, a especificação técnica dos componentes integrados ao protótipo físico, incluindo o módulo termoelétrico TEG1261G e células de Poly-Si, a instrumentação de aquisição de dados e os protocolos experimentais aplicados na validação do conceito (Proof of Concept – PoC).

O Capítulo 5 – Resultados e Discussão apresenta e analisa os dados obtidos experimentalmente. São avaliados os parâmetros de desempenho dos subsistemas isolados e do sistema híbrido sob condições controladas de gradiente térmico, bem como as curvas elétricas características. O capítulo estabelece a correlação entre os resultados experimentais e a modelagem matemática proposta, permitindo avaliar o desempenho da arquitetura híbrida e os ganhos de densidade energética obtidos dentro do domínio experimental investigado.

Por fim, o Capítulo 6 – Conclusões e Trabalhos Futuros sintetiza os avanços científicos e tecnológicos obtidos, retomando os objetivos específicos e discutindo as limitações observadas. O capítulo encerra-se com a proposição de trabalhos futuros voltados à continuidade da pesquisa em sistemas autônomos de geração e gerenciamento de energia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo estabelece as bases físicas e conceituais necessárias para a compreensão e desenvolvimento do sistema híbrido STEG-CUBE. A fundamentação apresentada organiza-se em quatro eixos complementares. Inicialmente, é realizada a caracterização energética do ambiente orbital LEO equatorial, adotado como cenário de referência para definição das condições de contorno térmicas e radiativas do projeto. Em seguida, são abordados os fundamentos físicos dos dispositivos fotovoltaicos, incluindo a comparação entre tecnologias baseadas em silício e células espaciais de TJ.

Na sequência, são apresentados os princípios termodinâmicos da conversão termoelétrica, com ênfase na modelagem matemática empregada neste trabalho para descrição do comportamento termoelétrico dos dispositivos. Por fim, é discutido o estado da arte das tecnologias híbridas do STEG, contextualizando a proposta desenvolvida nesta tese no panorama científico e tecnológico atual.

2.1 CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DO AMBIENTE LEO EQUATORIAL

O dimensionamento de sistemas de EH para aplicações espaciais exige a compreensão detalhada das fontes de energia disponíveis e dos fluxos térmicos incidentes sobre a estrutura do satélite. Em LEO, o equilíbrio térmico de um satélite é determinado pela interação entre a radiação externa incidente e a dissipação interna de calor gerado pelos sistemas embarcados (WERTZ; LARSON, 1999).

As principais fontes externas de fluxo térmico incidente em satélites em órbita terrestre são representadas pela radiação solar direta, pelo albedo terrestre e pela radiação infravermelha emitida pela Terra. A Figura 2 apresenta esquematicamente essas contribuições energéticas externas que compõem o balanço térmico orbital.

Figura 2- Fontes de fluxo térmico externo em órbita terrestre.



Fonte: o autor, 2026.

A equação fundamental do balanço de energia na superfície externa de um *CubeSat* pode ser descrita pela Lei da Conservação de Energia (GILMORE, 2002):

$$m \times c_p \times \frac{dT}{dt} = Q_{abs} - Q_{emit} + Q_{int} \quad (5)$$

onde:

Q_{abs} representa o fluxo de energia absorvido externamente;

Q_{emit} representa o fluxo térmico emitido por radiação;

Q_{int} representa a dissipação térmica interna do sistema.

A energia absorvida Q_{abs} é composta principalmente por três contribuições:

A radiação solar direta constitui a principal fonte energética externa. A irradiância solar média no topo da atmosfera terrestre é de aproximadamente 1361 W/m^2 (constante solar), podendo variar cerca de $\pm 3,5\%$ em função da posição da Terra ao longo de sua órbita elíptica (WERTZ; LARSON, 1999).

O albedo terrestre corresponde à fração da radiação solar refletida pela superfície terrestre e pela cobertura atmosférica. Em LEO, esse valor varia tipicamente entre 30% e 35% da radiação solar incidente, dependendo da cobertura de nuvens, composição atmosférica e tipo de superfície observada.

A radiação infravermelha terrestre corresponde à emissão térmica do planeta, que pode ser aproximada como radiação de corpo negro a uma temperatura média de aproximadamente 255K , resultando em um fluxo térmico médio próximo de 237 W/m^2 (KONO; MATSUNAGA, 2012).

Para o cenário de projeto adotado nesta tese, foi considerada uma órbita equatorial ou de baixa inclinação, compatível com lançamentos a partir do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). Esse cenário foi utilizado como referência para definição das condições térmicas de projeto e para a reprodução dos cenários experimentais em bancada.

Nessas condições orbitais, o ciclo de eclipses desempenha papel determinante no comportamento térmico do sistema. Durante o período iluminado, superfícies diretamente expostas à radiação solar podem atingir temperaturas superiores a $100 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto durante o período de eclipse orbital a temperatura pode reduzir para valores próximos a $-65 \text{ }^\circ\text{C}$. Conforme discutido em Silva, E. A.; et al. (2025), é a existência desses gradientes térmicos transientes que torna possível a exploração da conversão termoelétrica complementar em sistemas híbridos aplicados a *CubeSats*.

2.2 FÍSICA DA CONVERSÃO FOTOVOLTAICA

A conversão fotovoltaica fundamenta-se na interação entre a radiação eletromagnética incidente e materiais semicondutores capazes de gerar portadores de carga livres

quando excitados por fótons com energia superior à largura da banda proibida (*bandgap*). Esse processo permite a conversão direta da energia radiante em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico, tipicamente implementado em junções semicondutoras do tipo $p - n$.

Em uma célula fotovoltaica convencional, a junção $p - n$ estabelece um campo elétrico interno responsável pela separação espacial dos pares elétron-lacuna gerados na região de depleção. A corrente elétrica resultante depende da taxa de geração de portadores, da mobilidade dos semicondutores e das perdas associadas à recombinação radiativa e não radiativa. A eficiência de conversão e a potência de saída de uma célula solar são fortemente dependentes das condições de operação, particularmente da temperatura, fator crítico para a análise do sistema híbrido proposto nesta tese (SZE; NG, 2006).

A relação corrente-tensão pode ser descrita, em primeira aproximação, pelo modelo de diodo ideal associado a uma fonte de corrente dependente da irradiância:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

em que: I é a corrente de saída; I_{ph} é a corrente fotogerada; I_0 é a corrente de saturação do diodo; q é a carga elementar do elétron; V é a tensão aplicada; n é o fator de idealidade do diodo; k é a constante de *Boltzmann*; T é a temperatura absoluta da junção.

A potência elétrica fornecida pela célula é definida por:

$$P = V \times I \quad (7)$$

atingindo valor máximo no ponto de máxima potência (*Maximum Power Point* – MPP), definido pela condição:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (8)$$

A eficiência de conversão fotovoltaica pode ser expressa como:

$$\eta_{PV} = \frac{P_{max}}{G \times A} \quad (9)$$

em que P_{max} é a potência máxima gerada, G é a irradiância incidente e A é a área ativa da célula.

Do ponto de vista energético, apenas uma fração da potência radiante incidente é convertida em energia elétrica. As perdas estão associadas principalmente a três mecanismos: (i) fótons com energia inferior ao *bandgap*, que não são absorvidos; (ii) termalização dos portadores gerados por fótons de alta energia; e (iii) recombinação de portadores antes da extração elétrica.

A elevação da temperatura de operação da célula fotovoltaica provoca redução da tensão de circuito aberto, e conseqüentemente da potência máxima disponível, comportamento descrito pelo coeficiente térmico negativo da tensão:

$$\frac{dV_{oc}}{dT} < 0 \quad (10)$$

Esse fenômeno implica que parte significativa da energia absorvida se manifesta como aquecimento da estrutura do dispositivo. Em plataformas *CubeSat*, a dissipação térmica é limitada pela área radiativa disponível e pelas condições térmicas do ambiente orbital, tornando a gestão térmica um aspecto crítico do subsistema de potência.

No contexto desta tese, esse comportamento é particularmente relevante, pois o sistema híbrido STEG busca explorar parcialmente o fluxo térmico dissipado pelo dispositivo fotovoltaico como fonte complementar de geração elétrica, por meio da conversão termoelétrica associada ao gradiente térmico estabelecido entre o módulo fotovoltaico e a estrutura adjacente.

Considerando as diferentes tecnologias disponíveis para aplicações fotovoltaicas, torna-se necessária a análise comparativa entre dispositivos de alta eficiência utilizados em aplicações espaciais e dispositivos baseados em silício empregados na validação experimental. Nesse contexto, são discutidas as características das células de TJ, utilizadas como referência tecnológica espacial, e das células de Poly-Si, utilizadas como base experimental na POC desenvolvida neste trabalho.

As células solares de TJ representam o estado da arte para aplicações espaciais. Baseadas em semicondutores compostos do grupo III-V, tipicamente *InGaP/GaAs/Ge*, essas células utilizam empilhamento monolítico de subcélulas conectadas eletricamente em série, sendo cada subcélula otimizada para absorver diferentes regiões do espectro solar. Essa arquitetura permite atingir eficiências próximas a 30% sob condições Massa de Ar Zero (*Air Mass Zero – AM0*) (AZUR SPACE, 2020).

Apesar da elevada eficiência de conversão, o desempenho elétrico apresenta degradação com o aumento da temperatura de operação. Segundo o *datasheet* da célula *TJ3G30-Advanced* (AZUR SPACE, 2020), o coeficiente térmico da tensão de circuito aberto é negativo, implicando redução da potência disponível sob condições térmicas elevadas.

No contexto do sistema híbrido proposto, a presença do módulo termoelétrico pode contribuir para o aproveitamento parcial do fluxo térmico dissipado pela célula fotovoltaica, reduzindo o impacto energético associado ao aumento da temperatura de operação.

Para a validação experimental e desenvolvimento da PoC, adotou-se o uso de células de silício policristalino como substitutos funcionais. Embora o silício policristalino apresente eficiência inferior, tipicamente próxima de 17%, em comparação às células de tripla junção, seu comportamento térmico apresenta maior sensibilidade à variação de temperatura.

Conforme descrito na literatura (GREEN, 2009), o coeficiente de degradação de potência do silício, aproximadamente $-1,45\%/^{\circ}C$, apresenta magnitude significativamente superior ao observado em células baseadas em *GaAs*, aproximadamente $-0,21\%/^{\circ}C$. Sob a ótica da engenharia térmica, o silício representa, portanto, um cenário experimental conservador.

Dessa forma, a capacidade do sistema híbrido STEG de operar sob condições térmicas mais severas em módulos de silício constitui um indicativo favorável para aplicações futuras em tecnologias fotovoltaicas de maior estabilidade térmica, como células de TJ.

2.3 FUNDAMENTOS DA TERMOELETRICIDADE

A conversão termoelétrica fundamenta-se no efeito *Seebeck*, pelo qual um gradiente de temperatura imposto a um material condutor ou semicondutor resulta no surgimento de uma diferença de potencial elétrico entre suas extremidades. Esse fenômeno permite a conversão direta de energia térmica em energia elétrica sem a intermediação de partes móveis ou ciclos termodinâmicos convencionais (ROWE, 2018).

Os geradores termoelétricos podem apresentar diferentes arquiteturas construtivas, incluindo módulos convencionais baseados em pares termoelétricos rígidos conectados em série, microgeradores termoelétricos (micro-TEGs) desenvolvidos para aplicações em microescala e dispositivos flexíveis ou radiais projetados para superfícies curvas ou sistemas vestíveis. Em aplicações de geração de energia em sistemas eletrônicos e aeroespaciais, predominam módulos rígidos compostos por múltiplos pares termoelétricos do tipo p-n conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo, configuração utilizada nos módulos comerciais empregados nesta pesquisa.

Em TEGs, a tensão de circuito aberto gerada é proporcional à diferença de temperatura entre as junções quente e fria. Para um módulo composto por múltiplos pares termoelétricos conectados eletricamente em série, essa relação pode ser expressa por:

$$V_{oc} = N \times \alpha_{pn}(T_{med}) \times (T_h - T_c) \quad (11)$$

onde: N Número de pares termoelétricos; α_{pn} Coeficiente de *Seebeck* efetivo do par (V/K); T_h e T_c Temperaturas das faces quente e fria, respectivamente; e T_{med} Temperatura média do dispositivo.

Em conformidade com a metodologia desenvolvida e validada em Silva, E. A.; et al. (2025), a resistência elétrica interna (R_{int}) e o coeficiente de *Seebeck* (α) não são constantes, apresentando dependência com a temperatura média do módulo. O estudo demonstrou que desconsiderar essa dependência térmica pode levar a erros significativos na estimativa da potência elétrica gerada. No contexto desta tese, a dependência térmica de α e R_{int} foi incorporada ao modelo eletrotérmico parametrizado, permitindo representar com maior fidelidade o comportamento real do módulo TEG sob gradientes térmicos transientes.

Assim, a potência elétrica entregue à carga pode ser modelada por:

$$P_{load} = \left(\frac{V_{oc}(T_{med})}{R_{int}(T_{med}) + R_{load}} \right)^2 \times R_{load} \quad (12)$$

Essa abordagem matemática fundamenta as simulações e a análise dos dados experimentais do módulo termoelétrico *Custom Thermoelectric 1261G-7L31-24CX1* utilizados nesta tese.

Do ponto de vista térmico, o fluxo de calor que atravessa o módulo termoelétrico pode ser descrito, em primeira aproximação, por:

$$Q = K \times \Delta T \quad (13)$$

onde K representa a condutância térmica equivalente do módulo.

A eficiência de conversão termoelétrica pode ser definida como:

$$\eta_{TEG} = \frac{P_{el}}{Q} \quad (14)$$

onde P_{el} é a potência elétrica útil gerada e Q é o fluxo térmico imposto ao dispositivo.

A eficiência máxima teórica de um gerador termoelétrico é função do fator de mérito adimensional ZT , definido por:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma T}{\kappa} \quad (15)$$

onde σ é a condutividade elétrica, κ é a condutividade térmica e T é a temperatura absoluta média do material.

Embora materiais com elevado ZT apresentem melhor desempenho termoelétrico, a eficiência prática de módulos comerciais permanece inferior à de ciclos termodinâmicos ideais, especialmente para gradientes térmicos reduzidos.

Os materiais termoelétricos são geralmente classificados de acordo com a faixa de temperatura de operação. Para baixas temperaturas, até aproximadamente 300 °C, destacam-se ligas baseadas em bismuto telureto (Bi_2Te_3) e antimônio telureto (Sb_2Te_3), amplamente utilizadas em módulos comerciais. Em faixas intermediárias, de 300 a 600 °C, são empregados materiais como telureto de chumbo ($PbTe$), *skutteruditas* e ligas *half-Heusler*, enquanto aplicações de alta temperatura, acima de 600 °C, podem utilizar ligas silício-germânio ($SiGe$) ou óxidos termoelétricos.

De forma geral, os materiais termoelétricos podem ser agrupados em três grandes famílias: semicondutores inorgânicos tradicionais, como Bi_2Te_3 , $PbTe$, $SiGe$, *half-Heusler* e *skutteruditas*, materiais orgânicos ou polímeros condutores e materiais nano estruturados ou nano compósitos, desenvolvidos para melhorar o fator de mérito termoelétrico por meio do controle do transporte de carga.

Em aplicações práticas, o desempenho termoelétrico é fortemente influenciado pelas resistências térmicas de contato e pelas condições de dissipação térmica do lado frio. Dessa forma, a imposição de gradientes térmicos significativos depende não apenas da disponibilidade de uma fonte quente, mas também da eficiência da remoção de calor na face fria.

No contexto de sistemas fotovoltaicos, o módulo termoeletrico não converte diretamente a radiação solar incidente, mas sim o fluxo térmico resultante da dissipação energética do dispositivo fotovoltaico e das estruturas adjacentes. Essa característica fundamenta a aplicação do TEG como elemento complementar em sistemas híbridos de geração.

Em plataformas *CubeSat*, a geração termoeletrica apresenta particularidades associadas à limitação de dissipação térmica e à variabilidade dos ciclos térmicos orbitais. A diferença de temperatura entre superfícies iluminadas e sombreadas pode ser explorada como fonte de gradiente térmico, desde que exista acoplamento térmico adequado entre o módulo fotovoltaico, o TEG e a estrutura dissipadora.

O módulo termoeletrico utilizado nesta tese pertence à classe de dispositivos comerciais baseados em ligas de bismuto telureto (Bi_2Te_3), otimizadas para operação em baixas temperaturas e amplamente empregadas em aplicações de recuperação de calor residual. Essa escolha é compatível com os gradientes térmicos moderados esperados em sistemas fotovoltaicos e com as condições térmicas típicas de plataformas *CubeSat*, nas quais as diferenças de temperatura disponíveis são tipicamente inferiores às observadas em aplicações industriais de recuperação de calor de alta temperatura.

2.4 ESTADO DA ARTE EM SISTEMAS HÍBRIDOS STEG

A integração de geradores fotovoltaicos e termoeletricos STEG tem sido investigada como alternativa para ampliar o aproveitamento energético global de sistemas fotovoltaicos, explorando parte da energia térmica dissipada durante o processo de conversão fotovoltaica. Em células solares convencionais, uma parcela significativa da radiação incidente não é convertida em energia elétrica, sendo dissipada na forma de calor, principalmente devido à termalização dos portadores e às perdas por recombinação (TRITT; BÖTTNER; CHEN, 2008).

Estudos recentes indicam que células fotovoltaicas aplicadas em *CubeSats*, nano satélites padronizados de $1U$, apresentam eficiências típicas entre aproximadamente 16,8% e 32,2%, sob irradiância próxima a $1.000 W/m^2$, enquanto geradores termoeletricos comerciais apresentam eficiências tipicamente entre 3,1% e 9,6% para gradientes térmicos que podem variar aproximadamente entre $50 K$ e $300 K$, dependendo fortemente das condições de dissipação térmica do sistema. Apesar da menor eficiência absoluta, os TEGs apresentam a vantagem de operar independentemente da incidência solar direta, explorando gradientes térmicos estruturais e calor residual dos subsistemas embarcados. Dessa forma, as duas tecnologias apresentam caráter complementar, possibilitando arquiteturas híbridas capazes de ampliar a disponibilidade energética

ao longo do ciclo orbital em LEO, tipicamente situadas entre aproximadamente 160 km e 2.000 km de altitude.

A revisão sistemática da literatura realizada por Silva, E. A.; et al. (2025), parte integrante deste doutorado, identificou que, embora existam diversas propostas teóricas para integração termoelétrica em sistemas fotovoltaicos, a aplicação de TEGs em *CubeSats* ainda é incipiente. Revisões recentes indicam que a utilização de TEGs como fonte primária de energia em *CubeSats* permanece limitada tanto na literatura científica quanto em depósitos de patentes, sendo mais comum sua aplicação em controle térmico passivo ou em sistemas terrestres. Esse cenário evidencia uma lacuna tecnológica relevante, justificando a investigação de arquiteturas híbridas compactas voltadas à geração energética em nano satélites.

De forma geral, o estudo classifica as arquiteturas de EH híbrido em dois grupos principais. O primeiro grupo corresponde aos sistemas com divisão espectral (*Spectrum Splitting*), que utilizam elementos ópticos, como espelhos dicróicos ou prismas, para direcionar diferentes faixas espectrais da radiação solar para dispositivos distintos de conversão energética. Embora apresentem elevado potencial teórico de eficiência, esses sistemas adicionam complexidade óptica, massa estrutural e ocupam volume adicional, limitando sua aplicação em plataformas *CubeSat* (nano satélites 1U ou 3U), nas quais as restrições geométricas são severas (SILVA, E. A.; et al., 2025; TRITT; BÖTTNER; CHEN, 2008).

O segundo grupo corresponde aos sistemas de acoplamento direto, que consistem na integração do módulo termoelétrico diretamente à face posterior do módulo fotovoltaico, permitindo que o TEG atue simultaneamente como elemento de conversão termoelétrica e interface térmica. Nessa configuração, o fluxo térmico gerado durante o processo de conversão fotovoltaica é parcialmente conduzido através do TEG em direção ao dissipador térmico. Essa topologia, adotada no presente trabalho (STEG-CUBE), favorece a miniaturização, a robustez mecânica e a simplicidade construtiva.

Neste trabalho, o termo STEG refere-se ao conceito geral de sistemas híbridos solar-termoelétricos descritos na literatura. O termo STEG-CUBE é utilizado para designar a arquitetura específica desenvolvida nesta tese, otimizada para integração em plataformas *CubeSat* e validada experimentalmente em bancada. Essa distinção permite situar claramente a contribuição desta pesquisa no contexto das arquiteturas STEG existentes, destacando a aplicação de um arranjo híbrido compacto adaptado às restrições geométricas, térmicas e energéticas características de nano satélites.

Na literatura especializada, as arquiteturas de sistemas híbridos STEG podem ser agrupadas em duas abordagens principais: sistemas baseados em divisão espectral da radiação solar (*spectrum splitting*) e sistemas baseados em acoplamento térmico direto entre o módulo fotovoltaico

e o gerador termoelétrico. Nos sistemas baseados em *spectrum splitting*, a radiação solar incidente é separada em diferentes faixas espectrais por meio de elementos ópticos, como prismas ou espelhos dicróicos. Cada faixa espectral é então direcionada para dispositivos de conversão energética específicos, permitindo potencialmente maior eficiência global de conversão. Entretanto, essa abordagem requer a introdução de componentes ópticos adicionais e estruturas de alinhamento, o que aumenta significativamente a complexidade estrutural do sistema, bem como sua massa e volume. Essas características representam limitações importantes para aplicações em plataformas *CubeSat*, nas quais as restrições de massa, volume e simplicidade estrutural são particularmente severas.

Por outro lado, arquiteturas baseadas em acoplamento térmico direto consistem na integração do módulo termoelétrico diretamente à face posterior do módulo fotovoltaico, permitindo que o gerador termoelétrico aproveite parte do calor residual gerado durante o processo de conversão fotovoltaica. Nessa configuração, o gradiente térmico disponível depende diretamente das condições de dissipação térmica do sistema fotovoltaico e da eficiência da remoção de calor na interface fria do módulo termoelétrico. Apesar dessa dependência térmica, essa abordagem apresenta vantagens significativas em termos de simplicidade construtiva, menor massa estrutural e maior compactidade, características particularmente relevantes para aplicações em plataformas espaciais miniaturizadas.

Observa-se, portanto, que arquiteturas baseadas em divisão espectral apresentam maior potencial teórico de eficiência energética, uma vez que permitem direcionar diferentes faixas do espectro solar para dispositivos de conversão específicos. Entretanto, a necessidade de componentes ópticos adicionais aumenta significativamente a complexidade estrutural, o volume e a massa do sistema. Em contraste, arquiteturas baseadas em acoplamento térmico direto apresentam maior simplicidade construtiva e melhor compatibilidade com plataformas *CubeSat*, nas quais restrições de massa, volume e robustez mecânica são fatores críticos de projeto.

Nesse contexto, a arquitetura adotada nesta tese baseia-se no acoplamento térmico direto entre os módulos fotovoltaico e termoelétrico, configurando o sistema denominado STEG-CUBE. A contribuição original deste trabalho reside na integração dessa arquitetura em um sistema compacto compatível com plataformas *CubeSat*, na modelagem eletrotérmica parametrizada do módulo termoelétrico e na validação experimental do comportamento termo energético do sistema híbrido sob condições térmicas controladas representativas do ambiente orbital.

Estudos como os de Huen e Daoud (2017) demonstram que, embora o acoplamento direto possa elevar a temperatura de operação da célula fotovoltaica devido à resistência térmica adicional introduzida pelo TEG, o ganho de potência associado à conversão termoelétrica pode compensar parcialmente as perdas fotovoltaicas, dependendo das condições térmicas e do projeto térmico do sistema.

Para que esse balanço energético seja favorável, é fundamental que o fator de mérito termoelétrico (ZT) do material e o projeto do sistema de dissipação térmica sejam adequadamente otimizados. Dessa forma, esta tese concentra-se na arquitetura de acoplamento direto, buscando refiná-la para atender às restrições de massa, volume e desempenho térmico impostas por plataformas *CubeSat*.

Com base na fundamentação apresentada, observa-se que o desenvolvimento de sistemas híbridos fotovoltaico-termoelétricos exige a integração coerente entre fenômenos físicos de conversão energética, comportamento térmico estrutural e restrições geométricas impostas por plataformas espaciais compactas. A análise do ambiente LEO permitiu estabelecer as condições de contorno térmicas relevantes para aplicações em *CubeSats*, enquanto a revisão da física da conversão fotovoltaica e termoelétrica evidenciou os mecanismos fundamentais responsáveis pela geração elétrica e pelas perdas energéticas inerentes a cada tecnologia.

A consolidação do estado da arte em arquiteturas STEG demonstra que, embora existam abordagens teóricas promissoras, ainda persistem lacunas relacionadas à validação experimental em sistemas miniaturizados submetidos a ciclos térmicos representativos do ambiente orbital. Nesse contexto, a presente tese propõe o desenvolvimento e a validação experimental de uma arquitetura híbrida fotovoltaico-termoelétrica compacta (STEG-CUBE), baseada em acoplamento térmico direto entre módulos fotovoltaicos e termoelétricos. A contribuição do trabalho reside na integração dessa arquitetura em um sistema miniaturizado compatível com plataformas *CubeSat*, na modelagem eletrotérmica parametrizada do módulo TEG e na avaliação experimental do desempenho energético do sistema sob condições térmicas controladas representativas do ambiente orbital.

Assim, o próximo capítulo apresenta a modelagem matemática e a definição da arquitetura do sistema STEG-CUBE, estabelecendo as relações termoelétricas, elétricas e térmicas que fundamentam o dimensionamento do protótipo experimental e a análise de desempenho realizada nesta pesquisa.

3 ARQUITETURA E MODELAGEM

Este capítulo apresenta a modelagem física, matemática e arquitetural do sistema híbrido STEG-CUBE, estabelecendo a relação entre os fenômenos termoeletricos discutidos no Capítulo 2 e a implementação tecnológica do protótipo desenvolvido nesta pesquisa. São descritas a arquitetura conceitual do dispositivo, as condições de contorno orbitais adotadas para o dimensionamento, os modelos térmicos e eletrotérmicos empregados na simulação e a estratégia de validação experimental baseada em substituição tecnológica.

O desenvolvimento do modelo termoeletrico do sistema STEG-CUBE combina caracterização experimental, modelagem física fundamentada nas propriedades termodinâmicas dos materiais e exploração paramétrica numérica, permitindo a previsão do comportamento do sistema em envelopes operacionais além daqueles reproduzíveis experimentalmente em bancada.

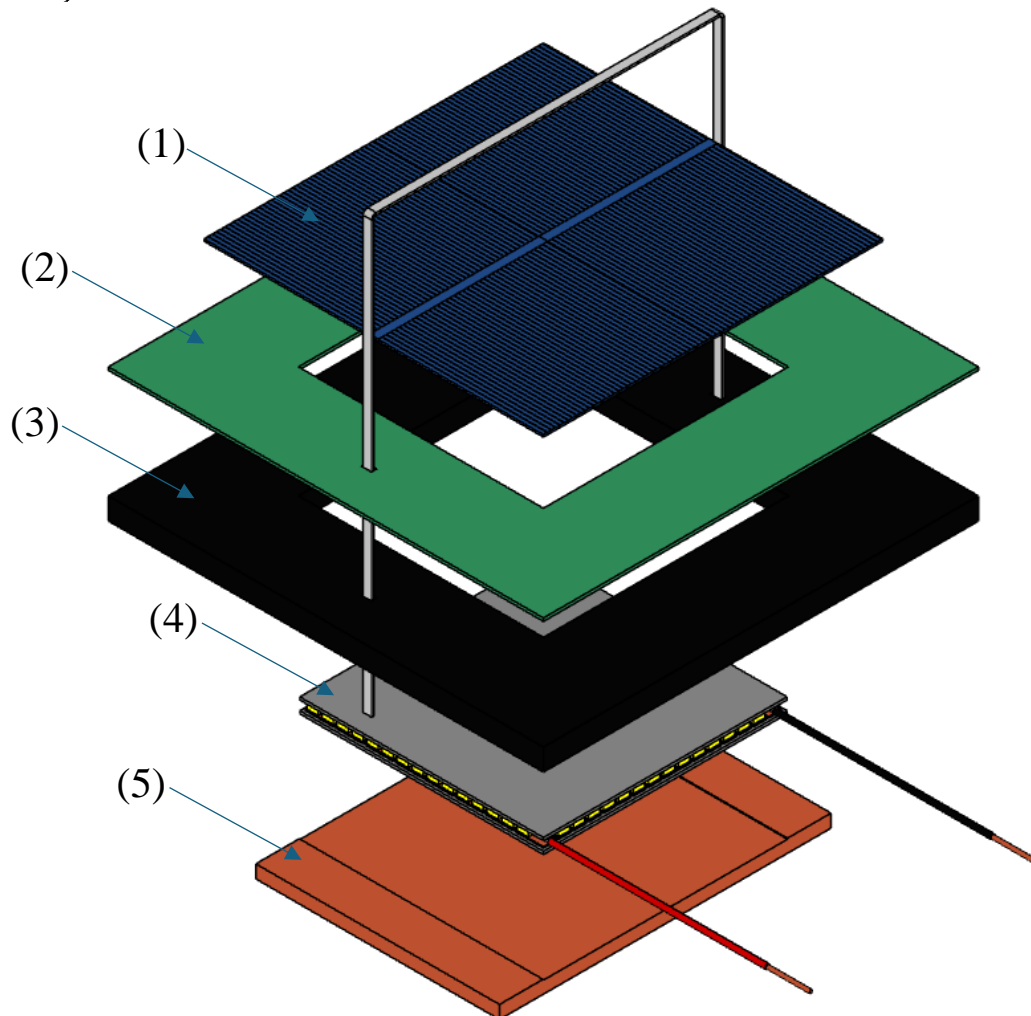
Adicionalmente, são apresentados os modelos matemáticos utilizados para descrever o comportamento não linear do módulo termoeletrico e a arquitetura do sistema híbrido de gerenciamento de energia (*Electrical Power System – EPS*), responsável pela integração das fontes fotovoltaica e termoeletrica. O capítulo estabelece, portanto, a base físico-matemática e de engenharia que fundamenta a construção do protótipo experimental e a análise dos resultados apresentados nos capítulos subsequentes.

3.1 ARQUITETURA DO SISTEMA

A arquitetura conceitual do sistema STEG-CUBE foi definida com base na topologia de acoplamento térmico direto em configuração elétrica paralela, visando maximizar a densidade de potência elétrica e o gradiente térmico efetivo aplicado ao módulo termoeletrico em volumes restritos compatíveis com o padrão *CubeSat* (1U). Essa configuração permite que a conversão fotovoltaica e termoeletrica ocorra de forma complementar, explorando tanto a radiação solar incidente quanto o fluxo térmico residual gerado durante o processo de conversão fotovoltaica.

Do ponto de vista físico, o sistema é estruturado em camadas funcionais sequenciais, projetadas para favorecer um fluxo térmico predominantemente vertical, desde a superfície de captação solar até a estrutura dissipadora do satélite. Essa abordagem permite estabelecer e manter o gradiente térmico necessário para a operação eficiente do módulo termoeletrico, ao mesmo tempo em que preserva a integridade térmica, elétrica e estrutural do subsistema fotovoltaico. Conforme ilustrado na Figura 3, a arquitetura funcional de cada face ativa do STEG-CUBE é composta por um conjunto integrado de camadas estruturais e funcionais, organizadas de modo a promover simultaneamente eficiência energética, robustez mecânica e estabilidade térmica.

Figura 3- Arquitetura multicamada com detalhamento das interfaces térmicas e estruturais de cada face ativa do sistema.



Fonte: o autor, 2026.

A camada superior (1) é composta pelo módulo fotovoltaico, responsável pela conversão primária da radiação solar em energia elétrica e pela absorção térmica associada à fração não convertida da energia incidente. No modelo de aplicação espacial considera-se o uso de células fotovoltaicas de TJ, amplamente utilizadas em aplicações espaciais devido à sua elevada eficiência e resistência à radiação. No protótipo experimental, entretanto, foram utilizadas células Poly-Si, conforme a estratégia de validação por substituição tecnológica adotada neste trabalho. Essa abordagem preserva os principais fenômenos térmicos relevantes para a investigação proposta, particularmente o balanço energético do módulo fotovoltaico e o gradiente térmico imposto ao TEG, ainda que a eficiência fotovoltaica absoluta seja distinta da observada em células TJ. Dessa forma, o protótipo experimental permite validar a arquitetura térmica e o comportamento eletrotérmico do sistema híbrido, enquanto as diferenças de eficiência fotovoltaica são consideradas na análise comparativa de desempenho. O módulo fotovoltaico é suportado por uma estrutura rígida de sustentação, responsável por garantir planicidade, integridade mecânica e estabilidade geométrica do conjunto durante ciclos térmicos, além de atuar como interface estrutural entre a célula fotovoltaica e as camadas subsequentes.

Imediatamente abaixo do conjunto fotovoltaico encontra-se a interface estrutural baseada em material compósito de fibra de vidro (2), cuja função é fornecer suporte mecânico adicional e contribuir para a estabilidade dimensional do sistema, reduzindo tensões mecânicas induzidas por gradientes térmicos. Associada a essa interface estrutural, encontra-se uma camada de isolamento térmico lateral (3), implementada por meio de espuma de poliuretano, cuja função é minimizar perdas térmicas laterais e promover o confinamento do fluxo térmico na direção do módulo termoeletrico. Essa camada também realiza a compatibilização dimensional entre o módulo fotovoltaico, com dimensões aproximadas de $78 \times 78 \text{ mm}$, e o módulo termoeletrico, com dimensões de $56 \times 56 \text{ mm}$, garantindo acoplamento térmico eficiente entre as superfícies ativas.

A camada de conversão termoeletrica (4), é composta pelo módulo TEG, responsável pela conversão do gradiente térmico estabelecido entre as faces quente e fria em energia elétrica adicional. O TEG é posicionado centralmente sob o módulo fotovoltaico e conectado eletricamente de forma independente ao sistema de gerenciamento energético, permitindo operação paralela em relação ao subsistema fotovoltaico. Essa camada constitui o elemento responsável pela recuperação parcial do fluxo térmico residual gerado durante a operação fotovoltaica, contribuindo diretamente para o aumento da densidade energética global do sistema híbrido.

Nas duas faces do módulo termoeletrico é aplicada uma camada de interface térmica de baixa resistência, cuja função é reduzir perdas térmicas de contato entre o TEG e a estrutura dissipadora. Essa interface é implementada por meio de uma folha de grafite, tipicamente caracterizado por condutividade térmica $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ e espessura de $0,127 \text{ mm}$. Essa interface é crítica para a manutenção do gradiente térmico efetivo no módulo termoeletrico, influenciando diretamente a eficiência de conversão energética do sistema.

A camada inferior do conjunto é composta pela estrutura dissipadora térmica (5), representando a interface térmica com o chassi do satélite ou com a base estrutural do sistema experimental. Essa camada atua como sumidouro térmico, permitindo a remoção contínua de calor e a manutenção do gradiente térmico necessário à operação do TEG, especialmente durante períodos de exposição solar direta.

A arquitetura multicamada proposta permite a integração compacta dos transdutores energéticos, favorece o controle passivo do fluxo térmico estrutural e mantém compatibilidade com as severas restrições geométricas impostas por plataformas *CubeSat*. Além disso, possibilita a implementação de geração híbrida com impacto mínimo em massa e volume, estabelecendo a base física para a modelagem termo energética e termoeletrica apresentada nas seções subsequentes deste capítulo.

3.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO ORBITAIS E ENVELOPE TÉRMICO OPERACIONAL

O desempenho termo energético do sistema STEG-CUBE é diretamente influenciado pelas condições ambientais às quais o dispositivo é submetido durante a operação orbital. Dessa forma, a modelagem do sistema foi estruturada a partir da definição de condições de contorno térmicas e radiativas representativas de uma missão típica em LEO, com ênfase em cenários compatíveis com lançamentos a partir do CLA.

A definição dessas condições permite estabelecer limites operacionais seguros para os materiais empregados, além de fornecer parâmetros físicos consistentes para a modelagem matemática e para a reprodução experimental em bancada, garantindo rastreabilidade entre simulação numérica e validação experimental.

Para garantir consistência entre a caracterização dos dispositivos individuais e o comportamento do sistema completo, a modelagem foi estruturada considerando três níveis complementares de análise. O primeiro corresponde ao nível de componente, no qual são caracterizados individualmente o módulo fotovoltaico e o módulo termoelétrico, permitindo a obtenção de parâmetros fundamentais como coeficiente de *Seebeck* dependente da temperatura, resistência elétrica interna variável e coeficientes térmicos do dispositivo fotovoltaico. O segundo corresponde ao nível de envelope operacional, responsável pela definição dos limites térmicos seguros de operação e pela caracterização das condições ambientais orbitais, incluindo irradiância solar direta, radiação infravermelha terrestre e contribuição de albedo. O terceiro corresponde ao nível sistêmico, no qual é considerada a interação dinâmica entre o satélite e o vetor solar ao longo da órbita, incluindo diferentes ângulos de incidência solar e seus impactos diretos na distribuição térmica e na geração energética do sistema híbrido.

A radiação solar que incide em cada face do *CubeSat* pode ser modelada, em primeira aproximação, pela Lei do Cosseno de *Lambert*, que descreve a projeção geométrica da irradiância incidente em função da orientação relativa entre o vetor solar e a normal da superfície irradiada. O fluxo efetivamente absorvido pela superfície depende adicionalmente das propriedades ópticas do material, sendo representado pelo produto entre a irradiância incidente projetada e a absorvidade superficial do material. Essa relação pode ser expressa por:

$$Q_{in} = G_{solar} \times A_{face} \times \alpha_{abs} \times \cos \theta \quad (16)$$

em que G_{solar} representa a irradiância solar incidente, A_{face} corresponde à área da face irradiada, α_{abs} é a absorvidade superficial e θ representa o ângulo entre o vetor solar incidente e a normal da superfície.

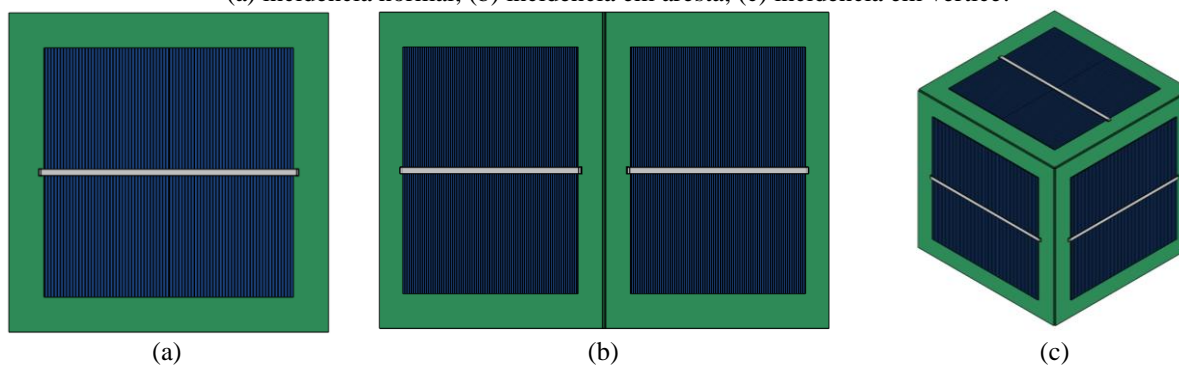
Com base nesse modelo físico, foram definidos três cenários geométricos críticos de incidência solar, utilizados para avaliar a robustez térmica e energética do sistema híbrido.

Conforme ilustrado na Figura 4-(a), o Caso A representa a incidência normal do vetor solar sobre uma única face ativa do *CubeSat*, condição na qual a face irradiada recebe a irradiância máxima disponível em ambiente espacial, tipicamente próxima de 1361 W/m^2 em condição AM0. Esse cenário representa o pior caso térmico local e foi utilizado como referência para os ensaios experimentais realizados em bancada, descritos no Capítulo 4.

Na Figura 4-(b) é apresentado o Caso B, correspondente à incidência do vetor solar sobre a aresta do *CubeSat*, formando aproximadamente 45° com as normais de duas faces adjacentes. Nessa condição, a irradiância efetiva em cada face é reduzida pelo fator geométrico $\cos(45^\circ)$, resultando em aproximadamente 70,7% da irradiância máxima em cada módulo. Esse cenário promove maior distribuição térmica espacial e reduz gradientes térmicos locais extremos.

A Figura 4-(c) ilustra o Caso C, correspondente à incidência sobre o vértice do *CubeSat*, formando aproximadamente $54,7^\circ$ com as normais das três faces adjacentes. Nessa condição, a irradiância efetiva em cada face é reduzida para aproximadamente 57,7% da irradiância máxima. Esse cenário representa uma condição estatisticamente relevante em regimes de rotação livre ou controle de atitude limitado, sendo utilizado para estimativas de geração energética média ao longo da missão.

Figura 4- Configurações geométricas de incidência solar utilizadas na análise termo energética orbital do STEG-CUBE: (a) incidência normal; (b) incidência em aresta; (c) incidência em vértice.



Fonte: o autor, 2026.

Essa relação geométrica entre orientação orbital e fluxo energético absorvido fundamenta a extrapolação dos resultados experimentais obtidos no Caso A para os cenários orbitais B e C, permitindo avaliar o comportamento energético do sistema híbrido sob diferentes condições de incidência solar ao longo da órbita, conforme discutido quantitativamente no Capítulo 5.

Os três casos geométricos apresentados não representam estados orbitais fixos, mas sim configurações limite de incidência solar utilizadas para delimitar o envelope de operação térmica e energética do sistema. Ao longo de uma órbita real, a orientação relativa entre o satélite e o vetor solar varia continuamente em função da dinâmica orbital e das condições de controle de atitude, de modo que os casos A, B e C podem ser interpretados como limites superior, intermediário e distribuído de fluxo energético incidente sobre as faces do *CubeSat*.

Para garantir a representatividade entre simulação numérica e validação experimental, foram definidas linhas de contorno térmicas e radiativas baseadas em parâmetros orbitais típicos de uma LEO equatorial com altitude aproximada de 600 km.

Essa altitude foi selecionada por representar uma condição operacional comum para missões *CubeSat*, nas quais o período orbital típico situa-se em torno de 95 a 100 minutos, com ciclos alternados de exposição solar e eclipse que influenciam diretamente o comportamento térmico dos sistemas embarcados. Em órbitas próximas de 600 km, a fração de eclipse pode atingir aproximadamente 35 a 40% do período orbital, resultando em ciclos térmicos periódicos relevantes para a avaliação do desempenho termo energético. Além disso, essa faixa de altitude apresenta arrasto atmosférico moderado, permitindo vida orbital compatível com missões de nano satélites sem exigir sistemas complexos de controle orbital, o que a torna representativa para estudos conceituais de plataformas *CubeSat*.

Nesse contexto, considerou-se irradiância solar orbital de aproximadamente 1361 W/m^2 em condição AM0, enquanto os ensaios experimentais em bancada foram realizados sob irradiância típica de aproximadamente 1000 W/m^2 , correspondente ao espectro AM1.5 global. Considerou-se ainda contribuição média de albedo terrestre da ordem de 30% da irradiância solar incidente e fluxo médio de radiação infravermelha terrestre próximo de 237 W/m^2 .

Os limites térmicos operacionais foram definidos considerando simultaneamente a integridade estrutural dos materiais e a faixa operacional segura do módulo termoeletrico, sendo adotados valores máximos típicos de aproximadamente $120 \text{ }^\circ\text{C}$ para a face quente e valores mínimos próximos de $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ para a face fria. Esses limites são compatíveis com as faixas operacionais típicas de módulos termoeletricos comerciais baseados em ligas de bismuto telureto (Bi_2Te_3), bem como com restrições térmicas usuais de componentes eletrônicos e materiais estruturais empregados em plataformas *CubeSat*. Para fins de projeto e validação experimental, definiu-se como faixa operacional típica de interesse gradientes térmicos entre aproximadamente $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e $60 \text{ }^\circ\text{C}$, faixa na qual o módulo termoeletrico apresenta geração elétrica mensurável e comportamento estável.

Esses limites foram utilizados tanto nas simulações termoeletricas quanto na definição dos protocolos experimentais em bancada, assegurando coerência física entre modelagem matemática, ensaios experimentais e análise de desempenho energético apresentada nos capítulos subsequentes.

3.3 MODELAGEM TERMO ENERGÉTICA DO SISTEMA STEG-CUBE

A modelagem termo energética do sistema STEG-CUBE foi desenvolvida com o objetivo de descrever de forma integrada os mecanismos físicos responsáveis pela absorção de

energia, transporte térmico e conversão termoelétrica no dispositivo híbrido. O modelo considera o acoplamento físico e térmico entre o módulo fotovoltaico, as interfaces térmicas, o módulo termoelétrico e a estrutura dissipadora, permitindo correlacionar diretamente as condições ambientais orbitais definidas na Seção 3.2 com o desempenho energético global do sistema.

A abordagem adotada baseia-se na analogia eletrotérmica, na qual o fluxo de calor é tratado de forma análoga à corrente elétrica, permitindo representar o sistema térmico como uma rede equivalente de resistências térmicas. Essa metodologia possibilita integrar a modelagem térmica e elétrica em um modelo único de simulação, facilitando a correlação direta com os dados experimentais obtidos em bancada e posteriormente analisados no Capítulo 5.

O transporte térmico através da arquitetura multicamada do STEG-CUBE é dominado pelo mecanismo de condução térmica nas camadas sólidas estruturais e funcionais. Em primeira aproximação, esse processo pode ser descrito pela Lei de *Fourier* para condução unidimensional:

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (17)$$

onde Q representa o fluxo térmico conduzido, ΔT corresponde à diferença de temperatura entre as extremidades do material e R_{th} representa a resistência térmica equivalente do caminho de condução.

Considerando a estrutura multicamada do sistema STEG, a resistência térmica total pode ser expressa como a soma das resistências térmicas individuais associadas às camadas físicas e às interfaces térmicas:

$$R_{th_{total}} = R_{th_{PV}} + R_{TIM1} + R_{th_{TEG}} + R_{TIM2} + R_{th_{sink}} \quad (18)$$

onde $R_{th_{PV}}$ representa a resistência térmica equivalente do módulo fotovoltaico, R_{TIM1} e R_{TIM2} representam as resistências térmicas das interfaces de acoplamento, $R_{th_{TEG}}$ representa a resistência térmica do módulo termoelétrico e $R_{th_{sink}}$ representa a resistência térmica associada à estrutura dissipadora do satélite.

A eficiência térmica global do sistema depende criticamente da minimização das resistências térmicas de interface, garantindo que o gradiente térmico seja estabelecido predominantemente sobre o material termoelétrico ativo, maximizando assim a eficiência de conversão termoelétrica.

$$Q_{abs} = P_{PV} + Q_{TEG} + Q_{loss} \quad (19)$$

onde Q_{abs} representa o fluxo térmico absorvido pelo sistema, P_{PV} representa a potência elétrica convertida pelo módulo fotovoltaico, Q_{TEG} representa o fluxo térmico conduzido através do módulo termoelétrico e Q_{loss} representa perdas térmicas estruturais e radiativas.

Esse modelo estabelece a ligação física direta entre a conversão fotovoltaica e a conversão termoelétrica, evidenciando que o módulo termoelétrico atua como conversor do fluxo térmico residual gerado pelo sistema fotovoltaico e pela absorção radiativa estrutural.

No STEG-CUBE, o módulo termoelétrico opera como conversor energético complementar, utilizando o fluxo térmico residual proveniente das perdas energéticas do processo fotovoltaico e do aquecimento estrutural associado à absorção radiativa. Dessa forma, o fluxo térmico efetivamente disponível para conversão termoelétrica pode ser estimado como:

$$Q_{TEG} \approx Q_{abs} - P_{PV} - Q_{parasitic} \quad (20)$$

onde $Q_{parasitic}$ representa perdas térmicas associadas à condução estrutural não útil, radiação térmica e imperfeições de interface térmica.

O desempenho termoelétrico depende diretamente da eficiência do acoplamento térmico entre módulo fotovoltaico, módulo termoelétrico e estrutura dissipadora, bem como da estabilidade temporal do gradiente térmico ao longo do ciclo orbital.

O desempenho do módulo termoelétrico está diretamente relacionado ao gradiente térmico estabelecido entre suas faces quente e fria, definido por:

$$\Delta T = T_{hot} - T_{cold} \quad (21)$$

No sistema STEG-CUBE, o projeto foi otimizado para manter gradientes térmicos operacionais dentro da faixa:

$$20 \text{ } ^\circ\text{C} \leq \Delta T \leq 60 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (22)$$

Essa faixa representa um compromisso entre desempenho termoelétrico, limitações estruturais dos materiais, confiabilidade mecânica do sistema multicamada e estabilidade térmica do módulo fotovoltaico.

A modelagem termo energética desenvolvida nesta seção fornece os parâmetros térmicos fundamentais utilizados na modelagem eletrotérmica detalhada apresentada na Seção 3.4, na qual são considerados os efeitos de dependência térmica do coeficiente de *Seebeck*, da resistência elétrica interna e da potência elétrica efetivamente entregue à carga.

Essa integração permite estabelecer uma correlação direta entre condições ambientais orbitais, comportamento térmico estrutural e desempenho elétrico do sistema híbrido. Essa correlação é posteriormente validada experimentalmente no Capítulo 5, por meio da comparação entre os resultados obtidos em bancada e as previsões do modelo termo energético e termoelétrico parametrizado, permitindo avaliar quantitativamente a validade da arquitetura híbrida proposta.

3.4 MODELAGEM PARAMETRIZADA DO MÓDULO TERMOELÉTRICO

A modelagem eletrotérmica do módulo termoeétrico utilizada nesta tese foi desenvolvida com o objetivo de representar de forma realista o comportamento não linear de dispositivos termoeétricos comerciais baseados em semicondutores, considerando a dependência dos parâmetros elétricos e termoeétricos em função da temperatura média de operação.

Diferentemente de abordagens simplificadas, nas quais o coeficiente de *Seebeck* e a resistência elétrica interna são considerados constantes, o modelo adotado baseia-se em parametrizações obtidas a partir de dados experimentais e informações de fabricante, conforme metodologia validada em Silva, E. A.; et al. (2025). Essa abordagem permite reduzir erros na estimativa de potência e tensão de saída, especialmente em regimes de operação com grande variação térmica.

A tensão de circuito aberto de um módulo termoeétrico pode ser expressa por:

$$V_{oc} = \alpha(T_{med}) \times (\Delta T) \quad (23)$$

onde $\alpha(T_{med})$ representa o coeficiente de *Seebeck* dependente da temperatura média e ΔT representa o gradiente térmico aplicado ao módulo.

A temperatura média do módulo é definida como:

$$T_{med} = \left(\frac{T_{hot} + T_{cold}}{2} \right) \quad (24)$$

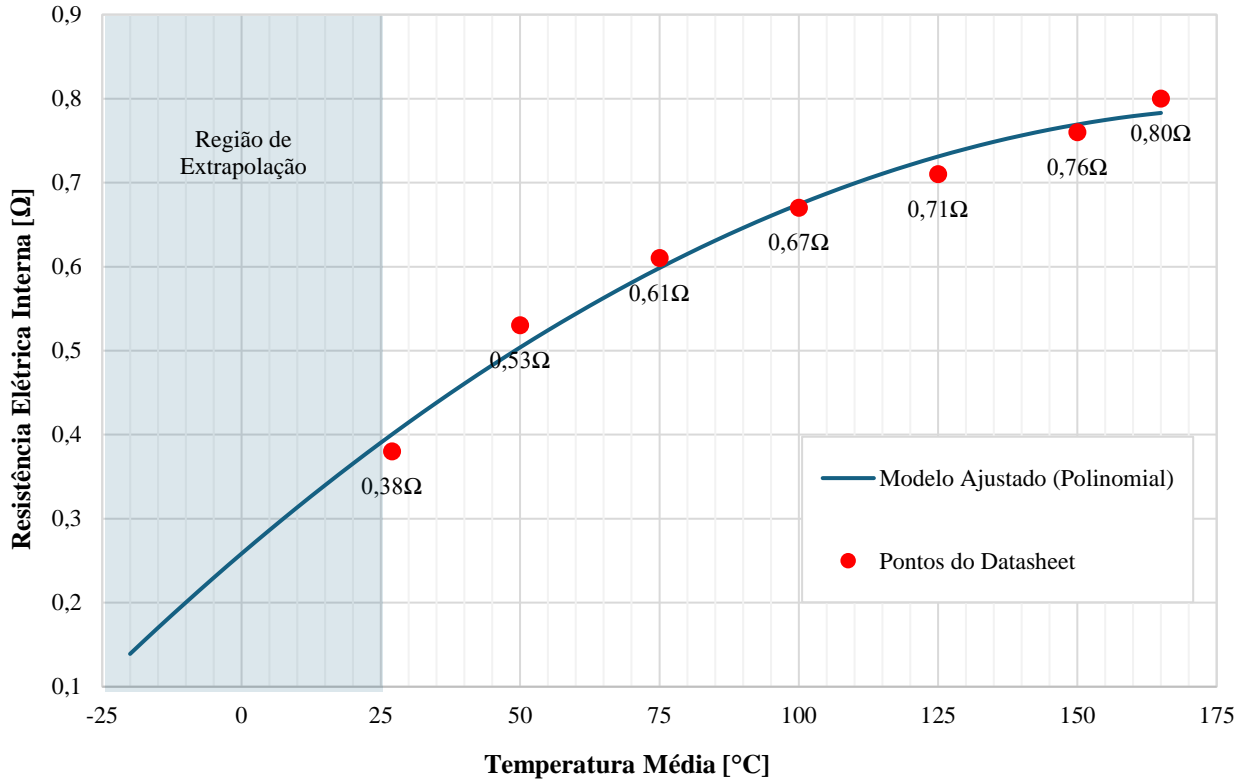
Portanto, variações na temperatura da face fria influenciam diretamente o valor da resistência elétrica interna e, conseqüentemente, o ponto de máxima potência do dispositivo. Dessa forma, mudanças nas condições térmicas do dissipador ou do ambiente orbital alteram simultaneamente T_{med} , R_{int} e a potência elétrica máxima estimada pelo modelo. Essa definição permite capturar de forma mais realista a variação das propriedades termoeétricas do material semicondutor.

Assim, o modelo eletrotérmico considera explicitamente a dependência térmica dos principais parâmetros do módulo, permitindo representar o impacto simultâneo das variações de T_{hot} , T_{cold} e T_{med} no desempenho elétrico do dispositivo.

A resistência elétrica interna do módulo termoeétrico apresenta variação significativa com a temperatura de operação. Para representar esse comportamento, foi realizada regressão polinomial de segunda ordem a partir de dados experimentais e dados de fabricante do módulo *Custom Thermoelectric 1261G-7L31-24CX1*.

A Figura 5 apresenta a variação da resistência elétrica interna em função da temperatura média de operação, construída a partir da análise combinada dos dados de *datasheet* e da expressão de caracterização desenvolvida neste trabalho.

Figura 5- Variação da resistência elétrica do módulo termoelétrico em função da temperatura média de operação.



Fonte: elaborado pelo autor a partir de dados de CUSTOM THERMOELECTRIC (2014).

A resistência interna foi modelada como função da temperatura média do módulo, sendo expressa por:

$$R_{int}(T_{med}) \approx -1,504 \times 10^{-5} \times T^2 + 5,662 \times 10^{-3} \times T + 0,258 \quad (25)$$

Essa parametrização permite atualizar dinamicamente a impedância interna do módulo durante simulações orbitais e análises experimentais, aumentando a fidelidade na estimativa da potência elétrica gerada.

A potência elétrica entregue à carga pode ser estimada por:

$$P_{load} = \left(\frac{\alpha(T_{med}) \times \Delta T}{R_{int}(T_{med}) + R_{load}} \right)^2 \times R_{load} \quad (26)$$

A condição teórica de máxima transferência de potência ocorre quando:

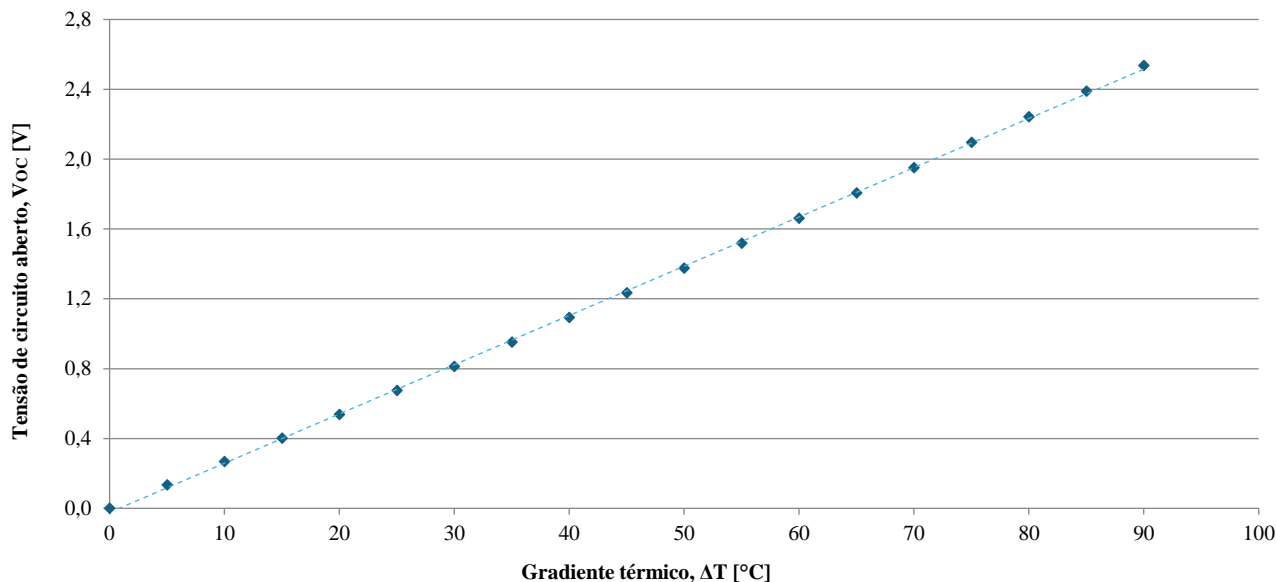
$$R_{load} = R_{int}(T_{med}) \quad (27)$$

Entretanto, em aplicações reais de EH, a carga elétrica é dinâmica, exigindo o uso de estágios conversores capazes de adaptar continuamente a impedância vista pelo módulo termoeletrico.

Para avaliar o comportamento do dispositivo em condições térmicas além das reproduzíveis experimentalmente, foi realizada uma exploração paramétrica do modelo eletrotérmico. Inicialmente, avaliou-se a dependência da tensão de circuito aberto em função do gradiente térmico para temperatura nominal da face fria, conforme apresentado na Figura 6. Observa-

se comportamento aproximadamente linear, conforme previsto pelo efeito *Seebeck*, sendo a inclinação da curva associada ao coeficiente de *Seebeck* efetivo médio do módulo.

Figura 6- Tensão de circuito aberto em função do gradiente térmico para temperatura de face fria de 30 °C.



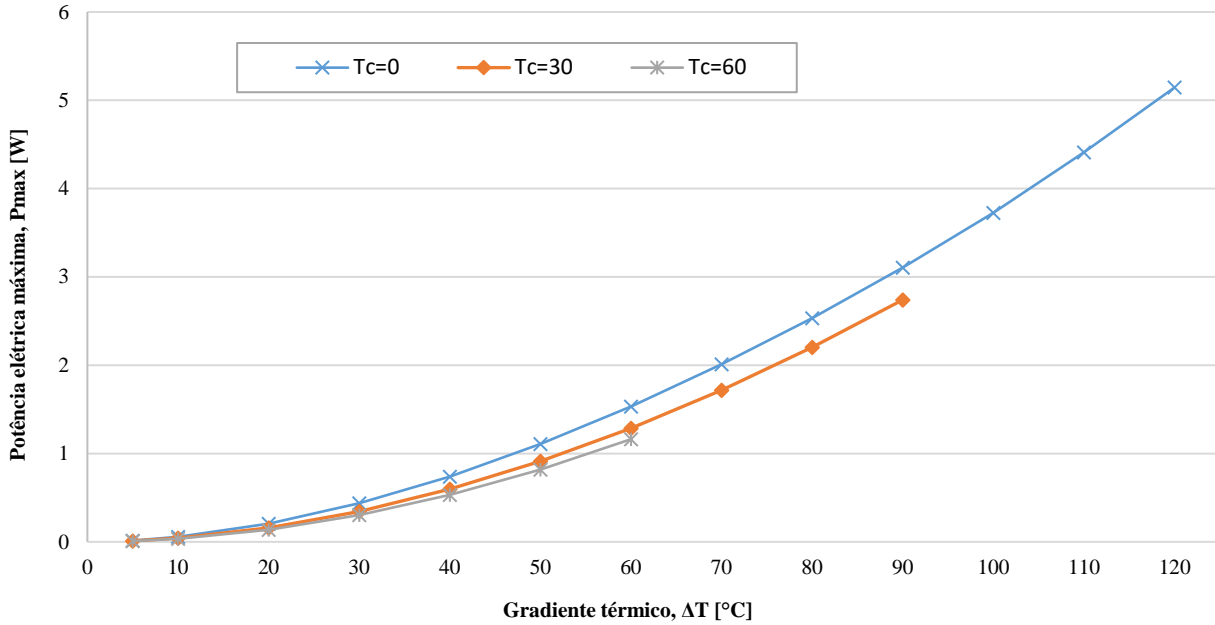
Fonte: o autor, 2026.

Em seguida, avaliou-se a potência elétrica máxima em função do gradiente térmico para diferentes temperaturas absolutas de operação, conforme apresentado na Figura 7. Os resultados demonstram que o desempenho do módulo depende simultaneamente do gradiente térmico aplicado e da temperatura absoluta de operação, refletindo a dependência térmica combinada do coeficiente de *Seebeck* e da resistência elétrica interna.

Por fim, o comportamento elétrico completo do módulo foi analisado por meio das curvas potência versus tensão para diferentes gradientes térmicos, conforme mostrado na Figura 8. Observa-se o deslocamento do ponto de máxima potência em função do gradiente térmico aplicado, comportamento fundamental para o dimensionamento dos estágios de condicionamento eletrônico do sistema híbrido.

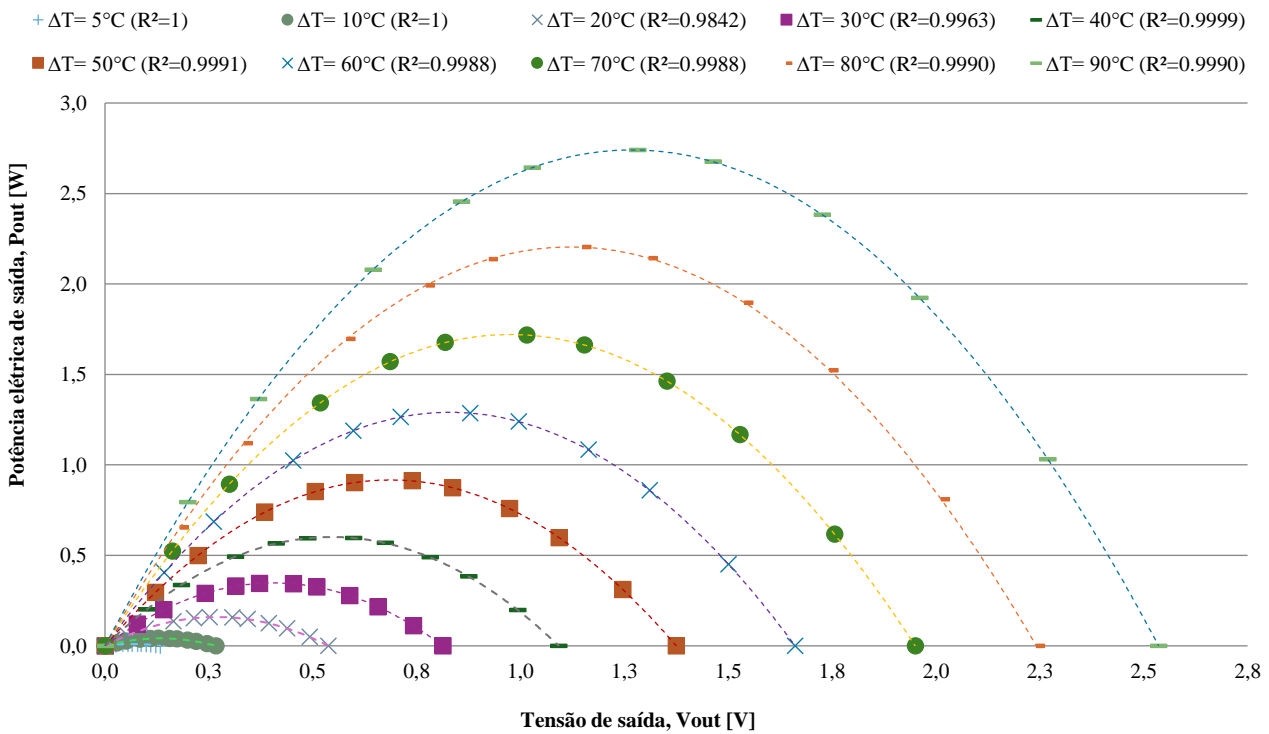
A exploração paramétrica realizada permite mapear o envelope eletrotérmico completo do módulo termoelétrico, incluindo condições não reproduzíveis experimentalmente em bancada, mantendo coerência física com os dados utilizados na parametrização do modelo. Esses resultados fornecem base para a previsão do desempenho do sistema STEG-CUBE em condições operacionais variáveis e fundamentam a análise comparativa entre modelagem e resultados experimentais apresentada no Capítulo 5.

Figura 7- Potência elétrica máxima estimada em função do gradiente térmico para diferentes temperaturas de face fria ($T_c = 0\text{ }^\circ\text{C}$, $30\text{ }^\circ\text{C}$ e $60\text{ }^\circ\text{C}$).



Fonte: o autor, 2026.

Figura 8- Família de curvas potência versus tensão para diferentes gradientes térmicos considerando temperatura nominal de face fria.



Fonte: o autor, 2026.

3.5 ESTRATÉGIA DE VALIDAÇÃO

Devido às restrições de custo e aos volumes mínimos de aquisição associados a células fotovoltaicas espaciais de TJ, esta tese adota uma estratégia de validação experimental baseada em substituição tecnológica por equivalência termo energética. Nesse contexto, a célula fotovoltaica de aplicação final, baseada em tecnologia de TJ (*TJ3G30*), é substituída durante os

ensaios experimentais por uma célula de Poly-Si, permitindo a validação física do comportamento termo energético do sistema híbrido em condições conservadoras.

A validade dessa abordagem fundamenta-se na premissa de pior caso térmico. A substituição é baseada na diferença entre as frações de potência absorvida convertidas em energia elétrica e em energia térmica em cada tecnologia fotovoltaica. Considerando uma mesma irradiância incidente, células de TJ apresentam eficiência típica próxima de 30%, enquanto células de Poly-Si apresentam eficiência típica próxima de 17%. Conseqüentemente, a fração de energia absorvida convertida em calor é significativamente maior no Poly-Si, resultando em maior carga térmica sobre o sistema híbrido.

Adicionalmente, o coeficiente térmico de degradação da potência máxima em células de Poly-Si apresenta magnitude superior ao observado em células fotovoltaicas baseadas em semicondutores III–V. Valores típicos reportados na literatura indicam coeficiente aproximado de $-0,45\%/^{\circ}\text{C}$ para Poly-Si, enquanto células de TJ baseadas em *GaAs* apresentam valores próximos de $-0,21\%/^{\circ}\text{C}$. Esse comportamento implica maior sensibilidade térmica do silício, reforçando o caráter conservador da validação experimental.

Sob a ótica termo energética, o uso de células Poly-Si impõe ao sistema STEG condições térmicas mais severas do que aquelas esperadas para a aplicação final em ambiente orbital com células de TJ. Dessa forma, caso o sistema híbrido seja capaz de gerenciar o fluxo térmico e gerar energia elétrica útil sob condições experimentais baseadas em Poly-Si, a aplicação utilizando células de TJ apresenta margem adicional de segurança térmica e energética.

Essa estratégia garante coerência entre modelagem e validação experimental, permitindo extrapolação física fundamentada dos resultados experimentais para o cenário de aplicação espacial, desde que respeitados os limites de similaridade termo energética entre os dispositivos.

A Tabela 2 apresenta um comparativo entre propriedades termo energéticas relevantes das tecnologias fotovoltaicas consideradas neste trabalho.

Tabela 2- Comparativo de propriedades termo energéticas das células.

Parâmetro	Célula Poly-Si	Célula TJ 3G30
Material Base	Silício Policristalino	<i>InGaP/GaAs/Ge</i>
Eficiência	17%	30%
Coef. Temp. (Pmp)	$-0,45\%/^{\circ}\text{C}$	$-0,21\%/^{\circ}\text{C}$
Absortividade (α)	Alta ($>0,85$)	Otimizada (0,91)

Fonte: adaptado de AZUR SPACE (2020) e GREEN (2009).

Ressalta-se que a validação por substituição tecnológica não busca reproduzir o desempenho absoluto da célula espacial, mas sim validar os mecanismos físicos de acoplamento termo energético e o comportamento sistêmico da arquitetura híbrida proposta.

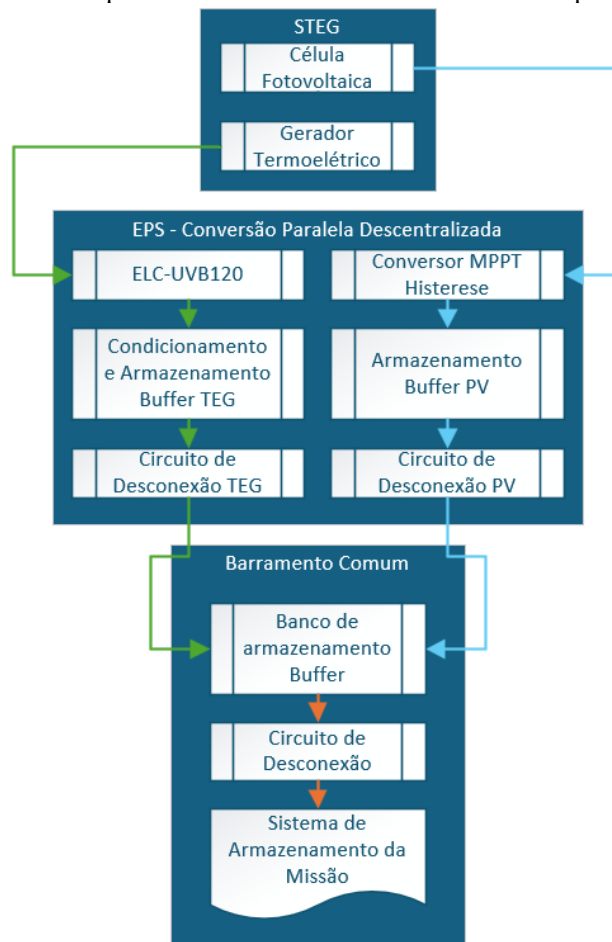
3.6 ARQUITETURA DO SISTEMA DE ENERGIA (EPS HÍBRIDA)

Para maximizar a extração energética de fontes com características elétricas distintas, esta tese propõe uma arquitetura de EPS híbrida baseada no conceito de *Decentralized Parallel Energy Harvesting*, na qual cada transdutor energético opera com estágio dedicado de condicionamento, armazenamento intermediário e desacoplamento dinâmico do barramento principal.

Diferentemente de arquiteturas convencionais baseadas em barramento único direto, o sistema proposto introduz *buffers* energéticos distribuídos por fonte e por face geradora, permitindo desacoplamento dinâmico entre geração, armazenamento intermediário e distribuição energética. Essa abordagem reduz interferência entre canais, melhora estabilidade do barramento e aumenta a resiliência energética global do sistema.

A arquitetura geral é apresentada na Figura 9, que ilustra a estrutura hierárquica composta pela camada de conversão energética STEG, pela camada de condicionamento e armazenamento local por canal e pela camada de barramento energético comum que faz interface com o sistema de armazenamento de missão.

Figura 9- Arquitetura hierárquica da EPS híbrida baseada em conversão paralela descentralizada.

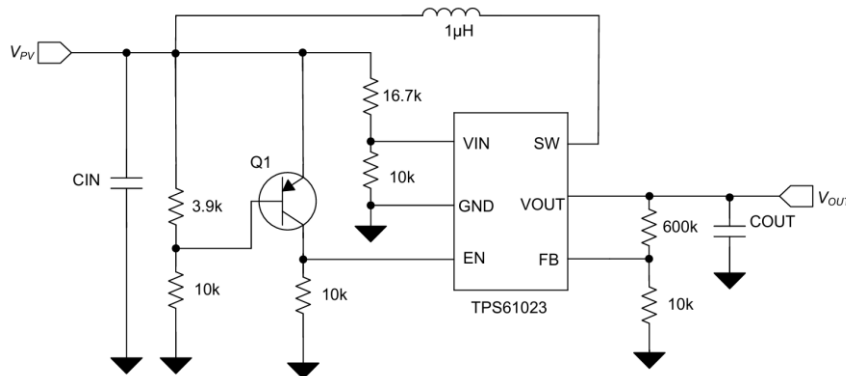


Fonte: o autor, 2026.

Cada face geradora incorpora três elementos de armazenamento baseados em capacitores híbridos de íons de lítio (LIC), operando como *buffer* fotovoltaico dedicado, *buffer* termoeletrico dedicado e *buffer* local de interface com o barramento comum. Essa configuração resulta em dezoito capacitores LIC de 20 F distribuídos no sistema, selecionados por apresentarem elevada densidade energética volumétrica, tensão nominal de 3,8V e ampla faixa térmica operacional ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$), características compatíveis com aplicações aeroespaciais compactas.

O canal fotovoltaico foi projetado para operação nominal com células de TJ, utilizando estratégia MPPT baseada em controle por histerese associada ao conversor *boost* síncrono TPS61023, cuja arquitetura funcional é apresentada na Figura 10. A escolha dessa técnica baseia-se na baixa complexidade computacional, elevada robustez e reduzido consumo energético, características críticas para sistemas embarcados em *CubeSats*.

Figura 10- Topologia do conversor boost síncrono com controle MPPT por histerese baseado no TPS61023.

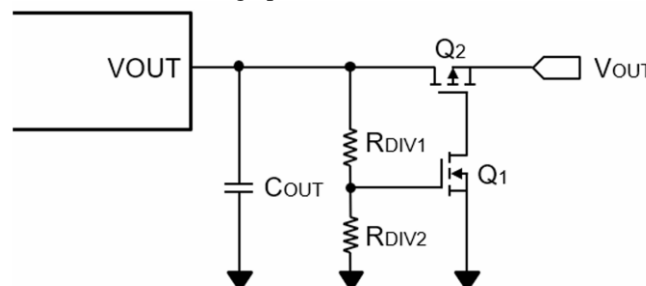


Fonte: adaptado de TEXAS INSTRUMENTS, 2024.

Para garantir estabilidade do barramento energético híbrido, o canal fotovoltaico incorpora estágio de desconexão ativa de carga, apresentado na Figura 11, permitindo isolamento automático em condições de falha, sobrecorrente ou operação fora da faixa segura de tensão.

Os circuitos de desconexão e proteção foram dimensionados para atuar dentro da faixa segura de operação dos capacitores LIC e do barramento energético. Foram adotados limiares típicos de sub tensão de 2,5 V e de sobretensão de 4,0 V por capacitor, evitando oscilações rápidas de conexão e desconexão do barramento.

Figura 11- Circuito de desconexão ativa de carga para isolamento do buffer fotovoltaico do barramento comum.

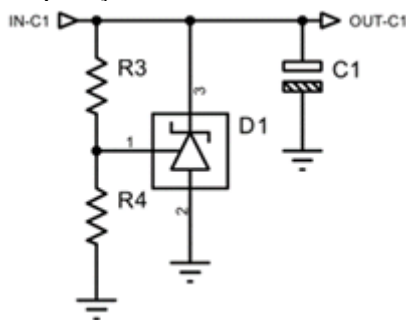


Fonte: adaptado de TEXAS INSTRUMENTS, 2024.

Durante a etapa experimental, foram utilizadas células de Poly-Si como substitutas funcionais das células de TJ. Devido à menor tensão gerada por essas células, o MPPT não opera na região nominal de projeto. Entretanto, essa limitação não compromete a validação termo energética do sistema, uma vez que a fase experimental se concentra na validação da integração térmica e da conversão energética global.

O canal termoelétrico apresenta comportamento elétrico distinto, caracterizado por níveis de tensão baixos e forte dependência do gradiente térmico instantâneo. Para viabilizar a extração energética nessas condições, foi adotado o conversor auto oscilante ELC-BVB120, capaz de iniciar operação com tensões próximas de 120 mV . O estágio de condicionamento e proteção do canal termoelétrico é apresentado na Figura 12.

Figura 12- Estágio de condicionamento e proteção do canal termoelétrico baseado em regulador shunt de precisão.



Fonte: o autor, 2026.

Embora a eficiência de conversão do canal termoelétrico seja inferior à observada no canal fotovoltaico, conforme dados do fabricante do conversor situando-se tipicamente entre 40% e 60% para tensões de entrada a partir de 100 mV , essa característica é tecnicamente aceitável, uma vez que a energia convertida tem origem no fluxo térmico residual do sistema fotovoltaico. Dessa forma, qualquer energia elétrica recuperada representa ganho líquido no balanço energético sistêmico.

O barramento energético híbrido é formado por capacitores LIC distribuídos entre buffers locais e barramento comum. Considerando operação até 4 V , a energia máxima teórica por capacitor é de aproximadamente 160 J . Considerando a faixa operacional útil do barramento de $2,5\text{ V}$ a 4 V , a energia efetivamente disponível por capacitor é aproximadamente $97,5\text{ J}$. Para a arquitetura completa, a energia útil total armazenada é da ordem de 1755 J .

Para órbitas LEO equatoriais próximas de 600 km de altitude, o período orbital típico é de aproximadamente 96 minutos. A fração de eclipse varia tipicamente entre 34% e 38% dependendo da geometria orbital. Os capacitores LIC distribuídos no barramento não foram dimensionados para sustentar integralmente o consumo do satélite durante o período de eclipse, função normalmente atribuída às baterias eletroquímicas principais do sistema EPS. Sua função principal é atuar como buffers energéticos intermediários, reduzindo ripple no barramento, absorvendo transientes de carga e contribuindo para suavizar a transição entre períodos de geração e

eclipse. Dessa forma, o banco capacitivo complementa o sistema de armazenamento principal, reduzindo o estresse cíclico das baterias e aumentando a robustez energética do sistema híbrido.

A utilização de *buffers* capacitivos distribuídos permite redução de *ripple*, desacoplamento dinâmico entre fontes, proteção contra falhas de conversores individuais e continuidade energética parcial durante eclipse, reduzindo o risco de *single point of failure* no subsistema EPS.

A modelagem física, térmica e eletrotérmica desenvolvida neste capítulo permitiu estabelecer uma arquitetura híbrida de geração e gerenciamento energético compatível com as restrições geométricas, térmicas e operacionais impostas por plataformas *CubeSat*. A integração entre os modelos de conversão fotovoltaica e termoelétrica e a arquitetura de condicionamento energético resultou em uma estratégia baseada em canais independentes de geração, *buffers* capacitivos distribuídos e desacoplamento ativo do barramento, garantindo estabilidade elétrica e robustez operacional sob condições térmicas e radiativas transientes.

Adicionalmente, a modelagem eletrotérmica parametrizada do módulo termoelétrico, aliada à estratégia de validação por substituição tecnológica, permitiu estabelecer uma correlação fisicamente consistente entre o modelo teórico e o comportamento esperado do sistema em condições operacionais representativas. Dessa forma, o presente capítulo estabelece as bases de engenharia necessárias para a implementação física do sistema STEG-CUBE e para a definição dos parâmetros experimentais utilizados na validação do modelo proposto.

Nesse contexto, o capítulo seguinte apresenta a infraestrutura experimental, os materiais empregados, os procedimentos de montagem e os protocolos de ensaio desenvolvidos para reproduzir, em ambiente laboratorial controlado, as condições térmicas e energéticas definidas neste capítulo, permitindo a validação experimental direta do modelo termo energético e eletrotérmico proposto.

4 DESIGN E DESENVOLVIMENTO

O presente capítulo descreve a infraestrutura experimental desenvolvida para a validação do modelo termoelétrico proposto para o sistema híbrido STEG-CUBE. A abordagem metodológica adotada baseia-se na correlação direta entre a modelagem físico-matemática apresentada no Capítulo 3 e a implementação experimental do protótipo funcional, permitindo avaliar o comportamento eletrotérmico do sistema sob condições térmicas controladas que reproduzem, em escala laboratorial, os envelopes operacionais esperados para aplicações em LEO.

Na infraestrutura experimental desenvolvida, apenas parte dos parâmetros ambientais característicos do ambiente LEO foi reproduzida diretamente em bancada. Foram reproduzidos experimentalmente os principais fenômenos físicos que governam a conversão termo energética do sistema, incluindo a irradiância incidente equivalente sobre o módulo fotovoltaico, o estabelecimento de gradientes térmicos controlados entre as faces quente e fria do módulo termoelétrico e a dissipação térmica controlada na interface estrutural do sistema. Outros parâmetros ambientais orbitais, como vácuo espacial, radiação infravermelha terrestre, contribuição de albedo e variações dinâmicas associadas ao movimento orbital, foram considerados no modelo termo energético apresentado no Capítulo 3 e utilizados na extrapolação do comportamento do sistema para condições orbitais completas.

A estratégia experimental foi estruturada de forma a permitir a validação física dos mecanismos de acoplamento termo energético entre conversão fotovoltaica e conversão termoelétrica, mantendo rastreabilidade metrológica entre simulação numérica, modelagem analítica e dados experimentais obtidos em bancada.

A metodologia experimental adotada segue uma estratégia hierárquica de validação em três níveis complementares. No primeiro nível, são caracterizados individualmente os componentes principais do sistema, módulo fotovoltaico e módulo termoelétrico, permitindo a identificação de parâmetros elétricos e térmicos fundamentais. No segundo nível, realiza-se a validação do módulo híbrido STEG em configuração de face geradora unitária, permitindo investigar o acoplamento termo energético entre as camadas fotovoltaica e termoelétrica. No terceiro nível, os resultados experimentais obtidos são utilizados para alimentar o modelo termo energético sistêmico apresentado no Capítulo 3, permitindo extrapolar o comportamento do sistema completo STEG-CUBE sob diferentes cenários orbitais.

A Figura 13 apresenta o conceito estrutural do sistema STEG-CUBE e o protótipo físico ilustrativo desenvolvido como referência construtiva. A Figura 13-(a) ilustra o modelo conceitual tridimensional do sistema híbrido, enquanto a Figura 13-(b) apresenta o protótipo físico

montado com três faces geradoras, representando a arquitetura mecânica e construtiva proposta para o sistema final.

Entretanto, devido às limitações inerentes à caracterização térmica controlada em ambiente laboratorial, a validação termoelétrica experimental foi realizada de forma unitária, por meio da caracterização individual de uma face geradora STEG por vez, utilizando bancada térmica desenvolvida.

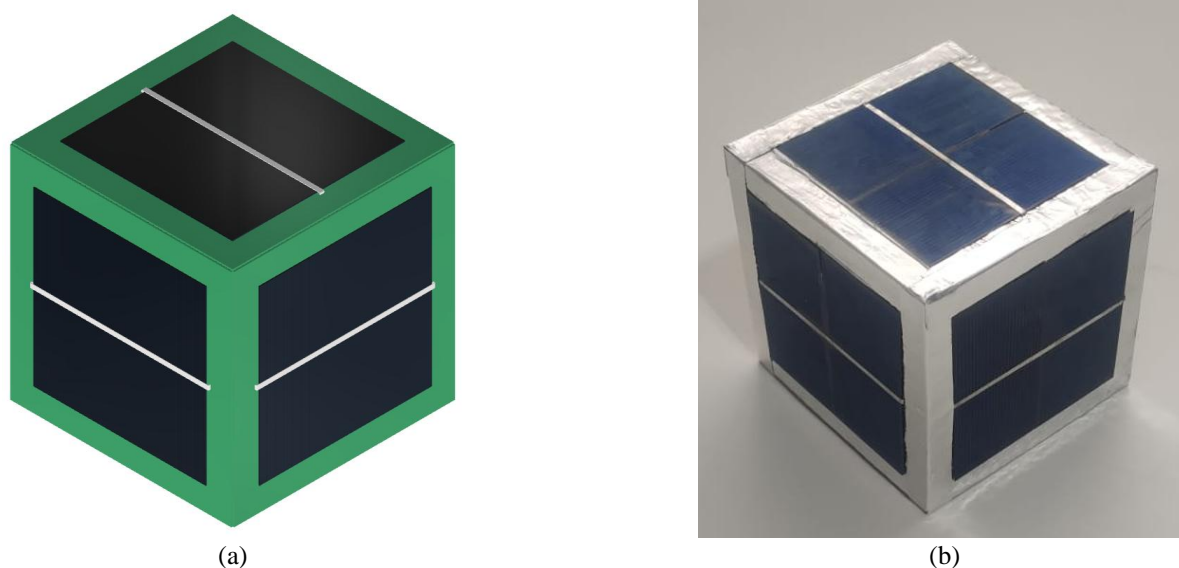
A caracterização individual de cada face geradora foi adotada para garantir controle preciso das condições térmicas e elétricas do experimento. Embora essa abordagem não reproduza diretamente efeitos tridimensionais de condução térmica entre múltiplas faces do *CubeSat*, esses efeitos foram considerados no modelo termo energético sistêmico apresentado no Capítulo 3. Nesse modelo, a interação térmica entre faces adjacentes, a condução estrutural através do chassi do satélite e a redistribuição de calor ao longo da estrutura foram incorporadas como resistências térmicas equivalentes no caminho de dissipação térmica. Dessa forma, a validação experimental unitária fornece os parâmetros fundamentais do comportamento eletrotérmico do módulo STEG, enquanto o modelo sistêmico permite extrapolar esses resultados para o comportamento multiface do sistema completo.

Essa abordagem permitiu impor gradientes térmicos controlados, garantir repetibilidade metrológica e reduzir variáveis experimentais não controladas associadas a efeitos tridimensionais de condução térmica estrutural.

A extrapolação do comportamento multiface do sistema completo foi realizada posteriormente por meio da aplicação do modelo termo energético validado experimentalmente, permitindo estimar o desempenho do sistema STEG-CUBE sob diferentes cenários orbitais de incidência solar apresentados no Capítulo 3 e analisados quantitativamente no Capítulo 5.

A estratégia experimental adotada baseia-se na utilização de componentes substitutos funcionalmente equivalentes, permitindo a validação física do acoplamento termoelétrico entre conversão fotovoltaica e termoelétrica sem a necessidade de utilização de dispositivos espaciais de alto custo. Nesse contexto, a substituição de células fotovoltaicas de tripla junção por células de silício policristalino não compromete a validação do modelo proposto, uma vez que o objetivo experimental se concentra na caracterização do balanço térmico do módulo fotovoltaico e do gradiente térmico aplicado ao TEG, e não na eficiência fotovoltaica absoluta do dispositivo. Para esse fim, foi desenvolvido um protótipo funcional de face geradora STEG, associado a uma plataforma automatizada de caracterização térmica capaz de impor gradientes térmicos controlados, registrar grandezas elétricas de baixa amplitude e executar ensaios repetíveis com elevada resolução temporal.

Figura 13- PoC do sistema STEG-CUBE. (a) Modelo conceitual do STEG-CUBE. (b) Protótipo físico ilustrativo com três faces geradoras montadas.



Fonte: o autor, 2026.

Adicionalmente, este capítulo apresenta a implementação experimental do sistema híbrido de gerenciamento de energia, incluindo os canais independentes de condicionamento fotovoltaico e termoelétrico, os estágios de proteção e desacoplamento do barramento energético e o sistema de armazenamento baseado em supercapacitores de íons de lítio. São descritos também os sistemas de instrumentação utilizados, os métodos de quantificação da irradiância incidente e os protocolos experimentais aplicados durante a campanha de ensaios, assegurando rastreabilidade metrológica e reprodutibilidade dos resultados experimentais.

Dessa forma, este capítulo estabelece a base experimental necessária para a análise dos resultados apresentada no Capítulo 5, assegurando coerência entre modelagem teórica, implementação física e validação experimental do conceito STEG aplicado a sistemas energéticos compactos para aplicações aeroespaciais.

4.1 ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL E DE VALIDAÇÃO

A estratégia experimental adotada nesta pesquisa foi estruturada para permitir a validação físico-experimental do modelo híbrido fotovoltaico-termoelétrico proposto, mantendo coerência com as condições de contorno estabelecidas no Capítulo 3 e respeitando as limitações práticas associadas a custo, disponibilidade de componentes e complexidade de implementação experimental.

Para viabilizar a validação experimental dentro dessas restrições, adotou-se uma abordagem baseada em validação por substituição, na qual dispositivos fotovoltaicos comerciais de Poly-Si foram utilizados para representar, sob a ótica térmica e de dissipação energética, o comportamento esperado de células fotovoltaicas espaciais de TJ.

Essa abordagem fundamenta-se no princípio do pior caso térmico. Células de Poly-Si apresentam maior degradação de eficiência com o aumento da temperatura e maior fração de energia dissipada na forma de calor quando comparadas às células de TJ. Dessa forma, a validação do sistema híbrido sob condições baseadas em silício estabelece um cenário experimental conservador, aumentando a confiabilidade da extrapolação dos resultados para aplicações espaciais.

A filosofia experimental adotada baseia-se na correlação direta entre três níveis complementares de validação: a validação física do acoplamento térmico entre as camadas estruturais do sistema híbrido; a validação eletrotérmica do comportamento do módulo termoeletrico sob gradientes térmicos controlados; e a validação funcional do sistema híbrido de geração e armazenamento energético operando de forma integrada. Essa abordagem assegura que os fenômenos físicos descritos na modelagem matemática sejam reproduzidos experimentalmente de forma consistente.

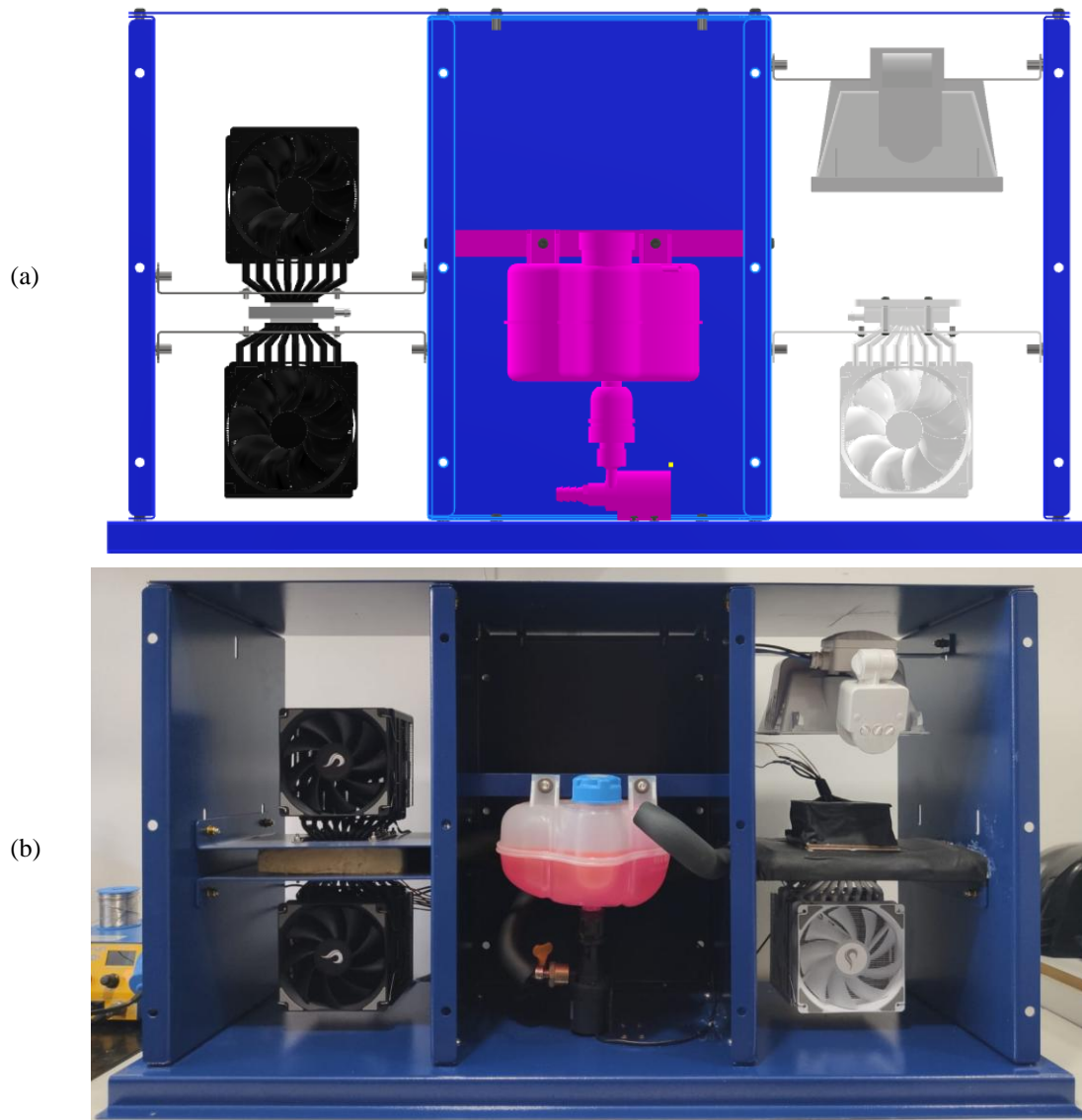
Do ponto de vista operacional, os ensaios foram projetados para reproduzir gradientes térmicos equivalentes aos observados em ciclos orbitais típicos de plataformas *CubeSat* em LEO, incluindo regimes de aquecimento intenso, resfriamento acelerado e operação em regime térmico transiente.

A infraestrutura experimental desenvolvida integra o protótipo STEG, a plataforma térmica de caracterização, o sistema de aquisição de dados e o sistema híbrido de gerenciamento energético, conforme apresentado na Figura 14.

A partir dessa infraestrutura experimental foi possível implementar protocolos de ensaio reprodutíveis, garantindo rastreabilidade metrológica e repetibilidade dos resultados obtidos. Essa consistência experimental é fundamental para permitir a correlação entre modelagem numérica, simulação eletrotérmica e validação física, estabelecendo base científica sólida para a análise dos resultados apresentada no Capítulo 5.

Dessa forma, a estratégia experimental adotada estabelece o elo entre a modelagem físico-matemática desenvolvida no Capítulo 3 e a verificação quantitativa da hipótese de pesquisa apresentada no Capítulo 5, assegurando coerência científica entre formulação teórica, implementação experimental e validação dos resultados.

Figura 14- Plataforma experimental de caracterização térmica e eletroenergética do sistema STEG-CUBE. (a) Projeto mecânico da bancada experimental desenvolvido para validação termo energética controlada. (b) Bancada experimental construída e utilizada nos ensaios de caracterização do sistema.



Fonte: o autor, 2026.

4.2 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO STEG

O protótipo experimental do sistema STEG foi desenvolvido com o objetivo de reproduzir, em escala laboratorial, a arquitetura física das faces geradoras do sistema proposto para aplicação em plataformas *CubeSat*, mantendo coerência direta com o modelo termo energético e eletrotérmico apresentado no Capítulo 3. A construção física foi orientada pela necessidade de garantir que o gradiente térmico imposto ao sistema ocorresse predominantemente sobre o material termoelétrico ativo, minimizando perdas associadas a resistências térmicas parasitas de interface e efeitos térmicos de borda.

A arquitetura implementada baseia-se na topologia de acoplamento térmico direto entre o módulo fotovoltaico e o módulo termoelétrico, com dissipação térmica controlada na face

oposta do conjunto, reproduzindo a topologia térmica prevista para operação orbital. Para viabilizar a validação experimental dentro das restrições de custo e disponibilidade tecnológica, foi adotada a estratégia de validação por substituição funcional, na qual células fotovoltaicas de Poly-Si foram utilizadas como substitutas térmicas conservadoras de células fotovoltaicas espaciais de TJ.

A Figura 15 apresenta as partes da implementação física do protótipo, evidenciando a correspondência entre as camadas funcionais projetadas e os elementos construtivos produzidos experimentalmente.

O módulo fotovoltaico experimental, Figura 15-(a), foi construído a partir de células com dimensões individuais de $78 \times 39 \text{ mm}$, interconectadas eletricamente em configuração paralela para compor uma área ativa aproximada de $78 \times 78 \text{ mm}$. Essa escolha geométrica garante cobertura térmica integral do módulo termoeletrico, reduzindo gradientes térmicos laterais e melhorando a uniformidade do fluxo térmico conduzido através do material termoeletrico. Do ponto de vista termo energético, essa configuração favorece a maximização do fluxo térmico útil disponível para conversão termoeletrica, contribuindo diretamente para o aumento da densidade energética superficial do sistema híbrido.

Para reduzir perdas térmicas laterais e garantir integridade estrutural, foi adotada uma estrutura composta por uma lâmina de fibra de vidro com espessura de 0,7 mm, associada a uma camada periférica de espuma de poliuretano expandido, ambas recortadas a laser para assegurar precisão dimensional. Essa configuração promove isolamento térmico lateral eficiente do módulo termoeletrico e viabiliza o correto acoplamento geométrico entre o módulo fotovoltaico de $78 \times 78 \text{ mm}$ e o módulo termoeletrico de $56 \times 56 \text{ mm}$, conforme ilustrado na Figura 15-(b) e (c).

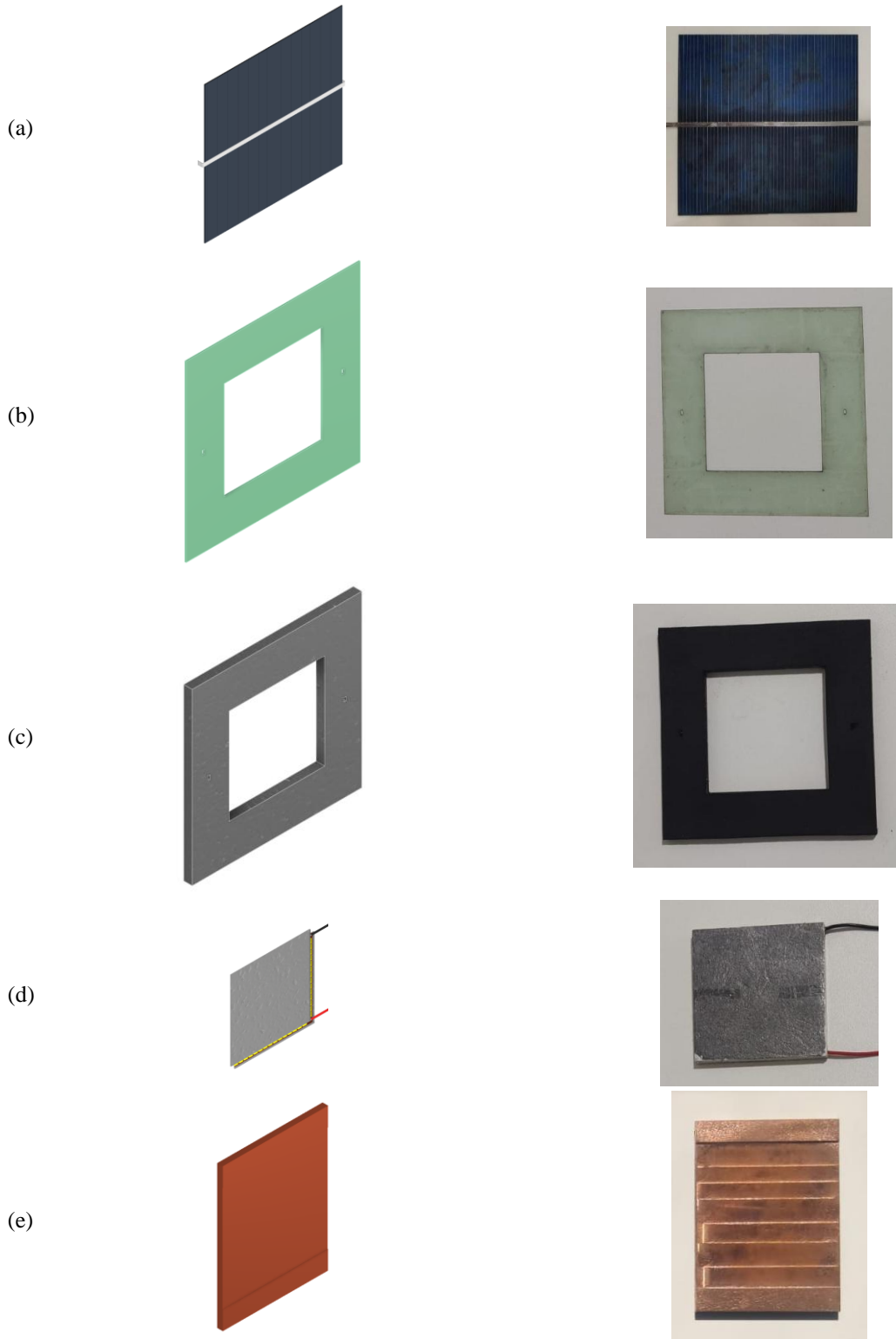
O elemento termoeletrico empregado, Figura 15-(d), foi o módulo *Custom Thermoelectric*® 1261G-7L31-24CX1, selecionado devido à sua robustez térmica e estabilidade eletrotérmica em regimes de operação com gradientes térmicos transientes. Embora o dispositivo suporte temperaturas de face quente superiores a $300 \text{ }^\circ\text{C}$, os ensaios experimentais foram conduzidos dentro do envelope térmico definido no Capítulo 3, garantindo operação segura e repetível do conjunto experimental.

A interface térmica primária entre o módulo fotovoltaico e o módulo termoeletrico foi implementada utilizando folhas de grafite de alta condutividade térmica pré-aplicadas às faces cerâmicas do módulo termoeletrico. Complementarmente, foi aplicada uma fina camada de adesivo térmico metálico nas interfaces fotovoltaico-termoeletrico e termoeletrico-dissipador, garantindo estabilidade mecânica, repetibilidade térmica e redução da resistência térmica de contato ao longo dos ciclos experimentais.

O dissipador térmico, Figura 15-(e), foi fabricado em cobre maciço usinado, com espessura de 3 mm , permitindo elevada condutividade térmica e resposta térmica rápida durante

ensaios em regime transiente. Essa configuração permite reproduzir, de forma controlada, a função estrutural do corpo do satélite como sumidouro térmico, conforme considerado na modelagem termo energética do sistema.

Figura 15- Estrutura física do protótipo STEG utilizado na validação experimental. (a) Módulo fotovoltaico em silício policristalino com células interconectadas formando área ativa de aproximadamente 78×78 mm. (b) Camada estrutural em fibra de vidro recortada a laser utilizada como interface mecânica e dimensional. (c) Camada de isolamento térmico lateral em espuma de poliuretano expandido recortada a laser. (d) Módulo termoeletrico Custom Thermoelectric 1261G com folhas de grafite de alta condutividade térmica pré-aplicadas. (e) Dissipador térmico usinado em cobre maciço.



A construção do protótipo foi realizada de forma modular, permitindo substituição individual de componentes, avaliação de diferentes condições de interface térmica e repetição de ensaios experimentais sob condições controladas. Essa flexibilidade experimental foi fundamental para validar o modelo eletrotérmico parametrizado desenvolvido nesta tese e para garantir a reprodutibilidade dos resultados experimentais apresentados no Capítulo 5.

Do ponto de vista de validação científica, a construção do protótipo foi orientada para permitir a medição direta das grandezas físicas utilizadas na validação da hipótese de pesquisa, incluindo potência elétrica gerada, gradiente térmico imposto ao módulo termoeletrico e densidade energética superficial do sistema híbrido. Dessa forma, a arquitetura experimental construída permite a avaliação direta da métrica de ganho energético relativo de forma a estabelecer quantitativamente o desempenho do sistema híbrido em relação a arquiteturas puramente fotovoltaicas sob condições térmicas equivalentes.

A correspondência entre a arquitetura funcional projetada, o modelo termo energético desenvolvido e a implementação física construída assegura que os ensaios experimentais representem adequadamente o comportamento energético esperado do sistema híbrido, garantindo rastreabilidade científica entre modelagem teórica, simulação numérica e validação experimental.

4.3 SELEÇÃO DOS COMPONENTES DO EPS

A implementação experimental do sistema híbrido de gerenciamento energético foi realizada com base na arquitetura de conversão paralela descentralizada definida no Capítulo 3. A seleção dos componentes eletrônicos priorizou dispositivos comerciais com elevada eficiência energética, baixa tensão de partida e comportamento estável sob condições dinâmicas de carga, características essenciais para aplicações em sistemas de EH de baixa potência.

O subsistema elétrico experimental foi projetado para validar o conceito de integração entre fontes fotovoltaicas e termoeletricas até o nível do barramento comum, mantendo a independência funcional entre os canais de geração. A etapa posterior de armazenamento híbrido com baterias e conversores dedicados para cargas úteis foi propositalmente excluída deste estudo, uma vez que o dimensionamento desses subsistemas depende diretamente do perfil energético específico da missão espacial.

No canal fotovoltaico, foi utilizado o conversor boost síncrono TPS61023, selecionado devido à sua elevada eficiência de conversão em baixas tensões de entrada e capacidade de partida autônoma a partir de aproximadamente $1,8V$. Essa característica é particularmente relevante para aplicações com células fotovoltaicas de TJ, cuja tensão típica de circuito aberto situa-se na faixa de $2,4V$ a $2,8V$ sob condições AM0. A topologia síncrona baseada em MOSFETs

internos reduz significativamente as perdas por condução quando comparada a conversores boost convencionais baseados em diodos *Schottky*, permitindo eficiências superiores a 90% nas condições típicas de operação do sistema.

Para maximizar a extração de potência do canal fotovoltaico, foi implementado controle de rastreamento do ponto de máxima potência baseado em histerese, permitindo adaptação dinâmica da impedância vista pela célula fotovoltaica. Essa estratégia apresenta robustez elevada frente a variações rápidas de irradiância e reduz a complexidade computacional quando comparada a algoritmos MPPT tradicionais baseados em perturbação e observação.

O canal termoelétrico foi implementado utilizando o conversor auto oscilante ELC-BVB120, baseado em topologia de oscilador de bloqueio com transformador elevador. Esse dispositivo permite operação com tensões de entrada extremamente reduzidas, a partir de 120 mV, possibilitando a recuperação energética mesmo em gradientes térmicos pequenos. Embora a eficiência desse estágio seja inferior à do canal fotovoltaico, situando-se entre 40% e 60%, sua utilização é justificada pelo caráter de recuperação energética, uma vez que a fonte térmica constitui energia residual do sistema.

Para proteção do barramento energético e prevenção de correntes reversas, foi implementado um circuito de desconexão real de carga, permitindo isolar eletricamente cada canal de geração em condições de operação fora do envelope seguro do barramento. Esse circuito também atua como mecanismo de proteção contra falhas dos conversores individuais, aumentando a robustez global do sistema híbrido.

O barramento energético comum foi implementado utilizando supercapacitores de íon-lítio com capacitância nominal de 20 F e tensão máxima de operação entre 3,8 V e 4,0 V. Esses dispositivos apresentam elevada densidade de potência, baixa resistência série equivalente e reduzida taxa de autodescarga quando comparados a supercapacitores convencionais baseados em dupla camada eletroquímica.

A utilização de supercapacitores como elemento intermediário de armazenamento permite desacoplar dinamicamente os perfis de geração e consumo energético, além de reduzir o estresse elétrico sobre os conversores DC-DC durante transientes rápidos de carga. Essa característica é particularmente relevante para sistemas híbridos, nos quais múltiplas fontes energéticas operam de forma assíncrona.

A seleção dos componentes do sistema EPS foi, portanto, orientada não apenas por critérios elétricos nominais, mas também pela compatibilidade funcional com a arquitetura híbrida proposta, garantindo estabilidade do barramento, robustez frente a falhas parciais e maximização do aproveitamento energético global do sistema.

4.4 INSTRUMENTAÇÃO E INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A confiabilidade dos resultados experimentais obtidos nesta pesquisa depende diretamente da qualidade metrológica dos instrumentos utilizados e da correta caracterização das incertezas associadas às medições realizadas. Considerando que o sistema híbrido STEG opera com grandezas elétricas e térmicas de baixa magnitude, especialmente no canal termoelétrico, a seleção dos instrumentos foi realizada priorizando elevada resolução, estabilidade temporal e compatibilidade com medições em regime transiente.

O sistema de aquisição experimental foi estruturado para permitir a medição simultânea de grandezas elétricas e térmicas, possibilitando a correlação direta entre gradiente térmico aplicado e resposta elétrica do módulo termoelétrico. Essa abordagem é fundamental para validar o modelo eletrotérmico parametrizado apresentado no Capítulo 3, especialmente no que se refere à dependência térmica do coeficiente de *Seebeck* e da resistência elétrica interna do módulo.

A caracterização elétrica dos módulos fotovoltaicos foi realizada utilizando o analisador de módulos solares PROVA 200A, permitindo a obtenção direta das curvas corrente–tensão (I–V) e potência–tensão (P–V). Esse equipamento apresenta resolução de milivolts e décimos de miliampere, garantindo precisão suficiente para caracterização de módulos fotovoltaicos de pequena área sob irradiância controlada.

Além das especificações técnicas do equipamento, foi registrada a configuração operacional utilizada durante os ensaios experimentais, garantindo rastreabilidade metrológica e reprodutibilidade dos resultados.

A Figura 16 apresenta a parametrização aplicada no analisador PROVA 200A durante os ensaios de caracterização fotovoltaica, incluindo faixa de varredura de corrente, irradiância de referência, área ativa do módulo e parâmetros de aquisição temporal.

Observa-se que os ensaios foram configurados para irradiância nominal de 1000 W/m^2 , área ativa de aproximadamente $0,006 \text{ m}^2$ e faixa completa de varredura de corrente do dispositivo, garantindo aquisição completa das curvas características I–V e P–V em condições equivalentes ao *Standard Test Conditions* (STC).

A utilização de parametrização fixa durante todos os ciclos de ensaio assegura consistência estatística entre medições e reduz incertezas associadas a variações operacionais do instrumento.

O monitoramento da irradiância incidente durante os ensaios em ambiente aberto foi realizado utilizando luxímetro digital UNI-T UT383BT. Embora não substitua piranômetros em aplicações meteorológicas de alta precisão, o uso de luxímetros calibrados é amplamente aceito em aplicações de engenharia experimental quando associado a fatores de conversão de eficácia luminosa

adequados. A conversão entre fluxo luminoso e irradiância foi realizada conforme metodologia descrita na Seção 4.6, permitindo estimar a irradiância global incidente com precisão adequada para ensaios comparativos.

Figura 16- Parametrização operacional do analisador PROVA 200A utilizada nos ensaios experimentais.

Information	Parameter
Time delay before scan :	100 <input type="text"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> mS <input type="button" value="Apply"/> (0 ~ 9999 ms)
Current Range of Scan begin :	3,000 <input type="text"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> A <input type="button" value="Apply"/> (0.0 mA ~ 6.000 A)
Current Range of Scan end :	0,0 <input type="text"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> mA <input type="button" value="Apply"/> (0.0 mA ~ 6.000 A)
Area of Solar Cell or Panel :	0,006 <input type="text"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> m2 <input type="button" value="Apply"/> (0.001 m2 ~ 9999 m2)
Irradiance :	1000 <input type="text"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> W/m2 <input type="button" value="Apply"/> (10 ~ 1000 W/m2, Test)
Single Test Point :	500,0 <input type="text"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> mA <input type="button" value="Apply"/> (0.0 mA ~ 6.000 A)
Alarm of Low Power :	1,000 <input type="text"/> <input type="button" value="+"/> <input type="button" value="-"/> mW <input type="button" value="Apply"/> (1.00 mW ~ 100.0 W)
<input type="button" value="Load"/> <input type="button" value="Apply All"/>	

Fonte: o autor, 2026.

Para medições elétricas de baixa tensão no canal termoeletrico, foi utilizado multímetro digital TRUE-RMS UNI-T UT61E+ com interface de aquisição via *datalogger* USB. Esse equipamento foi selecionado devido à sua elevada resolução em faixas de milivolts, característica fundamental para registro da tensão termoeletrica durante variações rápidas de gradiente térmico.

O monitoramento térmico foi realizado utilizando termistores NTC de dois valores nominais distintos, permitindo otimização da sensibilidade ao longo do envelope térmico operacional. Termistores de 10 $k\Omega$ foram utilizados para monitoramento da face fria, devido à maior sensibilidade térmica na faixa de temperaturas negativas e próximas à temperatura ambiente. Para a face quente, foram utilizados termistores de 100 $k\Omega$, reduzindo correntes de excitação e minimizando efeitos de auto aquecimento em temperaturas elevadas.

A análise de incerteza experimental foi realizada considerando as especificações de exatidão fornecidas pelos fabricantes, combinadas com erros associados ao condicionamento de sinal e resolução do sistema de aquisição. Para medições elétricas no canal termoeletrico, a incerteza expandida foi estimada considerando a soma quadrática das contribuições de resolução do instrumento, estabilidade térmica e ruído de aquisição.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as principais especificações metrológicas dos equipamentos utilizados durante os ensaios experimentais.

Tabela 3- Especificações metroológicas da instrumentação utilizada.

Instrumento	Função no Equipamento	Faixa de Operação Utilizada	Resolução	Exatidão
PROVA 200A (Solar Module Analyzer)	Caracterização I-V e P-V dos módulos Fotovoltaicos	0 – 6 V / 0 – 6 A	1 mV / 0,1 mA	±1%
Luxímetro Digital (UNIT UT383BT)	Monitoramento da Irradiância Incidente	0 - 199.900 Lux	100 Lux (>100 k)	±4%+8
Multímetro True-RMS (UNIT UT61E+ com Datalogger USB)	Registro da tensão transiente do TEG (Sincronizado)	V (DC)	0,0001V	±0.05%+5
Termistores NTC (10k beta=3950)	Monitoramento da face Fria	-40 °C a 50 °C	0,1°C (Via ADC 12-bit)	±1%
NTC (100k beta=3950)	Monitoramento da face Quente	0 a 200 °C	0,1°C (Via ADC 12-bit)	±1%

Fonte: o autor, 2026.

No caso das medições térmicas, a incerteza total foi estimada considerando tolerância do sensor NTC, erro de linearização da equação beta e resolução do conversor analógico-digital utilizado no sistema embarcado. Essa abordagem permite estabelecer intervalos de confiança realistas para os resultados experimentais, aumentando a robustez estatística das análises apresentadas no Capítulo 5.

A sincronização temporal das medições térmicas e elétricas foi realizada via sistema de aquisição integrado ao controlador embarcado da bancada experimental, garantindo alinhamento temporal entre os registros de temperatura e tensão. Essa sincronização é essencial para análise de comportamento transiente e validação das equações eletrotérmicas dependentes da temperatura média do módulo.

Adicionalmente, a definição do envelope térmico investigado experimentalmente foi suportada por análise eletrotérmica numérica preliminar do módulo termoelétrico utilizado no protótipo STEG. Essa análise considerou a variação paramétrica da temperatura da face quente e da face fria, permitindo estimar previamente a resposta elétrica do dispositivo em termos de tensão de circuito aberto, corrente elétrica e potência elétrica disponível.

Essa exploração paramétrica foi utilizada exclusivamente como ferramenta de planejamento experimental, permitindo identificar as regiões de maior sensibilidade eletrotérmica do módulo e garantir que os ensaios realizados em bancada abrangessem as condições mais representativas do comportamento físico do dispositivo. Os resultados completos dessa modelagem numérica são apresentados posteriormente como apoio à interpretação dos resultados experimentais.

Dessa forma, a infraestrutura metroológica implementada assegura que os dados experimentais obtidos sejam representativos, rastreáveis e adequados para validação do modelo físico proposto, garantindo consistência científica entre modelagem teórica e validação experimental.

4.5 BANCADA DE CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA

Para viabilizar a validação experimental do modelo eletrotérmico do sistema híbrido STEG sob condições térmicas controladas, foi desenvolvida uma plataforma de caracterização térmica automatizada dedicada. Essa plataforma foi projetada para reproduzir, em escala laboratorial, gradientes térmicos equivalentes aos observados em ciclos térmicos orbitais de plataformas *CubeSat* em LEO, permitindo a execução de ensaios repetíveis e com elevado controle paramétrico.

A inexistência de equipamentos comerciais capazes de reproduzir simultaneamente gradientes térmicos elevados, temperaturas negativas controladas e perfis térmicos dinâmicos motivou o desenvolvimento de uma bancada experimental proprietária. O sistema foi concebido para operar em malha fechada, permitindo a execução automatizada de perfis térmicos configuráveis e sincronização com o sistema de aquisição elétrica.

O núcleo de controle da plataforma baseia-se em um sistema embarcado com microcontrolador ESP32®, responsável pela execução dos algoritmos de controle térmico, aquisição de dados e interface de comunicação com o usuário. Essa arquitetura permite operação autônoma do sistema, com controle remoto via interface *Web* embarcada, eliminando a necessidade de softwares externos dedicados.

A arquitetura térmica da bancada foi projetada utilizando estratégia de refrigeração baseada em módulos termoelétricos, permitindo atingir temperaturas negativas na face fria e temperaturas elevadas na face quente de forma independente. O sistema de refrigeração utiliza três estágios termoelétricos associados a dissipadores líquidos e ventilação forçada, permitindo redução progressiva da temperatura do fluido refrigerante antes da aplicação no estágio final de controle térmico.

O primeiro e o segundo estágio utilizam módulos TEC12715 acoplados a dissipadores líquidos de $40 \times 80 \text{ mm}$ associados a ventiladores de alto fluxo, sendo responsáveis pela pré-refrigeração do fluido anticongelante do circuito térmico fechado. O terceiro estágio utiliza módulo TEC2-19008 operando como estágio de refinamento térmico, permitindo atingir temperaturas mínimas operacionais da bancada.

O fluido refrigerante circula continuamente através de bomba dedicada, garantindo homogeneidade térmica e resposta dinâmica rápida durante variações de carga térmica. Para minimizar perdas térmicas parasitas, foi utilizado isolamento térmico baseado em espuma de poliuretano expandido entre os módulos termoelétricos e os elementos estruturais da bancada.

A configuração mecânica geral da plataforma experimental é apresentada na Figura 14, onde é possível visualizar a integração entre os estágios termoelétricos, sistema de refrigeração líquida, estrutura mecânica e interfaces térmicas de ensaio.

Para padronização geométrica das superfícies de ensaio, foi implementado sistema de interfaces térmicas baseado em placas de cobre com dimensões de $10 \times 10 \text{ cm}$, permitindo repetibilidade das condições de contato térmico entre os dispositivos sob teste e a bancada experimental. Para garantir transferência térmica eficiente, foram utilizadas almofadas térmicas de alta condutividade térmica ($24 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) nas interfaces entre módulos termoelétricos e dissipadores.

A padronização das faces térmicas utilizadas nos ensaios experimentais pode ser observada na Figura 17. (a) Base da face fria em cobre $10 \times 10 \text{ cm}$; (b) Base da face fria em validação da mínima temperatura atingida com sensoriamento em redundância; (c) Base da face fria com aplicação da almofada térmica; (d) TEG com isolamento latera aplicado a base da face fria e (e) acoplamento base fria TEG com isolante e base quente com sensores em redundância aplicados entre o TEG e a almofada térmica.

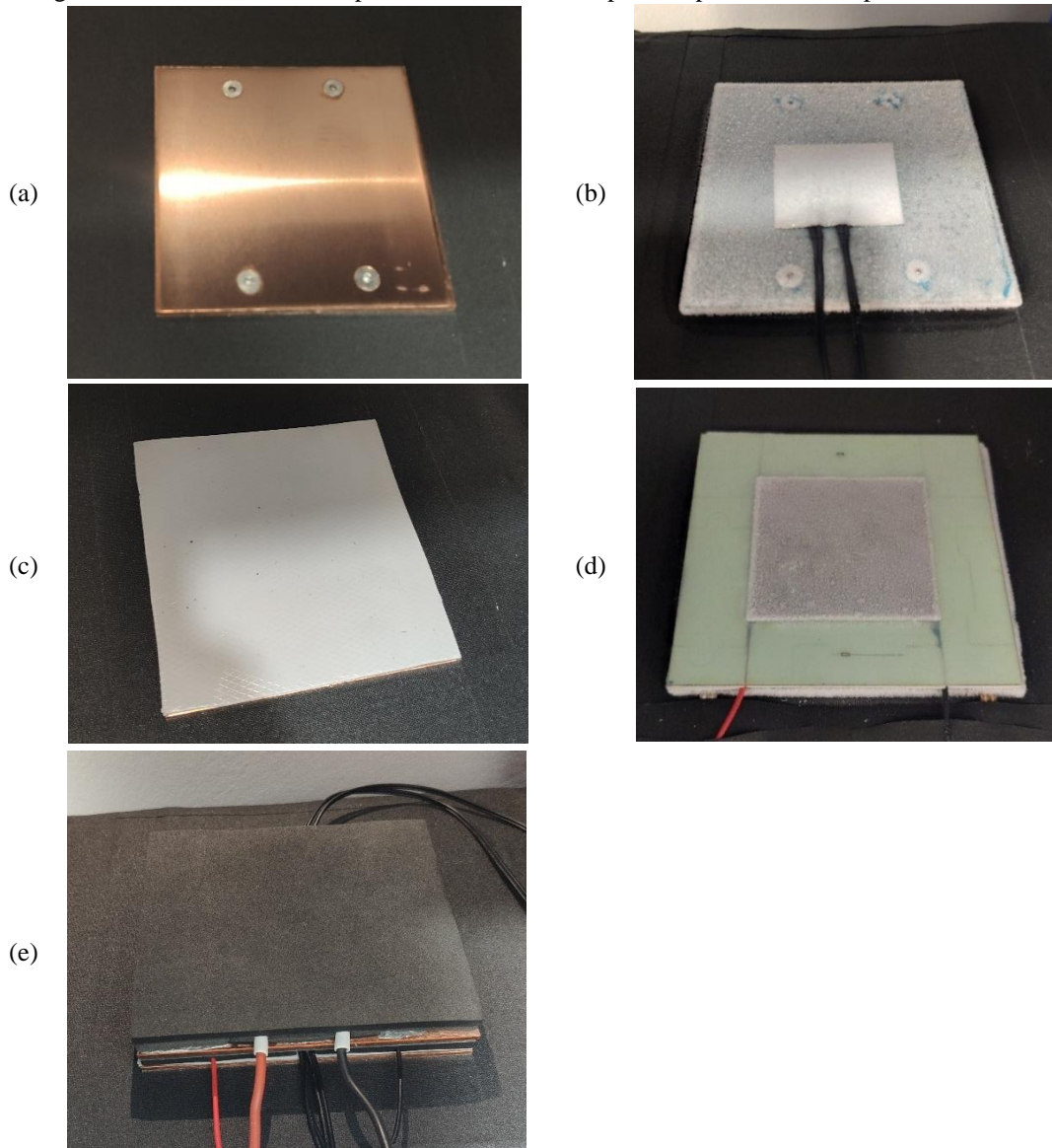
O sistema de controle térmico opera através de duas malhas independentes de controle PID, permitindo controle simultâneo e desacoplado das temperaturas das faces quente e fria. Essa arquitetura permite a imposição de gradientes térmicos controlados e reprodutíveis, fundamentais para caracterização eletrotérmica do módulo termoelétrico.

O monitoramento térmico do sistema foi implementado utilizando estratégia de sensoriamento híbrido baseada em termistores NTC com valores nominais distintos, permitindo otimizar a sensibilidade de medição ao longo de todo o envelope térmico operacional da bancada.

Para a face fria, foram utilizados termistores NTC de $10 \text{ k}\Omega$. Esses sensores apresentam maior sensibilidade térmica e melhor resolução na faixa de temperaturas entre aproximadamente $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ e $50 \text{ }^\circ\text{C}$, intervalo crítico para monitoramento do dissipador térmico e simulação de condições térmicas equivalentes ao regime de eclipse orbital.

Para a face quente, foram utilizados termistores NTC de $100 \text{ k}\Omega$. A elevada impedância elétrica desses sensores reduz a corrente de excitação necessária para leitura, minimizando efeitos de auto aquecimento e protegendo o conversor analógico-digital contra saturação em temperaturas elevadas. Essa configuração permite medições estáveis e linearidade adequada para temperaturas de operação próximas a $200 \text{ }^\circ\text{C}$ na fonte térmica.

Figura 17- Interfaces térmicas padronizadas utilizadas para acoplamento do dispositivo sob teste.



Fonte: o autor, 2026.

A utilização combinada de sensores NTC com diferentes impedâncias nominais permite otimizar simultaneamente resolução térmica, estabilidade de leitura e robustez do sistema de aquisição, garantindo maior confiabilidade na correlação entre gradiente térmico aplicado e resposta elétrica do módulo termoeletrico.

O sistema de aquisição de dados foi integrado diretamente ao controlador embarcado, permitindo registro sincronizado de temperatura e grandezas elétricas em regime contínuo. Os dados são armazenados em formato CSV e podem ser exportados diretamente para análise posterior.

A interface principal de operação do sistema permite monitoramento em tempo real das temperaturas das faces térmicas, diferencial térmico aplicado e estado dos atuadores térmicos, conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18-Interface principal de controle térmico e monitoramento em tempo real da bancada experimental.



RTC: 2026-02-13 14:21:17

Fonte: o autor, 2026.

Adicionalmente, a plataforma experimental dispõe de uma interface avançada de configuração e calibração, permitindo ajuste fino dos parâmetros de controle térmico e dos sensores utilizados na aquisição de dados. Essa interface permite a parametrização individual das constantes proporcional, integral e derivativa das malhas PID associadas às faces quente e fria, possibilitando otimização da resposta dinâmica do sistema para diferentes gradientes térmicos, Figura 19.a.

O sistema também permite a calibração individual dos sensores térmicos, incluindo ajuste do coeficiente beta dos termistores NTC e correção de offsets das curvas de leitura, Figuras 19-b e 19-c. Essa funcionalidade reduz erros sistemáticos de medição e garante consistência entre ensaios realizados sob diferentes condições térmicas.

Figura 19- Interface de configuração e calibração (a) Ajuste de PID. (b) Parâmetros de Sensor. (c) Calibração.

Ajustes

Relógio

Web Sync

Local Sync

(a)

Tuning PID

PTC (Quente)
Kp: Ki: Kd:

Peltier (Frio)
Kp: Ki: Kd:

SALVAR PID

RESTAURAR CALIBRAÇÃO PADRÃO

Sensor A1 (Pelt Princ)
Beta:

Temp. Real (Padrão)	Leitura ESP
<input type="text" value="-20,0"/> °C	<input type="text" value="-20,0"/> °C
<input type="text" value="0,0"/> °C	<input type="text" value="0,0"/> °C
<input type="text" value="30,0"/> °C	<input type="text" value="30,0"/> °C
<input type="text" value="60,0"/> °C	<input type="text" value="60,0"/> °C
<input type="text" value="90,0"/> °C	<input type="text" value="90,0"/> °C
<input type="text" value="120,0"/> °C	<input type="text" value="120,0"/> °C

Offset:

Sensor A2 (Pelt Aux)
Beta:

Temp. Real (Padrão)	Leitura ESP
<input type="text" value="-20,0"/> °C	<input type="text" value="-20,0"/> °C
<input type="text" value="0,0"/> °C	<input type="text" value="0,0"/> °C
<input type="text" value="30,0"/> °C	<input type="text" value="30,0"/> °C
<input type="text" value="60,0"/> °C	<input type="text" value="60,0"/> °C
<input type="text" value="90,0"/> °C	<input type="text" value="90,0"/> °C
<input type="text" value="120,0"/> °C	<input type="text" value="120,0"/> °C

Offset:

(b)

Sensor A3 (PTC Princ)
Beta:

Temp. Real (Padrão)	Leitura ESP
<input type="text" value="-20,0"/> °C	<input type="text" value="-20,0"/> °C
<input type="text" value="0,0"/> °C	<input type="text" value="0,0"/> °C
<input type="text" value="30,0"/> °C	<input type="text" value="30,0"/> °C
<input type="text" value="60,0"/> °C	<input type="text" value="60,0"/> °C
<input type="text" value="90,0"/> °C	<input type="text" value="90,0"/> °C
<input type="text" value="120,0"/> °C	<input type="text" value="120,0"/> °C

Offset:

(c)

Sensor A4 (PTC Aux)
Beta:

Temp. Real (Padrão)	Leitura ESP
<input type="text" value="-20,0"/> °C	<input type="text" value="-20,0"/> °C
<input type="text" value="0,0"/> °C	<input type="text" value="0,0"/> °C
<input type="text" value="30,0"/> °C	<input type="text" value="30,0"/> °C
<input type="text" value="60,0"/> °C	<input type="text" value="60,0"/> °C
<input type="text" value="90,0"/> °C	<input type="text" value="90,0"/> °C
<input type="text" value="120,0"/> °C	<input type="text" value="120,0"/> °C

Offset:

SALVAR SENSORES

Voltar

RTC: 2026-01-28 22:21:29

Fonte: o autor, 2026.

A plataforma experimental desenvolvida permite a execução de ensaios térmicos controlados em regime estacionário e transiente, garantindo elevada repetibilidade experimental e possibilitando a correlação direta entre modelagem eletrotérmica e resultados experimentais, estabelecendo base experimental robusta para análise dos resultados apresentada no Capítulo 5.

4.6 METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR

Para a realização dos ensaios experimentais em ambiente aberto, foi necessário estabelecer uma metodologia confiável para estimativa da irradiância solar incidente sobre os dispositivos sob teste. Embora piranômetros sejam considerados o padrão metrológico para medições absolutas de irradiância solar em aplicações meteorológicas, sua utilização apresenta limitações práticas em experimentos laboratoriais de engenharia, principalmente relacionadas a custo, disponibilidade e complexidade de integração com sistemas experimentais portáteis.

Dessa forma, optou-se pela utilização de luxímetro digital calibrado para estimativa indireta da irradiância solar global, adotando metodologia baseada na conversão entre fluxo luminoso e potência radiante incidente. Essa abordagem é amplamente utilizada em aplicações de engenharia aplicada, desde que sejam utilizados fatores de conversão compatíveis com o espectro médio da radiação solar incidente.

Adotou-se o fator de conversão utilizado como referência industrial por fabricantes de estações meteorológicas comerciais, tais como *Davis Instruments* (2016) e *Ambient Weather* (2024). Esses fabricantes utilizam metodologias de conversão baseadas na eficácia luminosa média da radiação solar global para estimativa indireta de irradiância a partir de sensores fotométricos.

Considerando eficácia luminosa média aproximada de $126,7 \text{ lm/W}$ para radiação solar direta em condições atmosféricas padrão, estabelece-se o fator de conversão:

$$Fator_{conv} = \frac{1}{126,7} \approx 0,0079 \frac{W/m^2}{Lux} \quad (28)$$

Assim, a irradiância solar estimada G_{est} é dada pela equação:

$$G_{est} \left[\frac{W}{m^2} \right] = 0,0079 \times L_{medido} [Lux] \quad (29)$$

Onde G_{est} representa a irradiância estimada e, L_{medido} representa a iluminância medida pelo luxímetro em Lux .

Essa metodologia foi aplicada durante os ensaios experimentais realizados em ambiente aberto, sendo considerados válidos apenas os ensaios realizados sob condições de estabilidade de irradiância.

Durante os experimentos, as leituras de iluminância estabilizaram próximas de 129.000 Lux , correspondendo a valores estimados de irradiância próximos de 1000 W/m^2 . Esse valor foi adotado como referência experimental equivalente às condições padrão de teste fotovoltaico (*Standard Test Conditions – STC*), correspondentes à irradiância de 1000 W/m^2 sob espectro AM1.5 Global.

Essa escolha representa uma condição conservadora quando comparada ao ambiente orbital, no qual a irradiância média solar aproxima-se de 1361 W/m^2 sob espectro AM0.

Dessa forma, os resultados experimentais obtidos em bancada podem ser considerados conservadores em relação ao cenário espacial real.

A utilização dessa metodologia permite estabelecer correlação consistente entre os resultados experimentais obtidos com células fotovoltaicas de silício policristalino em ambiente terrestre e o desempenho esperado para dispositivos fotovoltaicos espaciais sob condições orbitais. Essa normalização é fundamental para permitir a extrapolação dos resultados experimentais para o contexto de aplicação espacial proposto nesta tese.

Adicionalmente, a utilização de medições indiretas baseadas em iluminância apresenta elevada repetibilidade experimental, sendo particularmente adequada para ensaios comparativos e validação de modelos físicos, nos quais a consistência relativa das medições é mais relevante do que a determinação absoluta de irradiância com precisão meteorológica.

4.7 PROTOCOLO DE CARACTERIZAÇÃO

O protocolo experimental adotado nesta pesquisa foi desenvolvido com o objetivo de garantir reprodutibilidade metrológica, rastreabilidade das medições e correlação direta entre os dados experimentais obtidos e os modelos físico-matemáticos estabelecidos nos Capítulos 2 e 3. A metodologia foi estruturada de forma a permitir a caracterização termoelétrica do sistema híbrido em regime transiente e quase estacionário, reproduzindo condições térmicas equivalentes às variações térmicas observadas em órbitas LEO.

Como etapa complementar ao planejamento experimental, foi empregada modelagem paramétrica numérica do módulo termoelétrico, permitindo estimar previamente o comportamento eletrotérmico do dispositivo ao longo do envelope térmico de ensaio. Essa modelagem foi utilizada exclusivamente como ferramenta de suporte metodológico para definição das faixas de temperatura aplicadas experimentalmente, não sendo utilizada como substituto dos resultados experimentais obtidos nesta pesquisa.

A metodologia foi estruturada de forma a permitir a caracterização eletrotérmica do sistema híbrido em regime transiente e quase estacionário, reproduzindo condições térmicas equivalentes às variações térmicas observadas em órbitas LEO.

O procedimento experimental foi dividido em três fases principais: montagem e estabilização inicial, excitação térmica controlada e regime de relaxamento térmico com aquisição contínua de dados.

Inicialmente, realiza-se a montagem do dispositivo sob teste entre os blocos térmicos da bancada de caracterização. O acoplamento térmico é garantido pela aplicação de pressão mecânica controlada e utilização de interfaces térmicas de alta condutividade, minimizando

resistências térmicas parasitas. Nesta etapa são conectados os sensores térmicos e instrumentos elétricos, garantindo sincronização temporal entre medições térmicas e elétricas.

O monitoramento térmico é realizado utilizando sensores NTC distribuídos nas interfaces térmicas críticas do sistema. Na face fria são empregados termistores NTC de $10\text{ k}\Omega$, que apresentam maior sensibilidade e resolução na faixa de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo adequados para simulação das condições térmicas associadas ao eclipse orbital e monitoramento do dissipador térmico. Na face quente são utilizados termistores NTC de $100\text{ k}\Omega$, cuja elevada impedância reduz o risco de auto aquecimento e saturação do conversor analógico-digital em temperaturas elevadas, garantindo linearidade de leitura em temperaturas de até $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Como suporte ao planejamento experimental, a modelagem paramétrica permitiu estimar a variação das curvas características do módulo termoeletrico para diferentes combinações de temperatura nas faces quente e fria. Os resultados experimentais obtidos por meio deste protocolo são posteriormente comparados com as curvas elétricas modeladas apresentadas no Capítulo 3, permitindo a validação do modelo eletrotérmico parametrizado.

Essa análise permitiu definir os limites térmicos mínimos e máximos aplicados nos ensaios experimentais, assegurando que o protocolo experimental cobrisse a faixa completa de operação prevista para o dispositivo.

Após a estabilização inicial do sistema, inicia-se a fase de excitação térmica controlada. Por meio da interface *Web* da bancada, define-se o *setpoint* de temperatura da face quente. O sistema inicia a rampa de aquecimento da face superior enquanto simultaneamente ativa o sistema de refrigeração da face fria. Essa abordagem permite a imposição controlada do gradiente térmico e a reprodução de perfis térmicos equivalentes aos ciclos térmicos orbitais.

A dinâmica térmica apresentada na Figura 20 pode ser dividida em dois regimes físicos distintos, diretamente associados ao protocolo experimental adotado.

No intervalo inicial, Região I – excitação térmica ativa, observa-se o estabelecimento progressivo do gradiente térmico, caracterizado pelo aumento da temperatura da face quente e pela redução controlada da temperatura da face fria, resultante da atuação simultânea dos sistemas de aquecimento e refrigeração. Nesse regime, o sistema opera desacoplado com o módulo fixado a face de aquecimento.

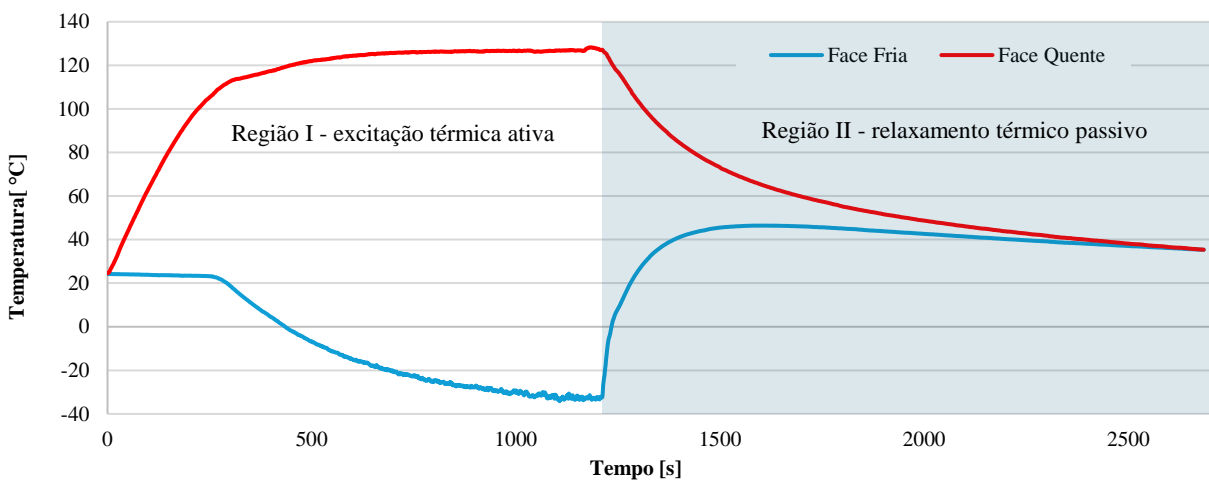
A transição entre os regimes ocorre aproximadamente em 1250 s , instante correspondente ao início da região sombreada nas Figuras 20 e 21, no qual o módulo e a fonte de aquecimento é acoplada a fonte de refrigeração e ambas as fontes são desligadas simultaneamente.

No regime subsequente, Região II – relaxamento térmico passivo, o sistema evolui sob dinâmica puramente passiva, governada por mecanismos de condução e convecção natural. Observa-se a redução progressiva do gradiente térmico, associada à dissipação de energia armazenada

nas massas térmicas do sistema. Nesse intervalo, destaca-se o aumento da temperatura da face fria, resultado da redistribuição interna de calor, evidenciando a inércia térmica do conjunto estrutural.

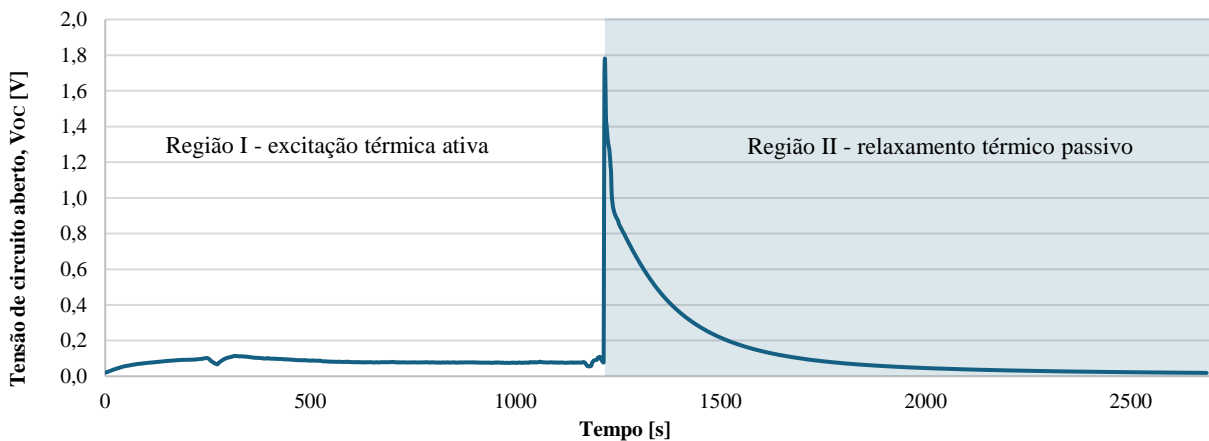
A resposta elétrica correspondente, apresentada na Figura 21, evidencia comportamento diretamente correlacionado com a dinâmica térmica. No instante de transição, aproximadamente 1250 segundos, observa-se um pico abrupto de tensão termoelétrica, associado à máxima taxa de variação do gradiente térmico, indicando a influência dos efeitos transientes no processo de conversão termoelétrica.

Figura 20- Dinâmica térmica da bancada de caracterização durante ensaio de excitação térmica controlada.



Fonte: o autor, 2026.

Figura 21- Registro temporal da tensão termoelétrica em função do gradiente térmico aplicado ao módulo.



Fonte: o autor, 2026.

Após esse pico, a tensão decai de forma aproximadamente exponencial, acompanhando a redução do gradiente térmico durante o regime de relaxamento. Esse comportamento confirma que a geração termoelétrica está associada tanto ao gradiente térmico quanto à sua dinâmica temporal, evidenciando a contribuição da inércia térmica como mecanismo adicional de geração energética.

Durante o regime de relaxamento térmico, obtém-se a varredura completa da curva característica do módulo termoelétrico, desde o gradiente térmico máximo até valores próximos de

equilíbrio térmico, permitindo validação experimental dos modelos eletrotérmicos parametrizados desenvolvidos nesta pesquisa.

A análise quantitativa dos dados experimentais permite identificar que o gradiente térmico máximo atingido durante o ensaio foi de $161,74\text{ }^{\circ}\text{C}$, ocorrendo em aproximadamente 1248 s, imediatamente antes da transição entre os regimes de excitação e relaxamento térmico.

A resposta elétrica associada apresenta valor máximo de tensão de circuito aberto $1,7818\text{ V}$, observada logo após o acoplamento das faces de aquecimento e refrigeração. Nota-se uma defasagem temporal entre os máximos térmico e elétrico, atribuída à dinâmica transiente do sistema e aos efeitos de inércia térmica presentes no acoplamento entre as interfaces quente e fria.

Esse comportamento evidencia que a geração termoelétrica não depende exclusivamente do valor instantâneo do gradiente térmico, mas também de sua dinâmica temporal, sendo influenciada pela taxa de variação do gradiente e pelos mecanismos de armazenamento e redistribuição de energia térmica no sistema.

Adicionalmente, a relação observada entre V_{oc} e ΔT_{max} apresenta coerência com o modelo teórico baseado no efeito *Seebeck*, validando experimentalmente o comportamento eletrotérmico do módulo sob condições transientes.

Os dados experimentais obtidos são armazenados automaticamente pelo sistema de aquisição embarcado e exportados em formato CSV, permitindo posterior processamento estatístico, validação dos modelos matemáticos e comparação direta com os resultados de simulação numérica apresentados no Capítulo 3.

A metodologia experimental adotada permite a caracterização completa do comportamento eletrotérmico do sistema híbrido STEG sob condições térmicas controladas e reproduzíveis, garantindo coerência entre modelagem teórica, simulação numérica e validação experimental. Essa abordagem assegura que os resultados obtidos possam ser utilizados de forma confiável na validação do conceito STEG-CUBE proposto nesta tese.

Com base na infraestrutura experimental desenvolvida, foi possível estabelecer um ambiente controlado e reproduzível para a validação dos modelos termoelétricos e fotovoltaicos propostos nesta tese. A construção do protótipo físico baseada em estratégia de substituição tecnológica, associada ao desenvolvimento da plataforma automatizada de caracterização térmica, permitiu a obtenção de dados experimentais com resolução temporal e precisão metrológica compatíveis com as grandezas elétricas e térmicas envolvidas. A utilização complementar de modelagem paramétrica numérica permitiu otimizar o planejamento experimental e assegurar que os ensaios cobrissem integralmente o envelope operacional previsto para o sistema STEG-CUBE, mantendo a distinção entre previsão teórica e validação experimental.

Os protocolos experimentais definidos asseguram a repetibilidade dos ensaios e a rastreabilidade das medições, permitindo correlacionar diretamente os resultados obtidos com os modelos matemáticos apresentados no Capítulo 3. Dessa forma, os procedimentos descritos nesta seção estabelecem a base experimental necessária para a caracterização eletrotérmica do sistema híbrido STEG sob condições térmicas controladas e reproduzíveis. Os dados obtidos por meio desse protocolo são utilizados na análise quantitativa do desempenho do sistema, conforme apresentado no Capítulo 5.

4.8 VALIDAÇÃO EM CONDIÇÃO DE PICO TÉRMICO

Como complemento à validação experimental realizada em bancada, foi conduzida uma análise simplificada com o objetivo de interpretar os resultados obtidos sob a ótica do comportamento térmico esperado em ambiente orbital. Essa análise não tem como objetivo reproduzir o regime operacional completo do sistema em órbita, mas sim justificar a condição experimental adotada, caracterizada pela imposição de gradientes térmicos elevados visando a avaliação do potencial máximo de geração termoelétrica do sistema.

Em plataformas *CubeSat*, o controle térmico é realizado predominantemente por meio de estratégias passivas, com eventual utilização de aquecimento localizado para proteção de subsistemas críticos. Diferentemente de satélites de maior porte, o sistema de controle térmico não mantém a temperatura constante, mas sim dentro de uma faixa operacional admissível, tipicamente entre 0 °C e 40 °C, com região ideal entre 10 °C e 30 °C, conforme práticas consolidadas de engenharia espacial (WERTZ; EVERETT; PUSCHELL, 2011; GILMORE, 2002; NASA, s.d.; CAL POLY, s.d.). Essa abordagem reflete o objetivo do projeto térmico de manter os subsistemas dentro de limites seguros de operação, e não impor condições térmicas estacionárias (WERTZ; EVERETT; PUSCHELL, 2011; ECSS, 2011).

Nesse contexto, a geração termoelétrica está diretamente associada à existência de gradientes térmicos entre regiões do sistema, os quais são naturalmente induzidos pelos ciclos orbitais de iluminação e eclipse. Durante a fase iluminada, a superfície externa tende a aquecer rapidamente devido à absorção da radiação solar, enquanto a massa interna apresenta resposta mais lenta devido à sua maior inércia térmica. Já durante o eclipse, ocorre resfriamento acelerado da superfície externa, enquanto a temperatura interna permanece elevada, resultando em gradientes térmicos significativos (GILMORE, 2002; ECSS, 2011).

Para interpretar esse comportamento, adotou-se um modelo térmico simplificado de dois nós, representando a massa térmica externa e a massa interna do *CubeSat*. Considerou-se uma órbita LEO típica com período aproximado de 90 a 96 minutos, composta por fases alternadas de iluminação e eclipse (WERTZ; EVERETT; PUSCHELL, 2011; NASA, s.d.; HEIDT et al., 2000). As

condições térmicas externas foram representadas por temperaturas radiativas equivalentes de aproximadamente 35 °C durante a iluminação e -25 °C durante o eclipse, valores compatíveis com modelos simplificados de excitação térmica orbital (GILMORE, 2002; ECSS, 2011; NASA, s.d.).

A temperatura interna foi modelada como variável no tempo, limitada por uma estratégia de controle térmico passivo dominante, resultando em um comportamento dinâmico governado pelo balanço entre dissipação interna, troca térmica com o ambiente e inércia térmica estrutural. O gradiente térmico aplicado ao módulo termoeétrico foi definido como:

$$\Delta T(t) = T_{int}(t) - T_{ext}(t) \quad (30)$$

onde $\Delta T(t)$ representa o gradiente térmico instantâneo aplicado ao módulo termoeétrico, $T_{int}(t)$ corresponde à temperatura da face quente associada ao subsistema fotovoltaico, e $T_{ext}(t)$ representa a temperatura da interface fria acoplada ao sistema dissipador.

Os resultados dessa análise indicam que os maiores valores de gradiente térmico ocorrem nas transições entre as fases de eclipse e iluminação, podendo atingir valores significativamente superiores aos observados em regime quase estacionário. Essas condições transientes representam, portanto, cenários de pico de geração termoeétrica.

Dessa forma, a estratégia experimental adotada nesta tese, baseada na imposição controlada de gradientes térmicos elevados em bancada, pode ser interpretada como uma representação de condições de pico térmico equivalentes às transições orbitais. Essa abordagem permite avaliar o limite superior de desempenho do sistema termoeétrico, sem a necessidade de reproduzir integralmente o ambiente orbital.

Assim, o experimento deve ser interpretado como uma validação em condição de máximo aproveitamento termoeétrico, e não como representação direta do regime térmico médio orbital.

É importante destacar que, em condições reais de operação, o sistema de controle térmico tende a reduzir os gradientes térmicos ao longo do tempo, estabelecendo um compromisso entre estabilidade térmica e aproveitamento energético. Conseqüentemente, os valores experimentais obtidos em bancada representam um cenário conservador voltado à caracterização do potencial máximo de geração termoeétrica.

Essa interpretação é fundamental para a análise dos resultados experimentais apresentada no Capítulo 5, na qual o desempenho do sistema híbrido é avaliado sob a perspectiva de ganho energético incremental. Nesse contexto, os resultados obtidos devem ser entendidos como limites superiores de desempenho associados a condições transientes de operação, servindo como referência para estimativas de contribuição termoeétrica em cenários orbitais reais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta a análise integrada dos resultados experimentais e numéricos obtidos para o sistema híbrido STEG-CUBE, estabelecendo a correlação direta entre a modelagem física, a modelagem termo energética, o modelo eletrotérmico parametrizado e o comportamento experimental observado em bancada. A discussão é conduzida de forma progressiva, iniciando pela validação dos subsistemas isolados, avançando para a avaliação do desempenho do sistema híbrido integrado e culminando na verificação quantitativa da hipótese de aumento da densidade energética superficial em arquiteturas híbridas fotovoltaico-termoelétricas aplicadas a plataformas *CubeSat*.

Conforme discutido na Seção 4.8, os ensaios experimentais foram conduzidos sob condições de excitação térmica controlada representativas de cenários de gradiente térmico elevado, não correspondendo diretamente ao regime térmico médio orbital. Dessa forma, os resultados apresentados neste capítulo devem ser interpretados como representativos do comportamento do sistema em regime transiente sob condições térmicas relevantes, sendo utilizados como referência para análise do potencial de aproveitamento energético do sistema híbrido.

A análise experimental é estruturada com base na comparação direta entre resultados medidos e valores estimados pelo modelo eletrotérmico, utilizando métricas de erro absoluto e erro quadrático médio (RMSE) para quantificar a aderência entre modelo e comportamento físico real do módulo termoelétrico. Complementarmente, são avaliados parâmetros físicos derivados, como a sensibilidade da potência gerada em função do gradiente térmico aplicado, permitindo verificar a coerência física do modelo ao longo do envelope térmico operacional investigado experimentalmente.

Na sequência, o desempenho energético do sistema híbrido é avaliado sob diferentes cenários térmicos e geométricos representativos de condições orbitais típicas de plataformas *CubeSat* em órbita terrestre baixa, incluindo cenários de incidência solar normal, incidência em aresta e incidência em vértice. Essa abordagem permite avaliar não apenas o desempenho instantâneo do sistema, mas também sua contribuição para o balanço energético global e para a robustez operacional do subsistema de potência em regime orbital.

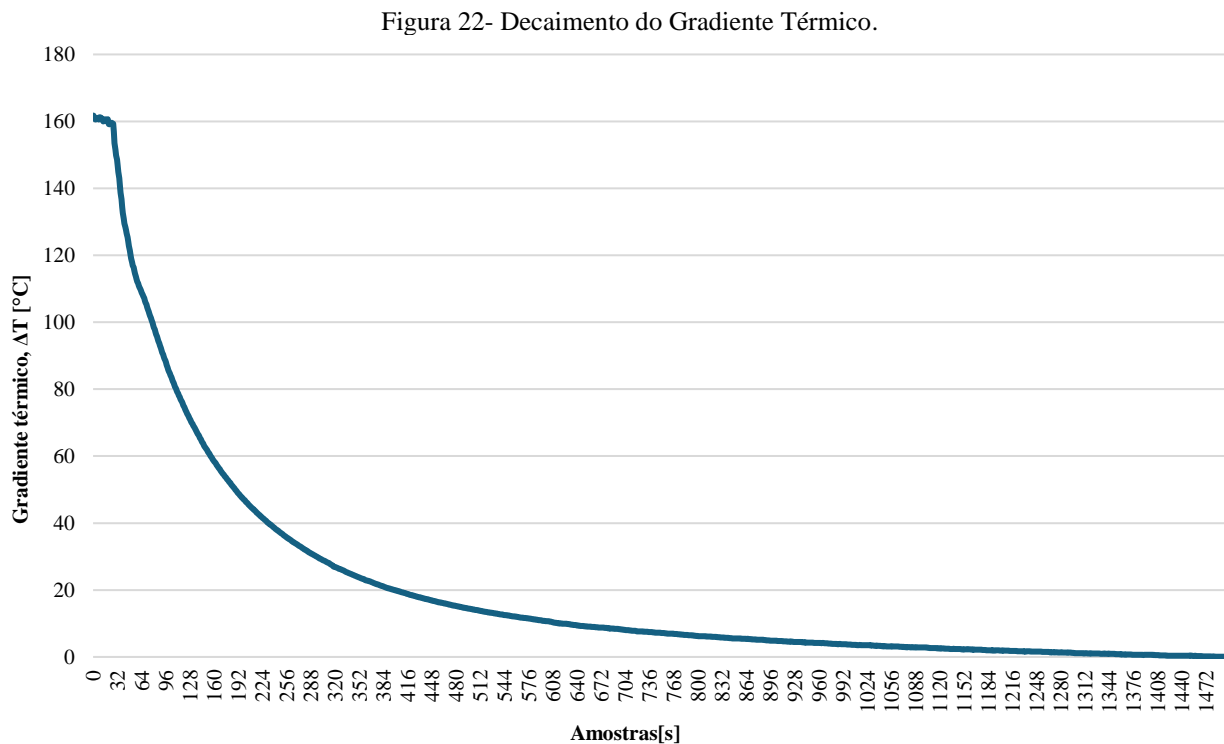
Por fim, os resultados experimentais e energéticos são utilizados para realizar a verificação quantitativa da hipótese central desta tese, baseada na comparação da densidade energética superficial do sistema híbrido STEG com arquiteturas puramente fotovoltaicas sob condições térmicas equivalentes. Dessa forma, este capítulo estabelece a validação científica do conceito STEG-CUBE, conectando diretamente modelagem teórica, validação experimental e aplicabilidade sistêmica em missões espaciais compactas.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSISTEMA TERMOELÉTRICO

A validação experimental do módulo termoeétrico foi conduzida a partir dos dados obtidos na bancada automatizada de caracterização térmica descrita no Capítulo 4, utilizando sistema de aquisição sincronizado entre grandezas térmicas e elétricas. A análise considera exclusivamente a janela experimental correspondente à fase de relaxamento térmico, imediatamente posterior ao pico de excitação, garantindo a avaliação do sistema sob condições fisicamente representativas da conversão termoeétrica associada à inércia térmica estrutural.

O protocolo experimental adotado permite a observação simultânea da dinâmica térmica do sistema e da resposta elétrica do módulo termoeétrico sob regime transiente controlado e durante a fase de relaxamento térmico estrutural. Essa abordagem reproduz, em escala laboratorial, condições térmicas análogas às transições orbitais entre iluminação solar e eclipse, particularmente no que se refere à ocorrência de gradientes térmicos elevados entre períodos de iluminação solar e eclipse.

A dinâmica de decaimento térmico observada experimentalmente é apresentada na Figura 22, que mostra a evolução temporal do gradiente térmico após o desligamento das fontes ativas de aquecimento e refrigeração até o equilíbrio.



Fonte: o autor, 2026.

Observa-se comportamento característico de relaxamento térmico com tendência aproximadamente exponencial, característico de sistemas multicamadas dominadas por condução

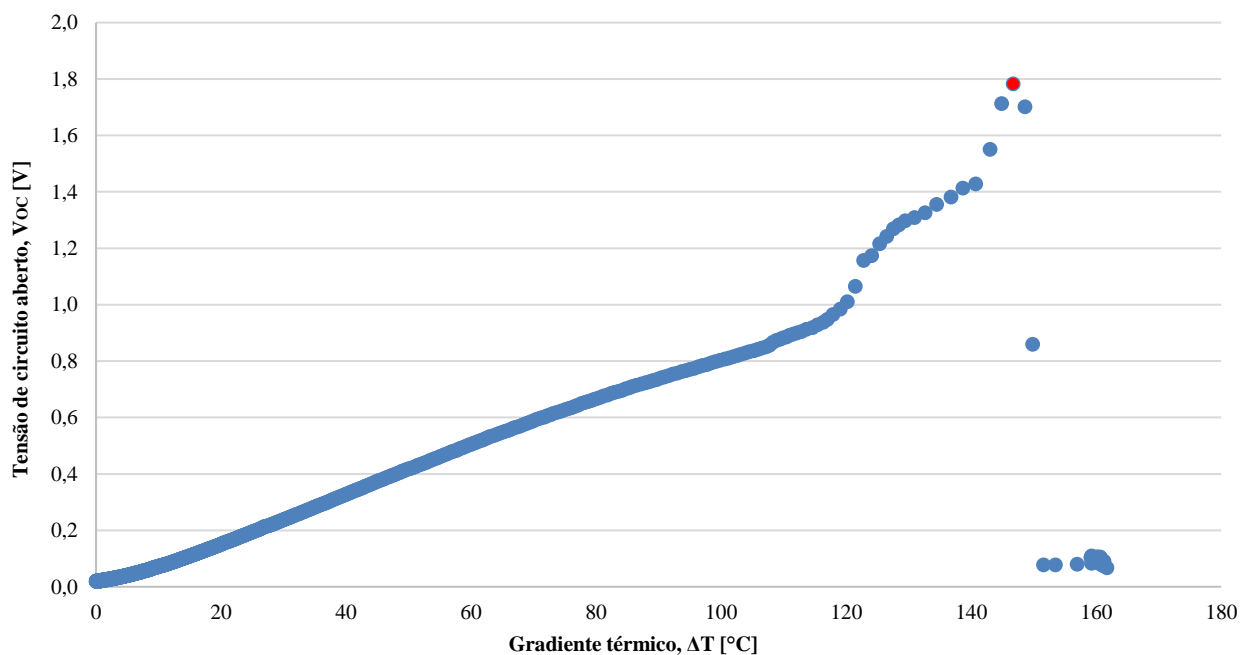
térmica e acoplamento estrutural. O gradiente térmico máximo experimental atingido foi de $161,74\text{ }^{\circ}\text{C}$, a partir do qual inicia-se o regime de dissipação térmica passiva.

O decaimento suave do gradiente térmico indica elevada inércia térmica do conjunto STEG, evidenciando que a energia térmica armazenada na estrutura continua sendo transferida ao módulo termoeletrico mesmo após a remoção da excitação térmica externa.

A análise do *dataset* experimental indica que o intervalo útil de conversão termoeletrica, definido como o período entre o pico térmico e o retorno ao equilíbrio térmico estrutural, apresenta duração aproximada de 1499 segundos, equivalente a cerca de 25 minutos. Esse tempo caracteriza a constante térmica efetiva do conjunto estrutural STEG e demonstra a capacidade do sistema de manter geração termoeletrica útil mesmo após a remoção da excitação térmica ativa, comportamento diretamente associado ao conceito de exploração da inércia térmica estrutural proposto nesta tese.

A resposta elétrica correspondente é apresentada na Figura 23, que relaciona a tensão de circuito aberto experimental com o gradiente térmico aplicado ao módulo termoeletrico.

Figura 23- V_{oc} Experimental em Função do Gradiente Térmico.



Fonte: o autor, 2026.

Os resultados experimentais indicam tensão máxima de circuito aberto de $1,7818\text{ V}$, associada aos maiores gradientes térmicos, e valor médio de aproximadamente $0,151\text{ V}$ ao longo da janela útil de conversão. Observa-se relação monotônica crescente entre gradiente térmico e tensão gerada, em concordância com o modelo termoeletrico baseado no efeito *Seebeck*, no qual a tensão gerada depende simultaneamente do gradiente térmico aplicado e da temperatura média do dispositivo.

A partir dos valores máximos experimentais, estima-se um coeficiente de *Seebeck* efetivo médio de $11\text{mV}/\text{K}$, esse valor deve ser interpretado como um parâmetro equivalente médio, representativo da faixa de operação térmica do experimento. Em dispositivos termoelétricos reais, o coeficiente de *Seebeck*, a resistência elétrica interna e a condutividade térmica são funções da temperatura média, o que implica comportamento não linear ao longo da faixa de operação.

Adicionalmente, por conta dessa característica observa-se maior dispersão experimental nos maiores gradientes térmicos, fenômeno fisicamente consistente com a maior sensibilidade paramétrica do módulo termoelétrico em regimes térmicos elevados, incluindo efeitos de variação da resistência elétrica interna e não linearidades associadas às propriedades termoelétricas dependentes da temperatura.

A correlação entre a variação temporal do gradiente térmico e a resposta elétrica do módulo confirma o comportamento previsto pela modelagem eletrotérmica parametrizada apresentada no Capítulo 3. A análise conjunta das curvas térmicas e elétricas demonstra relação funcional monotônica entre gradiente térmico aplicado e tensão elétrica gerada, validando a representação física adotada para o comportamento do módulo termoelétrico sob regime transiente.

Além disso, a persistência da geração termoelétrica durante a fase de relaxamento térmico valida experimentalmente a hipótese central desta tese, segundo a qual a inércia térmica estrutural do sistema STEG pode ser explorada como mecanismo adicional de geração energética, especialmente durante transições orbitais entre iluminação solar direta e eclipse.

De forma integrada, os resultados experimentais demonstram elevada coerência física entre modelagem teórica, simulação numérica e comportamento experimental observado, estabelecendo base científica sólida para a análise do sistema híbrido completo apresentada nas seções subsequentes.

Ressalta-se que os resultados obtidos nesta seção são representativos de regime transiente controlado sob gradientes térmicos elevados, conforme discutido na Seção 4.8, não correspondendo diretamente ao regime térmico médio orbital.

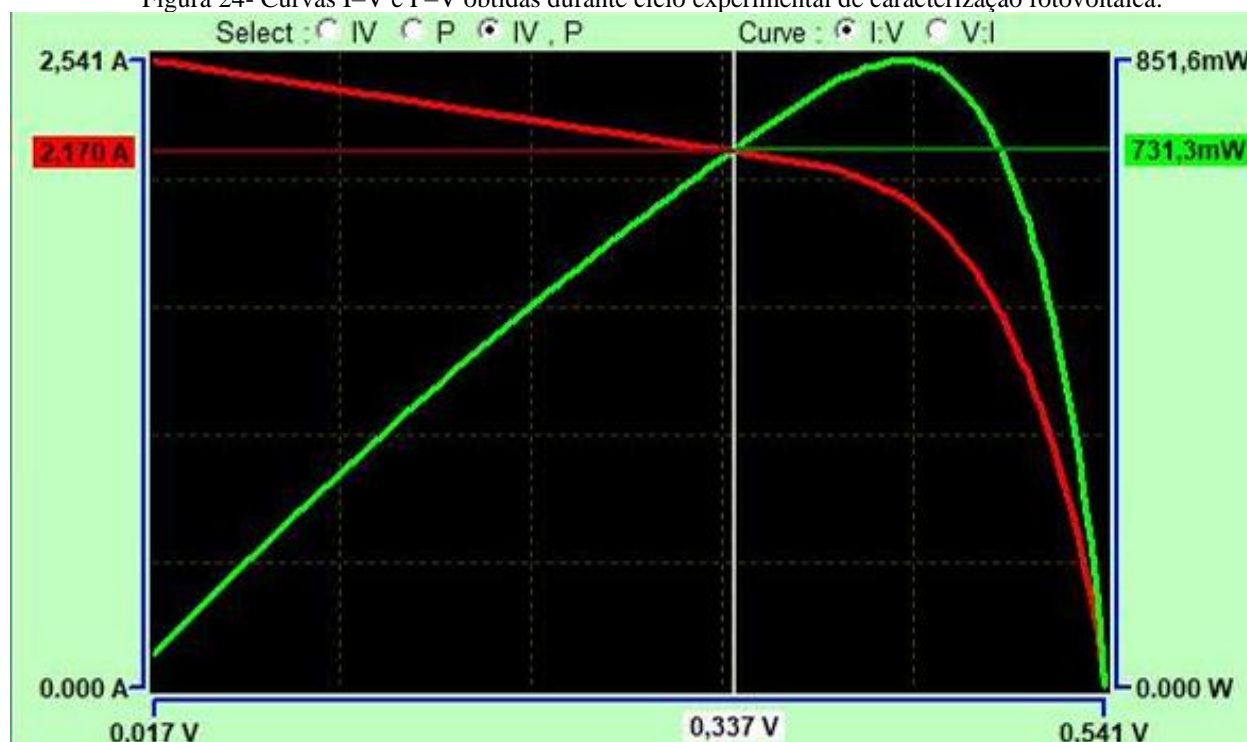
5.2 CARACTERIZAÇÃO DO SUBSISTEMA FOTOVOLTAICO

A caracterização experimental do subsistema fotovoltaico foi realizada com o objetivo de validar os parâmetros elétricos efetivos do arranjo fotovoltaico empregado no protótipo STEG e verificar a homogeneidade eletroenergética entre as faces geradoras. Essa etapa é fundamental para garantir que a base energética primária do sistema híbrido seja representada por dados experimentais reais, assegurando coerência com a modelagem termo energética desenvolvida no Capítulo 3.

Para essa finalidade, foram caracterizados experimentalmente quatro módulos fotovoltaicos, cada um submetido a três ciclos consecutivos de ensaio, totalizando doze medições independentes. Os ensaios foram realizados utilizando o analisador de módulos solares PROVA 200A, que permite a obtenção automática das curvas corrente–tensão (I–V) e potência–tensão (P–V) para cada ciclo de medição.

A Figura 24 apresenta um exemplo representativo das curvas experimentais obtidas durante a caracterização elétrica dos módulos fotovoltaicos.

Figura 24- Curvas I–V e P–V obtidas durante ciclo experimental de caracterização fotovoltaica.



Fonte: o autor, 2026.

Durante os ensaios em ambiente aberto, a irradiância global incidente foi monitorada continuamente por meio de luxímetro calibrado, registrando valor médio aproximado de 129.000 *Lux*. Considerando o fator de conversão adotado na metodologia experimental (0,0079 W/m^2 por *Lux*), obteve-se irradiância média estimada de aproximadamente 1019 W/m^2 . Esse valor encontra-se ligeiramente acima das condições padrão STC (1000 W/m^2), garantindo operação próxima da saturação elétrica das células durante os ensaios de potência máxima.

As medições foram realizadas individualmente para cada módulo fotovoltaico, sendo posteriormente calculadas as médias dos parâmetros elétricos característicos. Os resultados consolidados são apresentados na Tabela 4.

A análise estatística dos resultados demonstra elevada repetibilidade experimental entre os módulos avaliados. O desvio padrão da potência máxima corresponde a aproximadamente 5% do valor médio, resultando em coeficiente de variação inferior a 6%. Esse nível de dispersão

confirma a uniformidade eletroenergética do conjunto fotovoltaico e valida a premissa de simetria energética adotada nas simulações de atitude orbital apresentadas no Capítulo 3.

Tabela 4- Resultados médios obtidos para os quatro módulos avaliados.

ID Módulo	Potência Máxima	Eficiência (η)	Fator de Preenchimento (FF)	Tensão V_{oc}	Estabilidade Térmica
Painel 1	0,860 W	13,84%	0,55	0,550 V	+1,17%
Painel 2	0,828 W	13,31%	0,60	0,549 V	-1,71%
Painel 3	0,755 W	12,15%	0,55	0,550 V	-1,88%
Painel 4	0,805 W	12,95%	0,55	0,547 V	-0,67%

Fonte: o autor, 2026.

Com base nos resultados experimentais, foram adotados como parâmetros conservadores para modelagem sistêmica uma eficiência média de 13,06% e potência média de 0,812 W por face ativa. Esses valores foram utilizados na extrapolação do comportamento energético das demais faces do *CubeSat*, garantindo que o balanço energético global do sistema seja fundamentado em dados empíricos representativos, e não exclusivamente em valores nominais de fabricante.

Além da caracterização elétrica, os ensaios permitiram avaliar indiretamente o comportamento térmico do arranjo fotovoltaico. Observou-se consistência térmica entre os quatro módulos testados, indicando homogeneidade na dissipação térmica entre as faces do protótipo. Esse resultado é particularmente relevante para a validação do sistema híbrido STEG, pois garante condições térmicas equivalentes entre faces durante os ensaios de integração com o subsistema termoeletrônico.

Ressalta-se que os valores obtidos correspondem ao cenário experimental baseado em células de Poly-Si, utilizadas como substitutas funcionais das células fotovoltaicas espaciais de TJ previstas para a configuração de voo. Considerando a maior eficiência de conversão das células de TJ, espera-se desempenho elétrico superior na implementação final do sistema, mantendo-se, entretanto, a validade das conclusões térmicas e eletroenergéticas obtidas neste estudo.

Dessa forma, a validação experimental do subsistema fotovoltaico estabelece a base energética primária do sistema híbrido proposto. A caracterização confiável dessa fonte permite, nas análises subsequentes, isolar e quantificar a contribuição incremental do canal termoeletrônico para o balanço energético global do sistema STEG-CUBE, permitindo avaliação direta dos ganhos energéticos associados à arquitetura híbrida proposta nesta tese.

5.3 ANÁLISE DO SISTEMA INTEGRADO

A análise do sistema integrado STEG foi conduzida a partir da correlação direta entre os resultados experimentais obtidos na bancada térmica automatizada e as previsões do modelo eletrotérmico parametrizado desenvolvido no Capítulo 3. O objetivo desta etapa consiste em validar

o comportamento físico do sistema híbrido STEG sob condições experimentais controladas representativas de regimes térmicos transientes relevantes e verificar a capacidade do modelo matemático em representar o desempenho elétrico do módulo termoeletrico em regime dinâmico e transiente.

A execução do protocolo experimental descrito no Capítulo 4 permitiu a obtenção simultânea das curvas térmicas e elétricas do sistema. A análise sincronizada dessas grandezas confirma a relação funcional direta entre gradiente térmico aplicado e geração termoeletrica, conforme previsto pelo modelo baseado na dependência térmica do coeficiente de *Seebeck* e da resistência elétrica interna do módulo termoeletrico.

Durante a fase posterior ao pico térmico, considerada fisicamente representativa do regime real de conversão termoeletrica, observou-se manutenção da geração elétrica mesmo após o desligamento das fontes ativas de aquecimento e refrigeração. Esse comportamento decorre diretamente da inércia térmica estrutural do sistema e valida experimentalmente a possibilidade de recuperação energética durante fases de relaxamento térmico, fenômeno diretamente associado às transições orbitais entre períodos de iluminação solar e eclipse.

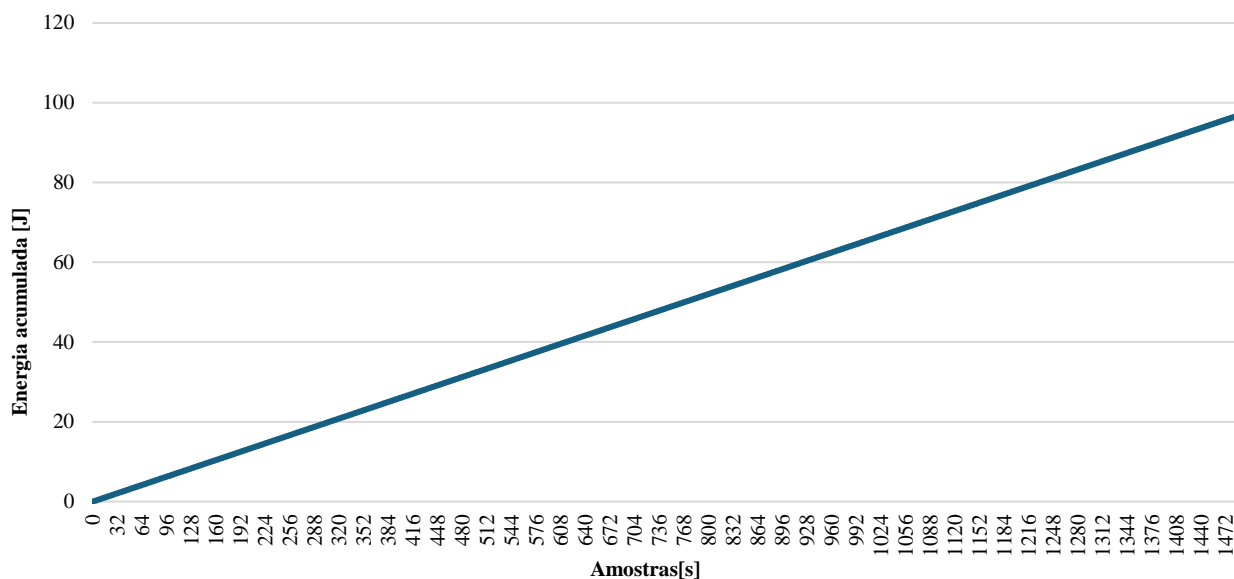
A potência elétrica efetivamente transferida ao barramento energético do sistema não pode ser medida diretamente devido à natureza auto oscilante e pulsada do conversor termoeletrico utilizado. Para contornar essa limitação instrumental, foi adotado o método da energia acumulada no capacitor do barramento, baseado na relação física entre energia armazenada e variação temporal da tensão no capacitor.

A dinâmica de transferência energética ao barramento é apresentada na Figura 25, que ilustra a evolução temporal da energia elétrica acumulada no sistema durante o regime útil de conversão termoeletrica.

Observa-se comportamento progressivo de acumulação energética ao longo da fase de relaxamento térmico, evidenciando que o sistema continua convertendo energia térmica residual em energia elétrica útil mesmo na ausência de excitação térmica ativa. Esse comportamento reforça o papel do módulo termoeletrico como conversor energético complementar, operando de forma particularmente relevante em regimes transientes.

Considerando o capacitor de armazenamento de 20 F utilizado no sistema e sua faixa operacional típica entre $2,5\text{ V}$ e 4 V , conforme especificação do fabricante, foi possível estimar a potência média transferida ao barramento durante a fase útil de conversão termoeletrica. Utilizando o intervalo experimental real de aproximadamente 1499 segundos observado no datalogger pós pico térmico, obteve-se taxa média de variação de tensão equivalente a aproximadamente $0,001\text{ V/s}$. Aplicando a formulação energética do capacitor, obteve-se potência média transferida ao barramento da ordem de 65 mW .

Figura 25- Energia Transferida ao Barramento.



Fonte: o autor, 2026.

Esse valor corresponde à potência média obtida ao longo da curva de relaxamento térmico experimental, incorporando tanto a região de gradiente térmico máximo quanto a fase de decaimento progressivo até o equilíbrio térmico. Dessa forma, não se trata de um valor de pico instantâneo, mas sim de um regime transiente médio associado à dinâmica térmica do sistema.

Entretanto, considerando que os gradientes térmicos impostos experimentalmente representam condições elevadas de excitação térmica, conforme discutido na Seção 4.8, espera-se que a contribuição termoelétrica média em regime orbital contínuo seja inferior à observada experimentalmente, em função da atuação do sistema de controle térmico e da redução dos gradientes térmicos efetivos ao longo do tempo.

Embora esse valor médio em regime transiente seja inferior à potência elétrica gerada pelo subsistema fotovoltaico, sua contribuição é relevante do ponto de vista sistêmico, uma vez que a energia convertida pelo módulo termoelétrico tem origem no fluxo térmico residual do sistema fotovoltaico e estrutural, que, na ausência do TEG, seria dissipado para o ambiente sem aproveitamento energético.

Adicionalmente, a capacidade do sistema termoelétrico de gerar energia durante a fase de relaxamento térmico evidencia seu papel como elemento de suporte energético em regimes transientes, contribuindo para a estabilidade do barramento durante períodos de transição térmica orbital. Esse comportamento aumenta a resiliência energética do sistema híbrido, reduz a dependência exclusiva da geração fotovoltaica em condições de baixa irradiância solar e reforça a viabilidade da arquitetura híbrida proposta para aplicações em ambientes com variabilidade térmica acentuada.

A análise integrada dos resultados experimentais e das previsões do modelo confirma que o modelo eletrotérmico parametrizado apresenta capacidade preditiva adequada para análise de desempenho do sistema híbrido STEG em condições térmicas transientes representativas

de cenários relevantes de operação. Essa validação experimental constitui evidência quantitativa da hipótese desta tese, demonstrando que a integração híbrida pode aumentar a densidade energética efetiva e a robustez operacional de sistemas energéticos compactos aplicados a plataformas *CubeSat*.

A partir da integração dos resultados experimentais obtidos em bancada, da modelagem termo energética e da modelagem eletrotérmica parametrizada desenvolvidas nos Capítulos 3 e 4, torna-se possível estimar o comportamento do sistema híbrido STEG-CUBE para cenários orbitais representativos de operação em LEO, com base em extrapolação fundamentada nos resultados experimentais e na modelagem desenvolvida.

A análise considera simultaneamente a contribuição energética do subsistema fotovoltaico, caracterizado experimentalmente na Seção 5.2, e do subsistema termoelétrico, validado experimentalmente na Seção 5.1 e integrado funcionalmente conforme análise apresentada nesta seção. Essa abordagem permite avaliar o comportamento energético global do sistema sob diferentes condições geométricas de incidência solar e regimes térmicos associados.

Com base nos resultados experimentais consolidados, adotam-se como parâmetros representativos a potência média PV experimental por face de $0,812\text{ W}$, a potência média TEG em regime transiente de relaxamento térmico de $0,065\text{ W}$ e a contribuição termoelétrica relativa média: aproximadamente 8% do canal PV.

Os valores apresentados na Tabela 5 correspondem à síntese do comportamento energético do sistema em diferentes cenários geométricos orbitais, sendo estimados a partir da combinação entre dados experimentais e modelagem termo energética. Dessa forma, devem ser interpretados como estimativas representativas, e não como medições diretas em ambiente orbital.

Tabela 5- Síntese do comportamento eletroenergético do sistema STEG em cenários LEO.

Cenário Orbital	Condição Geométrica	Potência PV por Face (W)	Potência TEG por Face (W)	Ganho Energético STEG (%)	Contribuição Sistêmica
Incidência Normal	Face única ativa	0,812	0,065	~ 8 %	Máxima geração local
Incidência em Aresta	Duas faces parcialmente ativas	0,574	0,046	~ 8 %	Distribuição térmica equilibrada
Incidência em Vértice	Três faces parcialmente ativas	0,468	0,037	~ 8 %	Geração média orbital
Regime Pós-Iluminação	Relaxamento térmico estrutural	~ 0	0,020 – 0,065	—	Recuperação energética térmica

Fonte: o autor, 2026.

A potência termoelétrica apresentada corresponde a valores médios obtidos durante a fase de relaxamento térmico experimental, não representando valores instantâneos de pico nem regime estacionário orbital contínuo.

Observa-se que a contribuição termoeétrica apresenta tendência de proporcionalidade com a potência térmica residual associada ao subsistema fotovoltaico, apresentando comportamento aproximadamente constante em termos percentuais. Esse resultado confirma que o canal termoeétrico atua como conversor energético complementar, explorando o fluxo térmico residual do sistema sem introduzir penalizações energéticas relevantes.

Adicionalmente, destaca-se que, mesmo na ausência de geração fotovoltaica direta, o sistema termoeétrico mantém capacidade de geração elétrica durante intervalos transientes de relaxamento térmico estrutural, característica particularmente relevante para aplicações orbitais sujeitas a ciclos térmicos rápidos.

Essa capacidade de geração complementar contribui diretamente para a estabilidade do barramento energético híbrido e para o aumento da robustez energética global do sistema, reduzindo a dependência exclusiva da geração fotovoltaica durante regimes transitórios e reforçando a viabilidade técnica do conceito híbrido proposto nas condições analisadas.

5.4 VALIDAÇÃO DA HIPÓTESE

A hipótese central desta tese estabelece que a integração híbrida fotovoltaico-termoeétrica baseada em acoplamento térmico direto é capaz de aumentar a densidade energética efetiva em condições de gradiente térmico disponível e a robustez operacional de sistemas energéticos compactos aplicados a plataformas *CubeSat*, por meio do aproveitamento do fluxo térmico residual inerente ao processo de conversão fotovoltaica e à dinâmica térmica estrutural orbital.

A validação dessa hipótese foi conduzida por meio da integração entre modelagem físico e matemática, simulação numérica e validação experimental em bancada, permitindo avaliar o comportamento do sistema híbrido em condições térmicas controladas e representativas de cenários relevantes de operação em LEO.

Os resultados experimentais demonstraram que o módulo termoeétrico é capaz de converter parte do fluxo térmico residual do sistema em energia elétrica útil, mantendo geração elétrica ao longo do regime transiente de relaxamento térmico mesmo durante fases de relaxamento térmico estrutural. Esse comportamento valida experimentalmente o conceito de recuperação energética térmica durante transições orbitais entre iluminação solar e eclipse.

Os resultados obtidos na modelagem demonstram que o modelo eletrotérmico parametrizado apresenta capacidade preditiva adequada para análise do desempenho termoeétrico sob condições dinâmicas representativas. A coerência entre resultados experimentais e previsões teóricas confirma a validade da abordagem de modelagem adotada nesta tese.

A Tabela 6 apresenta a comparação consolidada entre previsões do modelo, resultados experimentais e comportamento integrado do sistema.

Tabela 6- Comparação consolidada: Modelo, Experimento e Sistema Integrado.

Parâmetro	Modelo	Experimental	Sistema Integrado
Dependência térmica $\alpha(T)$	Considerada	Confirmada experimentalmente	Validada em operação
Dependência térmica $R_{int}(T)$	Modelada polinomialmente	Confirmada experimentalmente	Coerente com resposta dinâmica
Geração termoelétrica em regime transiente	Prevista	Observada	Confirmada em regime sistêmico
Geração pós pico térmico	Prevista	Observada experimentalmente	Confirmada como mecanismo energético real
Contribuição energética TEG	Prevista como complementar	Confirmada experimentalmente	Confirmada em nível sistêmico
Robustez energética global	Prevista	Evidenciada experimentalmente	Confirmada no sistema híbrido

Fonte: o autor, 2026.

Adicionalmente, a análise integrada do sistema híbrido confirma que a inclusão do canal termoelétrico permite recuperar energia que seria naturalmente dissipada para o ambiente, contribuindo para o aumento da densidade energética efetiva do sistema em condições de gradiente térmico disponível e para a melhoria da estabilidade do barramento energético durante regimes térmicos transitórios.

Dessa forma, a hipótese desta tese é considerada validada com base na evidência experimental e na coerência entre modelagem e resultados obtidos, demonstrando que sistemas híbridos fotovoltaico-termoelétricos baseados em acoplamento térmico direto constituem alternativa tecnicamente viável para aumento do aproveitamento energético e robustez operacional de plataformas *CubeSat*.

O conjunto de resultados obtidos estabelece base científica consistente para a aplicação de arquiteturas STEG em sistemas espaciais compactos e abre caminho para futuras investigações envolvendo materiais termoelétricos de maior fator de mérito, estratégias avançadas de gerenciamento térmico e arquiteturas eletrônicas de extração energética otimizadas para operação em ambientes com variabilidade térmica e restrições geométricas severas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese teve como objetivo desenvolver e validar experimentalmente uma arquitetura híbrida de geração energética baseada na integração direta entre conversão fotovoltaica e conversão termoelétrica, aplicada a sistemas com severas restrições de volume, massa e dissipação térmica, como plataformas *CubeSat* e sistemas com restrições geométricas e térmicas semelhantes. A abordagem adotada combinou modelagem física, modelagem eletrotérmica parametrizada, desenvolvimento de arquitetura energética híbrida e validação experimental em bancada térmica automatizada, permitindo estabelecer correlação direta entre fenômenos físicos, modelagem matemática e comportamento físico observado do sistema sob condições experimentais controladas.

Os resultados experimentais demonstraram que o modelo eletrotérmico parametrizado desenvolvido representa adequadamente o comportamento do módulo termoelétrico em função da temperatura média de operação e do gradiente térmico aplicado. A incorporação da dependência térmica do coeficiente de *Seebeck* e da resistência elétrica interna permitiu reduzir desvios entre previsão e experimento e reproduzir o comportamento não linear do dispositivo em condições térmicas transientes.

A caracterização experimental confirmou a capacidade do sistema híbrido de recuperar parte da energia térmica residual gerada pelo subsistema fotovoltaico, convertendo-a em energia elétrica útil. Observou-se que o canal termoelétrico contribui de forma complementar ao canal fotovoltaico, especialmente durante regimes de transição térmica, como fases análogas à transição orbital entre iluminação e eclipse. Esse comportamento confirma experimentalmente o potencial de utilização da inércia térmica estrutural como mecanismo adicional de geração energética.

Do ponto de vista sistêmico, a arquitetura EPS híbrida baseada em *buffers* energéticos distribuídos e canais independentes de condicionamento demonstrou elevada robustez operacional, permitindo desacoplamento dinâmico entre geração e distribuição energética. Essa característica amplia a resiliência do sistema frente a variações térmicas e operacionais e falhas parciais de subsistemas de geração.

De forma consolidada, os resultados obtidos indicam que a integração híbrida fotovoltaico-termoelétrica representa uma alternativa tecnicamente viável para aumento da densidade energética útil em plataformas *CubeSat*, sem aumento proporcional da área fotovoltaica instalada. As principais contribuições desta pesquisa podem ser sintetizadas em quatro níveis complementares.

No nível científico, destaca-se o desenvolvimento e validação experimental de um modelo eletrotérmico parametrizado para módulos termoelétricos comerciais, considerando dependência térmica simultânea dos parâmetros elétricos e termoelétricos. Esse modelo permite

simulações realistas em envelopes térmicos amplos, incluindo condições não reproduzíveis diretamente em bancada experimental.

No nível metodológico, destaca-se a proposição e validação do método da energia acumulada aplicado à caracterização energética de módulos termoelétricos conectados a conversores auto oscilantes de ultra baixa tensão. Essa abordagem permite estimar potência efetiva entregue ao barramento energético mesmo quando medições diretas de corrente e impedância tornam-se inviáveis.

No nível tecnológico, destaca-se o desenvolvimento da arquitetura STEG-CUBE baseada em acoplamento térmico direto, integração multicamadas e EPS híbrida descentralizada, permitindo operação estável sob condições térmicas transientes e com múltiplas fontes energéticas heterogêneas.

No nível aplicado, destaca-se o desenvolvimento de uma plataforma experimental automatizada capaz de impor gradientes térmicos controlados, registrar grandezas térmicas e elétricas de baixa amplitude e gerar *datasets* sincronizados de alta resolução temporal, permitindo validação direta entre modelo e experimento.

Embora os resultados obtidos demonstrem consistência experimental e aderência ao modelo físico proposto, algumas limitações devem ser consideradas no escopo desta investigação.

A validação experimental foi realizada utilizando células fotovoltaicas de Poly-Si como substitutos térmicos de células espaciais de TJ. Embora essa abordagem represente cenário térmico conservador, diferenças espectrais e elétricas entre tecnologias podem influenciar o comportamento final do sistema em ambiente orbital real.

A caracterização experimental do canal termoelétrico foi limitada pela impossibilidade de medição direta da corrente média devido à natureza pulsada do conversor auto oscilante. Embora o método da energia acumulada permita estimativa indireta robusta da potência transferida, medições diretas poderiam permitir validação adicional de modelos dinâmicos.

Adicionalmente, os ensaios foram realizados em ambiente laboratorial controlado, não contemplando integralmente fenômenos ambientais orbitais complexos como degradação por radiação ionizante, ciclagem térmica prolongada e efeitos de vácuo profundo sobre interfaces térmicas.

Mesmo considerando essas limitações, os resultados obtidos indicam que a arquitetura STEG-CUBE apresenta potencial de escalabilidade para aplicações além do domínio investigado nesta tese.

Em aplicações espaciais, a arquitetura pode ser expandida para múltiplas faces ativas com controle energético distribuído, permitindo aumento progressivo da densidade energética

sem aumento significativo da complexidade estrutural. A abordagem também é compatível com integração em sistemas EPS redundantes e arquiteturas modulares de nano satélites.

Em aplicações terrestres, o conceito pode ser aplicado em sistemas *self-powered* baseados em calor residual industrial, infraestruturas energéticas distribuídas, sensores autônomos e sistemas IoT de ultra baixo consumo energético.

A modularidade da arquitetura permite adaptação a diferentes transdutores energéticos, incluindo fontes vibracionais, RF ambiental e fontes térmicas industriais, ampliando o espectro de aplicações potenciais da arquitetura híbrida proposta.

6.1 TRABALHOS FUTUROS E PERSPECTIVAS DE EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA

Como continuidade direta desta pesquisa, consolidam-se frentes de evolução científica e tecnológica voltadas à ampliação do nível de maturidade da arquitetura proposta e à sua consolidação em cenários operacionais reais.

No nível experimental, encontra-se em execução a ampliação da campanha de ensaios com a incorporação de células fotovoltaicas espaciais de tripla junção, permitindo a validação do comportamento eletrotérmico do sistema sob condições elétricas representativas de voo. Essa abordagem reduz incertezas associadas às diferenças espectrais e elétricas entre tecnologias fotovoltaicas utilizadas na validação experimental e dispositivos espaciais de alta eficiência.

Paralelamente, está em desenvolvimento e preparação para submissão um artigo científico dedicado à bancada experimental de validação termo energética. Essa iniciativa sistematiza o projeto da infraestrutura experimental, os métodos de instrumentação, os procedimentos de calibração e os protocolos de ensaio utilizados para imposição e monitoramento de gradientes térmicos controlados, contribuindo diretamente para a reprodutibilidade experimental e para o avanço metodológico na caracterização de sistemas híbridos fotovoltaico-termoelétricos em condições representativas de aplicações orbitais.

Essa linha de trabalho já estabelece bases concretas para a padronização de metodologias experimentais voltadas à caracterização de sistemas de EH aplicados a plataformas espaciais miniaturizadas.

No nível de modelagem, encontra-se em andamento a expansão do modelo eletrotérmico para incorporação de efeitos de degradação térmica de longo prazo, envelhecimento de interfaces térmicas e variações paramétricas induzidas por radiação ionizante, ampliando sua capacidade preditiva para missões espaciais de longa duração e ambientes radiativos severos.

No nível eletrônico, está em desenvolvimento a implementação de conversores termoelétricos dedicados com controle adaptativo de impedância dinâmica, projetados para operação eficiente em regimes de ultra baixa tensão, ampliando o aproveitamento energético em condições de

baixo gradiente térmico e aumentando a contribuição do canal termoelétrico no balanço energético global.

No nível sistêmico, encontram-se em investigação arquiteturas híbridas integrando múltiplos mecanismos de EH, combinando conversão fotovoltaica, termoelétrica e vibracional, com foco no aumento da estabilidade energética em ambientes orbitais altamente variáveis e na introdução de redundância funcional ao subsistema energético de plataformas *CubeSat*.

Como desdobramento tecnológico em curso, a arquitetura STEG está sendo integrada a estratégias de gerenciamento energético baseadas em inteligência embarcada, permitindo adaptação dinâmica às condições ambientais orbitais e otimização contínua do fluxo energético disponível.

Em continuidade, a evolução de arquiteturas híbridas multicamadas encontra-se em desenvolvimento com foco na ampliação da autossuficiência energética de plataformas espaciais, reduzindo a dependência de sistemas eletroquímicos convencionais e contribuindo para o aumento da vida útil operacional de missões de pequeno porte.

O objetivo geral desta pesquisa consistiu em desenvolver e validar experimentalmente a arquitetura de um micro gerador híbrido do tipo STEG, concebido para maximizar o aproveitamento energético da radiação solar incidente e do fluxo térmico residual associado à conversão fotovoltaica em sistemas submetidos a severas restrições de volume e massa, tomando como referência parâmetros orbitais típicos. Esse objetivo foi plenamente alcançado por meio da integração entre modelagem física fundamentada, desenvolvimento arquitetural estruturado, implementação experimental e validação quantitativa do desempenho energético do sistema híbrido proposto.

A etapa inicial da pesquisa concentrou-se na revisão e sistematização das tecnologias híbridas de EH descritas na literatura científica e em bases de patentes. A análise crítica realizada permitiu identificar lacunas relevantes na aplicação de geradores termoelétricos como fontes complementares em plataformas *CubeSat*, especialmente no que se refere à validação experimental de arquiteturas compactas com acoplamento térmico direto. Essa constatação fundamentou a justificativa científica da tese e orientou a proposição da arquitetura STEG-CUBE como contribuição original ao estado da arte.

Na sequência, foram estabelecidas as condições de contorno térmicas e elétricas do projeto com base em dados típicos de irradiância solar orbital e perfis térmicos característicos de LEO. A definição do envelope operacional permitiu delimitar gradientes térmicos representativos, parâmetros de irradiância equivalentes às condições AM0 e AM1.5, e limites térmicos compatíveis com a integridade estrutural dos materiais empregados. Essa etapa garantiu coerência física entre modelagem teórica, simulação numérica e validação experimental.

O projeto da arquitetura do sistema STEG foi desenvolvido a partir da definição da topologia de integração paralela direta entre o módulo fotovoltaico e o módulo termoeletrico, com acoplamento térmico multicamadas e arquitetura de gerenciamento energético descentralizada. A modelagem termo energética e eletrotérmica parametrizada incorporou a dependência térmica do coeficiente de *Seebeck* e da resistência elétrica interna do módulo termoeletrico, permitindo representar com fidelidade o comportamento não linear do dispositivo sob gradientes térmicos transientes. A arquitetura proposta demonstrou compatibilidade geométrica com plataformas *CubeSat* e estabeleceu base tecnológica consistente para aplicações espaciais compactas.

O desenvolvimento do protótipo funcional foi realizado mediante estratégia de substituição tecnológica por equivalência termo energética, utilizando células de Poly-Si como cenário conservador em relação às células espaciais de TJ. A construção física validou a integração mecânica e térmica entre as camadas do sistema, assegurando estabelecimento efetivo do gradiente térmico sobre o módulo termoeletrico e reduzindo resistências térmicas parasitas de interface.

A caracterização experimental em bancada permitiu submeter o protótipo a condições controladas de gradiente térmico e irradiância, obtendo curvas características corrente tensão e potência tensão do subsistema fotovoltaico, bem como resposta termoeletrica em regime transiente controlado e durante fase de relaxamento térmico estrutural. A análise do intervalo útil de conversão termoeletrica, com duração aproximada de 1499 segundos, confirmou a exploração efetiva da inércia térmica estrutural como mecanismo adicional de geração energética. A potência média termoeletrica estimada, da ordem de 65 mW , obtida ao longo do regime transiente de relaxamento térmico, e a contribuição relativa aproximada de 8% em relação ao canal fotovoltaico demonstraram que o sistema híbrido é capaz de recuperar energia que seria dissipada termicamente, agregando ganho líquido ao balanço energético global.

Por fim, a validação experimental do modelo tecnológico foi realizada por meio da comparação entre o desempenho do sistema híbrido desenvolvido e arquiteturas puramente fotovoltaicas, utilizando como métrica a densidade energética superficial. A análise demonstrou incremento positivo da densidade energética no domínio experimental investigado, atendendo ao critério quantitativo estabelecido para validação da hipótese da tese. A coerência observada entre modelo, simulação e resultados experimentais confirma a capacidade preditiva do modelo eletrotérmico parametrizado e corrobora a viabilidade técnica da arquitetura híbrida proposta nas condições analisadas.

De forma consolidada, os resultados obtidos demonstram que a integração híbrida fotovoltaico-termoeletrica em configuração de acoplamento térmico direto constitui uma estratégia tecnicamente consistente para ampliação da densidade energética útil e aumento da robustez operacional em sistemas energéticos compactos. O trabalho estabelece contribuição científica ao

consolidar um modelo eletrotérmico validado experimentalmente, contribuição metodológica ao propor abordagem de caracterização baseada em energia acumulada em regimes de ultra baixa tensão, e contribuição tecnológica ao desenvolver e proteger uma arquitetura híbrida aplicável a plataformas espaciais de pequeno porte. Assim, o conceito STEG-CUBE demonstra maturidade científica e tecnológica compatível com sua aplicação em sistemas aeroespaciais compactos e configura-se como um avanço consistente no campo de sistemas híbridos de *Energy Harvesting* para ambientes de alta restrição geométrica e térmica.

REFERÊNCIAS

- ABDELNOUR, A. et al.** Energy harvesting based on printed organic photovoltaic cells for RFID applications. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON RFID TECHNOLOGY AND APPLICATIONS (RFID-TA), 2019, Pisa**. Anais... Pisa: IEEE, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/RFID-TA.2019.8892206>.
- ABRAMS, J. et al.** Extendable solar array for a spacecraft system. US9856039B2, 2018. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US9856039B2/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.
- AMBIENT WEATHER.** Why is the lux to W/m² conversion factor 126.7? Chandler, AZ, 2024. Disponível em: <https://ambientweather.com/faqs/question/view/id/1452/>. Acesso em: 15 jan. 2026.
- ANDO JUNIOR, O. H. et al.** Comparative analysis and integrated methodology for the electrical design and performance evaluation of thermoelectric generators (TEGs) in energy harvesting applications. *Energies*, v. 17, n. 20, 2024.
- ANDO JUNIOR, O. H. et al.** Acquisition and monitoring system for TEG characterization. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 11, p. 531516, 2015.
- ANDRADE DA SILVA, E. et al.** Review of energy harvesting techniques for the development of self-powered systems: methods and applications. In: **Engenharias em perspectiva: ciência, tecnologia e inovação**. [S.l.: s.n.], cap. 3.
- ARMENDANI, W. A. et al.** Conhecendo a piezoeletricidade, uma nova forma de geração de energia elétrica. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 1, n. 9, p. 314–320, fev. 2016.
- AZARBAYJANI, M.; ANDERSON, J.** Assessment of solar energy conversion technologies: application of thermoelectric devices in retrofit an office building. In: **SIXTEENTH SYMPOSIUM ON IMPROVING BUILDING SYSTEMS IN HOT AND HUMID CLIMATES, 2008, Plano, TX**. Anais... Plano, TX, 2008.
- BAI, B.; LI, X.; ZHANG, Y.; LIU, Y.; SUN, C.; SHI, L.** Integrated solar cell and slot antenna device. CN106711576B, 2017. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/CN106711576B/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.
- BARBI, I.** Eletrônica de potência. Florianópolis: Edição do Autor, 2005.
- BARBI, I.; MARTINS, D. C.** Conversores CC-CC básicos não isolados. Florianópolis: Edição dos Autores, 2000.
- BATISTA, D. et al.** Combined organic photovoltaic cells and ultra low power CMOS circuit for indoor light energy harvesting. *Sensors*, v. 19, p. 1803, 2019.
- BEVERIDGE, L.** Space-based radioisotope production and methods of use. US20220367077A1, 2022. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US20220367077A1/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.
- BISWAS, S.; LEE, Y.; KIM, H.** Micropower energy harvesting using high-efficiency indoor organic photovoltaics for self-powered sensor systems. *Journal of Sensor Science and Technology*, v. 30, p. 364–368, 2021.

BITO, J.; HESTER, J. G.; TENTZERIS, M. M. A fully autonomous ultra-low power hybrid RF/photovoltaic energy harvesting system with -25 dBm sensitivity. In: **IEEE WIRELESS POWER TRANSFER CONFERENCE (WPTC), 2017, Taipei**. Anais... Taipei, 2017a.

BITO, J.; HESTER, J. G.; TENTZERIS, M. M. A fully autonomous ultra-low power hybrid RF/photovoltaic energy harvesting system with -25 dBm sensitivity. In: **IEEE WIRELESS POWER TRANSFER CONFERENCE (WPTC), 2017, Taipei**. Anais... Taipei, maio 2017b. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/WPT.2017.7953858>.

BOUWMEESTER, J.; GUO, J. Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. *Acta Astronautica*, v. 67, p. 854–862, 2010.

BULUT, M.; SOZBIR, N. Analytical investigation of a nanosatellite panel surface temperatures for different altitudes and panel combinations. *Applied Thermal Engineering*, v. 75, p. 1076–1083, 2015.

CALDERÓN-HENAO, N. et al. Numerical–experimental performance assessment of a non-concentrating solar thermoelectric generator (STEG) operating in the Southern Hemisphere. *Energies*, v. 13, p. 2666, 2020.

CALIFORNIA POLYTECHNIC STATE UNIVERSITY (CAL POLY). CubeSat design specification. San Luis Obispo: Cal Poly, diversas revisões.

CAMACHO-MEDINA, P. et al. Maximum power of thermally and electrically coupled thermoelectric generators. *Entropy*, v. 16, n. 5, p. 2890–2903, 2014.

CANDOLFI, C. et al. Progress and perspectives in thermoelectric generators for waste-heat recovery and space applications. *Journal of Applied Physics*, v. 134, p. 100901, 2023.

CHACON, S.; GUTIERREZ, J.; ADANAQUE-INFANTE, L. Modelling CubeSat structure for thermal analysis. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTING (INTERCON), 29., 2022, Lima**. Anais... Lima, Peru, 2022.

CHAMPIER, D. Thermoelectric generators: a review of applications. *Energy Conversion and Management*, v. 140, p. 167–181, 2017.

CHAO, W.; CHENGGU, Z.; LIN, L.; CHUNHONG, L.; ZEZHAN, Z. A kind of device to be generated electricity using satellite external surface temperature gradient. **CN106208814B**, 5 abr. 2019.

CLARIVATE. Web of Science: option to save to BibTeX format not available in every database. Philadelphia, PA, USA, 2024.

CORPINO, S. et al. Thermal design and analysis of a nanosatellite in low Earth orbit. *Acta Astronautica*, v. 115, p. 247–261, 2015.

COSNER, C.; STICKELMAIER, J.; WOOTAN, J. Modular electrical power subsystem architecture. **US11750021B2**, 5 set. 2022. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US11750021B2/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.

CRUIJSSEN, J.; DATEMA, P.; BENTHERN, B. Solar panel and flexible radiator for a spacecraft. **US10737808B2**, 11 ago. 2020. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US10737808B2/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.

CUSTOM THERMOELECTRIC. 1261G-7L31-24CX1 specification sheet. Bishopville: Custom Thermoelectric, 2014.

CUSTOM THERMOELECTRIC. ELC specification sheet: ELC-UVB120. Bishopville: Custom Thermoelectric, LLC, 2020.

DALALA, Z. M. et al. A new maximum power point tracking (MPPT) algorithm for thermoelectric generators with reduced voltage sensors count control. *Energies*, v. 11, p. 1826, 2018.

DALLAMUTA, J.; PERONDI, L. F.; DE OLIVEIRA, M. E. R. Space missions in South America: profile and evolutionary perspective of their development. *Acta Astronautica*, v. 206, p. 9–17, 2023.

DALOLA, S. et al. Autonomous sensor system with RF link and thermoelectric generator for power harvesting. In: **INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 2008, Victoria.** Anais... Victoria, BC, Canada, 2008.

DAVIS INSTRUMENTS. Application note 30: reporting quality observations to NOAA. Hayward, CA, 2016. Disponível em: <https://support.davisinstruments.com/article/y8rq73hvj1-app-notes-davis-aero-cone-reduces-rainfall-error-caused-by-wind>. Acesso em: 15 jan. 2026.

DAVOLI, F. et al. Small satellites and CubeSats: survey of structures, architectures, and protocols. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, v. 37, p. 343–359, 2019.

DE, R.; ABEGAONKAR, M. P.; BASU, A. Enabling science with CubeSats—trends and prospects. *IEEE Journal of Miniaturization for Air and Space Systems*, v. 3, p. 221–231, 2022.

DE SOUZA, T. S. et al. Aplicação do ProKnow-C para seleção e análise de um portfólio bibliográfico sobre aplicação dos recursos da tecnologia 4.0. *Gestão & Desenvolvimento*, v. 8, p. 68–89, 2021.

DERKACS, D. Space vehicles including multijunction metamorphic solar cells. **US12249667B2**, 1 jul. 2021. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US12249667B2/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.

DILEEP, G.; SINGH, S. N. Selection of non-isolated DC-DC converters for solar photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 76, p. 1230–1247, 2017.

DIMITRIEV, O. P. Thermomechanical energy converters for harvesting thermal energy: a review. *Journal of Renewable Materials*, v. 11, p. 1555–1600, 2023.

DING, L. C.; AKBARZADEH, A.; TAN, L. A review of power generation with thermoelectric system and its alternative with solar ponds. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 799–812, 2018.

DINH, D. Thermal modeling of nanosat. S.l.: [s.n.], 2012. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Thermal_Modeling_of_Nanosat.html?id=hE9WAQAACAAJ. Acesso em: 20 mar. 2026.

DINULOVIC, D. et al. Rotational electromagnetic energy harvesting system. *Physics Procedia*, v. 75, p. 1244–1251, 2015.

DORAGHI, Q.; JOUHARA, H. Thermoelectric generator efficiency: an experimental and computational approach to analysing thermoelectric generator performance. *Thermal Science and Engineering Progress*, v. 55, p. 102884, 2024.

DORSA, A. O papel da revisão da literatura na escrita de artigos científicos. *Interações*, v. 21, p. 681–683, 2020.

DUNFORD, R.; SU, Q.; TAMANG, E. The Pareto principle. *Plymouth Student Scientist*, v. 7, p. 140–148, 2014.

EHRlich, J. Spherical mobility system. [S.l.: s.n.], [s.d.].

ELISEEV, A. et al. Satellite-constructor, training-demonstration model. [S.l.: s.n.], [s.d.].

ELSEVIER. Mendeley. Amsterdam, 2024. Disponível em: <https://www.mendeley.com>. Acesso em: 20 mar. 2026.

ELVIN, N.; ERTURK, A. Advances in energy harvesting methods. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5705-3>.

ENSSLIN, L. et al. ProKnow-C: knowledge development process—constructivist. Processo técnico com registro junto ao INPI. Brasil, 2010.

ENSSLIN, S. R. et al. Processo estruturado de revisão da literatura e análise bibliométrica sobre avaliação de desempenho de processos de implementação de eficiência energética. *Revista Brasileira de Energia*, v. 20, p. 21–50, 2014.

ESA (EUROPEAN SPACE AGENCY). Mission navigator. Paris: ESA, [s.d.]. Disponível em: <https://mission-navigator.esa.int>. Acesso em: 20 mar. 2026.

ESCOBAR, E.; DIAZ, M.; ZAGAL, J. C. Evolutionary design of a satellite thermal control system: real experiments for a CubeSat mission. *Applied Thermal Engineering*, v. 105, p. 490–500, 2016.

ESPEJO, S. C. C.; DE SOUZA, S. S. S.; ANDO JUNIOR, O. H. Development of a biochemical oxygen demand incubator prototype based on thermoelectric effect with monitoring system. *IEEE Latin America Transactions*, v. 18, p. 2037–2046, 2020.

EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION (ECSS). ECSS-E-ST-31C Rev.1: thermal control – general requirements. Noordwijk: ESA, 2011.

EVANS, B. G. et al. 1945–2010: 65 years of satellite history from early visions to latest missions. *Proceedings of the IEEE*, v. 99, p. 1840–1857, 2011.

EWELL, R. et al. Radioisotope thermoelectric generator. **WO2016138389A1**, 1 set. 2016. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/WO2016138389A1>. Acesso em: 20 mar. 2026.

FAIRBANKS, J. Vehicular thermoelectric applications. In: **EUROPEAN CONFERENCE ON THERMOELECTRICS, 6., 2008, Paris.** Anais... Paris, France, 2008. Disponível em: <http://ect2008.icmpe.cnrs.fr>. Acesso em: 20 mar. 2026.

FARMER, J. R. A comparison of power harvesting techniques and related energy storage issues. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/242282555_A_comparison_of_power_harvesting_techniques_and_related_energy_storage_issues. Acesso em: 20 mar. 2026.

FERNÁNDEZ-YÁÑEZ, P. et al. Evaluating thermoelectric modules in diesel exhaust systems: potential under urban and extra-urban driving conditions. *Journal of Cleaner Production*, v. 182, p. 1070–1079, 2018.

FOELKEL, L. Energy harvesting is not fiction anymore. In: **PCNS, 2., 2019, Bucharest**. Anais... Bucharest, Romania, set. 2019a.

FOELKEL, L. Energy harvesting is not fiction anymore. In: **PCNS, 2., 2019, Bucharest**. Anais... Bucharest, Romania, set. 2019b.

GAO, M. Thermoelectric energy harvesting. Norwood, MA: Artech House, 2010.

GAO, M.; ROWE, D. M. Conversion efficiency of thermoelectric combustion systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 22, n. 2, p. 528–534, jun. 2007.

GILMORE, D. G. (ed.). Spacecraft thermal control handbook: fundamental technologies. 2. ed. El Segundo: The Aerospace Press, 2002.

GOMEZ-JENKINS, M. et al. Project Irazú: space and ground systems engineering of a 1U CubeSat store and forward mission for environmental monitoring. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, v. 66, p. 217–225, 2023.

GRAY, D. T.; COGGIN, J. M. Magneto-thermoelectric generator for energy harvesting. **US9793829B2**, 17 out. 2017. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US9793829B2/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.

GROSSI, M. Energy harvesting strategies for wireless sensor networks and mobile devices: a review. *Electronics*, v. 10, p. 661, 2021.

HARB, A. Energy harvesting: state-of-the-art. *Renewable Energy*, v. 36, p. 2641–2654, 2011.

HE, W. et al. Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. *Applied Energy*, v. 143, p. 1–25, 2015.

HEIDT, H.; PUIG-SUARI, J.; MOORE, A. S.; NAKASUKA, S.; TWIGGS, R. J. CubeSat: a new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation. In: **ANNUAL/USU CONFERENCE ON SMALL SATELLITES, 14., 2000, Logan**. Anais... Logan: Utah State University, 2000.

HIPP-MÉNDEZ, J. R. et al. Morazán MRZ-SAT CubeSat: thermal modelling and analysis guide for academic CubeSat missions. In: **INTERNATIONAL ASTRONAUTICAL CONGRESS (IAC), 73., 2022, Paris**. Anais... Paris, France, 2022.

HUEN, P.; DAOUD, W. A. Advances in hybrid solar photovoltaic and thermoelectric generators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 1295–1302, maio 2017.

IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY) et al. Tracking SDG7: the energy progress report 2022. Washington, DC, 2022.

INBTHERMOELECTRIC. inbC1-127.08HTS thermoelectric power generation datasheet. 2024. Disponível em: <http://www.inbthermoelectric.com/Thermoelectric-Peltier-Modules/Power-Generators/inbC1-127.08HTS.html>. Acesso em: 20 mar. 2026.

ISMAIL, B. I.; AHMED, W. H. Thermoelectric power generation using waste-heat energy as an alternative green technology. *Recent Patents on Electrical Engineering*, v. 2, p. 27–39, 2009.

IWAN, A.; PELLOWSKI, W.; BOGDANOWICZ, K. A. Conversion of radiophotoluminescence irradiation into electricity in photovoltaic cells: a review of theoretical considerations and practical solutions. *Energies*, v. 14, p. 6186, 2021.

IZIDORO, C. L. et al. Characterization of thermoelectric generator for energy harvesting. *Measurement*, v. 106, p. 283–290, 2017.

IZIDORO, C. L. et al. Organic photovoltaic (OPV) with electronic protection system: a systematic review. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 67, p. e24230786, 2024.

JOUHARA, H. et al. Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications. *International Journal of Thermofluids*, v. 9, p. 100063, 2021.

JUNG, S. et al. 3D Cu ball-based hybrid triboelectric nanogenerator with non-fullerene organic photovoltaic cells for self-powering indoor electronics. *Nano Energy*, v. 77, p. 105271, 2020.

ANDO JUNIOR, O. H. Microgerador termoeletrico para capturação de energia baseado no efeito Seebeck com sistema de transferência de calor intercambiável. **BR102013027947-1 A2**, 2013. Rio de Janeiro: Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), 2013.

ANDO JUNIOR, O. H.; CHAVES FILHO, W. M.; SILVA, E. A. D. System for conditioning, feeding, storing, and managing energy for sensors and/or electronic devices self-powered by photovoltaic cell. **BR1020240088069**, 2024. Rio de Janeiro: Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), 2024.

JUNIOR, O. H. A.; MARAN, A. L. O.; HENAO, N. C. A review of the development and applications of thermoelectric microgenerators for energy harvesting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 91, p. 376–393, 2018.

JUNIOR, O. H. A. et al. Proposal of a thermoelectric microgenerator based on Seebeck effect for energy harvesting in industrial processes. *Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ)*, v. 1, p. 227–333, 2014.

JURKOWSKI, A. et al. Thermal modelling of a small satellite data processing unit aided by sensitivity analysis and uncertainty quantification. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 193, p. 108514, 2023.

KANG, S. J.; OH, H. U. On-orbit thermal design and validation of 1U standardized CubeSat of STEP Cube Lab. *International Journal of Aerospace Engineering*, v. 2016, p. 4213189, 2016.

KARABETOGLU, S.; SISMAN, A. Characterization of a thermoelectric generator at low temperatures. *Energy Conversion and Management*, v. 62, p. 47–50, abr. 2012.

KARTUS, R.; KUKRUS, A. Innovation, product development and patents at universities. *Estonian Journal of Engineering*, v. 19, p. 477–482, 2013.

KAUSHALYA, T.; LITTOW, M.; VIRTA, E.; RUOTSALAINEN, T.; JUUTI, J.; BAI, Y. Evaluation of charging efficiency for power management integrated circuits and their compatibility with indoor light energy harvesting devices for IoT sensors. SSRN, 2023. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=4455207>. Acesso em: 20 mar. 2026.

KHATER, A.; JARRAR, F. Temperature distribution of CubeSats using finite element method. In: **INTERNATIONAL ASTRONAUTICAL CONGRESS (IAC), 73., 2022, Paris**. Anais... Paris, France, 2022.

KIM, B.; BUN, L. et al. Modeling and tuning of MPPT controllers for a thermoelectric generator. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON GREEN ENERGY, 1., 2014**. Anais... 2014.

KIM, W. et al. An indoor light-powered sensor system integrated with organic photovoltaics. *Advanced Materials Technologies*, v. 8, p. 2202040, 2023.

KJELLBY, R. A. et al. Self-powered IoT device for indoor applications. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON VLSI DESIGN AND INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMBEDDED SYSTEMS, 31./17., 2018, Pune**. Anais... Pune, India, jan. 2018.

KNAP, V.; VESTERGAARD, L. K.; STROE, D. I. A review of battery technology in CubeSats and small satellite solutions. *Energies*, v. 13, p. 4097, 2020.

KRAMER, L. R. et al. Analytical and numerical study for the determination of a thermoelectric generator's internal resistance. *Energies*, v. 12, p. 3053, 2019.

KWAN, T. H.; WU, X.; YAO, Q. Multi-objective genetic optimization of the thermoelectric system for thermal management of proton exchange membrane fuel cells. *Applied Energy*, v. 217, p. 314–327, 2018.

LACERDA, R.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. *Gestão & Produção*, v. 19, p. 59–78, 2012.

LASHMORE, D. et al. Nanostructured material-based thermoelectric generators. **EP2179453A1**, 2010. European Patent Office, 2010. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/EP2179453A1/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.

LAVANYA, A.; NAVAMANI, J. D.; VIJAYAKUMAR, K. Performance analysis of triple port DC-DC converter for energy harvesting systems. In: **NATIONAL CONFERENCE ON MATHEMATICAL TECHNIQUES AND APPLICATIONS, 11., 2019**. Anais... 2019.

LENS. Explore o conhecimento global em ciência e tecnologia. 2024. Disponível em: <https://www.lens.org/?locale=pt>. Acesso em: 20 mar. 2026.

LIU, H. et al. A MEMS-based piezoelectric cantilever pattern with PZT thin film array for harvesting energy from low frequency vibrations. *Physics Procedia*, v. 19, p. 129–133, 2011.

LIU, R. et al. An efficient ultra-flexible photo-charging system integrating organic photovoltaics and supercapacitors. *Advanced Energy Materials*, v. 10, p. 2000523, 2020.

LUO, D. et al. Parametric study of a thermoelectric module used for both power generation and cooling. *Renewable Energy*, v. 154, p. 542–552, 2020.

LUO, D. et al. Recent advances in modeling and simulation of thermoelectric power generation. *Energy Conversion and Management*, v. 273, p. 116389, 2022.

LUO, D. et al. Increasing power densities in a thermoelectric generator by stacking and incorporating dual heat pipes. *Device*, v. 2, p. 100435, 2024.

LUPO, D. et al. Flexible temperature logger powered by solar cell and supercapacitor. 2019. Disponível em: <https://researchportal.tuni.fi/en/publications/flexible-temperature-logger-powered-by-solar-cell-and-supercapaci>. Acesso em: 20 mar. 2026.

MACIEL, J. N.; LEDESMA, J. J. G.; ANDO JUNIOR, O. H. Forecasting solar power output generation: a systematic review with the ProKnow-C. *IEEE Latin America Transactions*, v. 19, p. 612–624, 2021.

MAMUR, H.; COBAN, Y. Detailed modeling of a thermoelectric generator for maximum power point tracking. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, v. 28, p. 124–139, 2020.

MAMUR, H.; ÜSTÜNER, M. A.; BHUIYAN, M. R. A. Future perspective and current situation of maximum power point tracking methods in thermoelectric generators. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 50, p. 101824, 2022.

MANN, C.; WALKER, D. Modular solar cell and solar cell array. **US12027911B2**, 2024. United States Patent and Trademark Office (USPTO). Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US12027911B2/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.

MARAN, A. L. O. et al. Modelling and simulation of a thermoelectric waste heat recovery system (TWRHS). *DYNA*, v. 88, p. 265–272, 2021.

GARZON, M. M. Development and analysis of the thermal design for the OSIRIS-3U CubeSat. 2012. Dissertação (Mestrado) – The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA, 2012.

MARTINS, J. et al. Thermoelectric exhaust energy recovery with temperature control through heat pipes. In: **SAE INTERNATIONAL, 2011, Warrendale**. Anais... Warrendale, PA, USA: SAE International, 2011.

MARVANI, M. et al. Flexible energy supply for distributed electronics powered by organic solar cell and printed supercapacitor. In: **IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NANOTECHNOLOGY (IEEE-NANO), 20., 2020, Montreal**. Anais... Montreal, QC, Canada: IEEE, 2020.

MASHALI, S.; VARJANI, A. Y. Dual-input, single-output step-up DC/DC power electronic interface for energy harvesting systems. In: **POWER ELECTRONICS, DRIVE SYSTEMS, AND TECHNOLOGIES CONFERENCE (PEDSTC), 14., 2023, Babol**. Anais... Babol, Iran: 2023.

MORALES, F. O. et al. Chassis optimization of a 1U CubeSat made in a developing country. In: **INTERNATIONAL ASTRONAUTICAL CONGRESS (IAC), 73., 2022, Paris**. Anais... Paris, France, 2022.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). TIROS M spacecraft (ITOS 1) final engineering report. Washington, DC, USA: NASA, 1973. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19730008155>. Acesso em: 20 mar. 2026.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). State-of-the-art of small spacecraft technology. Moffett Field: NASA Ames Research Center, diversas edições.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). State-of-the-art of small spacecraft technology. Moffett Field: NASA Ames Research Center, 2021. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210007892>. Acesso em: 20 mar. 2026.

NEVES, L. A. et al. Analysis of the performance of organic and inorganic photovoltaic cells under different air masses using numerical simulation. In: **BRAZILIAN CONGRESS OF SOLAR ENERGY, 8., 2020, Fortaleza.** Anais... Fortaleza, Brazil, 2020.

NING, A. et al. Satellite modular power supply. **WO2020076357**, 2020. World Intellectual Property Organization (WIPO). Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/ru/detail.jsf?docId=WO2020076357>. Acesso em: 20 mar. 2026.

NÓBREGA, L. Capítulo 10: histórico da exploração espacial. In: **AMLEF – UFRGS.** 2021. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/amlef/2021/11/30/capitulo-10-historico-da-exploracao-espacial/>. Acesso em: 20 mar. 2026.

NORDIN, N. A. et al. Integrating photovoltaic (PV) solar cells and supercapacitors for sustainable energy devices: a review. *Energies*, v. 14, p. 7211, 2021.

NOZARIASBMARZ, A. et al. Review of wearable thermoelectric energy harvesting: from body temperature to electronic systems. *Applied Energy*, v. 258, p. 114069, 2020.

O'BRIEN, R. C. et al. Safe radioisotope thermoelectric generators and heat sources for space applications. *Journal of Nuclear Materials*, v. 377, p. 506–521, 2008.

OH, H. U.; PARK, T. Experimental feasibility study of concentrating photovoltaic power system for CubeSat applications. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v. 51, p. 1942–1949, 2015.

OLIVEIRA, F. M. et al. Power management and power quality system applied in a single-phase nanogrid. *Energies*, v. 15, p. 7121, 2022.

OLIVEIRA, F. M.; LEDESMA, J. J. G.; ANDO JUNIOR, O. H. Rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) para sistemas de energia solar fotovoltaica: técnicas, implementação e desempenho sob sombreamento parcial. Curitiba: CRV, 2024. v. 1.

OMER, S. A.; INFELD, D. G. Design optimization of thermoelectric devices for solar power generation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 53, p. 67–82, 1998.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Relatório anual das Nações Unidas no Brasil 2022. Brasília, DF: ONU Brasil, 2023. Disponível em: https://brasil.un.org/sites/default/files/2023-04/ONU_Brasil_Relatorio_Anual_2022.pdf. Acesso em: 20 mar. 2026.

OSTESEVICIUS, V. et al. Cutting tool vibration energy harvesting for wireless applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 233, p. 310–318, 2015.

OSTRUFKA, A. L. A. et al. Experimental evaluation of thermoelectric generators for nanosatellites application. *Acta Astronautica*, v. 162, p. 32–40, 2019.

PATRA, A. et al. Understanding the charge storage mechanism of supercapacitors: in situ/operando spectroscopic approaches and theoretical investigations. *Journal of Materials Chemistry A*, v. 9, p. 25852–25891, 2021.

PAYREBRUNE, M. Power supply module for spacecraft. **WO2017177301A1**, 2017. World Intellectual Property Organization (WIPO). Disponível em: <https://patents.google.com/patent/WO2017177301A1>. Acesso em: 20 mar. 2026.

PEERAPONG, P.; LIMMEECHOKCHAI, B. Optimal photovoltaic resources harvesting in grid-connected residential rooftop and in commercial buildings: cases of Thailand. *Energy Procedia*, v. 79, p. 39–46, nov. 2015.

POGHOSYAN, A.; GOLKAR, A. CubeSat evolution: analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions. *Progress in Aerospace Sciences*, v. 88, p. 59–83, 2017.

POULEK, V. et al. PV panel with integrated lithium accumulators for BAPV applications one year thermal evaluation. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 10, p. 150–152, 2020.

QASIM, M. A. et al. A new maximum power point tracking technique for thermoelectric generator modules. *Inventions*, v. 6, p. 88, 2021.

RAHIMI, A. et al. A compact electromagnetic vibration harvesting system with high performance interface electronics. *Procedia Engineering*, v. 25, p. 215–218, 2011.

RAHMAN, M. S.; CHAKRAVARTY, U. K. A hybrid energy harvesting system based on solar radiation and mechanical vibration. In: **ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION (IMECE), 2018, Pittsburgh**. Anais... Pittsburgh, PA, USA: American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2018.

RIFFAT, S. B.; MA, X. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, v. 23, p. 913–935, 2003.

ROWE, D. M. Applications of nuclear-powered thermoelectric generators in space. *Applied Energy*, v. 40, p. 241–271, 1991.

ROWE, D. M. CRC handbook of thermoelectrics. Boca Raton: CRC Press, 1995.

ROWE, D. M. (ed.). Thermoelectrics handbook: macro to nano. Boca Raton: CRC Press, 2006.

SACHS, J. et al. Sustainable development report 2022. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

SATHARASINGHE, A.; HUGHES-RILEY, T.; DIAS, T. A review of solar energy harvesting electronic textiles. *Sensors*, v. 20, p. 5938, 2020.

SELVA, D.; KREJCI, D. A survey and assessment of the capabilities of CubeSats for Earth observation. *Acta Astronautica*, v. 74, p. 50–68, 2012.

SHAO, R. et al. Maximum power point tracking of thermoelectric generation systems under nonuniform temperature distribution: a state-of-the-art evaluation. *Frontiers in Energy Research*, v. 10, p. 857261, 2022.

SHER, H. A. et al. A new sensorless hybrid MPPT algorithm based on fractional short-circuit current measurement and P&O MPPT. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, v. 6, p. 1426–1434, 2015.

SHITTU, S. et al. Review of thermoelectric geometry and structure optimization for performance enhancement. *Applied Energy*, v. 268, p. 115075, 2020.

SILVA, E. A. DA et al. Self-powered system development with organic photovoltaic (OPV) for energy harvesting from indoor lighting. *Electronics*, v. 13, n. 13, 2024.

SIMBURGER, E. et al. Integrated solar power module. **US6300158B1**, 9 out. 2001.

SIMBURGER, E. et al. Flexible thin film solar cell. **US6410362B1**, 25 jun. 2002. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US6410362B1/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.

SIMBURGER, E. et al. Integrated thin film battery and circuit module. **US7045246B2**, 16 maio 2006. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US7045246B2/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.

SIMBURGER, E.; RUMSEY, D.; LIU, S.; HALPINE, J. Spacecraft solar cell monitoring system. **US8180505B2**, 15 maio 2012. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US8180505B2/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.

SINGH, R. et al. Ternary blend strategy for achieving high-efficiency organic photovoltaic devices for indoor applications. *Chemistry – A European Journal*, v. 25, p. 6154–6161, 2019.

SIPPERLEY, M.; SMITH, C. Thermoelectric rocket propellant tank pressurization system. **US10495028B1**, 3 dez. 2019. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US10495028B1/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.

SLATER, D. Solar array remote acoustic sensing (SARAS). **US10078328B1**, 18 set. 2018. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US10078328B1/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.

SNYDER, G. J. Small thermoelectric generators. *Electrochemical Society Interface*, v. 17, p. 54–56, 2008.

SOARES, G. B. et al. Thermoelectric generators applied as a power source in CubeSats: state of the art. *Energies*, v. 18, n. 1, 2025.

SRT MICROELECTRONICS. LIC (3.8V) series specification: LIC0813Q3R8206. [S.l.]: SRT Microelectronics, [s.d.].

STRAUB, J. et al. OpenOrbiter: a low-cost, educational prototype CubeSat mission architecture. *Machines*, v. 1, p. 1–32, 2013.

SUARI, J.; WILLIAMS, A. CubeSat system, method and apparatus. **US9150313B2**, 6 out. 2015. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US9150313B2/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.

SUNYIMA TECH. High efficiency solar panel 100x100 mm 5V/1W datasheet. 2023.

SUTIKNO, T.; APRILIANO, R. A.; PURNAMA, E. H. S. Application of non-isolated bidirectional DC–DC converters for renewable and sustainable energy systems: a review. *Clean Energy*, v. 7, p. 293–311, 2023.

SYSOUPHAT, A. J.; KENNEDY, S. D. A power supply. **WO2019210358A1**, 7 nov. 2019. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2019210358>. Acesso em: 20 mar. 2026.

SZE, S. M.; NG, K. K. Physics of semiconductor devices. 3. ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2006.

TAKSHI, A. et al. A critical review on the voltage requirement in hybrid cells with solar energy harvesting and energy storage capability. *Batteries & Supercaps*, v. 4, p. 252–267, 2021.

TAKSHI, A.; TEVI, T.; RAHIMI, F. Organic photovoltaic devices with concurrent solar energy harvesting and charge storage capability. In: **SPIE OPTICS + PHOTONICS FOR SUSTAINABLE ENERGY, 2015**. Anais... 2015.

TAN, W.-H.; MOHAMAD-SALEH, J. Critical review on interrelationship of electro-devices in PV solar systems with their evolution and future prospects for MPPT applications. *Energies*, v. 16, n. 2, p. 850, 2023.

TANG, X. et al. Energy harvesting technologies for achieving self-powered wireless sensor networks in machine condition monitoring: a review. *Sensors*, v. 18, p. 4113, 2018.

TANG, Y. et al. Integration designs toward new-generation wearable energy supply-sensor systems for real-time health monitoring: a minireview. *InfoMat*, v. 2, p. 1109–1130, 2020.

TEXAS INSTRUMENTS. Hysteresis control MPPT method with generic DC/DC converter. Dallas: Texas Instruments, 2024. (SLVAFT9).

TEXAS INSTRUMENTS. TPS61023 3.7-A boost converter with 0.5-V ultra-low input voltage (Rev. B). Dallas: Texas Instruments, 2020. (SLVSF14B).

THERMONAMIC. TEHP1-24156-1.2 thermoelectric module datasheet. Xiamen, China, 2022. Disponível em: <https://www.thermonamic.com/TEHP1-24156-1.2-English.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2026.

THERMONAMIC. TEHP1-1263-1.5 thermoelectric module datasheet. Disponível em: <https://www.thermonamic.com/TEHP1-1263-1.5-English.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2025.

TOHIDI, F.; HOLAGH, S. G.; CHITSAZ, A. Thermoelectric generators: a comprehensive review of characteristics and applications. *Applied Thermal Engineering*, v. 201, p. 117793, 2022.

TRIBAK, F.; BENDAOU, O.; NEJMA, F. B. Impact of orbit inclination on heat transfer in a 1U LEO CubeSat. In: **MATEC WEB OF CONFERENCES, 2022**. Anais... 2022.

TRITT, T. M.; BÖTTNER, H.; CHEN, L. Thermoelectrics: direct solar thermal energy conversion. *MRS Bulletin*, v. 33, n. 4, p. 366–368, 2008. DOI: 10.1557/mrs2008.73.

TZENG, S. C.; JENG, T. M.; LIN, Y. L. Parametric study of heat-transfer design on the thermoelectric generator system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 52, p. 97–105, 2014.

UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE (USPTO). Cooperative Patent Classification (CPC). Alexandria, VA, 2024. Disponível em: <https://www.uspto.gov/web/patents/classification/cpc.html>. Acesso em: 20 mar. 2026.

VENKATASUBRAMANIAN, R.; HIMMTANN, M.; GAJENDIRAN, P.; PIERCE, J.; FAIRBANKS, N.; UNG, R.; BALLARD, J.; MARANCHI, J. Nano-engineered thin-film thermoelectric converter for photovoltaic applications. **US20220285571A1**, 8 set. 2022. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US20220285571A1/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.

VIJAYAN, K. et al. Non-linear energy harvesting from coupled impacting beams. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 96–97, p. 101–109, 2015.

VON LUKOWICZ, M. et al. Characterisation of TEGs under extreme environments and integration efforts onto satellites. **Journal of Electronic Materials**, v. 44, p. 362–370, 2015.

WANG, M.; MA, W.; ZHANG, Z.; WANG, Y.; ZHU, Q.; LIU, X. Compact nuclear power system applied to space environment and working method. **CN110043338B**, 28 nov. 2023.

WATANABE, R. B. et al. Implementation of the bio-inspired metaheuristic firefly algorithm (FA) applied to maximum power point tracking of photovoltaic systems. **Energies**, v. 15, p. 5338, 2022.

WAYDO, S.; HENRY, D.; CAMPBELL, M. CubeSat design for LEO-based Earth science missions. In: **IEEE Aerospace Conference**, 2002, Big Sky. Anais... Big Sky, MT, USA, 2002.

WEISS, G.; SADON, A.; ELYASAF, A.; SINAI, M. Scenario based method for testing software. **US11138100B2**, 5 out. 2021. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US11138100B2/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.

WENWEN, C.; NING, S.; HAO, W.; JIANPING, C.; NA, C.; CHAO, Y.; FANG, L. Micro-nano satellite power system based on super capacitor. **CN106602694A**, 26 abr. 2017. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/CN106602694A/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.

WERTZ, J. R.; LARSON, W. J. (ed.). Space mission analysis and design. 3. ed. Torrance: Microcosm Press; Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.

WERTZ, J. R.; EVERETT, D. F.; PUSCHELL, J. J. Space mission engineering: the new SMAD. Hawthorne: Microcosm Press, 2011. **WIPO (WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION).** PATENTSCOPE. 2024. Disponível em: <https://www.wipo.int/patentscope/en/>. Acesso em: 20 mar. 2026.

WOODS, J. Solar energy conversion and transmission system and method. **US9815573B2**, 14 nov. 2017. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US9815573B2/en>. Acesso em: 20 mar. 2026.

XIAOXIA, X.; FENG, Y.; WEIJIA, R.; JIAN, D. Satellite storage battery system. **CN113422423B**, 30 nov. 2021.

YAN, J. et al. Review of micro thermoelectric generator. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v. 27, p. 1–18, 2018.

YU, P. et al. Numerical simulation of thermoelectric-based temperature control system for CubeSat in space. In: **IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)**, 2021, Kaohsiung. Anais... Kaohsiung, Taiwan, 2021.

ZHANG, H.; MA, T. Roles of the excitation in harvesting energy from vibrations. **PLoS One**, v. 10, p. 1–10, out. 2015.

ZHANG, S. et al. Development of an organic photovoltaic energy harvesting system for wireless sensor networks; application to autonomous building information management systems and optimisation of OPV module sizes for future applications. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 236, p. 111550, 2022.

ZHANG, Z.; WANG, X.; YAN, Y. A review of the state-of-the-art in electronic cooling. **e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy**, v. 1, p. 100009, 2021.

ZHOU, Y. et al. Thermal design and analysis of JZJ-5 CubeSat. In: **Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ACMAE)**, 13., 2022, Chengdu. Anais... Chengdu, China, 2022.

APÊNDICES

CAPÍTULO 3

REVIEW OF ENERGY HARVESTING TECHNIQUES FOR THE DEVELOPMENT OF SELF-POWERED SYSTEMS: METHODS AND APPLICATIONS

Data de aceite: 01/08/2024

Eder Andrade da Silva

Universidade Federal da Integração
Latinoamericana – UNILA
Programa de Pos-graduação
Interdisciplinar em Energia e
Sustentabilidade – PPGIES
Foz do Iguaçu, PR

Jorge Javier Gimenez Ledesma

Universidade Federal da Integração
Latinoamericana – UNILA
Programa de Pos-graduação
Interdisciplinar em Energia e
Sustentabilidade – PPGIES
Foz do Iguaçu, PR

Marco Roberto Cavallari

Universidade Estadual de Campinas
(UNICAMP)
Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação (FEEC)
Campinas, SP

Oswaldo Hideo Ando Junior

Universidade Federal Rural de
Pernambuco - UFRPE
Grupo de Pesquisa em Energia &
Sustentabilidade Energética - GPEnSE
Cabo de Santo Agostinho – PE

RESUMO: Este capítulo apresenta uma breve revisão do potencial das técnicas de captação de energia residual (*Energy Harvesting*) para o desenvolvimento de sistemas autoalimentados (*self-powered*) que abrangem microgeradores, sensores autônomos e Internet das Coisas (IoT). Inicialmente, discute-se a importância da conservação e da eficiência energética, destacando a necessidade de aprimorar técnicas eficazes para o aproveitamento de energias residuais, com foco em eficiência, conservação e sustentabilidade. Posteriormente, são exploradas as principais formas de aproveitamento baseadas em *Energy Harvesting*, incluindo métodos como piezoelectricidade, termoelectricidade, acoplamento magnético, radiofrequência e solar. Finalmente, são apresentados exemplos de aplicações que ilustram o potencial dessas técnicas para o desenvolvimento de sistemas autoalimentados.

PALAVRAS-CHAVE: Piezoelectricidade, Termoelectricidade, Acoplamento magnético, Radiofrequência, Solar, Microgeração, Captação de Energia, Sensores autônomos.

ABSTRACT: This chapter presents a brief review of the potential of energy harvesting techniques for the development of self-powered systems that include micro-generators, autonomous sensors and the Internet of Things (IoT). Initially, the importance of energy conservation and efficiency is discussed, highlighting the need to improve effective techniques for harnessing residual energy, with a focus on efficiency, conservation and sustainability. Subsequently, the main forms of utilization based on Energy Harvesting are explored, including methods such as piezoelectricity, thermoelectricity, magnetic coupling, radiofrequency and solar. Finally, examples of applications are presented which illustrate the potential of these techniques for the development of self-powered systems.

KEYWORDS: Piezoelectricity, Thermoelectricity, Magnetic coupling, Radiofrequency, Solar energy, Microgeneration, Energy harvesting, Autonomous sensors.

INTRODUÇÃO

O aumento das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), especialmente nos setores energético e de transporte, tem sido um ponto crítico destacado por organizações como a *Comisión Económica para América Latina y el Caribe* (2022) e o *World Population Review* (2022). Desde 1990, as emissões globais cresceram 41%, sendo o setor de energia responsável por 73% dessas emissões, destacando-se a importância e a necessidade de buscar alternativas e adotar tecnologias sustentáveis alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 e aos compromissos do Acordo de Paris para a neutralização das emissões de GEE até 2050 (SACHS et al., 2022). Destaca-se que o Brasil, comprometido com o Acordo de Paris, visa reduzir suas emissões de CO₂ em 37% até 2025, com perspectiva de alcançar uma redução de 43% até 2030 (IEA et al., 2022; RUCKS et al., 2023).

O constante desenvolvimento do setor industrial global, aliado ao aumento do uso de equipamentos eletrônicos, tem provocado um crescimento exponencial na demanda por eletricidade nas últimas décadas, resultando em obstáculos nos sistemas de geração de energia (SUTIKNO et. al., 2023). Neste contexto, o desenvolvimento e a implementação de técnicas avançadas de *Energy Harvesting* (EH), não apenas buscam maximizar a eficiência energética e reduzir custos operacionais, mas também desempenham um papel crucial na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Ao transformar energia residual, que de outra forma seria dissipada, em energia elétrica utilizável, a EH contribui para a diminuição da dependência de fontes tradicionais de energia e do uso de baterias frequentemente associadas a altas emissões de GEE. Essa abordagem não só se alinha com os compromissos globais de mitigação climática, mas também impulsiona a transição para um futuro mais sustentável e resiliente.

Energy Harvesting consiste na captura e na conversão de energia que normalmente seria perdida em formas úteis de energia elétrica, utilizando transdutores especiais capazes de transformar grandezas físicas como pressão, temperatura ou luz em energia elétrica (FARMER & JUSTIN, 2007). EH surge da necessidade de melhorar a eficiência energética

e buscar soluções de autoalimentação para microssistemas isolados, visando reutilizar energia desperdiçada e transformá-la em oportunidades de reaproveitamento, ou seja, a captação de energia residual (ANDO JUNIOR et al., 2014).

A crescente demanda energética impulsiona o desenvolvimento tecnológico global, incluindo métodos de aproveitamento de energia. Este cenário promove a criação e o aprimoramento de métodos destinados a reduzir perdas nos processos industriais, diminuir custos e aumentar a produção. E com o avanço dos dispositivos eletrônicos nas últimas décadas, houve uma tendência de miniaturização e melhoria das funcionalidades, resultando em significativa redução no consumo de energia em comparação com dispositivos mais antigos. Este progresso, aliado a outros fatores, permitiu o desenvolvimento de tecnologias capazes de aproveitar energia residual de diversas fontes (ANDO JUNIOR et al., 2014).

A pesquisa e aplicação de novas formas de captação de energia residual continuam a expandir-se, impulsionadas por considerações ambientais e sociais, visando mitigar os impactos adversos da má gestão energética e potenciais crises.

O capítulo está estruturado em quatro seções que abordam diferentes aspectos do desenvolvimento de técnicas de EH para o desenvolvimento de sistemas autoalimentados (*self-powered*). Na Seção 1, apresenta uma breve introdução sobre o assunto e sua importância para o desenvolvimento de sistemas autoalimentados e promoção da sustentabilidade energética. Enquanto na seção 2, tem-se um breve relato histórico abordando a origem das principais alternativas para captação de energia, começando pela termoeletricidade, seguida pela piezoeletricidade, eletromagnetismo, radiofrequência e finalizando com energia solar, destacando seus avanços e contribuições para a ciência. Na Seção 3, apresentam-se os principais métodos para captação de energia, destacando seu potencial para o desenvolvimento e a aplicação em sistemas autoalimentados. Finalmente, a Seção 4 apresenta as principais considerações para uso em futuras pesquisas, explorando potenciais melhorias para o desenvolvimento de sistemas autoalimentados em distintos cenários.

FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA

Nesta seção do capítulo, apresenta-se um breve relato histórico sobre a origem das principais alternativas para captação de energia. Inicia-se com a termoeletricidade, seguida pela piezoeletricidade, eletromagnetismo, radiofrequência e conclui-se com a energia solar, destacando seus avanços e contribuições.

Termoeletricidade

A termoeletricidade refere-se à conversão direta de uma diferença de temperatura em uma tensão elétrica, conhecida como efeito *Seebeck*, ou o fenômeno inverso, conhecido como efeito Peltier. A história da teoria termoelétrica remonta a 1823, quando Thomas J. Seebeck conduziu experimentos com uma bússola e observou que ela se desviava quando aproximada de um circuito fechado formado por dois condutores diferentes, aquecendo a junção entre eles. Embora suas conclusões iniciais tenham sido equivocadas, estudos subsequentes corrigiram esses equívocos, revelando o verdadeiro fenômeno da termoeletricidade (ROWE, 1995).

Por volta de 1850, o desenvolvimento da termoeletricidade ganhou impulso, à medida que a busca por novas formas de conversão de energia se expandia para diversas áreas, incluindo a utilização de materiais termoelétricos para geração de eletricidade (ROWE, 1995). Os geradores de estado sólido baseiam-se no efeito *Seebeck*, permitindo que materiais termoelétricos convertam diretamente energia térmica em energia elétrica (KARABETOGLU & SISMAN, 2012), (ANDO JUNIOR et al., 2014).

O efeito *Seebeck* resulta na geração de uma diferença de potencial, denominada tensão de *Seebeck* (E_s), entre duas junções de condutores, ou semicondutores, quando submetidas a um gradiente de temperatura. Isso gera uma corrente contínua no circuito termoelétrico (ANDO JUNIOR et al., 2014).

A Figura 1 ilustra o efeito *Seebeck*, mostrando a relação entre o gradiente de temperatura e a tensão gerada por meio do efeito termoelétrico.

$$E_s = \int_{T_{fria}}^{T_{quente}} \alpha_{A,B} dT = \alpha_{A,B}(\Delta T)$$

Onde E_s (V) é a tensão de *Seebeck*, $\alpha_{A,B}$ (V/K) é o coeficiente diferencial de *Seebeck*, ΔT (K) um gradiente de temperatura (variável de integração) de uma temperatura baixa (T_{fria} , K) a uma alta (T_{quente} , K).

Os Geradores Termoelétricos (TEGs), dispositivos de estado sólido, operam em condições extremas, exigindo gradientes de temperatura elevados para a geração de energia. Apresentam eficiência energética entre 5% e 15%, sendo aplicados amplamente em *Energy Harvesting* (CAMACHO-MEDINA et. al., 2014), (KIM & BUN, 2014). Dado que os geradores termoelétricos são fabricados pela associação em série de N termopares, basta utilizar a equação para obter a tensão de saída do módulo (ANDO JUNIOR et al., 2014).

$$V = NE_s$$

onde V (V) é a tensão de saída do gerador termoelétrico, N o número de termopares internos que compõem o módulo e E_s (V) a tensão de *Seebeck* de um único termopar.

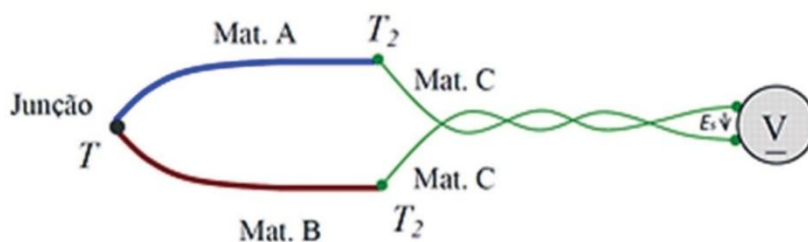


Figura 1 – Demonstrativo do efeito *Seebeck*.

Fonte: (IZIDORO et. al, 2016)

Dispositivos termoelétricos são capazes de transformar energia elétrica em gradientes de temperatura e vice-versa. Esta forma de conversão é principalmente correlacionada com os efeitos *Seebeck* e *Peltier*. Quando é estabelecida uma diferença de temperatura entre as partes “quentes” e “frias” de dois materiais semicondutores distintos é gerada uma tensão elétrica, que pode ser chamada de tensão de Seebeck, essa tensão é diretamente proporcional a um diferencial de temperatura, nesse caso o coeficiente de Seebeck. (ROWE, 1995).

Na Figura 2 apresenta o módulo termoelétrico (TEG) e suas partes constituintes. Destaca-se algumas das vantagens de se utilizar TEG para esse tipo de conversão de energia são: (i) os dispositivos termoelétricos não possuem partes móveis, portanto não são necessárias revisão e manutenção frequentes; (ii) não contém clorofluorcarbonetos ou outros materiais que demandem reabastecimento ou reposição; e (iii) razão de potência por peso (W/Kg) (KARABETOGLU & SISMAN, 2012), (ANDO JUNIOR et al., 2014).

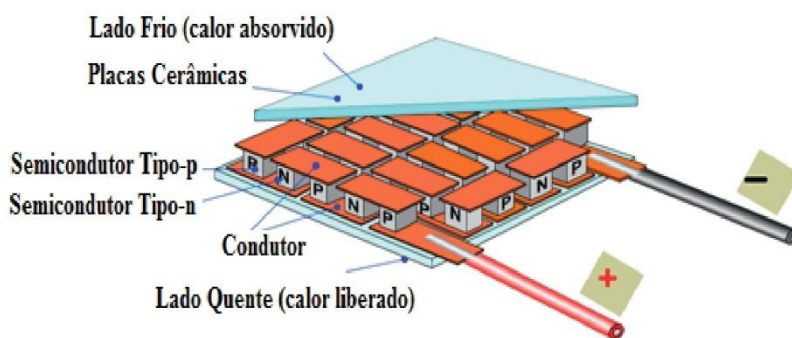


Figura 2 – Diagrama esquemático de um dispositivo termoelétrico

Fonte: (ANDO JUNIOR, 2014)

Dispositivos termoelétricos são utilizados em amplas áreas, desde aeroespacial, instrumental, militar ou produtos comerciais. Em baixa potência, pode-se exemplificar o uso de TEG em calculadoras ou relógios, substituindo baterias em alguns sistemas. A máxima eficiência termoelétrica convertida em um TEG é definida pela equação (KARABETOGLU & SISMAN, 2012), (ROWE, 1995):

$$\eta_{max} = \frac{T_{quente} - T_{frio}}{T_{quente}} \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\sqrt{1+ZT} + \frac{T_{quente}}{T_{frio}}}$$

Enquanto a figura de mérito é obtida pela equação:

$$Z = \frac{s^2}{\rho\lambda} T$$

onde Z é figura de mérito, T (K) a temperatura absoluta, S (V/K) o coeficiente Seebeck, ρ (Ω m) a resistência elétrica, λ (W/m/K) é o coeficiente de condução térmica do material, T_{fria} (K) a temperatura do lado frio dos módulos termoelétricos e T_{quente} (K) a temperatura do lado quente do módulo termoelétrico. Quando o calor flui através de um gerador termoelétrico, parte do calor absorvido é convertido em energia elétrica, enquanto o restante, em vez de ser dissipado para o ambiente, é recolhido e usado para o aquecimento de um fluido (KARABETOGLU & SISMAN, 2012).

A Figura 3 ilustra uma disposição básica de um sistema de cogeração termoelétrica. Contudo, quando o dispositivo é um gerador termoelétrico como gerador de um pré-aquecimento de um fluido incorporado, uma pequena porção de calor (Q_1 e Q_3) fluirá através de uma derivação constituída pelo módulo termoelétrico e então convertida em eletricidade. O calor que é dissipado no lado frio (Q_2) volta para a entrada do fluido aquecedor e pré-aquecerá o fluido. Com isso, o calor de Q_2 não é desperdiçado (IZIDORO et. al, 2016).

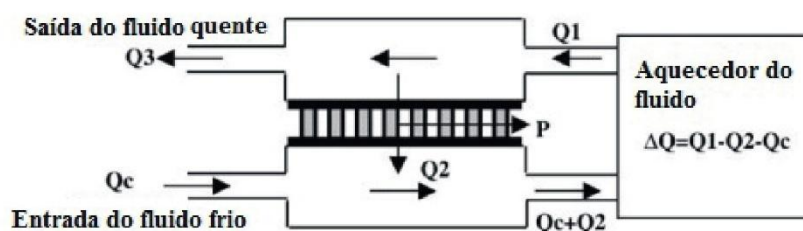


Figura 3 – Gerador termoelétrico utilizado para pré-aquecer um fluido.

Fonte: (IZIDORO et. al, 2016)

Do ponto de vista de aplicação da termoeletricidade para *Energy Harvesting*, destacam-se: **(i)** aproveitamento do calor dispersado em veículo à combustão; **(ii)** otimização de dispositivos termoelétricos na conversão de energia solar; e **(iii)** aproveitamento do calor residual de metal líquido em processos de fabricação e de vários tipos de sistemas térmicos (ANDO JUNIOR et al., 2014).

Piezoelasticidade

O efeito piezoelétrico se refere à capacidade de certos materiais gerar uma diferença de potencial elétrico quando submetidos a um estresse mecânico, como pressão ou vibração. Esse fenômeno também inclui o efeito inverso, onde esses materiais sofrem deformação quando expostos a um campo elétrico. Pierre e Jacques Curie foram os primeiros a observar esse comportamento em 1880, quando descobriram que certos cristais adquiriam uma carga elétrica sob estresse mecânico, definindo assim, o efeito piezoelétrico (FARMER & JUSTIN, 2007).

A utilização de materiais piezoelétricos começou na década de 1920 com dispositivos compostos por cristais, e a partir dos anos 1940 na geração baseada em materiais cerâmicos. No entanto, foi após a Primeira Guerra Mundial que esses materiais começaram a ser explorados em aplicações como sensores, transdutores e dispositivos de energia (ARMENDANI, 2016).

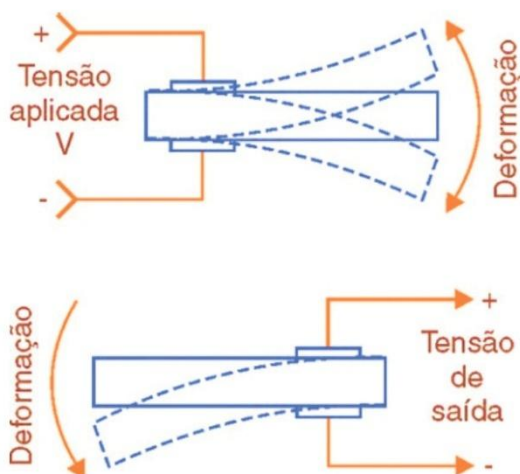


Figura 4 – Ilustração demonstrando o efeito piezoelétrico.

Fonte: (ARMENDANI, 2016).

Os dispositivos piezoelétricos têm uma ampla gama de aplicações, desde a condução elétrica em grafenos até sistemas híbridos em estradas para geração de eletricidade local, carregamento de dispositivos médicos, monitoramento por sensores, sonares e outras aplicações que exploram sua capacidade de converter energia mecânica em energia elétrica (ZHANG, 2015), (HARB, 2011). Nas Figuras 5 (a) e (b) são mostradas ilustrações esquemáticas do sistema do módulo piezoelétrico através de suas vistas, a superior e a lateral, respectivamente (LIU et al., 2011).

Um estudo realizado com o modelo piezoelétrico da Figura 6 apresenta resultados de tensão gerada de acordo com a frequência de vibração e o número de dispositivos piezoelétricos (PZT) em circuitos série e paralelo (LIU et al., 2011).

Para a medição da tensão de saída o sistema piezoelétrico é empregado a testes de vibração. Constituído por um agitador de vibração, amplificador de potência e um analisador de sinal dinâmico. O sinal de vibração é gerado a partir do analisador de sinal dinâmico, amplificado e utilizado para controlar a amplitude da frequência de vibração. Assim sendo, o sistema piezoelétrico sofre excitação e gera tensão de saída que será recolhida e registrada pelo analisador de sinal. Os resultados estão visíveis na Figura 6 e demonstram as diferenças entre a potência final dos sistemas piezoelétricos conectados em série e/ou paralelo (LIU et al., 2011).

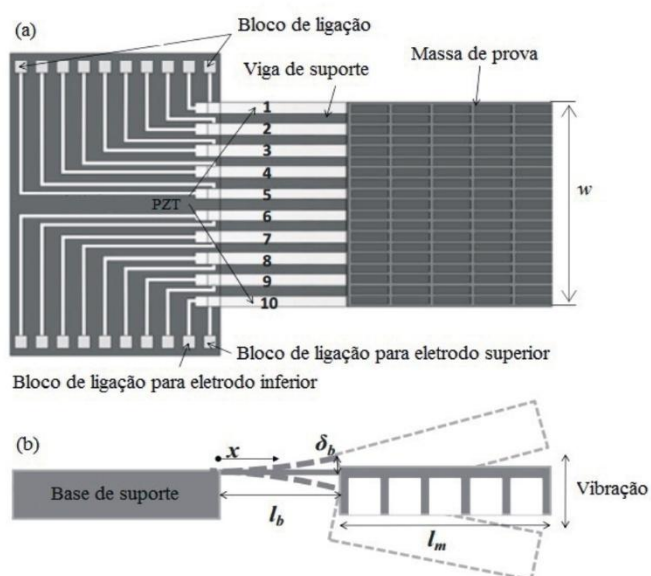


Figura 5 – Ilustração esquemática do sistema piezoelétrico: (a) vista superior e (b) vista lateral.

Fonte: (LIU et al., 2011).

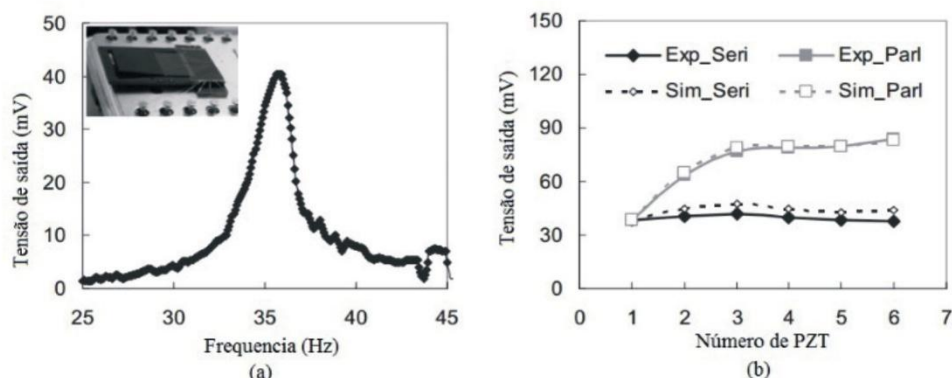


Figura 6 – Ilustração demonstrando (a) a Tensão de saída por frequência de um exemplar de PZT e da (b) Voltagem de saída por diferentes números de PZT conectados em série e em paralelo.

Fonte: (LIU et al., 2011).

Ao contrário do sistema linear em que apenas um módulo é excitado, o sistema não-linear impacta mais módulos com a mesma base de excitação por frequência. A variação do contato rígido altera a dependência de energia dada pelo diferencial do raio da curvatura do piezoelétrico (VIJAYAN et al., 2015).

As reações do feixe determinam a energia a ser gerada e, em seguida, é analisada a eficácia da energia gerada a partir da pressão piezoelétrica. O piezoelétrico pode ser adicionado ao feixe em qualquer configuração isomorfa ou bimorfa (VIJAYAN et al., 2015).

Outras investigações experimentais mostram um sensor sem fio (*wireless*) “*smart*” de baixo custo, que é utilizado para monitoramento de condições de equipamentos e diagnóstico de falhas. A ferramenta para mensurar a extração e acumulação de elementos, é no local onde está ocorrendo o trabalho em condições áspero/molhado (OSTESEVICIUS et al., 2015).

É impossível parar a vibração de curvatura de ferramenta estrutural. Isso permite um sistema autônomo de produção de energia sem cabos de suporte ou baterias. Para a estabilização do equipamento há uma dependência de um estabilizador CC (corrente contínua), cuja diferença de potencial é usada para suprir os componentes eletrônicos e os geradores que invertem a amplitude da tensão (ZHANG, 2015).

O subsistema de conversão de energia elétrica realiza a conversão de energia elétrica, gerada pelo transdutor de energia, em um microcontrolador de tensão. O transdutor primário, ou seja, piezoelétrico, converte vibrações mecânicas em energia elétrica, que é variável e precisa de suficientemente larga amplitude. Em contrapartida o transdutor secundário, o qual converte a tensão variável em constante e contínua, pode ser modificada. Essa proposta de um sensor *wireless* de baixa potência possui a função de monitorar a necessidade de ferramentas em que o suprimento de energia é limitado (OSTESEVICIUS et al., 2015).

Eletrromagnetismo

A conexão entre eletricidade e magnetismo foi estabelecida pela primeira vez em 1820 por Hans Oersted. Observou-se que uma corrente elétrica circulando em um fio causava deflexão em uma agulha magnética de bússola. Essa descoberta inicial foi fundamental para o desenvolvimento posterior das aplicações do eletromagnetismo (HARB, 2011).

Em 1831, Michael Faraday expandiu esse campo ao descobrir que uma diferença de potencial é induzida nas extremidades de um condutor quando ele se desloca através de um campo magnético. Essa descoberta levou à formulação da lei de Faraday, que estabelece que a força eletromotriz induzida em um circuito, é proporcional à taxa de variação temporal do fluxo magnético através do circuito. No mesmo ano, Faraday inventou o primeiro gerador de corrente contínua, que consistia em uma placa de cobre girando entre polos magnéticos (HARB, 2011).

A partir da década de 1930, com base nas descobertas de Faraday sobre a indução eletromagnética, o acoplamento magnético começou a ser amplamente utilizado para a geração de eletricidade e para melhorar o desempenho de dispositivos eletrônicos. Este princípio é aplicado em diversos sistemas, como por exemplo a alimentação de relógios por meio da conversão de movimentos humanos em energia rotativa, sistemas autoalimentados para bicicletas por meio de pedais, turbinas de água e monitoramento de equipamentos (ELVIN, 2012), (PRIYA, 2009).

Os dispositivos baseados no acoplamento magnético desempenham um papel crucial na utilização eficiente da energia mecânica e na geração de eletricidade em várias aplicações industriais e de consumo (ELVIN, 2012), (PRIYA, 2009).

Todos os sistemas eletromagnéticos de EH baseados em energia cinética podem ser classificados em três grupos de conversão magnética: **(i)** a conversão rotacional, **(ii)** a conversão oscilatória (vibracional), e a **(iii)** conversão híbrida (transformando oscilatória em movimentos rotacionais) (RAHIMI et al., 2011).

Os **conversores rotacionais** utilizam-se de partes móveis e ímãs permanentes para a geração do fluxo magnético. Neste caso, é necessário um projeto dedicado da parte eletrônica para maior eficiência de conversão. Estes modelos possuem bom desempenho em baixas frequências e seus picos de tensão de saída são relativamente pequenos (DINULOVIC et al., 2015), (RAHIMI et al., 2011).

Os **conversores oscilatórios** são baseados em sistemas massa-mola-amortecedor (do inglês, *mass-spring-damper* - MSD), onde os ímãs permanentes são utilizados como massa oscilatória. Geralmente, esse tipo de conversor é utilizado em sistemas de baixa frequência e, é caracterizado pela baixa densidade de energia (DINULOVIC et al., 2015).

Os **conversores híbridos** usam um rotor que transforma vibração linear em rotação. Os conversores rotacionais são aplicáveis em sistemas que possuem uma frequência a

partir de 1 até 400 krpm. Esse tipo de conversor tem sido amplamente utilizado em relógios (DINULOVIC et al., 2015).

Um transdutor eletromagnético é composto de um rotor (parte móvel) e uma parte estacionária. A tensão induzida é controlada usando alimentação via sistema eletromagnético. A tensão CA (corrente alternada) é convertida em CC e levada a um regulador de tensão de saída. A equação a seguir pode ser utilizada para calcular os parâmetros analíticos para obter uma visão sobre o gerador (DINULOVIC et al., 2015):

$$V_{oc} \sim (R_0^2 - R_i^2) \times \left(\frac{T_{pm}}{T_{pm} + T_{ag} + T_c} Br \right) p N \omega$$

onde V_{oc} é a tensão do circuito aberto, R_0 o raio externo da bobina, R_i o raio interno da bobina, T_{pm} a espessura do ímã permanente, T_{ag} a espessura do espaço de ar, T_c a espessura do sistema de bobina, Br o remanescente do ímã permanente, p o número de polos, N o número de voltas/polo e ω a velocidade angular.

O sistema eletromagnético consiste em rotor e estator. Uma alta saturação da densidade de fluxo evita a saturação dos ímãs em um dispositivo de *Energy Harvesting*. Para um bom desempenho, é importante encontrar um acerto entre a indutância elétrica e a resistência das molas (DINULOVIC et al., 2015).

O sistema de conversão por movimentos é baseado em rotação, onde a conversão é iniciada por pressão de um botão. O movimento do botão é linear, por conseguinte, um mecanismo para o movimento de conversão é necessário para converter um movimento linear do botão num movimento de rotação do sistema magnético.

A Figura 7 ilustra o mecanismo de conversão da engrenagem com uma cremalheira redonda. A embreagem unidirecional faz parte do sistema, uma vez que o sinal de tensão negativa for gerado resulta em uma tensão de saída nula. Os ímãs permanentes rodam acima do sistema de bobina incorporado, dessa maneira a tensão elétrica é induzida (RAHIMI et al., 2011).

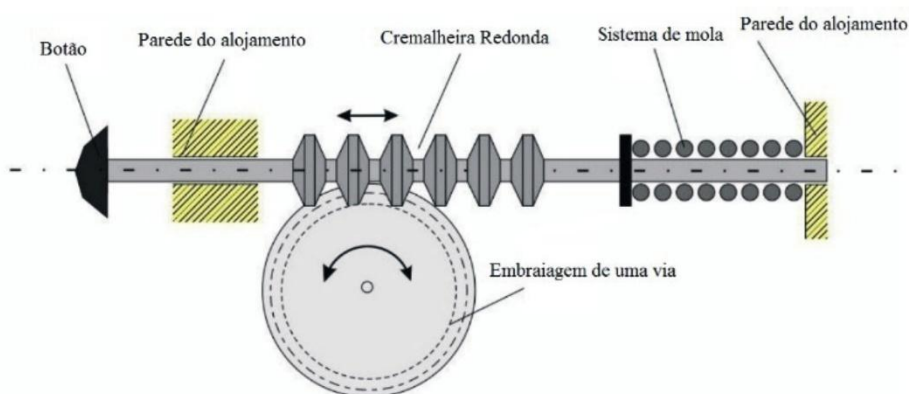


Figura 7 – Mecanismo cinético para a conversão do movimento.

Fonte: (RAHIMI et al., 2011).

A energia cinética resultante das vibrações do sistema é convertida em energia elétrica, onde a tensão induzida é gerada através de uma bobina, devido ao movimento de vibração externo de um ímã. A tensão CA gerada é convertida em CC e, posteriormente, é armazenada num capacitor atuando como bateria (RAHIMI et al., 2011).

Radiofrequência (RF)

As radiofrequências são formas de energia elétrica transmitidas pelo ar, estando vastamente presentes no ambiente cotidiano. O principal objetivo do estudo dessa tecnologia, é sua utilização na geração de energia elétrica para dispositivos pequenos, aproveitando a energia disponível no ambiente (ELVIN, 2012), (PRIYA, 2009).

Um circuito especializado para geração de energia, conectado a uma antena receptora, pode captar a energia de radiofrequência livre no ambiente e convertê-la em uma tensão contínua utilizável para alimentar dispositivos menores. O uso da tecnologia de radiofrequência é especialmente relevante para a geração de energia destinada a dispositivos de pequeno porte, aproveitando uma fonte de energia disponível e abundante no ambiente (ELVIN, 2012), (PRIYA, 2009).

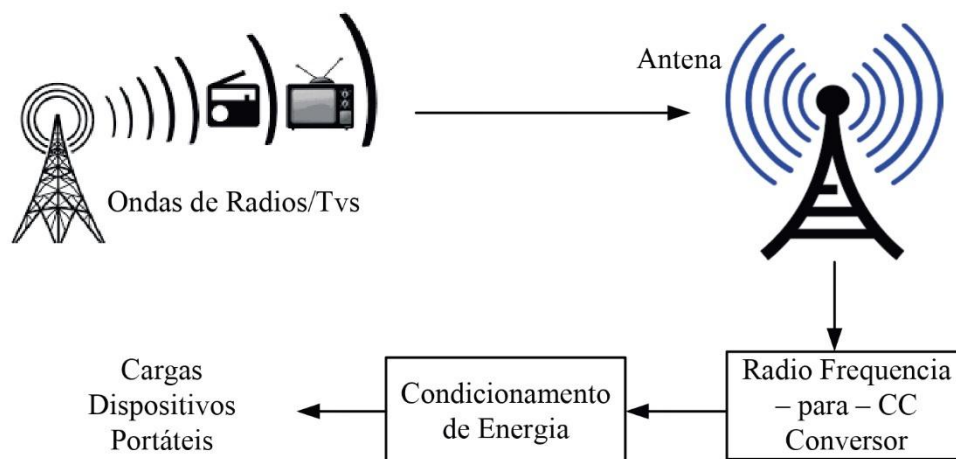


Figura 8 – Demonstrativo da aplicação de RF para *Energy Harvesting*

Fonte: (PRIYA, 2009).

Energia Solar

As células solares apresentam características distintas em comparação com outros métodos de captação de energia que para otimizar seu desempenho, é crucial encontrar o ponto de operação ideal onde a energia é extraída do painel solar.

Uma abordagem, para melhorar a eficiência da energia solar é combinar tecnologias de *Energy Harvesting*, aproveitando diferentes fontes de energia de forma complementar. Em muitos casos, pequenas placas solares são utilizadas para alimentar dispositivos de pequeno porte por exemplo, sistemas de iluminação, monitoramento e comunicação, além de diversas outras aplicações em indústria e veículos.

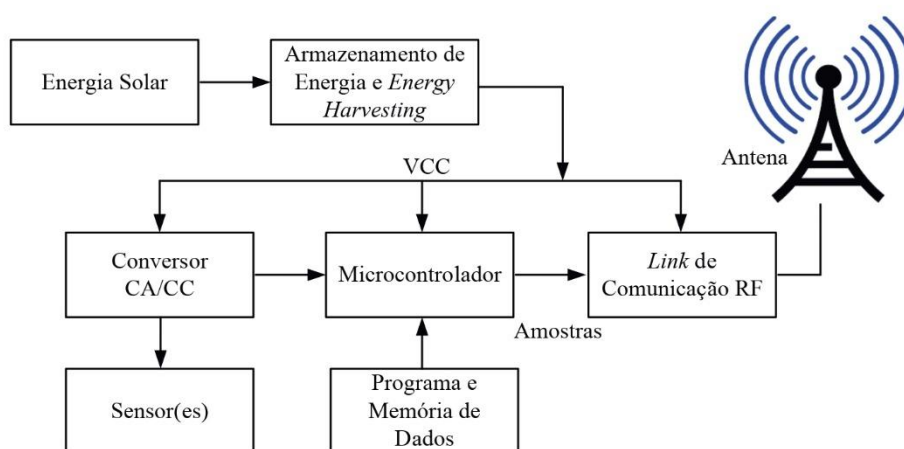


Figura 9 –Energia Solar em um sensor autônomo.

Fonte: (ELVIN, 2012).

Nessa perspectiva, novas tecnologias fotovoltaicas têm sido introduzidas, como os filmes fotovoltaicos orgânicos (OPV), que são leves, semitransparentes e eficientes em aplicações de microgeração interna, ganhando visibilidade no mercado e criando uma demanda crescente por equipamentos que viabilizem sua aplicação em larga escala. A tecnologia OPV, com sua alta eficiência na conversão da iluminação interna em energia elétrica (> 30 %), apresenta-se como uma alternativa promissora (TAN *et. al.*, 2023), (BITO *et. al.*, 2017).

No estudo de (ABDELNOUR *et. al.*, 2019) foi desenvolvido um sistema autoalimentado utilizando tecnologia de células fotovoltaicas orgânicas (OPV) para alimentar um sensor RFID do tipo SL900A-TAG. Um aspecto inovador deste trabalho, foi a fabricação por impressão de um supercapacitor flexível diretamente no OPV, formando assim, um módulo de energia integrado monoliticamente. Esse avanço possibilita a geração e armazenamento de energia de forma compacta e eficiente, adequada para aplicações onde o espaço e a flexibilidade são críticos, como em dispositivos portáteis e vestíveis (*wearables*).

ENERGY HARVESTING: METÓDO E TÉCNICA

Nesta seção, serão expostos os métodos principais de conversão para captação de energia, destacando seu potencial para o desenvolvimento e aplicação em *self-powered* com base nas referências estudadas.

Conversão de Energia por Termoeletricidade

O dispositivo termoelétrico (TEG) oferece diversas vantagens para *Energy Harvesting*, sendo uma das mais destacadas a ausência de partes móveis, que torna a conversão de energia silenciosa e livre de vibrações, ideal para aplicações em ambientes sensíveis ou com restrições de ruído. Além disso, a termoeletricidade pode operar em uma ampla faixa de temperaturas, desde condições criogênicas até centenas de graus Celsius. A robustez dos materiais termoelétricos, resistentes a vibrações e choques, e a escalabilidade da tecnologia, que pode ser ajustada para diferentes dispositivos e aplicações, também são pontos fortes. Pesquisas recentes destacam várias aplicações promissoras de TEG para EH em sensores autônomos e dispositivos autoalimentados com ênfase para as aplicações listadas/mencionadas a seguir:

Sensores de Vibração e Monitoramento Estrutural: (1) **Monitoramento de pontes e edifícios** - Utilizando o calor gerado pela radiação solar ou pela fricção do vento para alimentar sensores que monitoram a integridade estrutural e detectam rachaduras ou outros problemas. (2) **Monitoramento de máquinas rotativas** - Aproveitando o calor gerado pelo atrito ou pelo processo de produção para alimentar sensores que monitoram o desempenho da máquina e detectam falhas.

Sensores Ambientais e de Monitoramento: (1) **Monitoramento da qualidade do ar:** Utilizando o calor gerado pela radiação solar ou pela atividade humana para alimentar sensores que monitoram a qualidade do ar e detectam poluentes. (2) **Monitoramento de temperatura e umidade:** Aproveitando o calor gerado pelo ambiente ou por fontes artificiais para alimentar sensores que monitoram a temperatura e a umidade do ambiente.

Captação de Energia Cinética em Dispositivos Vestíveis: (1) **Coleta de energia do corpo humano:** Utilizando o calor gerado pelo corpo humano para alimentar dispositivos vestíveis como *smartwatches* e rastreadores de *fitness*. (2) **Coleta de energia da atividade física:** Aproveitando o calor gerado pela atividade física para alimentar dispositivos vestíveis similares.

Sistemas de Energia e Microgeração: (1) **Captação de energia de fontes renováveis:** Utilizando o calor gerado pelo sol, biomassa ou outras fontes renováveis para alimentar microgeradores que fornecem energia para um determinado dispositivo. (2) **Captação de energia de processos industriais:** Aproveitando o calor gerado nos processos industriais para alimentar principalmente microgeradores e/ou sensores autônomos.

Aplicações Espaciais e Aeroespaciais: (1) **Alimentação de satélites e espaçonaves:** Utilizando o calor gerado por fontes radioativas ou pelo sol, para alimentar satélites e espaçonaves que operam em ambientes com pouca ou nenhuma energia solar disponível. (2) **Alimentação de instrumentos científicos:** Aproveitando o calor gerado pelo ambiente ou por fontes artificiais para alimentar instrumentos científicos que operam em ambientes extremos.

É importante frisar que a escolha do TEG depende da fonte de calor disponível em sua aplicação, da quantidade de energia necessária e dos requisitos específicos do dispositivo. Embora a tecnologia termoelétrica ainda esteja em desenvolvimento, com pesquisas em andamento para melhorar a eficiência e reduzir o custo dos materiais, é claro que a tecnologia termoelétrica tem capacidade para ser usado em várias situações diferentes. Em particular, para aplicações espaciais e aeroespaciais, onde a robustez e a eficiência em ambientes extremos são cruciais.

Conversão de Energia por Piezoelectricidade

O piezoelétrico é uma solução que permite alimentar sensores autônomos e dispositivos autoalimentados, aproveitando a energia mecânica de fontes como vibrações, pressão e movimentos corporais para convertê-la em energia elétrica utilizável ou aproveitável. Entre os benefícios, destacam-se o baixo custo de manutenção ao eliminar a necessidade de substituição frequente de baterias, reduzindo os custos operacionais. Os elementos piezoelétricos são conhecidos pela robustez e durabilidade, sendo capazes de resistir a condições adversas e a aumentar a vida útil dos dispositivos. Destaca-se que a quantidade de energia gerada depende da amplitude e da frequência das vibrações ou da força aplicada, o que torna crucial otimizar o design para maximizar a eficiência energética. A versatilidade da tecnologia permite a captação de energia de várias fontes mecânicas, ampliando suas possibilidades de aplicação. Como por exemplo pode-se citar as seguintes aplicações:

Sensores de Vibração e Monitoramento Estrutural: Implementam-se sensores autônomos para monitorar vibrações e fadiga em estruturas como pontes, edifícios e equipamentos rotativos. A energia mecânica das vibrações é convertida em energia elétrica pelos elementos piezoelétricos, eliminando a necessidade de baterias.

Sensores de Pressão e Força: Utilizam-se para medir pressão, força e deformação em diversas aplicações, incluindo monitoramento de pneus e interfaces homem-máquina. A energia mecânica da pressão ou força aplicada é convertida em energia elétrica pelos elementos piezoelétricos, alimentando os sensores diretamente.

Coleta de Energia Cinética em Dispositivos Vestíveis: Implementam-se sensores piezoelétricos em dispositivos vestíveis para captar energia cinética do movimento humano, como passos, caminhadas e corridas. Essa energia é convertida e armazenada para alimentar ou transmitir para outros dispositivos.

Sensores Autônomos para Monitoramento Ambiental: são empregados no monitoramento de parâmetros ambientais, tais como a temperatura, vento e fluxo de água. As vibrações causadas por mudanças ambientais são convertidas em energia elétrica pelos elementos piezoelétricos, garantindo autonomia aos sensores.

Sistemas de Energia e Microgeração: Empregam dispositivos de EH para captar energia de vibrações em máquinas industriais e equipamentos rotativos. Essa energia é convertida em eletricidade que pode ser armazenada ou usada diretamente.

O piezoelétrico representa uma tecnologia promissora para o desenvolvimento de sensores autônomos e dispositivos *self-powered*, no avanço da tecnologia autônoma e sustentável, destacando a importância desse aspecto para investigações e avanços futuros no campo do sensoriamento inteligente.

Conversão de Energia por Acoplamento Eletromagnético

O acoplamento eletromagnético oferece diversas vantagens significativas, incluindo: **(i)** alta eficiência de conversão, isto significa, a capacidade de converter uma grande porcentagem da energia mecânica em energia elétrica, permitindo alimentar dispositivos com menor movimento ou vibração; **(ii)** versatilidade, conseqüentemente, aplicável a diversas fontes de movimento, como vibrações, rotações e movimentos lineares; **(iii)** robustez, ou em outros termos, os sistemas de acoplamento eletromagnético são robustos e resilientes a vibrações e choques, tornando-os ideais para ambientes hostis; e **(iv)** escalabilidade, ou seja, sendo facilmente escaláveis para atender às necessidades variadas de dispositivos e aplicações distintas. Por exemplo:

Sensores de Vibração e Monitoramento Estrutural: (1) Monitoramento de pontes e edifícios: Utilização da energia das vibrações estruturais para alimentar sensores que monitoram a integridade das estruturas, detectando rachaduras e outros problemas. **(2) Monitoramento de máquinas rotativas:** Captação de energia das vibrações em motores, turbinas e outras máquinas rotativas para alimentar sensores que monitoram o desempenho e detectam falhas.

Sensores de Pressão e Força: (1) Monitoramento da pressão em pneus: Aproveitamento da energia da pressão dos pneus para alimentar sensores que monitoram a pressão em tempo real, alertando pneus com baixa pressão. **(2) Medição de força em plataformas vibratórias:** Captação de energia da força aplicada em plataformas vibratórias para alimentar sensores que medem a força e oferecem *feedback* aos usuários.

Captação de Energia Cinética em Dispositivos Vestíveis: Uso da energia dos movimentos dos pés durante caminhadas e corridas para alimentar dispositivos vestíveis como *smartwatches* e rastreadores de *fitness*.

Sensores Ambientais e de Monitoramento: (1) Monitoramento da qualidade do ar: Utilização da energia das vibrações do ar para alimentar sensores que monitoram

a qualidade do ar e detectam poluentes. **(2) Monitoramento de temperatura e umidade:** Captação de energia das vibrações do ar para alimentar sensores que monitoram temperatura e umidade ambiental.

Sistemas de Energia e Microgeração: (1) Captação de energia das vibrações: em máquinas industriais para alimentar microgeradores e sensores autônomos. **(2) Aproveitamento da energia das ondas:** para alimentar microgeradores e sensores autônomos.

A escolha da aplicação mais adequada para o acoplamento eletromagnético depende da fonte de energia mecânica disponível, da quantidade necessária de energia e dos requisitos específicos do dispositivo ou sensor em questão. Esta tecnologia está em constante desenvolvimento, com novos materiais e designs sendo explorados para aprimorar eficiência e versatilidade no campo dos dispositivos *self-powered* e sensores autônomos.

Conversão de Energia por Radiofrequência (RF)

Aplicações de RF para *Energy Harvesting* tem como principal benefício o baixo custo de manutenção ao eliminar a necessidade de substituição frequente de baterias, reduzindo assim os custos operacionais. A RF permite escalabilidade e implementação eficiente de redes de sensores sem infraestrutura de energia complexa. A flexibilidade dessa tecnologia possibilita a instalação de sensores em locais remotos ou de difícil acesso, expandindo as capacidades de monitoramento e coleta de dados sem intervenção humana. Algumas das aplicações do RF em EH para alimentação de sensores autônomos e dispositivos *self-powered* pode ser visto a seguir:

Sensores Ambientais e de Monitoramento: Implementam-se sensores autônomos para monitorar temperatura, umidade, pressão, qualidade do ar e outros parâmetros ambientais em locais remotos ou de difícil acesso. A energia RF capturada de torres de celular, Wi-Fi ou outras transmissões de rádio, é alimenta os sensores, eliminando a necessidade de baterias e reduzindo a necessidade de manutenção.

Rastreamento de Ativos e Cadeia de Suprimentos: Utilizam-se etiquetas RFID ou sensores autônomos para rastrear o movimento de ativos, mercadorias ou animais em tempo real. A energia RF capturada do ambiente permite o rastreamento contínuo sem a necessidade de recarga manual.

Internet das Coisas (IoT) e Redes de Sensores Sem Fio: Criam-se redes de sensores IoT autônomos alimentados por RF para coletar dados de múltiplos pontos de interesse. A energia RF elimina a necessidade de fiação e baterias, facilitando a implantação e escalabilidade da rede.

Sensores Vestíveis e Monitoramento de Saúde: Implementam-se sensores vestíveis autônomos para monitorar sinais vitais, atividade física e outros parâmetros de saúde. A energia RF capturada do ambiente viabiliza o monitoramento contínuo e sem fio.

Sistemas de Energia e Microgeração: Utilizam-se dispositivos de RF para EH para capturar energia de fontes ambientais como transmissões de rádio, Wi-Fi ou energia solar, armazenando-a em acumuladores de energia e/ou alimentando dispositivos autônomos.

Por fim, o RF para *Energy Harvesting* apresenta um potencial significativo para transformar o desenvolvimento e a implementação de sensores autônomos e dispositivos *self-powered*, proporcionando novas oportunidades em áreas como agricultura, saúde, monitoramento ambiental, logística e indústria. Destaca-se que a combinação desta tecnologia com outras fontes energéticas, como baterias ou energia solar, pode aumentar a confiabilidade e a autonomia ampliando ainda mais suas aplicações.

Conversão de Energia por Energia Solar

A energia solar é uma fonte renovável e abundante, sendo um sistema de baixo custo de manutenção e alta escalabilidade para diferentes aplicações. As pesquisas nesta temática têm explorado o aproveitamento da energia solar, em diversas aplicações, incentivando o desenvolvimento de novas tecnologias nesse campo. Inúmeros exemplos são descritos a seguir:

Sensores de Iluminação: Utilizam energia da luz solar interna para alimentar sensores que regulam automaticamente a iluminação artificial, otimizando o consumo energético em ambientes como escritórios e residências (*Indoor Lighting Systems*).

Sensores de Qualidade do Ar: Alimentados pela luz solar interna, monitoram níveis de poluentes e CO₂, garantindo ambientes mais saudáveis em locais públicos (*Indoor Lighting Systems*).

Sensores de Temperatura e Umidade: Utilizam energia solar interna para monitorar condições climáticas, ajustando sistemas de HVAC e garantindo conforto térmico (*Indoor Lighting Systems*).

Dispositivos Vestíveis: Integrados com painéis solares, permitem o funcionamento contínuo de dispositivos como *smartwatches* e rastreadores de *fitness* através da energia solar captada por janelas ou claraboias (*Indoor Lighting Systems*).

Domótica: Dispositivos alimentados por painéis solares integrados, que controlam dispositivos domésticos como luzes e termostatos, interruptores, etc. (*Indoor Lighting Systems*).

Sensores Ambientais: Utilizam energia solar direta para monitorar parâmetros climáticos como temperatura e umidade, essenciais para aplicações meteorológicas e sistemas de irrigação (*Outdoor System*).

Sensores de Segurança: Equipados com células solares, monitoram movimentos em áreas externas, aumentando a segurança e a eficiência energética (*Outdoor System*).

Sensores de Monitoramento de Infraestrutura: Alimentados por energia solar direta, monitoram a integridade de estruturas como pontes e edifícios, garantindo segurança e manutenção adequadas (*Outdoor System*).

Dispositivos de Comunicação e Rede: Roteadores Wi-Fi e repetidores de celular solares fornecem conectividade em áreas remotas, operando de forma independente da rede elétrica tradicional (*Outdoor System*).

Sistemas de Iluminação Pública: Postes de luz solares captam energia durante o dia para iluminar ruas e espaços públicos à noite, reduzindo custos operacionais e impacto ambiental (*Outdoor System*).

Por fim, a Energia Solar tem um grande potencial para sua aplicação para EH e encontra-se em evolução com novos materiais e novas tecnologias que visam melhorar a eficiência e durabilidade dos painéis solares. Destaca-se que a escolha entre dispositivo de captação de energia solar (*indoor* ou *outdoor*) dependerá da disponibilidade de luz solar, da demanda energética, do local de instalação e dos requisitos do dispositivo a ser alimentado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Nesta seção, são apresentadas as considerações finais sobre os métodos de *Energy Harvesting* discutidos ao longo deste capítulo, assim como as perspectivas futuras para o desenvolvimento de sistemas *self-powered*.

Os métodos de captação de energia discutidos (termoeletricidade, piezoeletricidade, acoplamento magnético, radiofrequência e energia solar) têm demonstrado potencial significativo para aplicações em *self-powered*. Cada um desses métodos apresenta vantagens e desvantagens, desde a alta relação W/kg e baixa eficiência dos TEG, até a fragilidade e versatilidade das células fotovoltaicas para aplicação em ambientes (*indoor* ou *outdoor*).

Destaca-se que a *Energy Harvesting* está em constante evolução, proporcionando oportunidades contínuas de pesquisa e desenvolvimento. O crescente interesse em sistemas *self-powered* tem impulsionado melhorias na eficiência dos dispositivos e do potencial de captação de energia ampliado significativamente o campo de utilização dos dispositivos baseados em EH. A Figura 10 ilustra diversas aplicações com base no consumo de energia, destacando a versatilidade do método de EH para distintos cenários de acordo com o uso (FOELKEL, 2019).

As perspectivas futuras para essas tecnologias incluem desafios e oportunidades significativos. Entre os desafios estão a melhoria da eficiência energética, a redução de custos, a adaptação a diferentes condições de uso, o desenvolvimento de novos materiais, e integração com outras fontes de energia renovável.

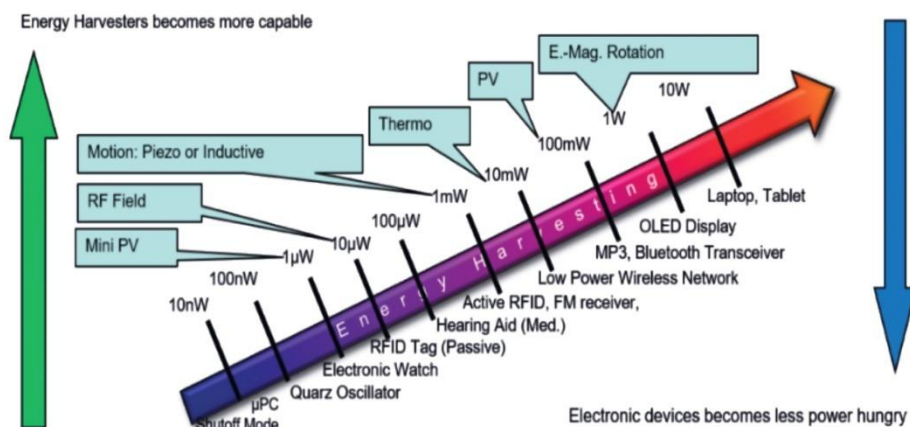


Figura 10 – *Energy Harvesting*: Método de captação versus Potência requerida.

Fonte: (FOELKEL, 2019).

Por fim, a produção e o aproveitamento de energia a partir de fontes de energia renovável ou reaproveitamento de energia são cruciais para o desenvolvimento sustentável. Todas as técnicas de EH têm potencial para contribuir na promoção da sustentabilidade energética. No entanto, é importante destacar que alguns métodos podem ainda se encontrar em fase de desenvolvimento tecnológico com alto custo para aplicações em larga escala. A redução de custos por meio de pesquisas é essencial para viabilizar a disseminação dessas tecnologias no mercado.

AGRADECIMENTOS & FOMENTO

Esta pesquisa foi parcialmente apoiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) de N°407531/2018-1, 303293/2020-9, 405385/2022-6, 405350/2022-8 e 40666/2022-3. Os autores gostariam de agradecer a FACEPE (Fundação de Amparo à Pesquisa de Pernambuco) ao longo do projeto com referências APQ-0616-9.25/21 e APQ-0642-9.25/22. O.H.A.J. agradece ao apoio do Programa em Engenharia de Sistemas Energéticos (PPGESE) Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). M.R.C. foi financiado pela UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas) por meio do Auxílio Início de Carreira (Docente), FAEPEX, processo número 2095/23, e Programa de Incentivo a Novos Docentes (PIND), FAEPEX, processo número 2419/23, assim como FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), processo número 2021/11380-5.

REFERÊNCIAS

- ABDELNOUR, A.; HALLET, A.; DKHIL, S.B.; PIERRON, P.; KADDOUR, D.; TEDJINI, S. Energy harvesting based on printed organic photovoltaic cells for RFID applications. In: Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA), Pisa, Italy, 25–27 September 2019. Pisa: IEEE, 2019. p. 110-112. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/Rfid-Ta.2019.8892206>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- ANDO JUNIOR, O. H. et al. Proposal of a Thermoelectric Microgenerator based on Seebeck Effect to Energy Harvesting in Industrial Processes. *Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ)*, v. 1, p. 227-333, 2014.
- ARMENDANI, Willian Alves; et al. Conhecendo a Piezoeletricidade, uma nova forma de geração de energia elétrica. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Ano 1. Vol. 9. pp 314-320, outubro / novembro de 2016. ISSN: 2448-0959.
- BITO, J.; HESTER, J.G.; TENTZERIS, M.M. A fully autonomous ultra-low power hybrid RF/Photovoltaic energy harvesting system with -25 dbm sensitivity. In: Proceedings of the 2017 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), Taipei, Taiwan, 10–12 May 2017. Taipei: IEEE, 2017. p. 1-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/Wpt.2017.7953858>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- CAMACHO-MEDINA, P.; OLIVARES-ROBLES, M. A.; VARGAS-ALMEIDA, A.; SOLORIO-ORDAZ, F. Maximum Power of Thermally and Electrically Coupled Thermoelectric Generators. *Entropy*, vol. 16, n. 5, pp. 2890-2903, 2014.
- COMISIÓN ECONÓMICA PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE. Índice ODS 2021 para América Latina y el Caribe.pdf. Bogotá, Colombia, ago. 2022.
- DINULOVIC, Dragan; BROOKS, Michael; HAUG, Martin; PETROVIC, Tomislav. Rotational Electromagnetic Energy Harvesting System. *Physics Procedia*, vol. 75, pp. 1244-1251, 2015.
- ELVIN, Niell; ERTURK, Alper. Advances in Energy Harvesting Methods. In: *Advances in Energy Harvesting Methods*. Capítulo: p. 241-369. 2012.
- FARMER, Justin R. A comparison of power harvesting techniques and related energy storage issues. 2007. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Virginia Polytechnic Institute and State Univ., Blacksburg.
- FOELKEL, L. Energy harvesting is not fiction anymore. In: PROCEEDINGS OF THE 2ND PCNS, Bucharest, Romania, 10–13 Sept. 2019.
- GAO, Min; ROWE, D. M. Conversion Efficiency of Thermoelectric Combustion Systems. *IEEE Transactions on Energy*, v. 22, n. 2, p. 528-534, jun. 2007.
- HARB, Adnan. Energy Harvesting: State-of-the-art. *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2641-2654, 2011.
- IEA; IRENA; UNSD; World Bank; WHO. Tracking SDG7: The Energy Progress Report 2022. Washington DC, 2022.
- IZIDORO, C. L.; ANDO JUNIOR, O. H.; CARMO, J. P.; SCHAEFFER, L. Characterization of thermoelectric generator for energy harvesting. *Measurement*, Available online 8 January 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.01.010>>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- KARABETOGLU, S.; SISMAN, A. Characterization of a thermoelectric generator at low temperatures. *Energy Conversion and Management: Elsevier Science*, vol. 62, pp. 47-50, abril 2012.

- KIM, Buntherm; BUN, Long et al. Modeling and tuning of MPPT Controllers for a Thermoelectric Generator. In: 2014 First International Conference on Green Energy, p. 220-226, 2014.
- LIU, Huicong; QUAN, Changenn; TAY, Cho Jui; KOBAYASHI, Takeshi; LEE, Chngkuo. A MEMS-based piezoelectric cantilever pattern with PZT thin film array for harvesting energy from low frequency vibrations. *Physics Procedia*, vol. 19, pp. 129-133, 2011.
- OMER, S. A.; INFIELD, D. G. Design optimization of thermoelectric devices for solar power generation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, UK, v. 53, p. 67-82, 1998.
- OSTESEVICIUS, Vytautas et al. Cutting tool vibration energy harvesting for wireless applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 233, pp. 310-318, 2015.
- PEERAPONG, Prachuab; LIMMEECHOKCHAI, Bundit. Optimal Photovoltaic Resources Harvesting in Grid-connected Residential Rooftop and in Commercial Buildings: Cases of Thailand. *Energy Procedia*, vol. 79, novembro 2015, pp. 39-46.
- PRIYA, Shashank; INMAN, Daniel J. Energy Harvesting Technologies. In: *Energy Harvesting Technologies*. Capítulo: p. 3-128, 325-350, 459-488. 2009.
- RAHIMI, A.; ZORLU, Ö.; MUHATAROGLU, A.; KÜLAH, H. A compact Electromagnetic Vibration Harvesting System with High Performance Interface Electronics. *Procedia Engineering*, vol. 25, pp. 215-218, 2011.
- RIFFAT, S. B.; MA, X. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, UK, v. 23, p. 913-935, 2003.
- RUCKS, S.; LEITE, L.; FERREIRA, I.; SALVE, S.; MUNIZ, E. Relatório Anual 2022 ONU Brasil. Nações Unidas, Brasília, DF, mar. 2023.
- ROWE, D. M. CRC handbook of thermoelectrics. CRC Press LLC, Estados Unidos da América, 1995.
- SACHS, J.; KROLL, C.; LAFORTUNE, G.; FULLER, G.; WOELM, F. Sustainable Development Report 2022. 1. ed. Cambridge University Press, 2022. doi: 10.1017/9781009210058.
- SUTIKNO, T.; APRILIANTO, R.A.; PURNAMA, E.H.S. Application of non-isolated bidirectional DC–DC converters for renewable and sustainable energy systems: A Review. *Clean Energy*, v. 7, p. 293-311, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/Ce/Zkac070>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- TAN, W.-H.; MOHAMAD-SALEH, J. Critical Review on Interrelationship of Electro-Devices in PV Solar Systems with Their Evolution and Future Prospects for MPPT Applications. *Energies* 2023, 16, 850. <https://doi.org/10.3390/en16020850>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- VIJAYAN, K.; FRISWELL, M. I.; KHODAPRAST, H. Haddad; ADHIKARI, S. Non-linear energy harvesting from coupled impacting beams. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 96-97, pp. 101-109, 2015.
- WORLD POPULATION REVIEW. Gini Coefficient by Country 2022. Disponível em: <https://worldpopulationreview.com/>. Acesso em: 17 jun. 2024.
- ZHANG, H.; MA, T. Roles of the Excitation in Harvesting Energy from Vibrations. *PLoS One*, USA, v. 10, p. 1-10, out. 2015.



Review

Thermoelectric Generators Applied as a Power Source in CubeSats: State of the Art

Gabriel Bruges Soares ¹, Jorge Javier Gimenez Ledesma ^{1,2}, Eder Andrade da Silva ^{1,2,*} and Oswaldo Hideo Ando Junior ^{1,2,3,4,*}

- ¹ Interdisciplinary Postgraduate Program in Energy & Sustainability (PPGIES), Federal University of Latin American Integration—UNILA, Paraná City 85867-000, PR, Brazil; gb.soares.2019@aluno.unila.edu.br (G.B.S.); jorge.ledesma@unila.edu.br (J.J.G.L.)
 - ² Research Group on Energy & Energy Sustainability (GPEnSE), Academic Unit of Cabo de Santo Agostinho (UACSA), Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE), Cabo de Santo Agostinho 54518-430, PE, Brazil
 - ³ Smart Grid Laboratory (LabREI), Center for Alternative and Renewable Research (CEAR), Federal University of Paraiba (UFPB), João Pessoa 58051-900, PB, Brazil
 - ⁴ Department of Engineering, UFRPE, Federal Rural University of Pernambuco, R. Cento e Sessenta e Três, 300, Cabo de Santo Agostinho 55292-901, PE, Brazil
- * Correspondence: ea.silva.2020@aluno.unila.edu.br (E.A.d.S.); oswaldo.ando@ufrpe.br (O.H.A.J.)

Abstract: This systematic review outlines the application of thermoelectric generators (TEGs) as energy sources in CubeSats. While CubeSats currently rely on solar cells with efficiencies between 16.8% and 32.2%, their performance diminishes with increased distance from the Sun. TEGs, although used in radioisotope thermoelectric generators (RTGs) for satellites, remain underutilized in CubeSats. A literature review revealed 33 relevant articles, with 21.2% employing simulation software to evaluate thermal behavior. Among 34 patents, only one mentioned micro-TEGs, with most focusing on structural improvements. Patent activity peaked between 2016 and 2020, emphasizing structural and thermal optimization, but no patents addressed TEGs as energy sources for CubeSats, highlighting a significant research gap. TEGs present a viable solution for harnessing residual heat in CubeSats.

Keywords: ProKnow-C; thermoelectric generators; TEG; energy source; mapping; CubeSat



Academic Editors: Mahmoud Bourouis and Stanislav Boldyryev

Received: 23 November 2024

Revised: 16 December 2024

Accepted: 26 December 2024

Published: 3 January 2025

Citation: Soares, G.B.; Ledesma, J.J.G.; Silva, E.A.d.; Ando Junior, O.H. Thermoelectric Generators Applied as a Power Source in CubeSats: State of the Art. *Energies* **2025**, *18*, 173. <https://doi.org/10.3390/en18010173>

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Since the launch of the TIROS-M satellite in 1970, satellites have played a vital role in Earth observation, meteorology, and communication, providing essential services such as weather monitoring and connectivity in remote areas [1,2]. However, the high production and launch costs of traditional satellites have historically restricted their development to major space agencies like the National Aeronautics and Space Administration (NASA) and European Space Agency (ESA) [3].

Since its inception in 1958, NASA has undertaken manned missions and launched communication satellites to enhance telecommunications and expand internet access. Similarly, ESA, founded in 1975, has contributed to global internet and telecommunications infrastructure through satellite launches and participated in scientific missions, such as the Cassini and Huygens probes, which provided valuable data on Saturn and its moons. The Soviet Union pioneered space exploration with the launch of Sputnik 1 in 1957, the world's first artificial satellite, marking the start of the space age and driving the development of subsequent communication satellites [4–6].

Advancements in Micro-Electronics and Microsystems Technologies have enabled the miniaturization of components, reducing costs and paving the way for SmallSats. These compact satellites maintain key functionalities while minimizing size and weight, making them an efficient and affordable option for LEO missions, significantly expanding access to space technology [7,8].

The CubeSat, developed in 1999 by professors Jordi Puig-Suari (California Polytechnic State University) and Bob Twiggs (Stanford University), is a standardized nanosatellite with dimensions of $10 \times 10 \times 10$ cm, weighing up to 1.33 kg, as shown in Figure 1. One of its most notable advantages is the ability to be constructed entirely from COTS (Commercial Off-The-Shelf) components, which ensures adaptability to various mission requirements while maintaining low production costs. Additionally, its power consumption is minimal, estimated at only a few watts [7]. This standardization of size, mass, and capacity aimed to simplify satellite control and enhance payload flexibility, making it a popular choice for nanosatellite missions, with launch costs typically ranging from \$50,000 to \$200,000 [9,10].

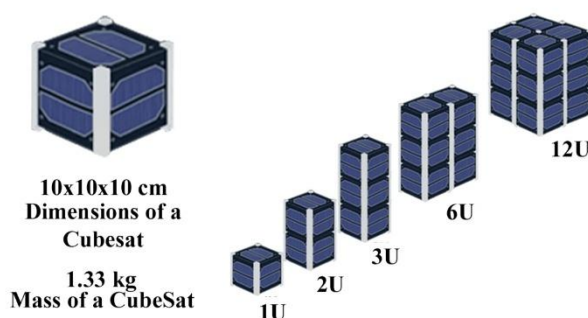


Figure 1. Standardized structure of a CubeSat. Adapted from [11].

In economic terms, the cost-per-kilogram ratio of payload has become the primary criterion for its transportation and launch, as the greater the amount of payload (in kilograms) to be launched into space, the higher its cost. This ratio has proven advantageous compared to traditional satellites, particularly for low-Earth-orbit missions, regarding construction and assembly time [10,12].

Focusing on the power supply for the systems and subsystems that make up the CubeSat, it is common to use photovoltaic solar cells as the main energy source, with efficiencies ranging from 16.8% to 32.2%, depending on their construction. Despite being widely implemented in space, these solar cells have the main disadvantage of specific power generated, measured in watts per kilogram (W/kg). This power decreases rapidly according to the $1/R^2$ relation, where R is the distance to the Sun [13,14].

Another possible unexplored solution to the use of solar cells is employing thermoelectric generators (TEGs) as a power source for CubeSats. Their application in satellites was already observed in [14]. Therefore, conducting research on the use of TEGs as a power source for CubeSats could reveal a promising application for low-Earth-orbit (LEO) space missions. Exploring this alternative could lead to significant advances in the feasibility of space missions with nanosatellites, expanding the technological and scientific capabilities of this sector.

TEGs and PVs are key energy sources for CubeSats, each with distinct advantages. TEGs efficiently convert temperature differences into electricity, leveraging waste heat from onboard systems and providing a reliable energy source in low-solar environments, such as deep-space orbits. Their compact, lightweight design suits CubeSats' weight constraints, although their conversion efficiency is relatively low (3.12–9.6%) [15,16]. PVs, on the other

hand, achieve higher conversion efficiencies (16.8–32.2%) by directly harnessing solar energy, but their performance depends on consistent sunlight exposure and can be hindered by shading or orientation issues. Together, these technologies offer complementary solutions for diverse mission profiles. The comparative synthesis of the mentioned energy sources is presented in Table 1.

Table 1. Comparison between TEGs and PVs.

Characteristic	TEGs	PVs
Principle	Temperature difference conversion	Solar energy conversion
Efficiency	3.12–9.6%	16.8–32.2%
Weight	Lower in relation to generated power	Higher in relation to generated power
Dependency	Constant heat source	Solar exposure
Advantages	Operates without sunlight; utilizes residual heat; resistant to extreme conditions	High efficiency in energy conversion; greater performance in the presence of sunlight
Disadvantages	Low efficiency compared to PVs	Dependence on sunlight; reduced efficiency in shade or improper orientation

Preliminary Studies

A preliminary search identified eight scientific articles related to the research topic. Three focused on simulations using FEM software to analyze the thermal behavior of 1U CubeSats, specifically the operating temperatures of internal devices. One article explored the use of Thermoelectric Coolers (TECs) as temperature regulators for CubeSat hardware, while two investigated the application of micro-TEGs and conventional TEGs as energy sources for specific sensors in CubeSats. Additionally, two studies provided insights into advancements in thermoelectric systems: one highlighted recent progress in the modeling and simulation of thermoelectric power generation, emphasizing innovations in materials and multi-physics modeling approaches, while the other introduced a novel thermoelectric generator design incorporating stacked modules and dual heat pipes to enhance power density and efficiency.

Concerning this, the study proposed by [17] evaluated the energy generation potential of TEG modules using temperature gradients from solar panels. They conducted a numerical analysis to estimate temperature gradient variations in low Earth orbit, and the resulting data were used in an experimental test bench to map the real-time generated power. In conclusion, the experiment successfully reproduced the expected temperature gradients, but there were data discrepancies when the TEGs reached temperatures above 35 °C due to a limitation of the TEG itself.

In [18], the research addressed the development and verification of a conceptual model and an analytical model of the thermal controls of a 3U CubeSat, focusing on the study of an Orbital Satellite for Investigation of the Response of the Ionosphere to Stimulation and Space Weather (OSIRIS). The use of COMSOL Multiphysics to create FEM thermal models, along with analytical calculations, was essential to determine the worst-case temperature limits that the OSIRIS-3U might encounter during its mission. Additionally, a theoretical understanding was developed for applying different types of TEGs aimed at capturing residual energy in CubeSats. The results indicated that thin-film TEG devices provided a higher power density compared to traditional TEGs; however, due to the low expected temperature gradient in a CubeSat, the efficiency of these devices remained below 1%.

Therefore, with the mass and cost constraints of CubeSats, the current TEG technology did not seem viable for that application.

From this perspective, Ref. [19] presented a study evaluating the potential of using TEGs as an energy source to power an Assistance System, which was based on ensuring communication with a ground station or a service satellite, delivering data for maneuvers of inactive spacecraft. To achieve this, it was necessary to analyze the electrical characteristics of TEGs under space conditions to evaluate their potential for capturing residual energy in spacecraft, as commercial TEGs were developed for use on Earth. As a result, the analysis demonstrated that the proposed system was viable, with the necessary power being provided by TEGs utilizing the thermal loads present within a satellite.

In parallel, given the proposed research topic, it is extremely important to understand the thermal energy balance that occurs in a CubeSat, as the temperature distribution on the equipment's surface influences the TEGs' energy generation. Within this context, Ref. [20] focused on creating an accurate thermal model for the CubeSat MYSat-1, considering the effects of various thermal sources in orbit. A detailed model was developed using Ansys Workbench software and compared with CubeSatWizard, another MATLAB-based software. The simulation results were compared with maintenance data, showing an acceptable difference of 0.45 °C in the CubeSat's average temperature between real data and the model results. However, on hot days, that difference was more significant, reaching 14 °C.

A study conducted by [21] involved the analysis of thermal simulations in a 1U CubeSat to ensure the electronic devices operated within their limits. Additionally, the study aimed to demonstrate that numerical simulations could be used to predict and optimize the temperature distribution of the space system before its construction. Ansys Icepak and Thermal Desktop software were used under LEO conditions. In conclusion, there was no overheating of the components under terrestrial hot-face conditions, as they were low-power devices. However, the study warns that in the near future, electronics were likely to continue developing while adding more power and functionality to devices. Therefore, thermal control would be necessary to ensure system reliability.

Another study proposed by [22] addressed the thermal simulation of a 1U CubeSat using COMSOL Multiphysics software. Their objective was to simulate the impact of the inclination angle (beta angle) of the CubeSat on the temperature distribution of the nanosatellite, which describes the equipment's position relative to the solar vector. To investigate this parameter's effect, a set of simulations was performed for different beta angles. The simulations showed that the larger the beta angle, the greater the nanosatellite's exposure to prolonged solar heating, implying longer periods of both direct solar radiation and Albedo radiation.

In [23], the authors highlight significant progress in thermoelectric generator (TEG) systems, focusing on innovations in modeling techniques—analytical, numerical, and experimental—and advancements in materials like bismuth telluride, known for superior energy conversion properties. They explore the integration of Computational Fluid Dynamics (CFD), using COMSOL Multiphysics, with thermoelectric modeling to enhance simulation accuracy and presents practical applications, such as using TEGs to convert waste heat into electricity in automobiles, demonstrating improved energy efficiency even under variable conditions. Their research also addresses ongoing challenges, such as the need for more efficient materials and the integration of TEGs into complex systems, suggesting future investigations into novel thermoelectric materials and multi-physics models that account for phenomena like thermal conduction and electromagnetic conversion.

Lastly, Ref. [24] presents an innovative thermoelectric generator (TEG) design that utilizes stacked thermoelectric modules (TEMs) and dual heat pipes to significantly enhance power density, achieving up to 48.22 W/L in experiments, with a prototype output

of 848.37 W. The use of dual heat pipes improves heat transfer efficiency between heating/cooling sources and the TEMs' hot/cold sides, enabling greater integration of TEMs in compact spaces. The study also highlights the adaptability of the design by modifying the number of layers in the stacked structure for diverse applications. Furthermore, it discusses the role of topological optimization and finite element modeling to simulate TEG performance, with experimental results validating the approach and demonstrating substantial efficiency improvements.

The data from the studies are essential for understanding the current limitations and future potential of TEGs. Advances in modeling combined with the development of new materials hold great promise for significantly enhancing the efficiency and applicability of thermoelectric systems. These improvements could make TEGs a viable option for various applications, including space exploration, where harnessing waste heat is critical for energy generation in resource-constrained environments.

This research aims to identify the application of TEGs as a power source for the Electrical Power System (EPS) of a 1U CubeSat operating in LEO. By mapping their application against existing technologies, the study seeks to address the gap in the use of TEGs in space missions and explore their potential for nanosatellite energy optimization. To achieve this, a systematic state-of-the-art review was conducted to identify the scientific literature and intellectual property (IP) related to EPS power sources, complemented by bibliometric analyses of the Bibliographic Portfolio (BP) and Patent Repository (PR). Connections between the datasets were further explored using Vosviewer software 1.6.20.

Initial research underscored the limited exploration of thermoelectric generators (TEGs) in nanosatellites, despite their widespread application in terrestrial industries such as automotive and manufacturing. This underutilization highlights a promising opportunity for LEO missions, particularly in leveraging TEGs as alternative power sources. Notably, the only prior use of TEGs in satellite applications involves radioisotope thermoelectric generators (RTGs). RTGs have been indispensable for NASA missions where solar power is impractical, such as in deep-space exploration. Often referred to as "nuclear batteries", RTGs have powered over 25 U.S. space missions since their debut in 1961, serving as a cornerstone of NASA's longstanding collaboration advancing space power systems [13].

A patent analysis identified only one direct application of TEGs for specific subsystems, neglecting geometric optimizations that could improve the watt-per-kilogram payload ratio of nanosatellites. The highlights of this study include:

- **Scientific and industrial impact:** TEGs can improve the energy efficiency of nanosatellites by increasing the W/kg payload ratio, enhancing power availability during low-Earth-orbit phases.
- **Unexplored technological approach:** the research addresses gaps in the application of TEGs as power generators for nanosatellites, utilizing temperature gradients from the space environment.
- **Utilization of waste heat:** TEGs harness waste heat generated by internal components or external space conditions, offering a novel approach to energy utilization in nanosatellites.
- **ProKnow-C methodology:** application of the ProKnow-C systematic method for mapping scientific and industrial developments related to TEGs as energy sources for CubeSats.

The study contributes to addressing this gap by investigating and analyzing key academic and industrial trends in the aerospace sector. While thermoelectric devices have primarily been used as temperature regulators for CubeSats, this research emphasizes their potential as energy sources, focusing on waste heat utilization and geometric optimization.

The results aim to enhance the performance of CubeSats, increase their power efficiency, and support future advancements in nanosatellite technology.

The article is structured into four sections. Section 1 contextualizes the topic, defines the general objective, and outlines the expected results and scientific contribution. Section 2 details the methodology, using the ProKnow-C method for a systematic review to select the Bibliographic Portfolio (BP) and Intellectual Property search, with a comprehensive bibliometric analysis of publications, patents, authors, and inventors, as well as the relevance of articles and patents. Section 3 provides a comparative analysis between the scientific portfolio and IP, utilizing Vosviewer software to examine the relationship between academic research and industrial patents. Section 4 concludes the study, summarizing the analyses and suggesting directions for future research.

2. Systematic Review

According to [25], a literature review aims to establish a line of reasoning that assists researchers in formulating hypotheses on the topic. Furthermore, a systematic review is essential for answering research questions, highlighting the main topics covered. This process aims to ensure a comprehensive and in-depth understanding of the subject.

In this context, the process of a systematic review is illustrated by the flowchart in Figure 2. Its organization involves a preliminary search for documents related to the topic to be investigated. These documents form a PDB, which should be studied to ensure alignment with the topic. Subsequently, the most common KWs should be extracted and combined, resulting in the main terms that will be used as references for creating the BP and PR. A general study of the obtained documents is conducted to ensure their relevance to the most pertinent information for investigating the proposed topic.

In this research, the scientific literature review addressing the utilization of residual heat for energy generation from TEGs as a power source for the EPS of a CubeSat was conducted using the ProKnow-C methodology, “Knowledge Development Process Constructivist”.

According to [26,27], using this methodology as the primary tool to structure the BP aims to ensure its methodological foundation, based on the topic of interest, while considering the delimitations and restrictions of the articles that compose this portfolio. This establishes its scientific relevance and alignment with the research topic, based on the axes composed of combinations of KWs.

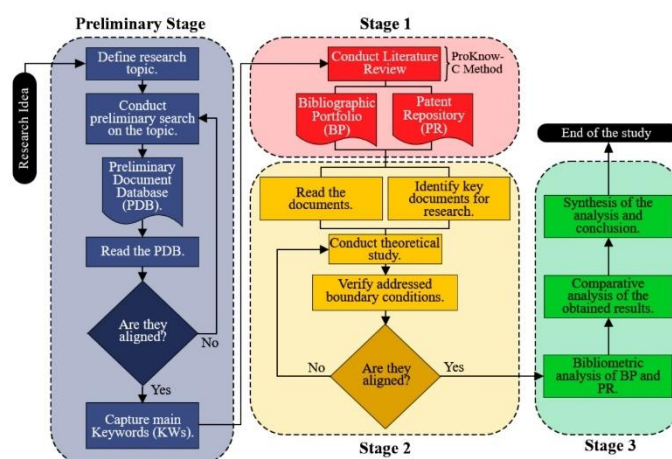


Figure 2. Basic process for conducting a systematic review.

The selected articles undergo a validation of the KWs through a verification of those present in the articles and are subsequently subjected to a bibliometric and systemic analysis. These steps form the primary stage of the ProKnow-C process, which consists of the following stages: selection of the BP; bibliometric analysis of the BP; Systemic analysis of the BP; and research question, as shown in Figure 3.

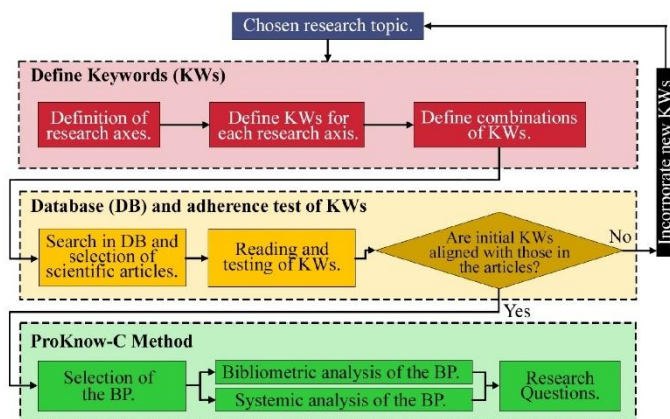


Figure 3. ProKnow-C methodology process.

2.1. Selection of the Bibliographic Portfolio

As an initial step in the execution of the ProKnow-C method, the selection of the BP is carried out through a systematic search for scientific materials, primarily in reliable databases [28]. For the present research, the chosen data sources were the WoS database, which generates the JCR and determines the impact factor of its journals, the Scopus database, which uses the SJR as its impact factor, and the SD database.

After selecting the DBs, the axes and KWs to be used for queries in these databases were defined. To clearly and comprehensively present the ProKnow-C procedures, the selection of the BP was organized into four axes within the proposed topic: Axis 1: internal and external temperature and structure of a nanosatellite; Axis 2: power sources and EPS of a nanosatellite; Axis 3: concepts of TEGs and their application in space; and Axis 4: thermal analysis in nanosatellites.

The combination of KWs for each axis was performed using logical expressions “and” and “or”. Additionally, since the research area of this work focused on space conditions and the electronic systems of a nanosatellite, a category filter available in both DBs was applied, such as aerospace engineering, electrical/electronic engineering, mechanical engineering, and thermodynamics for WoS, and engineering for Scopus and SD.

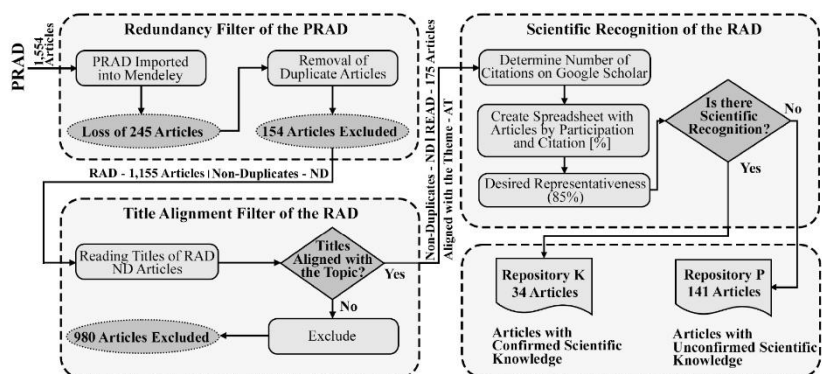
The results of each query are displayed in Table 2, with a space–time delimitation over a period of 24 years. This time frame was defined based on the advancement of research that occurred from the year 2000 onward [1].

The PRAD, initially containing 1554 documents, was imported into the Mendeley bibliographic management tool [29]. After importing all the DBs into the software, it was verified whether all files from the export process were stored. This step was necessary because some titles may not have been exported due to unavailability in the desired format [30]. To address this issue, a manual search for the articles in the DBs can be performed. However, this process was not conducted at that stage.

Table 2. Results of the searches conducted in the DBs.

Database	WoS	Scopus	SD
Axis 1			
(CubeSat or Nanosatellite) and (Design or Structure)	312	157	10
(Temperature or Thermal) and (Internal or External) and (Nanosatellite or CubeSat)	27	8	80
("Finite Element analysis") and ("Thermoelectric Devices" or "Thermoelectric Generators" or "TEG") and (CubeSat)	1	0	0
Axis 2			
("Power Supply" or "Source") and (Nanosatellite)	188	156	90
Axis 3			
("Thermoelectric Generators" or "Thermoelectric Generator" or "TEG") and (Principles)	109	27	235
("Thermoelectric Generators" or "Thermoelectric Generator" or "TEG") and ("Space Applications")	26	25	50
Axis 4			
(CubeSat or Nanosatellite) and ("Thermal design" or "Thermal Modeling")	17	21	15
Preliminary Raw Articles' Database (PRAD)		1554	

As a result, the RAD contained 1309 titles, representing a loss of 15.76%. Subsequently, filtering actions were carried out to verify if the articles aligned with the proposed topic to obtain the K and P repositories, as described in the flowchart in Figure 4 [31]. At the end, 175 articles were obtained, whose citation numbers were verified on Google Scholar on 23 January 2024.

**Figure 4.** Initial filtering process for aligning titles with the proposed theme.

The organization of these articles was defined such that the citations were in descending order. Additionally, the minimum scientific representativeness criterion adopted followed the Pareto principle, which states that, in many phenomena, 80% of results or consequences are produced by 20% of their causes [32]. In this work, the adopted representativeness was 85%.

Using algorithms developed in Python, Repository K was composed of 34 articles with a cutoff value of 49, demonstrating proven scientific reliability. These articles represented

85% of the total citations, being cited 49 or more times. Conversely, Repository P consisted of 141 articles of lower academic relevance and without proven scientific reliability, divided between 104 journals with 1 to 48 citations and 37 without citations. Due to the number of articles in both repositories, the procedures established by [27] were automated using Python algorithms. These steps included verifying the thematic alignment of the articles, creating the AD, and validating it with articles from Repository P. Figure 5 illustrates a flowchart of the executed procedures, also presenting the final activity counts for the composition of Repository C.

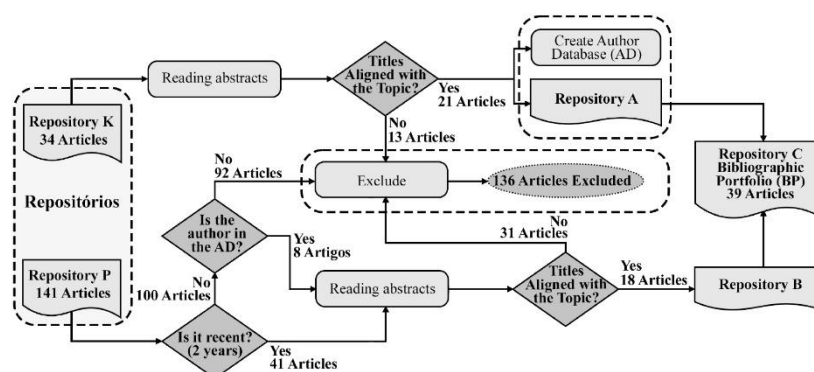


Figure 5. Process of analyzing Repositories K and P, resulting in Repository C.

In the end, Repository C was created by merging Repositories A and B, containing 39 articles that constituted the final BP, ensuring verified academic relevance and alignment with the researched topic. Each article in that portfolio was verified for availability through the CAPES portal or free access on the internet. As a result, 6 articles were excluded, totaling 33 articles in the BP. After these analysis procedures, the selection of that BP represented 2.12% of the initial 1554 articles. The 33 articles, ordered in descending order by the number of citations, are listed in Table 3.

Table 3. Presentation of the thirty-three articles that compose the Bibliographic Portfolio (BP).

Reference	BP Article	Citations
[33]	Thermoelectric generators: A review of applications. <i>Energy Conversion and Management</i> , 140, 167–181.	1185
[34]	Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. <i>Applied Energy</i> , 143, 1–25.	762
[3]	CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions. <i>Progress in Aerospace Sciences</i> , 88, 59–83.	534
[35]	Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions, and subsystem technology. <i>Acta Astronautica</i> , 67, 854–862.	493
[36]	Safe radioisotope thermoelectric generators and heat sources for space applications. <i>Journal of Nuclear Materials</i> , 377, 506–521.	260
[37]	Review of wearable thermoelectric energy harvesting: From body temperature to electronic systems. <i>Applied Energy</i> , 258, 114069.	245

Table 3. Cont.

Reference	BP Article	Citations
[38]	Review of Micro Thermoelectric Generator. <i>Journal of Microelectromechanical Systems</i> , 27, 1–18.	219
[39]	Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications. <i>International Journal of Thermofluids</i> , 9, 100063.	201
[15]	Thermoelectric Generators: A comprehensive review of characteristics and applications. <i>Applied Thermal Engineering</i> , 201, 117793.	151
[40]	Review of thermoelectric geometry and structure optimization for performance enhancement. <i>Applied Energy</i> , 268, 115075.	145
[41]	OpenOrbiter: A low-cost, educational prototype CubeSat mission architecture. <i>Machines</i> , 1.	109
[42]	A review of the state-of-the-art in electronic cooling. <i>E-Prime—Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy</i> , 1, 100009.	102
[7]	Small satellites and CubeSats: Survey of structures, architectures, and protocols. <i>International Journal of Satellite Communications and Networking</i> , 37, 343–359.	101
[43]	Thermal design and analysis of a nanosatellite in low earth orbit. <i>Acta Astronautica</i> , 115, 247–261.	96
[8]	CubeSat design for LEO-based Earth science missions. <i>IEEE</i> , 435–445.	95
[44]	Parametric study of a thermoelectric module used for both power generation and cooling. <i>Renewable Energy</i> , 154, 542–552.	85
[45]	Evolutionary design of a satellite thermal control system: Real experiments for a CubeSat mission. <i>Applied Thermal Engineering</i> , 105, 490–500.	66
[46]	Parametric study of heat-transfer design on the thermoelectric generator system. <i>International Communications in Heat and Mass Transfer</i> , 52, 97–105.	59
[47]	A review of battery technology in CubeSats and small satellite solutions. <i>Energies</i> , 13.	56
[48]	On-Orbit Thermal Design and Validation of 1U Standardized CubeSat of STEP Cube Lab. <i>International Journal of Aerospace Engineering</i> , 2016.	55
[49]	Analytical investigation of a nanosatellite panel surface temperatures for different altitudes and panel combinations. <i>Applied Thermal Engineering</i> , 75, 1076–1083.	49
[50]	Experimental Feasibility Study of Concentrating Photovoltaic Power System for CubeSat Applications. <i>IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems</i> , 51, 1942–1949.	29
[12]	Enabling Science with CubeSats—Trends and Prospects. <i>IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems</i> , 3, 221–231.	8
[51]	Progress and perspectives in thermoelectric generators for waste-heat recovery and space applications. <i>Journal of Applied Physics</i> , 134. doi:10.1063/5.0166338	3

Table 3. Cont.

Reference	BP Article	Citations
[52]	Modelling CubeSat Structure for Thermal Analysis.	1
[53]	Chassis Optimization of a 1U CubeSat made in a developing Country. 2022-September.	0
[54]	Thermal modelling of a small satellite data processing unit aided by sensitivity analysis and uncertainty quantification. International Journal of Thermal Sciences, 193, 108514.	0
[55]	Numerical Simulation of Thermoelectric Based Temperature Control system for CubeSat in Space. Project Irazú: Space and Ground Systems Engineering of a 1U CubeSat Store and Forward Mission for Environmental Monitoring. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 66, 217–225.	0
[56]	Space missions in South America: Profile and evolutionary perspective of their development. Acta Astronautica, 206, 9–17.	0
[57]	Temperature Distribution of CubeSats Using Finite Element Method. 2022-September.	0
[20]	Thermal design and analysis of JZJ-5 CubeSat.	0
[58]	Morazán MRZ-SAT CubeSat: Thermal Modelling and Analysis Guide for Academic CubeSat Missions.	0
[59]	Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC, Vol. 2022-September.	0

Among the 33 articles that composed the BP, 7 (21.21%) were conference papers focused on the structure, designs, and missions of nanosatellites. Additionally, 18 (54.54%) aimed to present both the historical and scientific development of nanosatellites and their power systems, such as the EPS, as well as their numerical-computational modeling focused on thermal analyses at LEO altitudes, covering the range of 400 to 1500 km from Earth. Lastly, eight (24.24%) presented concepts and applicability of TEGs in terrestrial situations.

2.2. Bibliometric Analysis

The bibliometric analysis of the BP assists both in developing the theoretical framework on the topic and in accounting for the scientific recognition variables of the articles, authors, journals, and KWs [26,27]. Therefore, based on the data provided by the DBs, several combinations of the information that comprise each article are evaluated, such as the number of citations, author of each publication, year of publication, journal published, among others.

2.2.1. Citation Analysis of the Bibliographic Portfolio

The initial analysis of the 33 articles that composed the BP was structured according to the year of publication and academic relevance within the stipulated period. Figure 6a illustrates the historical distribution of the number of annual publications along with their cumulative frequency.

From this analysis, it is observed that more than half of the publications were concentrated between the years 2020 and 2023. This was confirmed by the graph presented in Figure 6b, which shows the number of annual citations that the BP contained and demonstrates the increase in the density of recent publications. Therefore, it was possible to assert that the proposed research topic was on the rise in recent years.

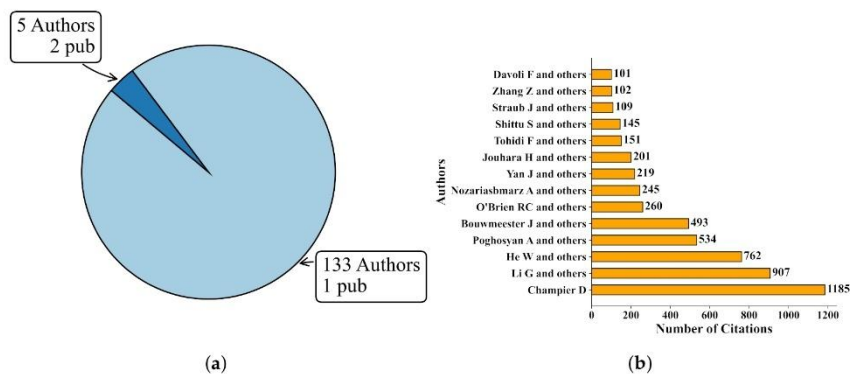


Figure 7. Distribution of (a) the number of publications per author and (b) the number of citations per author.

2.2.3. Relevance of Articles and Keywords

The relevance of the articles, in terms of the publication medium and the manner in which they are presented to the academic community, whether through journals or conferences, aims to align both the articles that compose the BP according to the journal in which they were published and to present their publication frequency.

With a total of 33 articles, it was identified that 7 (21.21%) of these were conference papers presented in journals such as IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems, ResearchGate, and IOPScience. The remaining 26 (78.78%) were journal articles published in various journals, with Acta Astronautica, Applied Energy, and IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems being the most prolific, each representing 11.54% of the total articles. However, the journal Energies stood out as a promising venue for disseminating knowledge on the proposed topic, offering a suitable platform for advancing research in this field. The described results are illustrated in Figure 8.

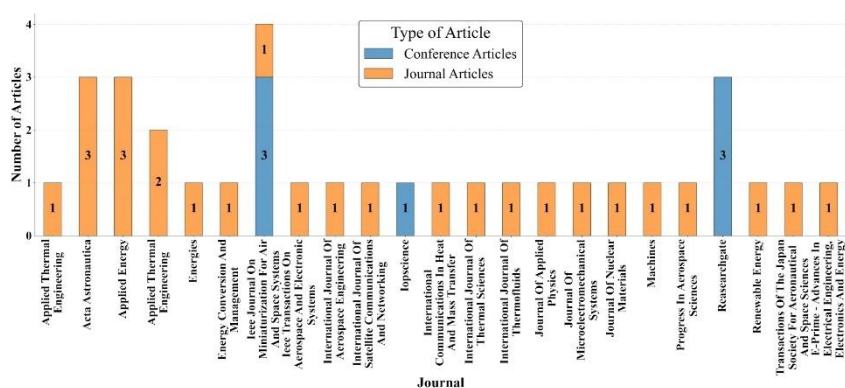


Figure 8. Scientific Relevance of the articles composing the BP and their published journals.

A total of 167 distinct KWs were identified in the academic works of the BP, with 112 (67.07%) observed only once, and 55 (32.93%) two or more times. The study of KWs helped identify which terms are most frequently used in the BP, ensuring their alignment with the proposed topic. The list of the top 30 most frequent KWs among the articles is presented in Figure 9.

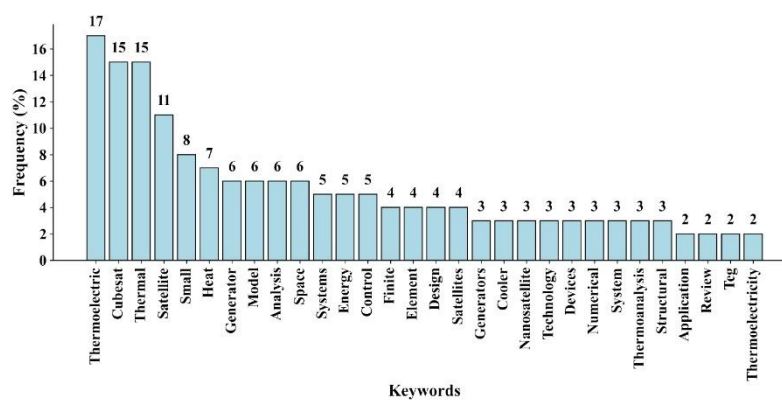


Figure 9. Representation of the 30 most frequently used KWs in the BP.

Even though the term “Thermoelectric” was the most frequently used in the BP, the terms “CubeSat” (second) and “Thermal” (third) held significant relevance in this KW analysis. Despite their individual positions, combined, they totaled 30 occurrences (17.96%), indicating their high usage in combination (or separately) for studies related to the proposed research topic. Additionally, among the 30 most cited KWs, terms like “Finite”, “Element”, “Numerical” and “Thermoanalysis” suggested the use of computational tools applied to the problem of thermal simulations in nanosatellites.

2.2.4. Analysis of the Bibliographic Portfolio

The BP consisting of 33 articles, it was essential to verify articles that reviewed the literature on the proposed topic, as well as those that aided in its development. These served as a basis for defining the connection between technological progress made in this area.

Therefore, to automate the process of capturing review articles, algorithms were developed in the Python programming language, along with Microsoft Excel spreadsheets, to identify the term “review” in the titles of the articles in the BP and separate them from the research articles. The distinction between research articles and review articles had to be made with the aim of identifying (i) if there had already been any review or application of TEGs within the proposed theme and (ii) if there were any research articles that had conducted an in-depth study on the application of TEGs in CubeSats as a primary energy source.

In total, seven (21.21%) review articles were identified, of which six (85.71%) presented reviews of concepts, applications, and innovations related to TEGs, while one (14.29%) presented a review of CubeSat batteries, as described in Table 4.

Table 4. Review Articles Ordered by Number of Citations.

Reference	Brief Description	Citations
[33]	Presents advancements in TEG production in terms of design and optimization, as well as classification and industrial applications. Additionally, it addresses improvements in the figure of merit (ZT), increased operating temperatures from high gradients, and the use of low-cost materials.	1185
[37]	Focuses on generally describing the use of TEGs to harness residual heat from the human body, highlighting the potential to power accessories and technological devices.	245

Table 4. Cont.

Reference	Brief Description	Citations
[38]	Explores the application of micro-TEGs as an economical and competitive alternative to traditional TEGs in areas such as medicine, electronic devices, and the Internet of Things (IoT). Consists of a literature review on TEGs in the current energy market, aiming to present their potential and applications.	219
[15]	Additionally, it delves into the development of TEGs using simulation software for various industrial sectors.	151
[40]	Discusses issues related to the geometry and optimization of thermoelectric device structures, focusing on enhancing their potential and mechanical performance under stress conditions.	145
[42]	Reviews current thermal management methods for electronic devices, highlighting active cooling. It covers techniques such as direct cooling, air jet, immersion, and contact. Additionally, it emphasizes the use of TEGs for contact cooling.	102
[47]	Conducts a review of battery technologies in CubeSats, illustrating the most commonly used types and their operating conditions. It also presents possible solutions to enable their use in space, considering environmental conditions, temperature, and mission requirements.	56

As identified, the set of review articles predominantly highlighted the advancements and applications of TEGs in terms of their design, optimization, and materials, as well as their widespread application in industrial and workplace environments, such as in electronic devices, IoT applications, and in the medical field, particularly for harnessing human residual heat for cardiac measurement devices, as highlighted by [33,37].

Other studies, such as those presented by [15], focused on literature reviews of the development and potential applications of TEGs, including the capture of residual heat from satellite dishes, hybrid systems with solar cells, heat sinks, and more. Notably, the text discussed the application of TEGs for deep space exploration missions, specifically describing the use of RTGs in satellites and their importance in thermal management.

There were discussions on structural challenges of thermoelectric devices under stress conditions, addressed by [40], and reviews of thermal management techniques in electronic devices, as mentioned by [42].

To conclude, Ref. [47] investigated the key technologies employed in CubeSats' batteries, identifying the main challenges associated with their use in space conditions and proposing possible solutions to optimize their efficiency given the limitations imposed by operational temperatures.

As presented, the review articles extracted from the BP indicated a gap in systematic review research regarding the application of TEGs as an energy source for CubeSats, with a primary focus on their implementation in terrestrial environments. Therefore, this work aims to fill this gap by detailing a systematic review of the scientific literature and recent industrial advancements in the aerospace sector concerning energy sources for nanosatellites.

The 26 research articles present in the BP were subdivided into three main themes: history, applications, and development of CubeSats, representing 8 (30.77%) articles; design and thermal analysis of CubeSats, comprising 13 (50.00%) articles; and finally, 5 (19.23%) articles that present studies and principles of TEGs. The articles are described in Table 5.

Table 5. Research Articles Ordered by Number of Citations.

Reference	Brief Description	Citations
[34]	Reviewed thermoelectric materials and their practical applications, highlighting existing technical barriers and proposing new research topics.	762
[3]	Reviewed CubeSats' state-of-the-art capabilities, focusing on scientific missions, and evaluated their potential for enabling high-quality, low-cost scientific missions.	534
[35]	Provided a detailed analysis of the most common technologies in nanosatellites and picosatellites, covering launch history, topologies, purposes, systems, subsystems, and applications.	493
[36]	Presented a historical review of radioisotope thermoelectric generators (RTGs) and their conversion mechanisms, providing information to enable a direct comparison with alternative isotopic systems.	260
[39]	Thoroughly analyzed the operating principles, applications, and materials used in TEGs. Additionally, it provided examples of simulations using software such as COMSOL Multiphysics and ANSYS.	201
[41]	Described the CubeSat OpenOrbiter's structural aspects and program objectives, focusing on requirements, constraints, high-level architecture, and design for small satellites.	109
[7]	Provided an overview of CubeSats, their systems and subsystems, main missions and objectives, and potential future challenges. Additionally, it classified topologies and protocols necessary for launches.	101
[43]	Presented the optimization process in the thermal analysis of a 1U CubeSat, setting boundary and environmental conditions. Developed and applied a MATLAB algorithm to compare results with ESTAN-TMS software.	96
[8]	Detailed the design and hardware/software architecture of internal systems for two 1U CubeSat missions: a combined probe/DC plasma impedance system on two satellites and two CubeSats for GPS scintillation measurements.	95
[44]	Developed a numerical model to predict the performance of a thermoelectric device as both a TEG and TEC, considering height, cross-sectional area, number of pairs, and ceramic plate's thermal conductivity.	85
[45]	Used a genetic algorithm to explore material combinations for 3U CubeSat coatings to meet operational temperature requirements, validated through FEM thermal simulation.	66
[46]	Described a high-performance platform combining heat transfer and thermoelectric conversion. Analyzed how different operating conditions affected TEG energy production using a metal pin array with forced convection.	59

Table 5. Cont.

Reference	Brief Description	Citations
[48]	Represented the development of the thermal design for the thermal control subsystem of the STEP Cube Lab and its validation through thermal vacuum tests, in order to estimate the thermal behavior of the components.	55
[49]	Conducted a thermal analysis of a 1U CubeSat in LEO, focusing on passive thermal control to ensure proper component operation using different surface coatings. Proposed the use of a CPV system, or Concentrating Photovoltaic system, in a 1U CubeSat to improve energy generation efficiency by converting the energy provided by the Sun's light intensity and concentrating it onto the solar cells using lens arrays.	49
[50]	Provided an overview of CubeSats as scientific platforms, highlighting their potential and challenges, focusing on communication systems and efficient space utilization with integrated or shared components.	29
[12]	Discussed the current state and advancements in thermoelectric technology for use in next-generation RTGs and in waste heat recovery applications using TEGs, excluding the discussion of material property optimization strategies.	8
[51]	Analyzed different materials in transient and steady-state regimes of a 1U CubeSat to select the most suitable ones according to the specified temperatures.	3
[52]	Conducted a global sensitivity analysis to identify key elements limiting heat transfer in a 1U CubeSat's data processing unit, followed by an uncertainty analysis for the temperatures of crucial electronic components and the radiator surface.	1
[54]	Introduced the thermal control design of a 3U CubeSat, calculated the temperature field under various conditions using FEM, and compared in-orbit temperature data with thermal simulation results.	0
[20]	This study validated FEM models on the CubeSat using real data from MYSat-1, developing a thermal model in ANSYS to ensure safe CubeSat operation.	0
[57]	Proposed a comparative study of South American space programs using an adapted Wood and Weigel model, evaluating their evolution over the past three decades and providing a comparative view of ten regional programs.	0
[56]	Described the Irazú Project and its development, in a superficial manner, related to a 1U CubeSat for environmental monitoring, focusing on biomass estimation and carbon dioxide fixation in a fast-growing tree plantation.	0
[55]	Conducted a detailed simulation of a TEC-based thermal control system for a CubeSat in a 300 km circular orbit, evaluating the feasibility and performance of TECs under extreme conditions.	0

Table 5. Cont.

Reference	Brief Description	Citations
[59]	Explained the thermal environment in low Earth orbit for MRZ-SAT and described computational thermal modeling for this 1U CubeSat using finite element algorithms, serving as an initial guide for beginners in CubeSat thermal analysis and modeling.	0
[53]	Described the structural optimization of the Morazán Satellite (MRZ-SAT) chassis, an award-winning project for natural disaster early warning. Compared three structural patterns to achieve the lightest and most rigid design.	0

Several studies focus on the structure and development of CubeSats, covering topics from thermal analysis to system control and optimization. Works like [43], which presents optimization processes for thermal analysis in CubeSats, and [8], which details hardware and software architecture in specific missions, are fundamental for understanding key CubeSat concepts. Additionally, studies like [45] use genetic algorithms to explore different material combinations that meet the satellites' thermal needs, while [49] and [20] focused on both passive thermal control requirements and the validation of thermal models using real CubeSat data, demonstrating the practical application of theories and models in real operational contexts.

These studies, along with the analysis of specific projects like the Irazú Project detailed by [56], and the Morazán-Sat Project explored by [53,59], exemplify the structural optimization of nanosatellites intended for specific monitoring functions. These functions include verifying CO₂ emissions and implementing early warning systems for natural disasters.

For research on thermoelectric devices, notable works include those by [36,51], which offer a historical review of RTGs to compare them with alternative isotopic systems and discuss recent advances in the field, presenting new approaches to optimizing thermoelectric material properties for the next generation of RTGs. Ref. [39] delves into the operating principles of TEGs through simulations based on FEM analyses. Additionally, Ref. [44,46] develop models to predict the performance of thermoelectric devices under various conditions, highlighting the crucial role of these technologies in energy efficiency and the sustainability of space operations.

Studies by [12,57] describe the potential of space programs, focusing particularly on CubeSats and the evolution of space programs in South America, respectively. The first highlights the versatility of these nanosatellites as scientific platforms, emphasizing their challenges and potential for future space missions, with special attention to communication systems and the optimization of satellite internal space usage. The second study employs an adaptation of the Wood and Weigel model to conduct a comparative analysis of the progress of South American space programs over three decades, offering a comprehensive perspective on regional development and trends, illustrating how these initiatives have expanded and evolved in response to different technological and geopolitical challenges.

Lastly, it is important to note that, although 8 (30.77%) of the 26 research articles were not cited, they are highly relevant to this research due to their direct influence on the applicability of TEGs in CubeSats. For example, Ref. [55] present a study on the use of TECs in nanosatellites for temperature control under extreme conditions. Additionally, Ref. [20,58] focus on the modeling and thermal analysis of CubeSats to define temperature limits, directly influencing the operation of internal components. These studies are fundamental to this work, as the study of TEG application in nanosatellites depends

entirely on the temperature gradient to which the satellite's face is subjected. Therefore, these studies cannot be disregarded.

In summary, the reviewed articles do not directly discuss the application of TEGs in nanosatellites, reinforcing a potential connection between thermoelectric technology and innovations in energy sources for small satellites. Future exploration in this field could open new avenues for space exploration and energy supply for nanosatellite missions.

Specifications and Boundary Conditions of CubeSats

This section aims to extract and present the main information that establishes both the specifications of CubeSats and the boundary conditions of the proposed topic, as found in the research articles of the BP. After reviewing the 26 articles, it was identified that the 13 articles focusing on the design and thermal analysis of CubeSats provided fundamental parameters for the research methodology, such as structural material, power source, number of PCBs, and others. Of these, only 11 are presented in Table 6, as they provide all the necessary information to establish the boundary conditions and appropriate structures for the application of TEGs as a power source in CubeSats.

Table 6. Structure, devices, specifications, and boundary conditions in CubeSats.

Reference	Structure and Devices	Specifications and Boundary Conditions	Software Used
[8]	1U CubeSat; structural material: AL 7075; solar cell: Tecstar Triple Junction; battery: LiPo	Circular orbit; LEO: 300 km and 60°; provides weights and consumed power	Not provided
[49]	1U CubeSat; structural material: AL6061T6; battery: LiPo; 5 PCBs	Sun-synchronous circular orbit; LEO: 600 km and 98°; transient and steady-state analysis; maximum and minimum temperatures provided	Not provided
[59]	1U CubeSat; structural material: AL6061; solar cell: GaInP2/GaAs/Ge	Circular orbit; LEO: 400 km and 51.65°; details angles and thermal analysis	GNU Octave; SINDA software
[52]	1U CubeSat; structural material: AL6061TE; 3 PCBs	LEO: 600 km and 67°; transient and steady-state analysis; operating temperatures provided	ANSYS
[55]	1U CubeSat; structural material: AL 7075; 4 PCBs; PCB material: FR4; solar cell: single crystal silicon; solar cell sizes provided; TE: CP1.031-17-06L	Circular orbit; LEO: 300 km with no inclination; period of 90.4 min; Earth represented as a sphere; satellite surface temperature: 6–60 °C; operating temperature: 0–40 °C	Not provided
[53]	1U CubeSat; structural material: 6061; solar cells and components: obtained from Endurosat 1U	Detailed component weights and consumed power provided	Autodesk Fusion 360 Education License
[50]	1U CubeSat; specifications of STEP Cube Lab; solar cells: polycrystalline single-junction silicon	LEO: 600 km, sun-synchronous; Period of 1 year	Solar Simulator
[58]	3U CubeSat; structural material: AL 7075; PCB material: FR4	LEO: 500 km, sun-synchronous; operating temperatures of components and their power provided	Not provided

Table 6. Cont.

Reference	Structure and Devices	Specifications and Boundary Conditions	Software Used
[43]	1U CubeSat; structural material: AL 6101T6 and AL7076T6 (plate); solar cells: gallium arsenide triple junction; reference to PiCPoT nanosatellite	LEO: 600 km and 98°; operating temperatures of components and power provided	MATLAB-ESATAN-TMS
[20]	1U CubeSat; structural material: AL 6061 and stainless steel 304; 5 PCBs; PCB material: FR4; battery: Li-Ion	LEO; operating temperatures and maximum and minimum temperatures obtained by the software provided	CubeSat Wizard with MATLAB-ANSYS
[48]	1U CubeSat; structure based on STEP Cube; structural material: AL 6061T6; battery: Li-Ion; solar cells: ITO-GaAs triple junction; 5 PCBs; PCB material: FR4	Sun-synchronous orbit; LEO: 600 km and 97.78°; period of 1 year; details components, their dissipated power, and operating temperature; provides temperatures in low and high operation; provides power generated by the solar cells	Thermal Desktop; RadCAD

Although all the presented boundary conditions are relevant for this research, the most notable ones are those that provide information about the space environment in which the nanosatellites operate. In this case, articles such as those by [20,48,53,55] provide essential data on ambient temperatures, inclination angle, weight, and internal component consumption to determine the feasibility of using TEGs as an energy source in CubeSats.

In more detail, parameters such as ambient temperature and solar incidence significantly influence the performance of TEGs in generating electrical energy. As highlighted in the reviews presented in Table 4, the operation of a TEG depends on a temperature gradient, created by a hot source on one face and a cold source on the other. Simultaneously, the weight and energy consumption of TEGs directly impact their ability to provide sufficient power for the CubeSat's operation. These factors are crucial to ensure a good watt/kg ratio of the payload, guaranteeing that the satellite operates efficiently and effectively.

2.3. Intellectual Property

The identification of registered products and patents within a research theme is extremely relevant for verifying existing technologies in the area, as they represent an indicator of technological advancement resulting from RD activities in universities [60]. Therefore, to verify the relationship between patent development and RD, steps similar to those applied for the selection of the BP were carried out.

2.3.1. Selection of the Patent Repository

The identification of patents was carried out using the Google Patents and Patentscope search engines. These tools are essential for a global search of patent data, including those registered in Brazil [61]. To optimize the search, combinations of KWs encompassing the investigated theme in both English and Portuguese were established, as shown in Table 7.

Table 7. Results of the patent searches conducted.

English	Portuguese	Google Patents	Patentscope
("Thermoelectric Generator" OR "TEG" OR Seebeck OR Thermoelectric) AND (Cubesat OR Nanosatellite OR Nanosat OR "Small spacecraft")	("Gerador Termoelétrico" OR "TEG" OR Seebeck OR Termoeletricidade) AND (Cubesat OR Nanossatélite OR Nanosat OR "Pequeno satélite")	93	101
("TEG") AND (Cubesat OR "Small spacecraft")	("TEG") AND ("Cubesat" OR "Pequeno satélite")	13	11
("Electrical Power System" OR "EPS") AND (Cubesat OR Nanosatellite OR Nanosat OR "Small spacecraft")	("EPS") AND (CubeSat OR Nanosatellite OR Nanosat OR "Small spacecraft")	33	131
("Power System" OR "EPS") AND (Cubesat OR Nanosatellite OR Nanosat OR "Small spacecraft")	("Sistema de potência" OR "EPS") AND (Cubesat OR Nanossatélite OR Nanosat OR "Pequeno Satélite")	261	356
("Thermoelectric Generator" OR "TEG") AND (Cubesat OR "Small Spacecraft" OR Nanosatellite)	("Gerador Termoelétrico" OR "TEG") AND (Cubesat OR "Pequeno Satélite" OR Nanossatélite)	29	31
Raw Patent Database (RPD)		1059	

Subsequently, using the search data exported to Excel, data processing of the RPD containing 1059 patents was carried out, ensuring that the identified patents were aligned with the research. The process and treatment were performed using the structure shown in the flowchart in Figure 10. The initial filtering, called a correction filter, identified duplicate titles and codes within the patents in the RPB, resulting in 632 exclusions (59.68%). The patents represented in the PD were processed with an alignment filter, which involved reading all titles aligned with the research theme. At that stage, 385 patents (90.16%) that were not aligned were excluded, leading to two patent repositories: Google Patents Repository and Patentscope Repository, containing 32 and 10 patents, respectively. A check for duplicate titles between the repositories was performed through a check filter. As a result, the final PR contained 34 patents aligned with the investigated theme, representing 3.21% of the RPB.

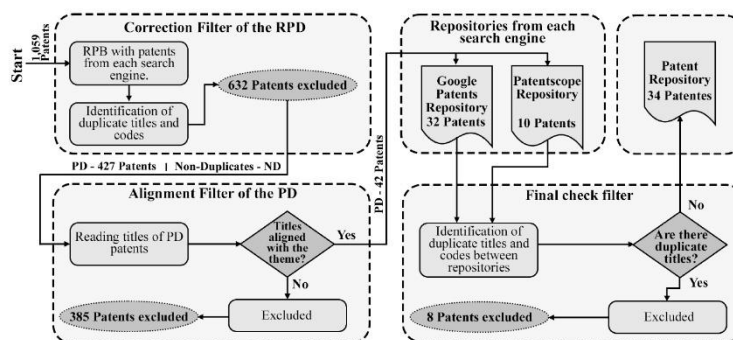


Figure 10. Flowchart representing the filtering of products and patents.

The patents from the Patent Repository (PR) are presented in Table 8, in ascending order. These patents include detailed information about the inventors, their titles and respective codes, country of origin, and a brief description of each invention. The evaluation of the relevance of these patents within the proposed theme was based on the following criteria: (i) verifying if the patented technology was directly applied to satellites or

nanosatellites; (ii) assessing the impact on energy generation in the satellite or nanosatellite; and (iii) using residual heat for electricity generation.

Of the 34 patents belonging to the PR, 5 patents (14.70%) (numbers 1 to 5) met all the mentioned requirements, demonstrating a significant influence on the research. Another 26 patents (76.47%) (numbers 6 to 31) had a lesser influence, partially fulfilling the requirements. Finally, three patents (8.83%) (numbers 32 to 34) were discarded for not meeting the established criteria.

Table 8. Presentation and selection of patents that comprised the Patent Repository.

Reference (Number)	Title: Code	Brief Description
[52] (1)	A kind of device for generating electricity using satellite external surface temperature gradient: CN-106208814-B	The invention proposes a method for generating electricity by utilizing the temperature gradient on the external surface of satellites. This is achieved through a series of thermal insulation layers, a heat-conducting layer, and thermoelectric devices, which is especially useful for micro- or nanosatellites. The invention consists of a device called a
[62] (2)	Magneto-thermoelectric generator for energy harvesting: US-9793829-B2	magneto-thermoelectric generator (MTG), capable of converting residual thermal heat from a photovoltaic cell into mechanical energy and, ultimately, into electrical energy. The embodiments operate based on the principle of thermally induced switching between open and closed states of a ferromagnetic switch, aiming to generate mechanical oscillations that cause deformation in a piezoelectric material, resulting in the generation of electrical energy. The patent describes systems, devices, and methods for manufacturing nano-engineered thin-film thermoelectric converters (NETT) with photovoltaic applications. These devices utilize the cold of space for satellites or improve the efficiency of terrestrial solar photovoltaic systems. Examples of methods include mounting a thin-film thermoelectric device to a photovoltaic device, followed by the assembly of a heat sink and, optionally, a radiator or heat exchanger. These are electric power generators that utilize the thermoelectric effect in arrays of nanostructured materials. A thermoelectric device is described, consisting of p-type and n-type elements made of carbon nanotubes, and it is capable of operating at high temperatures, generating considerable output power despite being lightweight. A method for manufacturing this device is also presented.
[63] (3)	Nano-engineered thin-film thermoelectric converter for photovoltaic applications: US-2022285571-A1	
[64] (4)	Nanostructured material-based thermoelectric generators: US-2009044848-A1	
[65] (5)	Radioisotope thermoelectric generator: WO-2016138389-A1	The present invention pertains to radioisotope thermoelectric generators, focusing on miniaturized versions to provide power in space-constrained situations. These generators incorporate radiological heat sources and are designed to operate in high-temperature, high-pressure, and high-vibration environments, such as in drilling probes. The invention describes a power supply for an autonomous device with multiple power supply units, each having an input for source power, an output to a common power rail, an energy storage device, and control to manage the energy flow.
[66] (6)	A power supply: AU-2019262087-A1	

Table 8. Cont.

Reference (Number)	Title: Code	Brief Description
[67] (7)	Compact nuclear power system applied to space environment and working method: CN-110043338-B	A compact nuclear power system is proposed for the space environment. Using carbon dioxide as the working fluid, the system is capable of operating stably for decades or even centuries, increasing efficiency by more than 10%. It can be used as a power source in space probes for long-term missions. The invention consists of the introduction of small, ready-to-use, low-cost CubeSat systems that are more accessible, reliable, and easier to use compared to conventional CubeSats. It provides a complete solution, including a satellite, ground station, and remote field units, which can be assembled and deployed quickly.
[68] (8)	CubeSat system: US-11021274-B1	The patent addresses a set of systems applied to a 2U CubeSat nanosatellite, focusing on generating electrical power from solar energy. These systems may include aluminum honeycomb structures or composites with glass covers, as well as rigid crystalline photovoltaic cells and rigid or flexible deployment mechanisms.
[69] (9)	Extendable solar array for a spacecraft system: US-9856039-B2	A transparent thermal film is applied directly onto thin-film solar cells, creating a flexible solar panel. This panel can be installed on a substrate during the manufacturing process to allow illumination and heat dissipation on both sides, making it ideal for building a solar array on curved surfaces, such as spherical nanosatellites. The current inventions involve thin-film devices and processes, especially solar cells and flexible circuit boards, and their manufacturing methods.
[70] (10)	Flexible thin-film solar cell: US-6410362-B1	The invention focuses on the presentation of thin-film devices and processes, particularly thin-film solar cells and flexible circuit boards, and their manufacturing methods. An exemplary configuration involves multiple layers of transparent polyimide with metallization between them, forming a three-dimensional flexible printed circuit board. This allows for the direct deposition of thin-film solar cells, creating flexible electronic modules. These boards are ideal for electronic systems on curved surfaces, such as spherical energy nanosatellites.
[71] (11)	Integrated solar power module: US-6300158-B1	The invention pertains to thin-film batteries embedded in thin-film printed circuits to provide localized power to electronic devices. These batteries are integrated into multi-layer flexible circuit boards, supporting devices such as power regulators, forming an integrated battery and circuit module.
[72] (12)	Integrated thin-film battery and circuit module: US-7045246-B2	The invention reveals a power system for micro and nano satellites based on a supercapacitor, comprising a supercapacitor and a power input module. The power input module includes an array of solar cells that charge the supercapacitor.
[73] (13)	Micro-nanosatellite power system based on super capacitor: CN-106602694-A	The present application provides an electrical power subsystem (EPS) with a dual-battery configuration that enables sufficient power supply for a spacecraft bus and a payload module carried by the spacecraft.
[74] (14)	Modular electrical power subsystem architecture: US-2022158477-A1	

Table 8. Cont.

Reference (Number)	Title: Code	Brief Description
[75] (15)	Modular solar cell and solar cell array: US-2023299610-A1	The present invention pertains to power management in spacecraft, particularly in the context of modular solar cells and solar cell arrays that can be deployed on different types of spacecraft. Examples of the invention include modular solar cells, arrays, and energy management systems designed for use in satellite systems and constellations.
[76] (16)	Power supply module for spacecraft: WO-2017177301-A1	The present invention pertains to power converter circuits or devices, specifically power modules based on solar cells for power subsystems in spacecraft. These modules provide power to an unregulated electrical bus of the spacecraft, using a solar cell and a power converter mounted on it to convert solar energy into a DC output voltage determined by the voltage of the spacecraft's electrical bus.
[77] (17)	Satellite modular power supply: US-100536107-B1	The invention presents simplified concepts for improved power supply configurations for satellite devices. An example discussed involves power units, i.e., batteries, in the form of polygons arranged around a power control module within the satellite's chassis.
[78] (18)	Satellite storage battery system: CN-113422423-A	The invention illustrates a battery system for satellites, enabling the conversion of solar energy into electricity, the storage of that energy, and its use when solar energy is unavailable. It includes a solar energy production device, a storage device, and a set of batteries that work together to provide power as needed.
[79] (19)	Solar array remote acoustic sensing (SARAS): US-10078328-B1	The invention relates to sensing technologies, specifically systems and devices that utilize solar arrays, photovoltaic cells, or photodetectors to obtain or provide acousto-optic signatures. These devices act as remote acoustic sensors, detecting fluctuations in the intensity of optically modulated light at audio frequencies.
[80] (20)	Solar battery and the integrated device of slot antenna: CN-106711576-B	The invention presents a device that combines a slot antenna and a solar battery into a single system. This resolves space competition issues in micro- and nanosatellites, reducing the satellite's volume and weight while increasing the light capture area of the solar battery.
[81] (21)	Solar energy conversion and transmission system and method: US-9815573-B2	The present invention relates to systems and methods for converting solar energy into microwave electrical energy and transmitting it to Earth.
[82] (22)	Solar panel and flexible radiator for a spacecraft: EP-3239057-B1	The invention relates to a combination of a solar array and a flexible radiator for a spacecraft.
[83] (23)	Solar panel array: US-9882330-B2	The invention relates to methods and devices for interconnecting a set of solar panels composed of elongated PCBs, each with solar cells mounted linearly and connected in series to form a panel. There are also hinge assemblies consisting of hinge pieces, support plates, a spring, and a hinge pin, which are mounted between the panels to allow them to be folded in an accordion arrangement or deployed up to 180 degrees.
[84] (24)	Space vehicles including multijunction metamorphic solar cells: US-2021202777-A1	The document addresses spacecraft with multijunction solar cell panels and their manufacturing, focusing on the design and specification of bandgap ranges in four- or five-junction solar cells to optimize efficiency in orbit and ensure performance over an operational lifespan of five to fifteen years.

Table 8. Cont.

Reference (Number)	Title: Code	Brief Description
[85] (25)	Space-based radioisotope production and methods of use: US-20220367077-A1	The text describes a system for producing radioisotopes in space and its methods of use. It highlights the acceleration of a propellant by decay energy and the possibility of recharging radioisotope rocket thrusters at an orbital charging station. Additionally, it mentions that activated isotopes can be used to generate electricity and irradiate other items in space for various purposes.
[86] (26)	Spacecraft solar cell monitoring system: US-2009119060-A1	The invention deals with monitoring the characteristics of a solar cell array in small spacecraft. A method is used to determine the current and voltage of the solar cells, allowing the determination of the cells' orientation relative to the sun. This is useful for monitoring the degradation of the solar cells over time in picosatellites.
[87] (27)	Thermoelectric rocket propellant tank pressurization system: US-10495028-B1	The text describes advanced rocket engine systems, where one system uses TEGs to produce electrical power for the pump, based on the temperature difference between the liquid propellant and the heat produced in the combustion chamber. This pressurizes the propellant tanks to feed the engine. It addresses a satellite system consisting of a chassis with an avionics package in the upper portion. This package includes various boards, such as the main board, payload interface board, daughter board, and battery board, all arranged in parallel planes. They are connected through stackable connectors. The method of operating the satellite is also described.
[88] (28)	CubeSat system, method, and apparatus: US-9248924-B2	The present invention relates to power distribution systems that manage the distribution of electrical power between power sources and energy storage elements on a regulated bus in micro- and nanosatellites. The system allows the coupling of multiple power sources and energy storage devices to the bus, with individual regulators and chargers for each device. The invention relates to a power and distribution module designed for CubeSats, offering 3.3 V and 5 V converters connected in parallel to a power distribution unit. This compact and highly integrated module is developed to meet the high-reliability, high-performance, and high-integration power requirements of CubeSat equipment.
[89] (29)	Power distribution system: US-6396167-B1	The invention relates to the design and equipment of small modular CubeSats, including models for training. The CubeSats feature a basic modular platform, internal network, central processor, control and communication module, and service systems for selecting and replacing elements. A service connector allows access to the internal network, the debugging of programmable devices, and external power supply.
[90] (30)	Power supply and distribution module applied to CubeSat: CN-106059266-A	The invention pertains to a satellite with a body containing a radiative surface to emit heat into space, and an attitude control system to orient the satellite in Earth's orbit. This system can adjust the satellite's orientation relative to the sun, switching between a position where the radiative surface points away from the Sun and one where it is exposed to the Sun. The goal is to control the satellite's heat transfer.
[91] (31)	Satellite-constructor, training-demonstration model: RU-2693722-C2	
[92] (32)	Satellite thermal control: WO-2024003013-A1	

Table 8. Cont.

Reference (Number)	Title: Code	Brief Description
[93] (33)	Scenario-based method for testing software: US-11138100-B2	The present invention pertains to the field of software testing, specifically a method for testing software, such as that used in satellites, using scenario-based programming. The method involves testing the operational software of a system with various internal subsystems, operating in an environment controlled by a hardware board using electronic signals and operational software.
[94] (34)	Spherical mobility system: US-11420777-B1	The text describes a lunar exploration rover designed to detect subsurface ice and traverse varied terrains in extraterrestrial environments. The rover features a spherical structure that houses an avionics core. The avionics core contains components for data acquisition and motor assemblies that enable the rover to rotate the spherical shell for locomotion.

Description:

US—United States; CN—China; AU—Australia; RU—Russia; EP—European Patents Official; WO—World Intellectual Property Organization.

2.3.2. Analysis of the Patent Repository

The initial analysis of the PR focused on identifying the countries with the most patents related to the theme. As a result, Figure 11 shows the number of patents from each country, indicating that 64.71% of the total patents in the PR originated from the United States, followed by China with 17.65%, patents administered by WIPO with 8.82%, and countries like Russia, Australia, and the EP institution each representing 2.94%.

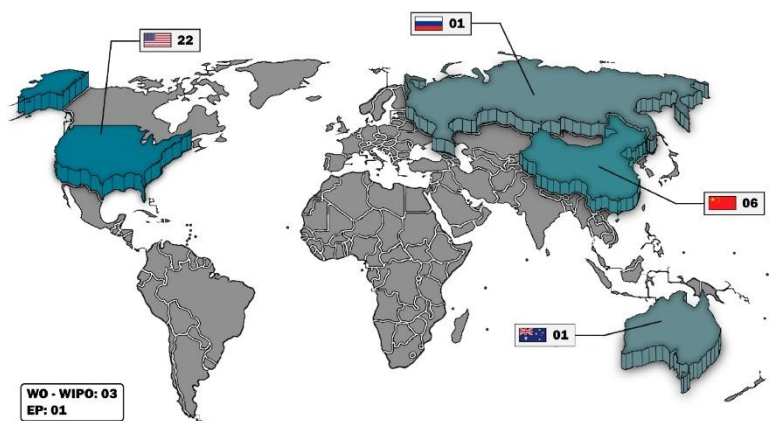


Figure 11. Number of patents registered by country.

Using The Lens Patent Search mechanism provided by The Lens site allowed us to capture legally characterizing information about the patents in the PR. Data such as annual patent publications, most cited patents, discontinued, inactive, expired, or active patents, main inventors and institutions, among others, are made available for free by the platform. Thus, analyses of the patents and the inventors/institutions were carried out to verify their industrial relevance within the proposed theme.

By adding the codes of each patent in the PR to the platform, a “Dynamic Collection” was formed. This guide allowed access to the associated legal records. Of the patents ana-

lyzed, 29 patents (85.29%) referenced other inventions, totaling 335 citations, highlighting their importance for conceptual and innovative development.

Additionally, 12 patents (35.29%) included citations of non-patent literature documents, providing additional context and aiding in defining the state of the art in the relevant field. Concurrently, 21 patents (61.76%) served as a foundation for developing new inventions.

Figure 12 illustrates the evolution in the number of patents created over the past 20 years, according to their year of publication, classified into two categories: granted patents, referring to those approved by a licensed office, and patent applications, referring to inventions that have entered the patenting process [95]. In this case, a significant increase in the production of patents related to the theme was observed starting from 2016.

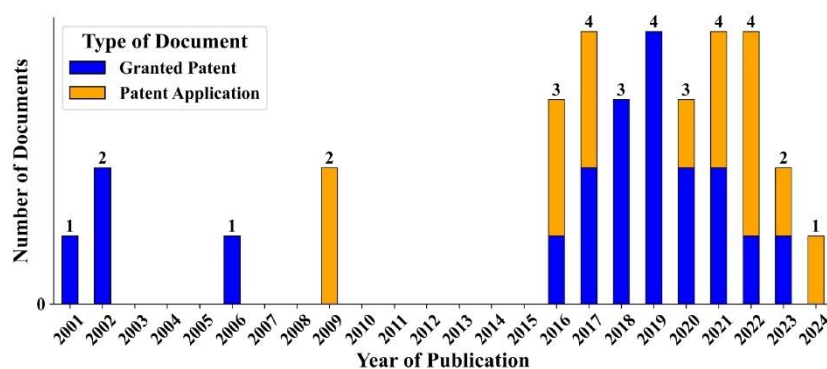


Figure 12. Number of patents registered per year.

In parallel, it was essential to identify the legal conditions associated with each patent, considering their year of registration. This process involved determining the current legal status of the patent, which can vary between active, inactive, expired, discontinued, pending, patented, or unknown. Additionally, it was important to quantify the number of citations each patent had received to highlight the relevance of the previously selected ones in the field of study.

Thus, Figure 13 shows the number of citations per patent for each year of registration, accompanied by Table 9, which presents the number of documents by legal status. This analysis indicated a significant growth in the production of new patents starting from 2016, showing increased interest from companies and inventors in the aerospace sector. Furthermore, 52.9% of the total patents remained active, while 26.4% represented patents that had been discontinued, expired, or were inactive, and 20.6% were pending approval by an accredited office.

Table 9. Number of patents by legal status.

Legal Status	Quantity	
Active/patented	18	(52.9%)
Pending	7	(20.6%)
Expired	3	(8.8%)
Inactive	3	(8.8%)
Discontinued	3	(8.8%)

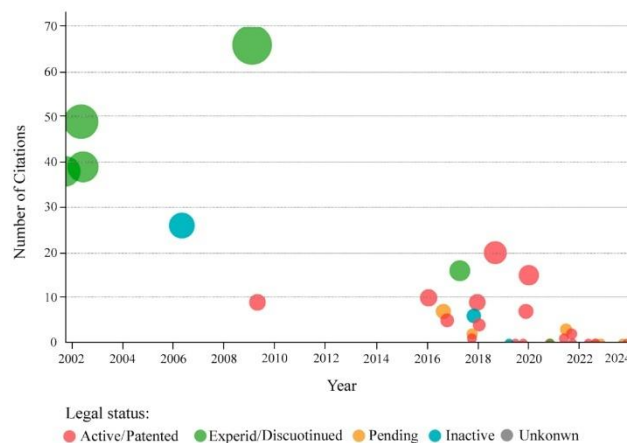


Figure 13. Number of citations per patent by year of publication. Adapted from [96].

In view of this, Table 10 describes the legal information of the patents that met all the requirements influencing the research, briefly described in Table 8.

Table 10. Description of the legal status of the filtered patents.

Reference	Code	Legal Status	Citations per Patent
[64]	US-2009044848-A1	Discontinued	66
[65]	WO-2016138389-A1	Pending	7
[62]	US-9793829-B2	Active	1
[97]	CN-106208814-B	Inactive	0
[63]	US-2022285571-A1	Pending	0

The analysis of the filtered patents revealed the legal status and citation impact of each. Among the patents, one was active (US-9793829-B2), two were pending (WO-2016138389-A1 and US-2022285571-A1), one was inactive (CN-106208814-B), and one was discontinued (US-2009044848-A1). Notably, the discontinued patent had the highest number of citations (66), while others had significantly fewer or none.

With this analysis, it was possible to identify the inventors with the highest number of registered patents in their names, as well as their involvement in other patents. Figure 14 presents the top 20 inventors in the PR, organized by the number of patents produced. It shows that inventor Edward Simburger had the highest number of produced patents, followed by Paul Gierow, Frank Jeffrey, and James Matsumoto.

Similar to the analysis of patent production by inventor, it is advisable to identify which institutions focus on the research theme. Additionally, it is important to determine the purposes for which the patents were designated to ensure their relevance to the present work.

Using the same procedures as before, the number of patents registered by company was obtained through a heat map, illustrated in Figure 15a, and the top 20 codes related to CPC are presented in Figure 15b. The CPC is a classification system developed by the USPTO and the EPO. This system has a designation letter for each study area, detailed in [98].

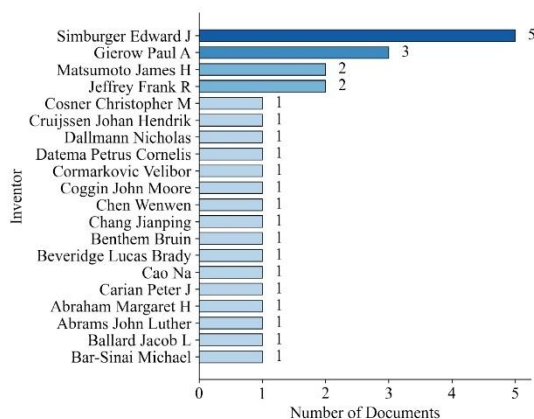


Figure 14. Number of patents produced by inventor. Adapted from [96].

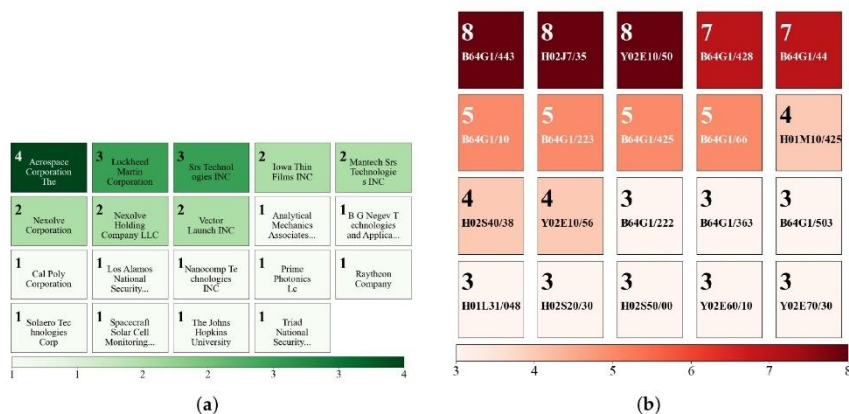


Figure 15. Number of documents by (a) institutions and (b) according to CPC classification.

In some cases, a patent may have more than one CPC classification. This occurs because the invention can cover multiple technical areas, making it relevant to different aspects of classification. For the PR, which contained 34 patents, some documents may also have had multiple categories.

Thus, out of a total of 31 documents registered by companies, it was noted that Aerospace Corporation had the highest number of patents, with four patents (12.90%), followed by Lockheed Martin Corporation and Srs Technologies INC with three patents each (9.68%), Iowa Thin Films, Mantech Srs Technologies INC, Nexolve Corporation, Nexolve Holding Company LLC, and Vector Launch INC with two patents each (6.45%), and other institutions with one patent each (3.23%).

Regarding the CPC classification, it was identified that a large portion of the patents were related to the code B64G1, which is classified under Performing Operations Transporting. More specifically, they focused significantly on energy and communication systems for space applications. Patents classified under codes H02J7, H01M10, H01L31, H02S50, and H02S20 were directed towards the development of structural components, energy storage systems, and photovoltaic system testing. Lastly, those with codes Y02E10, Y02E60, and Y02E70 were related to the development of batteries and photovoltaic systems.

2.3.3. Most Relevant Patents

In the context of the research, Ref. [97] describes the use of micro-thermoelectric devices, composed of thermoelectric materials with high ZT values at low temperatures and high-thermal-conductivity ceramic plates, to generate electricity using the temperature gradient on the external surface of the nanosatellite. Positioned centrally on the six faces of a CubeSat (Figure 16a), the structure of the invention is shown in Figure 16b. Other details are presented in [97].

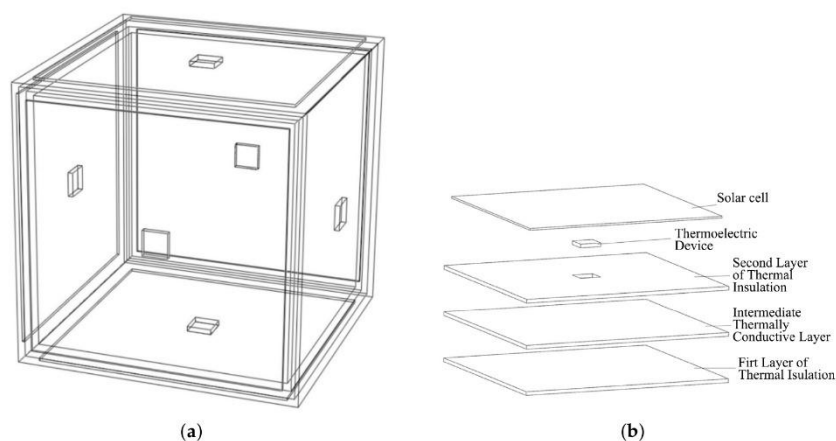


Figure 16. Drawing of the (a) three-dimensional schematic and (b) layer structure of the invention [97].

The approach presented in [62] describes a device capable of converting residual thermal heat from a photovoltaic cell into mechanical energy and, ultimately, into electrical energy. Called the MTG, this invention operates based on the thermally induced change in magnetic moment within a magnetic material due to the thermal transition between a heat source and a heat sink. This requires the use of a medium to force the nonlinear restoration of motion, exemplified by the use of a spring coupled to a ferromagnetic material. Its construction is observed in Figure 17, from top to bottom, where (10) details the MTG device.

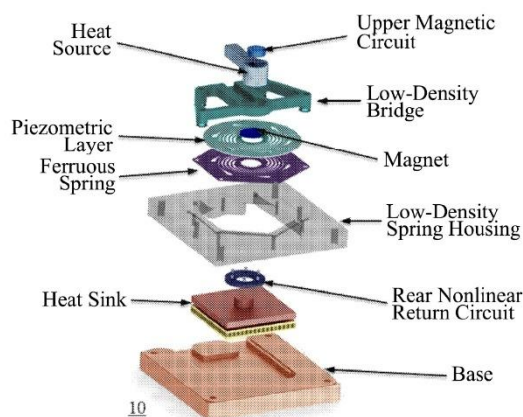


Figure 17. MTG device. Adapted from [62].

In the cold state, the magnetic material is in the closed position, i.e., in thermal contact with the hard magnet on the hot side. As heat from the source is conducted to the magnetic material, it approaches its transition temperature and experiences a change in the magnitude or direction of its magnetization. With the opposing magnetic force weakened, the means for the nonlinear restoring force return the magnetic material to the cold side of the device. After sufficient heat transfer to the cold side, the magnetic moment returns to its original state, moving the material back to the hot side. The movement of the magnetic material between the hot and cold sides causes mechanical oscillations, which are a form of nonlinear restoring force. Electrical energy is generated by coupling the means for the nonlinear restoring force with a piezoelectric material, resulting in the electromechanical production of electrical energy. Its operation and methodology are presented in [62].

Meanwhile, Ref. [63] describes methods for the fabrication of NETT devices for MJPV applications. Focusing on space employment, their use in satellites is appreciated in terms of harnessing residual energy, optimizing size, weight, and power. In certain cases, NETT devices can be used between the thermal blankets used by satellites, providing distributed energy to various sensors without reliance on the solar panel array. This means that the residual thermal energy output can be considered as the sum of the total incident solar power minus the energy output of the photovoltaic solar panels and minus the energy output of the NETT. The structure of the MJPV-NETT device is shown in Figure 18, where (190) shows the fabrication of the MJPV-NETT device. Additional details are available in [63].

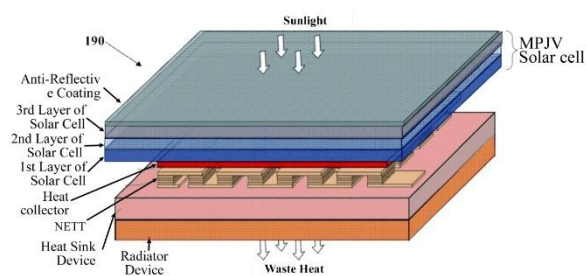


Figure 18. MJPV-NETT device. Adapted from [63].

In parallel, Ref. [64] conducted studies on the changes in geometry, material, and weight of TEGs for space applications. As a result, they patented a thermoelectric device consisting of (i) a first element designed to collect heat from a heat source, (ii) a second element spaced from the first element to dissipate heat from the first element, and (iii) a core positioned between the first and second elements to convert heat into useful energy. The core was composed of a carbon nanotube that exhibited a relatively high Seebeck coefficient, which increased as the temperature rose. Additionally, it had a relatively high transition temperature, allowing the coupled elements to operate in a substantially high-temperature range. Its construction is shown in Figure 19a, and detailed in Figure 19b, where (130) shows the device.

In summary, Table 11 addresses the main characteristics identified in the PR. It highlights that the only patents that closely aligned with the proposal of using TEGs as an energy source for CubeSats were those by [62,97]. However, these patents differed mainly because they integrated a hybrid TEG system with solar cells (or another type) and did not provide power for the entire nanosatellite. Additionally, [62] discussed thermoelectric devices to regulate the temperature of specific sensors and subsystems, rather than providing power for the entire system.

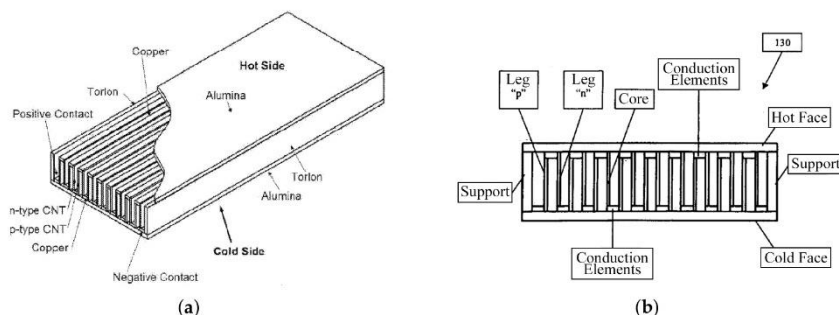


Figure 19. Schematic drawing of the thermoelectric device composed of carbon nanotube cores: (a) three-dimensional and (b) two-dimensional [64].

Table 11. Mapping of the main characteristics addressed in the topic.

Analyzed Characteristics	IP Publications					Proposal
	[97]	[62]	[63]	[64]	[65]	
Study of thermoelectric devices as electrical power generators	✓	✗	✗	✓	✓	✓
Presents modification in the standard structure of TEGs	✗	✓	✗	✓	✓	✓
Has space applications	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Utilizes only residual heat from ambient conditions	✓	✓	✓	✓	✗	✓
Forms a hybrid system with solar cells or another type	✓	✓	✓	?	✓	✗
Application in CubeSats	✓	✓	✓	?	✓	✓
Impact on energy supply to CubeSat subsystems	✓	✓	?	?	?	✓
Uses only TEGs for the integral power supply of CubeSats	✗	✗	?	?	?	✓

Complies: ✓ Does Not Comply: ✗ Not informed/Not identified: ?

The proposed research distinguishes itself from existing studies by exclusively focusing on the use of TEGs as the primary and integral power source for the EPS of a CubeSat, in contrast to prior works that predominantly explore hybrid systems or specific subsystem applications. Furthermore, the proposal introduces structural modifications to TEGs to optimize their functionality in space environments, an aspect not addressed in previous references. While many existing studies provide limited or unclear assessments of the impact of TEGs on nanosatellite subsystems, this research offers a comprehensive evaluation of their integration into the entire power system, thereby addressing significant gaps in the current literature.

3. Comparative Analysis of the Scientific and Patent Portfolio

This section aims to establish the relationships between the BP identified through the ProKnow-C methodology and the IP search conducted, resulting in the PR. It evaluates the connections between the authors and inventors of each repository, as well as the progress of RD in relation to the advancement of industrial innovations on the researched topic.

3.1. Relationship Between Scientific and Industrial Advancement

The importance of the comparative analysis between the BP, which comprised the most academically relevant articles, and the PR, constructed from the most relevant patents in the industrial sector, lay in establishing the main relationships regarding the production and development of new technologies applied to the energy supply for a CubeSat's EPS. This analysis structured the evaluation of scientific and industrial advances derived from the bibliometric analysis and compared the connections between authors and inventors, keywords, and the annual production history of works.

Thus, the evaluation of the annual production of works based on the existing relationship between scientific articles and patents related to the proposed research topic was conducted, aiding in the evolutionary diagnosis of documents and their possible historical links. The result is illustrated by Figure 20, where, for a better behavior analysis, rectangular regions with performance criteria are defined. These are red rectangles indicating the intervals between years in which there were no publications for both documents and green rectangles emphasizing the years in which the total number of both documents was greater than one.

The analysis indicated an increase in the production of works related to the topic studied in this research starting from the year 2014, with at least a total of two publications per year. Additionally, periods without publications were observed in the years 2002 to 2005, 2006 to 2008, and 2010 to 2013. This pattern suggested growing interest in the topic investigated by articles linked to both RD and the industry over the past 10 years.

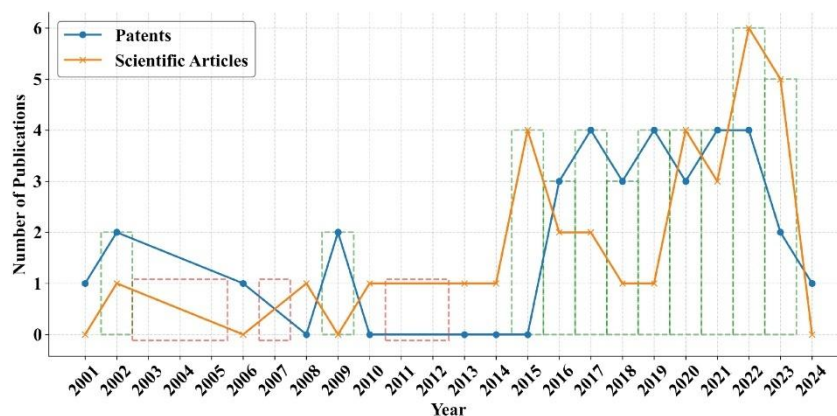


Figure 20. Number of scientific articles and patents over the years.

3.2. Interrelations of the Bibliographic Portfolio and Patent Repository

In order to explore the interrelationships among both the authors and KWs of the BP articles and the inventors of the PR patents, a robust analytical approach was adopted using the open-source software Vosviewer. This analysis focused on mapping the main connections between the authors and inventors, aiming to identify the key influencers in the scientific and industrial fields and contribute to a deeper understanding of RD trends. Additionally, it sought to highlight collaboration networks that may influence future academic work.

For the patents, detailed mappings of authors and co-authorships were obtained, illustrated in Figure 21. A total of 32 isolated and unrelated groups of inventors were identified, with a particular highlight on inventor Edward Simburger. He showed the highest density of interconnections among inventors, which supports the analysis conducted in the

previous section (Figure 14) and confirms his relevance in inventions within this industrial sector. Additionally, the publication years of the related patents were highlighted and linked to their inventors, revealing a trend of emerging new inventors such as Stephen David, Jacob Ballard, and others after 2016.

An additional analysis revealed the lack of connection between the 32 groups of inventors. This suggested that despite the progress in patent inventions related to the research, there was no direct correlation between the inventions of each subgroup. This indicates possible confidentiality and restrictions when it comes to sharing information among inventors from different institutions. As result, Table 12 presents patents related to the main connections of each inventor, subdivided into low, medium, and high density.

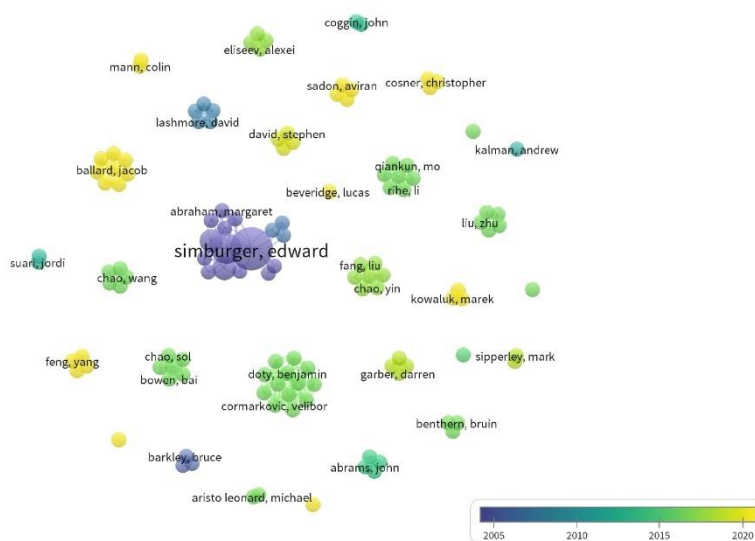


Figure 21. Mapping the existing connections between the inventors.

High-density patents indicate studies related to solar cells and energy storage systems, such as flexible thin-film solar cells and the integrated thin-film battery and circuit module. Medium-density patents present variations in innovations such as thin-film thermoelectric generators and the application of RTG. Low-density patents address both storage and energy supply systems for CubeSats, utilizing batteries, solar cells, and RTG modifications, as well as communication systems. Examples include power distribution modules applied to CubeSats and compact nuclear energy systems for space environments.

Table 12. Relationship between patents and the degree of connection density.

Density	Title
High density	Flexible thin-film solar cell. Integrated solar power module. Integrated thin-film battery and circuit module. Power distribution system. Spacecraft solar cell monitoring system.

Table 12. Cont.

Density	Title
Medium Density	Nano-engineered thin-film thermoelectric converter for photovoltaic applications. Radioisotope thermoelectric generator.
Low Density	Micro-nanosatellite power system based on supercapacitor. A power supply. Power supply and distribution module applied to CubeSat. Compact nuclear power system applied to space environment and working method. Solar battery and the integrated device of slot antenna. Satellite-constructor, training-demonstration model.

Regarding the scientific articles, similar to the previously adopted criteria, the density map is illustrated in Figure 22a, presenting a total of 31 isolated and unrelated groups of authors, with existing links between authors for specific articles. By evaluating the density of each group, it was possible to determine its intensity degree according to the number of citations per author presented in Figure 7b.

As a result, Figure 22b was obtained, demonstrating that, in this study, the citation relationship was not directly proportional to the connection density. For example, Champier D, who had 1185 citations, exhibited a low density, whereas Sratub et al. and Shittu et al., with 109 and 154 citations, respectively, exhibited a high density. Similarly, the same pattern of isolation observed with the patents was evident, highlighting the isolation of each scientific article concerning the academic development related to the research topic.

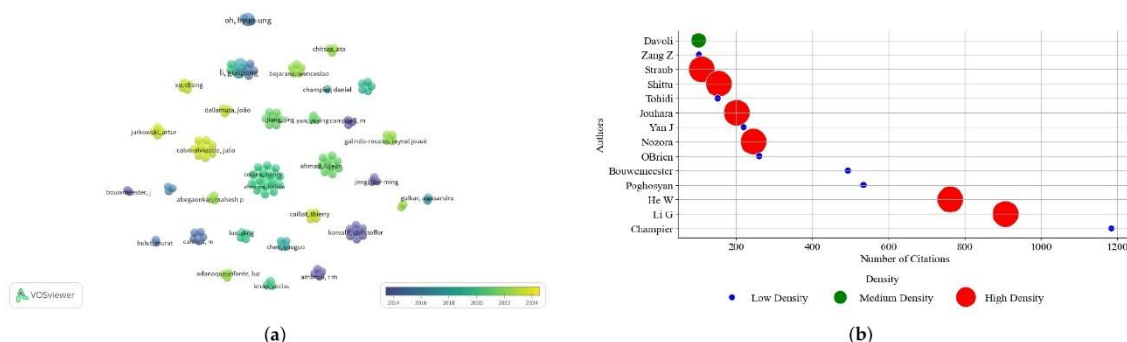


Figure 22. Representation of (a) density mapping and (b) the relationship between the number of citations per author and density.

At the end, Table 13 presents the density levels of scientific articles based on the existing connections between the authors, categorized into low, medium, and high densities. Based on the distribution of the titles of scientific articles within these density categories, articles classified as “High Density” focus on technologies related to CubeSats, suggesting a detailed technical discussion on the development and capabilities of these nanosatellites. Additionally, they highlight the optimization of geometry and applications of TEGs, reflecting a deep exploration of how to maximize the efficiency of these devices.

The article classified as “Medium Density” presents a slightly broader scope, covering an overview of CubeSats structures, architectures, and protocols. Articles addressed as “Low Density” discuss both the various applications of TEGs more generally and studies

dealing with the global analysis of nano- and picosatellite missions and the use of RTG in space missions.

Table 13. Relationship between scientific articles and the degree of connection density.

Density	Title
High density	<p>OpenOrbiter: A low-cost, educational prototype CubeSat mission architecture.</p> <p>Review of thermoelectric geometry and structure optimization for performance enhancement.</p> <p>Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications.</p> <p>Review of wearable thermoelectric energy harvesting: from body temperature to electronic systems.</p> <p>CubeSat evolution: analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions.</p> <p>Review of thermoelectric geometry and structure optimization for performance enhancement.</p>
Medium density	<p>Small satellites and CubeSats: survey of structures, architectures, and protocols.</p>
Low density	<p>A review of the state of the art in electronic cooling.</p> <p>Thermoelectric generators: a comprehensive review of characteristics and applications.</p> <p>Review of micro thermoelectric generator.</p> <p>Safe radioisotope thermoelectric generators and heat sources for space applications.</p> <p>Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology.</p> <p>CubeSat evolution: analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions.</p> <p>Thermoelectric generators: a review of applications.</p>

3.3. Keyword Analysis

This section aims to establish the relationships between the BP, identified through the ProKnow-C methodology, and the search conducted by the IP, resulting in the PR, through the existing relationships between the KWs of each article. The objective is to identify the most relevant terms associated with CubeSats, focusing on their subsystems and energy sources. Additionally, it seeks to diagnose the connection between the application of TEGs and thermal analysis in the structures of this category of nanosatellite.

As a consequence, Figure 23 illustrates that the term “CubeSat” is prominently associated with branches in thermal analysis, boundary conditions, communication and distribution technologies, and energy storage and consumption.

In conclusion, no direct relationships were identified with the application of TEGs as the main energy source, but rather as temperature regulators for these subsystems. Nevertheless, this analysis corroborated the combination of KWs initially used and presented both in Table 7 and in the graph shown in Figure 9, demonstrating that they were coherently aligned with the proposed research theme.

Another important highlight is the absence of the “Keywords” topic in patent documents, indicating the recommendation to synthesize the documents to identify the main words that describe them. This synthesis would enable a comparison with the most frequent words in the BP, to verify the relationship between the axes established by ProKnow-C and those identified in the IP search.

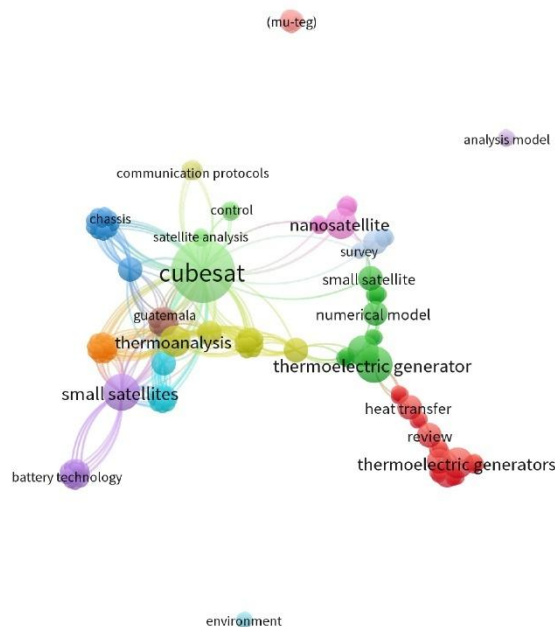


Figure 23. Mapping the existing connections between the inventors.

4. Final Considerations

This review aimed to recognize the application of TEGs as the main energy source in nanosatellites, particularly CubeSat models, identifying the impacted structures and systems under space conditions. The study highlighted the absence of TEG application, prompting the use of the ProKnow-C methodology for a state-of-the-art search. This search identified 33 relevant scientific articles and, after filtering, defined the necessary conditions to evaluate TEGs in CubeSats.

A similar patent search resulted in 34 patents, with only 5 meeting the criteria and 2 closely aligning with the research proposal. Initial assessments showed extensive use of simulation software like ANSYS and Matlab in 63.63% of the reviewed articles to evaluate CubeSat thermal behavior, considering construction specifications and enabling TEG application evaluation based on a CubeSat's face temperatures. However, there was a notable absence of studies directly addressing the use of TEGs as energy sources in nanosatellites, with existing research predominantly focused on terrestrial applications. Both internationally and in Brazil, the scientific literature and patent production on this topic remain limited, with the field being notably dominated by North American contributions.

The patent analysis revealed a predominance of U.S.-origin inventions, indicating a lack of incentives for this topic in Brazil and internationally. Only one patent addressed micro-TEGs, while others suggested structural modifications without direct applications in nanosatellites. The analysis of patents and scientific articles highlighted a peak in patent creation between 2016 and 2020, with a decline in scientific article production during the same period, but an increase since 2019, suggesting industry influence on academia.

Since 2020, the focus shifted to CubeSat structural and thermal optimization, crucial for potential TEG applications. Patents were mostly classified under "Execution of Transport

Operations”, focusing on space application energy and communication systems, structural development of electronic components, energy storage, and photovoltaic system testing. No patents were specifically for TEG application in CubeSats, highlighting an industrial innovation gap in nanosatellite energy supply systems.

The methodology used facilitated a detailed bibliometric analysis of scientific articles and patents, leading to key conclusions. TEGs were identified more as thermoelectric temperature regulators rather than energy sources for CubeSats, highlighting the importance of comprehensive state-of-the-art reviews. Among identified review articles, none directly addressed TEGs in CubeSats, indicating pioneering research. The 33 scientific articles did not show TEG applications as energy sources in CubeSats, instead focusing on temperature regulation. The analysis of the relationship between academic research and industrial sector patents revealed increased patent production since 2015, with a decline in the scientific literature until 2019, when it began to correlate more with patent development, indicating a connection between research and industrial progress.

The use of TEGs in CubeSats presents both opportunities and challenges. On the one hand, TEGs offer unique advantages, such as their ability to harvest waste heat from internal components and external space conditions, providing a supplementary power source that complements solar cells. Their compact and lightweight design aligns well with the constraints of nanosatellites, and their lack of moving parts ensures high reliability in the harsh space environment. In hybrid systems, TEGs could enhance the overall performance of the EPS, particularly during orbital eclipses or periods of reduced solar exposure.

On the other hand, significant limitations remain in the use of TEGs for CubeSats, particularly their low power output and reliance on thermal gradients, which are challenging to achieve on small satellite surfaces. A potential solution lies in modifying the geometry of TEGs to better adapt to the 10×10 cm dimensions of a 1U CubeSat’s faces. By optimizing their design to conform to specific face orientations—such as those exposed to higher thermal flux—TEGs could improve heat absorption and dissipation, enhancing power generation. This geometric optimization would enable better integration into the CubeSat structure without compromising payload space or mass constraints, making TEGs a more viable option for hybrid energy systems or even as standalone power sources in the future.

Future work should consider modifying procedures to include lost relevant articles, using new criteria like journal impact factors, and reading abstracts of excluded articles for valuable information. Additionally, numerical-computational simulations to describe TEG properties when optimally applied to CubeSats could reveal innovative methods for using thermoelectric devices in space missions, enhancing both temperature distribution analysis and power systems.

Author Contributions: Conceptualization, O.H.A.J.; methodology, G.B.S.; software, G.B.S.; validation, O.H.A.J. and G.B.S.; formal analysis, G.B.S.; investigation, G.B.S.; resources, O.H.A.J.; data curation, G.B.S.; writing—original draft preparation, G.B.S.; writing—review and editing, J.J.G.L. and O.H.A.J.; visualization, E.A.d.S.; supervision, O.H.A.J.; project administration, O.H.A.J. and J.J.G.L.; funding acquisition, O.H.A.J. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was partially supported by the FACEPE agency throughout the project with references APQ-0616-9.25/21 and APQ-0642-9.25/22. O.H.A.J. was funded by the CNPq, grant numbers 407531/2018-1, 303293/2020-9, 405385/2022-6, 405350/2022-8 and 40666/2022-3, as well as the Program in Energy Systems Engineering (PPGESE) Academic Unit of Cabo de Santo Agostinho (UACSA), Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE). G.B.S were funded by the Federal University of Latin American Integration (UNILA).

Data Availability Statement: Data collection related to the articles studied was entirely carried out through the CAPES Cafe governmental portal, a platform widely recognized for the integration of scientific journals and academic databases, guaranteeing access to highly relevant publications. Regarding patents, data was obtained via Google Patents, which offers an accessible and comprehensive interface for searching technological and innovative records. Additional information about patents was explored in Patentscope, a tool made available by the World Intellectual Property Organization (WIPO), which allows free access to patent documents from various international offices, ensuring a broad and detailed analysis of registrations.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

NASA	National Aeronautics and Space Administration
ESA	European Space Agency
LEO	Low Earth orbit
COTS	Commercial Off-The-Shelf
TEGs	Thermoelectric generators
RTG	Radioisotope thermoelectric generator
FEM	Finite Element Method
TECs	Thermoelectric Coolers
KWs	Keywords
BP	Bibliographic Portfolio
PR	Patent Repository
EPS	Electrical Power System
IP	Intellectual Property
RD	Research and Development
PDB	Preliminary Database
WoS	Web of Science
JCR	Journal Citation Report
SJR	SCImago Journal Rank
SD	Science Direct
DBs	Databases
PRAD	Preliminary Raw Articles' Database
RAD	Raw Articles' Database
AD	Author Database
PCBs	Printed circuit boards
RPD	Raw Patent Database
PD	Patent Database
CPC	Cooperative Patent Classification
USPTO	United States Patent and Trademark Office
EPO	European Patent Office
MTG	Magneto-thermoelectric generator
NETT	Nano-engineered thin-film thermoelectric
MJJPV	Multiple Junction Photovoltaic
IoT	Internet of Things
CNPq	Brazilian National Council for Scientific and Technological Development
FACEPE	Fundação de Amparo a Pesquisa de Pernambuco
PPGIES	Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade

References

- Evans, B.G.; Thompson, P.T.; Corazza, G.E.; Vanelli-Coralli, A.; Candreva, E.A. 1945–2010: 65 years of satellite history from early visions to latest missions. *Proc. IEEE* **2011**, *99*, 1840–1857. [[CrossRef](#)]
- NASA. *TIROS M Spacecraft (ITOS 1) Final Engineering Report*; NASA: Washington, DC, USA, 1970.
- Poghosyan, A.; Golkar, A. CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions. *Prog. Aerosp. Sci.* **2017**, *88*, 59–83. [[CrossRef](#)]
- NASA. *Powering Cassini*; NASA: Washington, DC, USA, 2024.
- ESA. *Mission Navigator*; ESA: Paris, France, 2023.
- Nobrega, L. *Capítulo 10: Histórico da Exploração Espacial*; UFRGS: Farroupilha, Brazil, 2021.
- Davoli, F.; Kourogorgas, C.; Marchese, M.; Panagopoulos, A.; Patrone, F. Small satellites and CubeSats: Survey of structures, architectures, and protocols. *Int. J. Satell. Commun. Netw.* **2019**, *37*, 343–359. [[CrossRef](#)]
- Waydo, S.; Henry, D.; Campbell, M. CubeSat design for LEO-based Earth science missions. In Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 9–16 March 2002; pp. 435–445.
- Heidt, H.; Puig-Suari, J.; Moore, A.S.; Nakasuka, S.; Twiggs, R.J. CubeSat: A new Generation of Picosatellite for Education and Industry Low-Cost Space Experimentation. In Proceedings of the 2000 Small Satellite Conference, Logan, UT, USA, 21–24 August 2000.
- Selva, D.; Krejci, D. A survey and assessment of the capabilities of Cubesats for Earth observation. *Acta Astronaut.* **2012**, *74*, 50–68. [[CrossRef](#)]
- Alén Space. *A Basic Guide to Nanosatellites*; Alén Space: Nigrán, Spain, 2022.
- De, R.; Abegaonkar, M.P.; Basu, A. Enabling Science with CubeSats—Trends and Prospects. *IEEE J. Miniaturization Air Space Syst.* **2022**, *3*, 221–231. [[CrossRef](#)]
- NASA. *State-of-the-Art: Small Spacecraft Technology*; NASA: Washington, DC, USA, 2023.
- Rowe, D.M. Applications of Nuclear-Powered Thermoelectric Generators in Space. *Appl. Energy* **1991**, *40*, 241–271. [[CrossRef](#)]
- Tohidi, F.; Holagh, S.G.; Chitsaz, A. Thermoelectric Generators: A comprehensive review of characteristics and applications. *Appl. Therm. Eng.* **2022**, *201*, 117793. [[CrossRef](#)]
- Doraghi, Q.; Jouhara, H. Thermoelectric generator efficiency: An experimental and computational approach to analysing thermoelectric generator performance. *Therm. Sci. Eng. Prog.* **2024**, *55*, 102884. [[CrossRef](#)]
- Ostrufka, A.L.A.; Filho, E.M.; Borba, A.C.; Spengler, A.W.; Possamai, T.S.; Paiva, K.V. Experimental evaluation of thermoelectric generators for nanosatellites application. *Acta Astronaut.* **2019**, *162*, 32–40. [[CrossRef](#)]
- Maria, G. Development and Analysis of the Thermal Design for the OSIRIS-3U. Master's Thesis, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA, 2012.
- von Lukowicz, M.; Schmiel, T.; Rosenfeld, M.; Heisig, J.; Tajmar, M. Characterisation of TEGs Under Extreme Environments and Integration Efforts Onto Satellites. *J. Electron. Mater.* **2015**, *44*, 362–370. [[CrossRef](#)]
- Khater, A.; Jarrar, F. Temperature Distribution of CubeSats Using Finite Element Method. In Proceedings of the 73rd International Astronautical Congress, IAC 2022, Paris, France, 18–22 September 2022.
- Dinh, D. Thermal Modeling of Nanosat. Master's Thesis, San Jose State University, San Jose, CA, USA, 2012. [[CrossRef](#)]
- Tribak, F.; Bendaou, O.; Nejma, F.B. Impact of orbit inclination on heat transfer in a 1U LEO CubeSat. *MATEC Web Conf.* **2022**, *371*, 02001. [[CrossRef](#)]
- Luo, D.; Liu, Z.; Yan, Y.; Li, Y.; Wang, R.; Zhang, L.; Yang, X. Recent advances in modeling and simulation of thermoelectric power generation. *Energy Convers. Manag.* **2022**, *273*, 116389. [[CrossRef](#)]
- Luo, D.; Yu, Y.; Yan, Y.; Chen, W.H.; Cao, B. Increasing power densities in a thermoelectric generator by stacking and incorporating dual heat pipes. *Device* **2024**, *2*, 100435. [[CrossRef](#)]
- Dorsa, A. O papel da revisão da literatura na escrita de artigos científicos. *Interações* **2020**, *21*, 681–683. [[CrossRef](#)]
- Lacerda, R.; Ensslin, L.; Ensslin, S.R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. *Gestão Produção* **2012**, *19*, 59–78. [[CrossRef](#)]
- Ensslin, L.; Ensslin, S.R.; Lacerda, R.T.O.; Tasca, J.E. ProKnow-C, Knowledge Development Process-Constructivist. *Processo Para Mapeamento Conhecimento Tema* **2010**, *10*, 2015.
- de Souza, T.S.; de Carvalho, F.L.S.; Gomes, T.C.; Junior, M.W.J.S. Aplicação do ProKnow-C para Seleção e Análise de um Portfólio Bibliográfico Sobre Aplicação dos Recursos da Tecnologia 4.0. *Gestão Desenvol. Rev.* **2021**, *8*, 68–89. [[CrossRef](#)]
- Elsevier. *Mendeley*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2024.
- Clarivate. *Web of Science: Option to Save to BibTeX Format Not Available in Every Database*; Clarivate: Philadelphia, PA, USA, 2024.
- Junior, O.H.A.; Ledesma, J.J.G.; Maciel, J.N. Forecasting Solar Power Output Generation—A Systematic Review with Proknow-C. *IEEE Lat. Am. Trans.* **2021**, *29*, 612–624.
- Dunford, R.; Su, Q.; Tamang, E. The Pareto Principle. *Plymouth Stud. Sci.* **2014**, *7*, 140–148.
- Champier, D. Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Convers. Manag.* **2017**, *140*, 167–181. [[CrossRef](#)]

34. He, W.; Zhang, G.; Zhang, X.; Ji, J.; Li, G.; Zhao, X. Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. *Appl. Energy* **2015**, *143*, 1–25. [[CrossRef](#)]
35. Bouwmeester, J.; Guo, J. Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology. *Acta Astronaut.* **2010**, *67*, 854–862. [[CrossRef](#)]
36. O'Brien, R.C.; Ambrosi, R.M.; Bannister, N.P.; Howe, S.D.; Atkinson, H.V. Safe radioisotope thermoelectric generators and heat sources for space applications. *J. Nucl. Mater.* **2008**, *377*, 506–521. [[CrossRef](#)]
37. Nozariasbmarz, A.; Collins, H.; Dsouza, K.; Polash, M.H.; Hosseini, M.; Hyland, M.; Liu, J.; Malhotra, A.; Ortiz, F.M.; Mohaddes, F.; et al. Review of wearable thermoelectric energy harvesting: From body temperature to electronic systems. *Appl. Energy* **2020**, *258*, 114069. [[CrossRef](#)]
38. Yan, J.; Liao, X.; Yan, D.; Chen, Y. Review of Micro Thermoelectric Generator. *J. Microelectromechanical Syst.* **2018**, *27*, 1–18. [[CrossRef](#)]
39. Jouhara, H.; Żabnieńska Góra, A.; Khordehghah, N.; Doraghi, Q.; Ahmad, L.; Norman, L.; Axcell, B.; Wrobel, L.; Dai, S. Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications. *Int. J. Thermofluids* **2021**, *9*, 100063. [[CrossRef](#)]
40. Shittu, S.; Li, G.; Zhao, X.; Ma, X. Review of thermoelectric geometry and structure optimization for performance enhancement. *Appl. Energy* **2020**, *268*, 115075. [[CrossRef](#)]
41. Straub, J.; Korvald, C.; Nervold, A.; Mohammad, A.; Root, N.; Long, N.; Torgerson, D. OpenOrbiter: A low-cost, educational prototype CubeSat mission architecture. *Machines* **2013**, *1*, 1–32. [[CrossRef](#)]
42. Zhang, Z.; Wang, X.; Yan, Y. A review of the state-of-the-art in electronic cooling. *e-Prime Adv. Electr. Eng. Electron. Energy* **2021**, *1*, 100009. [[CrossRef](#)]
43. Corpino, S.; Caldera, M.; Nichele, F.; Masoero, M.; Viola, N. Thermal design and analysis of a nanosatellite in low earth orbit. *Acta Astronaut.* **2015**, *115*, 247–261. [[CrossRef](#)]
44. Luo, D.; Wang, R.; Yu, W.; Zhou, W. Parametric study of a thermoelectric module used for both power generation and cooling. *Renew. Energy* **2020**, *154*, 542–552. [[CrossRef](#)]
45. Escobar, E.; Diaz, M.; Zagal, J.C. Evolutionary design of a satellite thermal control system: Real experiments for a CubeSat mission. *Appl. Therm. Eng.* **2016**, *105*, 490–500. [[CrossRef](#)]
46. Tzeng, S.C.; Jeng, T.M.; Lin, Y.L. Parametric study of heat-transfer design on the thermoelectric generator system. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2014**, *52*, 97–105. [[CrossRef](#)]
47. Knap, V.; Vestergaard, L.K.; Stroe, D.I. A review of battery technology in cubesats and small satellite solutions. *Energies* **2020**, *13*, 4097. [[CrossRef](#)]
48. Kang, S.J.; Oh, H.U. On-Orbit Thermal Design and Validation of 1 U Standardized CubeSat of STEP Cube Lab. *Int. J. Aerosp. Eng.* **2016**, *2016*, 4213189. [[CrossRef](#)]
49. Bulut, M.; Sozbir, N. Analytical investigation of a nanosatellite panel surface temperatures for different altitudes and panel combinations. *Appl. Therm. Eng.* **2015**, *75*, 1076–1083. [[CrossRef](#)]
50. Oh, H.U.; Park, T. Experimental Feasibility Study of Concentrating Photovoltaic Power System for CubeSat Applications. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* **2015**, *51*, 1942–1949. [[CrossRef](#)]
51. Candolfi, C.; Oualid, S.E.; Lenoir, B.; Caillat, T. Progress and perspectives in thermoelectric generators for waste-heat recovery and space applications. *J. Appl. Phys.* **2023**, *134*, 100901. [[CrossRef](#)]
52. Chacon, S.; Gutierrez, J.; Adanaque-Infante, L. Modelling cubesat Structure for Thermal Analysis. In Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing, INTERCON 2022, Lima, Peru, 11–13 August 2022. [[CrossRef](#)]
53. Morales, F.O.; Bejarano, W.; Rosales, D.; Aguilera, F.Z.; Mejuto, J. Chassis Optimization of a 1U CubeSat made in a developing Country. In Proceedings of the 73rd International Astronautical Congress, IAC 2022, Paris, France, 18–22 September 2022.
54. Jurkowski, A.; Paluch, R.; Wójcik, M.; Klimanek, A. Thermal modelling of a small satellite data processing unit aided by sensitivity analysis and uncertainty quantification. *Int. J. Therm. Sci.* **2023**, *193*, 108514. [[CrossRef](#)]
55. Yu, P.; Zhang, C.; Zhang, Z.; Yang, Y.; Niu, Y.; Jiang, J.; Wang, C. Numerical Simulation of Thermoelectric Based Temperature Control system for CubeSat in Space. In Proceedings of the IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST), ELECTR NETWORK, Kaohsiung, Taiwan, 24–26 August 2021. [[CrossRef](#)]
56. Gomez-Jenkins, M.; Calvo-Alvarado, J.; Chaves-Jimenez, A.; Carvajal-Godinez, J.; Martinez, E.; Yeine, A.J.A.; Calvo-Obando, A.J.; Jimenez, V.; Rojas, J.J.; Valverde-Salazar, A.; et al. Project Irazú: Space and Ground Systems Engineering of a 1U CubeSat Store and Forward Mission for Environmental Monitoring. *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.* **2023**, *66*, 217–225. [[CrossRef](#)]
57. Dallamuta, J.; Perondi, L.F.; de Oliveira, M.E.R. Space missions in South America: Profile and evolutionary perspective of their development. *Acta Astronaut.* **2023**, *206*, 9–17. [[CrossRef](#)]
58. Zhou, Y.; Zhang, X.; Xu, C.; Yang, X. Thermal design and analysis of JZJ-5 CubeSat. In Proceedings of the 13th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ACMAE), Chengdu, China, 22–24 December 2022; Volume 2472. [[CrossRef](#)]

59. Hipp-Méndez, J.R.; Sánchez-Varela, V.; Galindo-Rosales, R.J.; Zorto-Aguilera, F.J. Morazán MRZ-SAT CubeSat: Thermal Modelling and Analysis Guide for Academic CubeSat Missions. In Proceedings of the 73rd International Astronautical Congress, IAC 2022, Paris, France, 18–22 September 2022.
60. Kartus, R.; Kukrus, A. Innovation, product development and patents at universities. *Est. J. Eng.* **2013**, *19*, 477–482. [CrossRef]
61. Wipo. PATENTSCOPE. Available online: <https://www.wipo.int/patentscope/en/> (accessed on 11 April 2024).
62. Gray, D.; Coggin, J. Magneto-Thermoelectric Generator for Energy Harvesting. U.S. Patent 9,793,829, 17 October 2017.
63. Venkatasubramanian, R.; Himmtann, M.; Gajendiran, P.; Pierce, J.; Fairbanks, N.; Ung, R.; Ballard, J.; Maranchi, J. Nano-Engineered Thin-Film Thermoelectric Converter for Photovoltaic Applications. U.S. Patent Application 17/686,788, 8 September 2022.
64. Lashmore, D.; White, M.; White, B.; Degtiarov, D.; Mann, J. Nanostructured Material-Based Thermoelectric Generators. U.S. Patent Application 12/191,765, 19 February 2009.
65. Ewell, R.; Fleuriel, J.P.; Patel, J.; Nesmith, B.; Li, B.; Smith, K.; Doty, B.; Molina, G.; Cormarkovic, V.; Keyawa, N.; et al. Radioisotope Thermoelectric Generator. WIPO Patent WO 2016/138389 A1, 1 September 2016.
66. Sysouphat, A.J.; Kennedy, S.D. A Power Supply. WIPO Patent WO 2019/210358 A1, 7 November 2019.
67. Wang, M.; Ma, W.; Zhang, Z.; Wang, Y.; Zhu, Q.; Liu, X. Compact Nuclear Power System Applied to Space Environment and Working Method. Chinese Patent CN 110043338 B, 28 November 2023.
68. Leonard, M.A.; Patel, S.S. CubeSat System. U.S. Patent 11,021,274 B1, 1 June 2021.
69. Abrams, J.; Duchek, M.; Paz, A.; Harbach, R. Extendable Solar Array for a Spacecraft System. U.S. Patent 9,856,039, 2 January 2018.
70. Simburger, E.; Meshishnek, M.; Gilmore, D.; Smith, D.; Abraham, M.; Jeffrey, F.; Gierow, P. Flexible Thin Film Solar Cell. U.S. Patent 6,410,362 B1, 25 June 2002.
71. Simburger, E.; Matsumoto, J.; Giants, T.; Garcia, A.; Jeffrey, F.; Gierow, P. Integrated Solar Power Module. U.S. Patent 6,300,158 B1, 9 October 2001.
72. Simburger, E.; Matsumoto, J.; Gierow, P.; Hepp, A. Integrated Thin Film Battery and Circuit Module. U.S. Patent 7,045,246, 16 May 2006.
73. Wenwen, C.; Ning, S.; Hao, W.; Jianping, C.; Na, C.; Chao, Y.; Fang, L. Micro-Nano Satellite Power System Based on Super Capacitor. Chinese Patent CN106602694A, 26 April 2017.
74. Cosner, C.; Stickelmaier, J.; Wootan, J. Modular Electrical Power Subsystem Architecture. U.S. Patent 11,750,021, 5 September 2022.
75. Mann, C.; Walker, D. Modular Solar Cell and Solar Cell Array. U.S. Patent 2023/0299610 A1, 21 September 2023.
76. Payrebrune, M. Power Supply Module for Spacecraft. WIPO Patent WO 2017/177301 A1, 19 October 2017.
77. Ning, A.; Teel, G.; Riskas, B.; Garber, D. Satellite Modular Power Supply. U.S. Patent 10,536,107 B1, 14 January 2020.
78. Xiaoxia, X.; Feng, Y.; Weijia, R.; Jian, D. Satellite Storage Battery System. Chinese Patent CN113422423B, 30 November 2021.
79. Slater, D. Solar Array Remote Acoustic Sensing (SARAS). U.S. Patent US-10078328-B1, 18 September 2018.
80. Bowen, L.; Xiaoping, L.; Yanchao, Z.; Yanming, L.; Chao, S.; Lei, S. Solar Battery and the Integrated Device of Slot Antenna. Chinese Patent CN 106711576 B, 25 October 2019.
81. Woods, J. Solar Energy Conversion and Transmission System and Method. U.S. Patent 9,815,573, 14 November 2017.
82. Crujssens, J.; Datema, P.; Benthern, B. Solar Panel and Flexible Radiator for a Spacecraft. U.S. Patent 10,737,808, 11 August 2020.
83. Kalman, A. Solar Panel Array. U.S. Patent 9,882,330 B2, 30 January 2018.
84. Derkacs, D. Space Vehicles Including Multijunction Metamorphic Solar Cells. U.S. Patent Application 17/180,210, 1 July 2021.
85. Beveridge, L. Space-Based Radioisotope Production and Methods of Use. U.S. Patent Application 17/736,083, 17 November 2022.
86. Simburger, E.; Rumsey, D.; Liu, S.; Halpine, J. Spacecraft Solar Cell Monitoring System. U.S. Patent 2009/0119060 A1, 7 May 2009.
87. Sipperley, M.; Smith, C. Thermoelectric Rocket Propellant Tank Pressurization System. U.S. Patent 10,495,028, 3 December 2019.
88. Suari, J.; Williams, A. CubeSat System, Method and Apparatus. U.S. Patent US20140039729A1, 6 October 2015.
89. Simburger, E.; Prater, A.; Carian, P. Power Distribution System. U.S. Patent 6,396,167 B1, 28 May 2002.
90. Haining, M.; Qiankun, M.; Wenhe, L.; Yongjun, Y.; Xiang, Z.; Rihe, L.; Yuchen, H. Power Supply and Distribution Module Applied to CubeSat. Chinese Patent CN 106059266 A, 26 October 2016.
91. Eliseev, A.; Zharenov, I.; Zharkikh, R.; Purikov, A. Satellite-Constructor, Training-Demonstration Model. Russian Patent RU 2 693 722 C2, 4 July 2019.
92. Poirot, P.; Smith, C.; Kowaluk, M. Satellite Thermal Control. WIPO Patent WO 2024/003013 A1, 4 January 2024.
93. Weiss, G.; Sadon, A.; Elyasaf, A.; Sinai, M. Scenario Based Method for Testing Software. U.S. Patent US11138100, 5 October 2021.
94. Ehrlich, J. Spherical Mobility System. U.S. Patent 11,420,777 B1, 23 August 2022.
95. Patents, B. What's the Difference Between a Pending and a Granted Patent? Available online: <https://boldip.com/whats-the-difference-between-a-pending-and-a-granted-patent/> (accessed on 23 April 2024).
96. Lens, T. Explore o conhecimento global em ciência e tecnologia. Available online: <https://www.lens.org/?locale=pt> (accessed on 25 April 2024).

-
97. Chao, W.; Chenggu, Z.; Lin, L.; Chunhong, L.; Zezhan, Z. A Kind of Device to be Generated Electricity Using Satellite External Surface Temperature Gradient. Chinese Patent CN 106208814 B, 5 April 2019.
 98. USPTO. *Cooperative Patent Classification*; USPTO: Alexandria, VA, USA, 2024.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.



Article

Comparative Analysis and Integrated Methodology for the Electrical Design and Performance Evaluation of Thermoelectric Generators (TEGs) in Energy Harvesting Applications

Oswaldo Hideo Ando Junior ^{1,2,3,4,*} , Eder Andrade da Silva ^{1,2}, Emerson Rodrigues de Lira ⁴, Sergio Vladimir Barreiro Degiorgi ⁴ and João Paulo Pereira do Carmo ^{5,*}

¹ Research Group on Energy & Energy Sustainability (GPEnSE), Academic Unit of Cabo de Santo Agostinho (UACSA), Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE), Recife 52171-900, Brazil; ea.silva.2020@aluno.unila.edu.br

² Interdisciplinary Postgraduate Program in Energy & Sustainability (PPGIES), Federal University of Latin American Integration—UNILA, Foz do Iguaçu 85870-650, Brazil

³ Postgraduate Program in Energy Systems Engineering (PPGESE), Academic Unit of Cabo de Santo Agostinho (UACSA), Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE), Recife 52171-900, Brazil

⁴ Postgraduate Program in Physics Engineering (PPGENGFIS), Academic Unit of Cabo de Santo Agostinho (UACSA), Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE), Recife 52171-900, Brazil; emerson.rlira@ufrpe.br (E.R.d.L.); sergio.barreiro@ufrpe.br (S.V.B.D.)

⁵ Group of Metamaterials Microwaves and Optics (GMeta), Department of Electrical Engineering (SEL), University of São Paulo (USP), Butantã 05508-220, Brazil

* Correspondence: oswaldo.ando@ufrpe.br (O.H.A.J.); jcarmo@sc.usp.br (J.P.P.d.C.)



Citation: Ando Junior, O.H.; Silva, E.A.d.; Lira, E.R.d.; Degiorgi, S.V.B.; Carmo, J.P.P.d. Comparative Analysis and Integrated Methodology for the Electrical Design and Performance Evaluation of Thermoelectric Generators (TEGs) in Energy Harvesting Applications. *Energies* **2024**, *17*, 5176. <https://doi.org/10.3390/en17205176>

Academic Editors: Senentxu Lanceros-Mendez and Mahmoud Bourouis

Received: 5 September 2024
Revised: 28 September 2024
Accepted: 14 October 2024
Published: 17 October 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: This study presents a comparative analysis of the accuracy of different methodologies for the design and performance evaluation of thermoelectric generators (TEGs), using analytical, computational numerical, and experimental approaches. TEGs are promising devices for capturing waste energy in industrial processes, converting waste heat into electrical energy and contributing to energy sustainability. However, the efficiency of TEGs is a significant challenge due to their low conversion rates. To address this challenge, three different methodologies were developed and systematically compared. Analytical Model: Developed for the electrical design of thermoelectric micro generators, using theoretical performance data and industrial temperature gradients. This method offers a robust theoretical view but may not capture all practical variables. Computational model in Simulink/MATLAB: Created and validated to consider the variation of the Seebeck coefficient and the internal resistance of thermoelectric modules with temperature. This model provides an accurate simulation of operating conditions but depends on the accuracy of the input parameters. Experimental Multi-string Electrical Arrangement Prototype: This involved the design and construction of a prototype followed by experimental tests to validate its performance. This method provides valuable empirical data but can be limited by the complexity and cost of the experiments. The results show that each methodology has specific advantages and limitations, offering valuable insights for the development of more efficient TEG systems. The comparison of analytical, numerical, and experimental methods revealed differences in accuracy and efficiency, highlighting the importance of an integrated approach to TEG design. This study lays a solid foundation for future research and practical applications in the field of industrial residual energy harvesting.

Keywords: seebeck coefficient; multi-string electrical arrangement; maximum power point tracking; simulink model; industrial processes; waste recovery energy

1. Introduction

The growing demand for energy and the need for efficient energy harvesting methods have fueled research and development into new technologies. Thermoelectric generators (TEGs) are promising devices that directly convert thermal energy into electrical energy

using the Seebeck effect. This effect, discovered by Thomas Johann Seebeck in 1821, occurs when two different materials are joined and exposed to a temperature gradient, generating a difference in electrical potential between the junction points [1–6].

Thermoelectric modules are made up of thermoelectric elements (TEs) that can be connected in series or parallel to increase the output voltage and thermal conductivity respectively. The application of TEGs in industrial processes to capture waste energy is particularly attractive, as it allows waste heat to be utilized, contributing to energy efficiency and environmental sustainability. Energy capture techniques are important because they allow the reuse of energy that would otherwise be wasted, reducing dependence on non-renewable energy sources and reducing greenhouse gas emissions, incorporating clean technologies to promote a sustainable future [6–15].

However, the efficiency of TEGs is a significant challenge due to their low conversion rates. To maximize the energy obtained, precise design and the implementation of power management techniques, such as DC–DC converters with maximum power point tracking (MPPT) algorithms [16–21], are essential.

This article presents a comparative analysis of the accuracy of different methodologies for the design of thermoelectric generators (TEGs), including analytical, numerical, computational, and experimental approaches. These methodologies make it possible to optimize the development of proofs of concept, providing a comprehensive and innovative solution for the design and implementation of TEG systems based on energy harvesting. It is worth noting that the methodologies adopted in this research are the result of research and development (R&D) by the Energy and Sustainability Research Group (GPEnSE) focused on the development of solid-state generators, self-powered devices, and autonomous sensors based on energy harvesting [22–29]. The main contributions of this article are:

Development of Analytical Modeling: Proposal and development of a detailed analytical approach for the electrical design of thermoelectric microgenerators, using theoretical performance data and temperature gradients.

Development of Computational Numerical Modeling: Creation and validation of a computer model in Simulink/MATLAB that considers the variation of the Seebeck coefficient and the internal resistance of thermoelectric modules with temperature.

Development of an Experimental Analysis: Carrying out experimental tests to validate the performance of the prototype and comparing the results with the analytical and numerical computer models.

Section 2 details the conceptual design of a Thermoelectric Generator (TEG) system featuring a multi-string electrical arrangement for energy harvesting. Section 3 outlines the analytical methodology for electrical design, including steps for electrical dimensioning, selection of thermoelectric modules, and configuration of the arrangement. This section concludes with the presentation of a Proof of Concept (PoC) TEG system designed using the proposed analytical methodology. Section 4 describes the development of a computational numerical model in Simulink/MATLAB (Version R 2023a), which accounts for variations in the Seebeck coefficient and internal resistance with temperature and validates the model using experimental data. Section 5 focuses on the development and experimental analysis of the multi-string electrical arrangement based on TEGs for energy harvesting. Section 6 presents the results, comparing the accuracy and efficiency of TEG systems obtained from each methodology. Finally, Section 7 summarizes the main findings of the study and provides recommendations for future research and practical applications.

2. Conceptual Design of a TEG System

This section describes the electrical design analytical methodology of a TEG system concept with a multi-string electrical arrangement for the TEG system. Figure 1 presents the block diagram outlining the main stages for assembling and applying a generic TEG system for energy harvesting. In this system, the heat source includes thermal losses that can be captured through surface contact, fin systems, and heat pipes. The thermal system

should be customized according to the specific characteristics of the installation site to maximize resource utilization and enhance the waste recovery process.

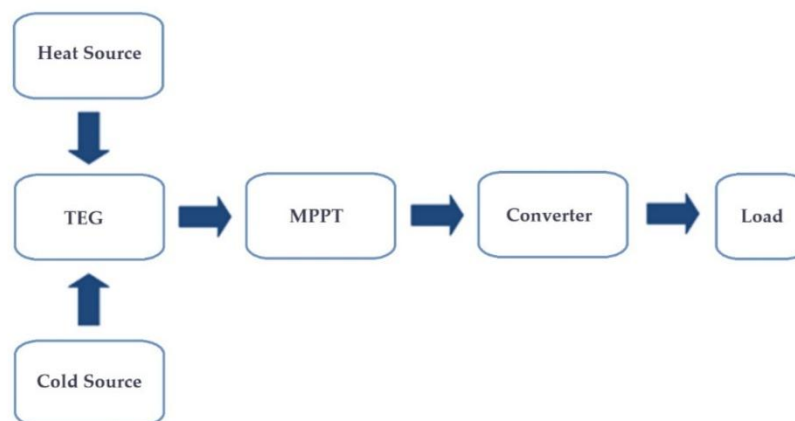


Figure 1. Block diagram demonstration of the TEG system.

2.1. TEG Operated in Multi-String Electrical Arrangement

When operating the TEG system in a multi-string electrical arrangement, efficiency is not solely dependent on the thermoelectric modules, as their output power is influenced by the temperature gradient. Therefore, the temperatures to which the modules are subjected directly affect the overall system efficiency. Tests confirm that the thermoelectric modules function as a voltage source. When connected in series, the total output voltage equals the sum of the voltages of each individual module. Conversely, when connected in parallel, the current circulating among the modules, when powering a specific load, is equally divided according to the number of modules. To increase the system's output voltage, multiple modules can be connected in series, while to supply a higher current, multiple modules can be connected in parallel. Due to variations in the temperatures of thermal processes, the output voltage of the modules also varies. For this reason, a DC–DC converter is necessary to maintain a constant voltage to supply a load. This converter can either step up or step down the output voltage and has its own efficiency, which influences overall system performance. Additionally, load impedance affects power transfer efficiency; maximum energy transfer is achieved when impedance matching occurs, meaning the internal electrical resistance of the system equals the electrical resistance of the load.

2.2. Maximum Power Point Tracking (MPPT)

The Maximum Power Point Tracking (MPPT) function optimizes the utilization of available energy by adjusting the impedance seen at the input of a DC–DC converter to operate at the point of maximum power. MPPT varies the conduction time of the transistor based on voltage and current data from the source, which is crucial for non-ideal voltage sources, such as solar panels subject to light variations or TEGs with variable temperature gradients.

One of the most commonly used algorithms for this function is Perturb and Observe (P&O). This algorithm works by perturbing the system's current or voltage in small increments and monitoring the corresponding changes in power. If the power increases with perturbation, the system was operating below the maximum power point and the perturbation continues in the same direction. If the power decreases, it indicates that the system has passed the maximum power point, and the direction of the perturbation is reversed.

This process is repeated continuously, allowing MPPT to “track” the maximum power point and adjust the system’s operation to maximize energy generation. Figure 2 shows a graph with the operating points and a diagram illustrating how the P&O algorithm makes decisions to find the maximum power point. The basic principle of the P&O algorithm involves periodically perturbing the system’s current or voltage in small increments while monitoring the corresponding changes in power. If the power increases with the perturbation, it means the system was operating below the maximum power point and the perturbation continues in the same direction. If the power decreases with the perturbation, it indicates that the system has passed the maximum power point and the perturbation is reversed.

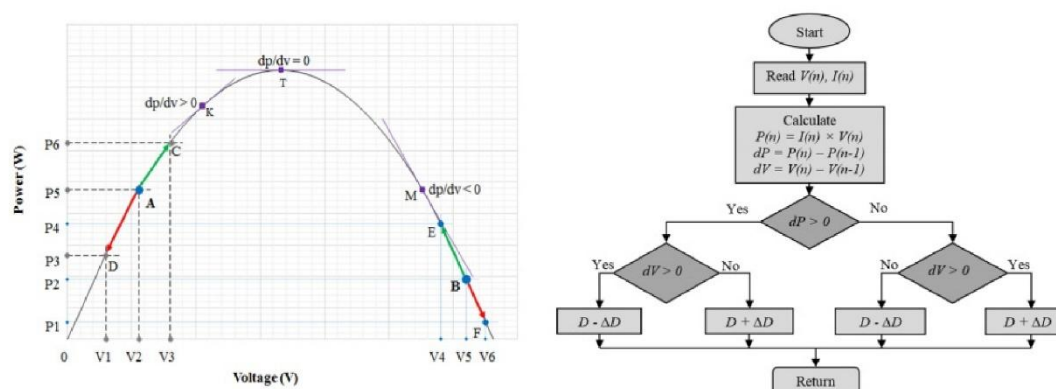


Figure 2. Graph and diagram on MPPT operation [20,21].

The P&O algorithm is effective and widely used due to its simplicity of implementation; however, it may exhibit oscillations around the maximum power point and, under extreme conditions, may not converge quickly or lose track of the optimal point. Currently, for extreme conditions with high variability in the generated power due to external factors, various MPPT algorithms are being studied and developed, which can be used depending on the desired operation [30–33].

2.3. DC–DC Converters

The design of the DC–DC converter involves determining several parameters based on the specific characteristics of the system, including the load supply voltage, the maximum power that the load connected to the converter can handle, the minimum input voltage, and the maximum input voltage of the converter. To ensure correct sizing, it is necessary to establish key values such as the switching frequency of the transistor, the inductor current ripple (expressed as a percentage), and the output voltage ripple (also expressed as a percentage).

The choice of the most suitable DC–DC converter for the proposed cogeneration system should take into account the output voltage of the thermoelectric modules feeding the converter’s input and the required output voltage of the converter powering the load. Specifically, if the input voltage is lower than the desired output voltage, a boost converter is recommended as it elevates the output voltage. Conversely, if the input voltage exceeds the output voltage, a buck converter is more suitable, as it reduces the output voltage to the required level.

Although the described selection model is valid, it is not conclusive. For a more detailed analysis, the relationship between the converter’s output power (P_o) and the power consumed by the switching elements (P_t) should be examined, disregarding current ripple (assuming the converter operates in continuous conduction mode) and voltage ripple. It is also assumed that the input voltage may vary and that the duty cycle should be

controlled to maintain a constant output voltage. Figure 3 shows the relationship between these powers, representing the utilization efficiency of the switching elements as a function of the duty cycle. For voltages of the same magnitude, the buck converter is the most efficient in utilizing the switching elements, as the duty cycle (D) will be close to 1. The buck–boost converter, on the other hand, has a lower utilization index, with a maximum value of 25% if the duty cycle is 0.5. The major advantage of the buck–boost converter is its ability to operate with input voltages both lower and higher than the output voltage, adjusting according to the system’s needs, especially considering that thermoelectric modules vary with the temperature difference (4). For the physical sizing of any chosen converter model, it is recommended to use classical methodologies [34–36].

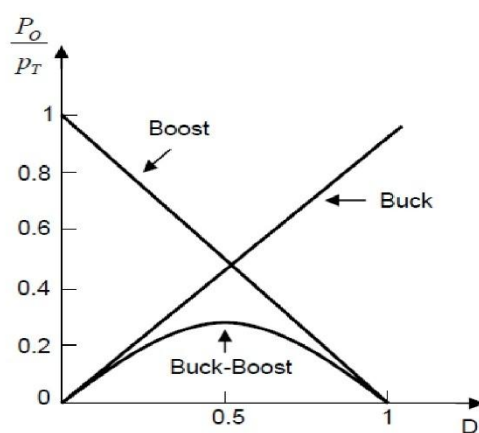


Figure 3. Energy utilization in DC–DC converters (4).

3. Analytical Methodology and Design of the PoC

This subsection describes the analytical modeling and detailed design methodology steps for the electrical dimensioning of the TEG system including the (i) calculating of power output, voltage, and current requirements based on the theoretical performance curves of thermoelectric modules and predetermined temperature gradients. (ii) Selection of Thermoelectric Modules involves selecting the appropriate specific performance criteria (Seebeck coefficient, internal resistance, and module dimensions), and (iii) configuration of the thermoelectric modules in series or parallel is determined based on the desired output voltage and current. The arrangement is optimized to ensure maximum power output and efficient energy harvesting.

3.1. Analytical Methodology

The calculation methodology developed for the electrical dimensioning of the main components in the TEG system is based on the structure outlined in Section 2. Applying this methodology requires prior knowledge of the system’s thermal behavior at the installation site and the operational conditions of the load that will be powered. The necessary input data includes: (i) the power and supply voltage of the load; (ii) the temperature gradient and temperatures of the hot and cold sources; (iii) the number of daily operating hours; and (iv) the selection of the thermoelectric module along with its performance curve. To achieve the optimal configuration of the thermoelectric cogeneration system for a specific application, the design process should involve thermoelectric modules with different characteristics (performance curves and dimensions). The system configuration that best satisfies the specific requirements of the installation site should be chosen.

3.1.1. Forecast of Electrical Energy Demand and Load Current Estimation

The estimation of energy consumption in the thermoelectric system serves as the foundation for sizing the entire proposed system. This process involves calculating the daily energy consumption in watt-hours, taking into account that not all components operate continuously throughout the day. To determine the energy usage of each load, it is necessary to compile a list of the nominal power of each load and the number of hours each load operates for daily. The calculation follows Equation (1), and with the known load power and the effective voltage required for operation, the load current (I_{Load}) can be determined using Equation (2).

$$P_{Cons} = P_{Load} \cdot N_{hour} \text{ [Wh]} \quad (1)$$

$$I_{Carga} = \frac{P_{Carga}}{V_{Carga}} \text{ [A]} \quad (2)$$

where P_{Cons} is the total energy consumption [Wh]; P_{Load} is the power of the load [W]; N_{hour} is the number of operating hours of the system [h], P_{Load} is the power of the load [W], and V_{Load} is the voltage of the load [V].

3.1.2. Estimation of the Number of TEG Modules

The number of thermoelectric modules needed for the cogeneration system is directly influenced by the load's power and voltage requirements, as well as the temperature gradient within the thermal system, since the generated power increases proportionally with the temperature gradient. The selection of the thermoelectric module is critical at this stage because different models offer varying dimensions and characteristic performance curves for voltage, current, and power.

After determining the load current (I_{Load}), the next step is to choose the most suitable thermoelectric module for the project. The module's datasheet should be reviewed to establish the optimal configuration of thermoelectric modules that will fulfill the voltage and current requirements of the load. This configuration is determined based on the temperature gradient of the thermal system and the performance curves of the selected modules. Figure 4 presents the performance curves for voltage, current, and power as a function of the temperature gradient, taken from the datasheet of the thermoelectric module inbC1-127.08HTS, WATRONIX [37].

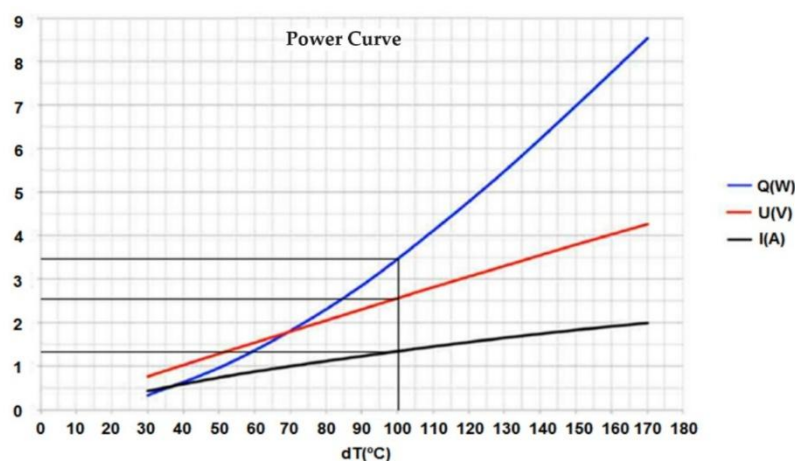


Figure 4. Performance curves (voltage, current, and power) as a function of ΔT [37].

Some datasheets provide the hot and cold side temperatures instead of the temperature difference, as shown by the datasheet of the thermoelectric module TEHP1-24156-1.2, Thermomonic (Figure 5) [38].

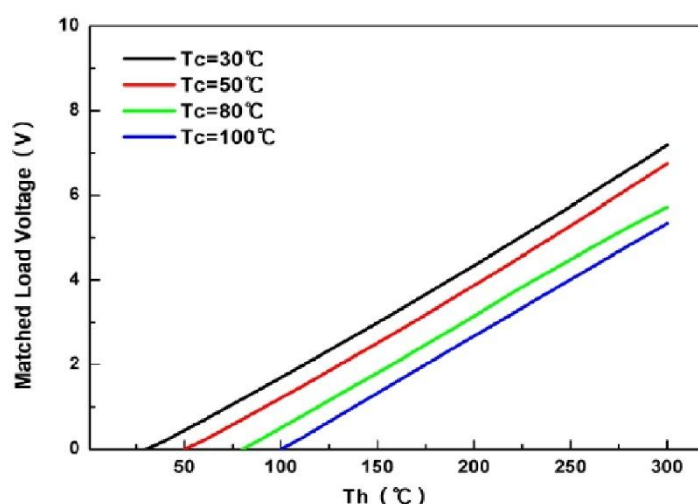


Figure 5. Performance curve of generated voltage as a function of hot and cold temperatures [38].

Figure 5 shows the performance curve of the generated voltage for four different cold-side temperatures. If the system's operating cold-side temperature (cold source) differs from the temperatures used to obtain the curves, the generated values should be approximated using interpolation based on Equation (3):

$$\frac{T_{c_{High}} - T_{c_{Low}}}{V_{High} - V_{Low}} = \frac{T_{c_{High}} - T_{c_{mod}}}{V_{High} - V_{mod}} \quad (3)$$

where $T_{c_{High}}$ is the higher cold source temperature from the performance curve [°C], $T_{c_{Low}}$ is the lower cold source temperature from the performance curve [°C], $T_{c_{mod}}$ is the cold source temperature for the thermoelectric module [°C], V_{High} is the Voltage generated at $T_{c_{High}}$ [V], V_{Low} is the voltage generated at $T_{c_{Low}}$ [V], and V_{mod} is the voltage generated at $T_{c_{mod}}$ [V].

Ideally, $T_{c_{High}}$ and $T_{c_{Low}}$ should be chosen so that $T_{c_{mod}}$ falls between these values. For example, if $T_{c_{mod}}$ is 70 °C, then $T_{c_{High}}$ should be 80 °C and $T_{c_{Low}}$ 50 °C. If $T_{c_{mod}}$ is 120 °C, $T_{c_{High}}$ would be 100 °C and $T_{c_{Low}}$ 80 °C. The interpolation method in Equation (3) is also recommended for determining the current or power generated based on performance curves, provided that the necessary adjustments are made.

3.1.3. Series Association in the Multi-String Electrical Arrangement

After determining the voltage generated by each thermoelectric module and the average input voltage required by the system's DC–DC converter, the number of modules that need to be connected in series (N_{Series}) can be estimated, considering that the voltages of the individual modules will add up. The number of modules required to achieve the necessary voltage can be calculated using Equation (4), where ΔV_{Conv} represents the average voltage at the DC–DC converter [V], and V_{mod} denotes the voltage generated by each thermoelectric module [V].

$$N_{Series} = \frac{\Delta V_{Conv}}{V_{mod}} \rightarrow \Delta V_{Conv} = \frac{V_{max} + V_{min}}{2} \quad (4)$$

It is essential to consider that the voltage used to power the converter should be the average of its maximum and minimum input values. For instance, if the DC–DC converter’s input voltage varies from 10 V to 20 V, then ΔV_{Conv} would be set at 15 V. This approach is vital for safety purposes, as the output voltage of the thermoelectric modules fluctuates with changes in the temperature gradient and can occasionally surpass the converter’s minimum or maximum input thresholds. If the resulting number of modules is not an integer, it should be appropriately rounded up or down to provide a wider operational range for the converter’s input voltage.

3.1.4. Parallel Association in the Multi-String Electrical Arrangement

Knowing the load current, the number of series blocks that need to be connected in parallel ($N_{Parallel}$) to meet the load current can be determined. The number of modules that must be connected in parallel to supply the maximum current required by the DC–DC converter ($I_{Critical}$) is calculated using Equation (5), where $I_{Critical}$ is the maximum circuit current [A] and I_{mod} is the current supplied per module [A].

$$N_{Parallel} = \frac{I_{Critical}}{I_{mod}} \rightarrow I_{Critical} = I_{Load} \times \frac{V_{Load}}{V_{min}} \quad (5)$$

As with the voltage-based calculation, the result is not always an integer. In this case, the number should always be rounded up because the current capacity of the modules must exceed the system’s current to ensure proper operation. For instance, if the calculated number is 3.9 modules, it is recommended to use 4 modules for full assurance, considering that temperature variations in the system also affect the maximum current of the modules. Adding more parallel blocks of modules does not pose a problem, as increasing the number of parallel blocks will not change the voltage but will increase the current capacity, providing extra reliability in case any module fails, though it will increase the project cost.

3.1.5. Multi-String Electrical Arrangement and Estimation of the Area the TEG System

Once the series and parallel configurations of the thermoelectric modules are determined, the total number of modules (N_{mod}) required for the electrical arrangement of the thermoelectric conversion system can be estimated using Equation (6), where N_{Series} represents the number of modules connected in series, and $N_{Parallel}$ denotes the number of modules connected in parallel.

$$N_{mod} = N_{series} \times N_{parallel} \text{ [unit]} \quad (6)$$

The minimum area (Area) occupied by the thermoelectric system can be determined based on the dimensions of the individual thermoelectric modules and the total number of modules required for the system’s electrical configuration. This area can be calculated using Equation (7), where Width and Length represent the dimensions of each module [cm], and N_{mod} is the total number of modules in the system.

$$Area = Width \times Length \times N_{mod} \text{ [cm}^2\text{]} \quad (7)$$

3.2. Design of a TEG System (PoC) with a Multi-String Electrical Arrangement

To demonstrate the applicability of the developed methodology, this subsection will design a TEG system (PoC) with a multi-string electrical arrangement to operate with a temperature difference (ΔT) of approximately 100 °C, providing a load voltage of 12 Vdc and capable of supplying up to 30 Watts of power to the load.

The thermoelectric modules used are the INBC1-127.08HTS models from WATRONIX [37]. By applying the methodology described in Section 3.1 and using Equation (2), the maximum load current is determined to be 2 A. The DC–DC converter has a fixed output voltage of 12 Vdc with a fluctuating input voltage ranging from 10 to 34 V.

Based on the power curve provided in the datasheet (Figure 5), the output voltage of each module under load is determined to be 2.4 V, depending on the temperature gradient. This value will be used to calculate the required number of modules in series. Thus, for the calculations, the average input voltage of the DC–DC converter is used along with Equation (4) to determine the number of modules connected in series.

$$\Delta V_{Conv} = \frac{V_{max} + V_{min}}{2} = \frac{34 + 10}{2} = 22 \text{ V} \rightarrow N_{Serie} = \frac{\Delta V_{Conv}}{V_{mod}} = \frac{22}{2.4} = 9.2 \text{ modules}$$

Since the calculated number of modules was fractional, it has been rounded to 10 modules in series (N_{serie}). The output voltage is then the product of the number of series-connected modules and the output voltage of each module (2.4 V), totaling 24 V.

Based on the power curve provided in the datasheet (Figure 5), with a temperature difference (ΔT) of approximately 100 °C, each module can supply around 3.5 W of power, with an output voltage of 2.4 Vdc and a current of 1.45 A. Therefore, applying Equation (5), the number of modules needed to be connected in parallel can be determined:

$$I_{Critical} = I_{Load} \times \frac{V_{Load}}{V_{min}} = 2 \times \frac{12}{10} = 2.4 \rightarrow N_{Parallel} = \frac{I_{Critical}}{I_{mod}} = \frac{2.4}{1.45} = 1.65 \text{ modules}$$

Thus, two parallel strings ($N_{parallel}$) should be used to ensure that the maximum operating current at the design temperature gradient is 2.9 A, which is greater than the system's critical current of 2.4 A. The total number of modules in the multi-string arrangement is found by applying Equation (6), and the minimum area occupied by the TEG system is calculated using Equation (7).

$$N_{mod} = N_{serie} \times N_{parallel} = 10 \times 20 = 20 \text{ modules}$$

$$Area = Width \times Length \times N_{mod} = 4 \times 4 \times 20 = 320 \text{ cm}^2$$

3.3. Prototype of a Proof-of-Concept (PoC)

The Prototype of the TEG system with a multi-string electrical arrangement was designed using an analytical electrical design methodology to power a load of approximately 30 W, with an output voltage of 12 Vdc for a maximum operating temperature of +200 °C. The system utilizes 20 thermoelectric modules, model INBC1-127.08HTS by WATRONIX, arranged in a multi-string configuration (10 in series and 2 in parallel), covering a minimum area of 320 cm². The cost for acquiring the TEG modules is \$49.00 per unit, totaling \$980.00. Each TEG module is capable of supplying approximately 3.5 W of power, with an output voltage of 2.4 Vdc and a current of 1.45 A per unit at a temperature difference (ΔT) of around 100 °C [29,37].

Figure 6 shows the schematic design of PoC, illustrating the electrical arrangement with 20 thermoelectric modules (model INBC1-127.08HTS by WATRONIX) configured with 10 modules in series and two strings connected in parallel [37].

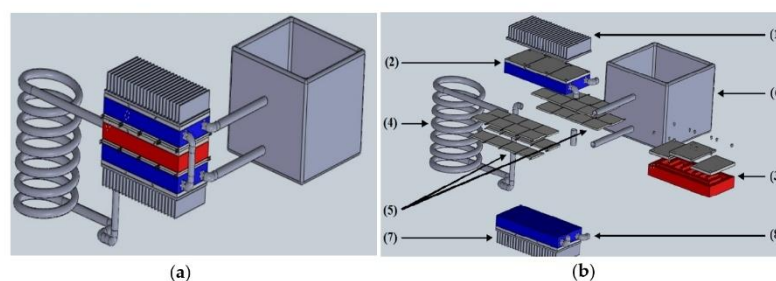


Figure 6. Design of the proposed (a) and demonstrated parts and pieces of the generator (b).

The Proof of Concept (PoC) (Figure 6) is composed of two independent thermal transfer systems operating in tandem. The first system captures residual heat (3, 4) from industrial processes, comprising a heat transfer module (3) and a heat exchanger (hot plate) (4). This system facilitates heat transfer (4) via convection from the industrial process to the heat transfer block (3), where the thermoelectric modules (5) are arranged. The second system is a hybrid refrigeration–cogeneration setup (1, 2, 7, 8), which includes fins (1, 7) and a flat cooling block (2, 8) to enhance the contact area with the thermoelectric modules. This configuration generates hot water (6) that can be reused in the industrial process and maintains a thermal gradient essential for thermoelectric power generation. It is important to note that the thermal system can be adapted to various processes by replacing the heat exchanger (4), thereby optimizing thermal transfer to the TEG system.

4. Computational Numerical Modeling

This section addresses the computational modeling and simulation of a system composed of 20 thermoelectric generators (TEGs). The system is divided into three main parts: power generation, consisting of the thermoelectric modules under a specific temperature gradient; a DC–DC converter that maintains a constant output voltage; and a maximum power point tracker (MPPT). The initial focus is on simulating the modules based on a realistic model, evaluating their performance under different temperature gradients and loads. At the end of the chapter, an analysis is conducted to compare the accuracy of the simulated values with the experimental data.

The thermoelectric generator was initially modeled electrically as a non-ideal voltage source with a series resistance (R_{INT}), where the source voltage corresponds to the open-circuit voltage (V_{OC}), and the series resistance represents the internal resistance of the thermoelectric module. In this model, the open-circuit voltage is given by $V_{OC} = \alpha \Delta T$, where α is the Seebeck coefficient, and ΔT is the temperature gradient. The internal resistance is determined by adding a resistive load to the TEG terminals, measuring the output voltage and current. The internal resistance, R_{INT} , can be calculated (Equation (8)):

$$R_{INT} = R_{OUT} \left(\frac{V_{OC}}{V_{OUT}} - 1 \right) \quad (8)$$

The power delivered to the load resistance R_{OUT} is calculated from the voltage, V_{OUT} , according to Equation (9):

$$V_{OUT} = \left(\frac{R_{OUT}}{R_{OUT} + R_{INT}} \right) V_{OC}; \quad P_{OUT} = \frac{V_{OUT}^2}{R_{OUT}} = \left(\frac{R_{OUT} V_{OC}^2}{R_{OUT}^2 + 2R_{OUT} R_{INT} + R_{INT}^2} \right) \quad (9)$$

By analyzing P_{OUT} as a function of R_{OUT} , keeping the other parameters constant, it is observed that power decreases as $P_{OUT}(R_{OUT})$ increases, as can be verified by calculating the limit of $P_{OUT}(R_{OUT})$ using Equation (10):

$$\lim_{R_{OUT} \rightarrow \infty} P_{OUT}(R_{OUT}) = 0 \quad (10)$$

The power is zero both when the load resistance is zero and when this resistance is very high. The maximum power point $P_{OUT}(R_{OUT})$ occurs when $R_{OUT} = R_{INT}$.

Additionally, the short-circuit current, I_{SC} , is given by the ratio of the open-circuit voltage, V_{OC} , to the internal resistance, R_{INT} . When the load resistance equals the internal resistance, the current at the maximum power point (MPP) will be half of I_{SC} . Thus, it can be defined that the optimal operating point to extract the maximum power from a TEG should be according to Equation (11). The total power generated by the TEG, dissipated internally and in the load resistance, is described by Equation (12).

$$V_{OUT} = \frac{V_{OC}}{2}; \quad I_{OUT} = \frac{I_{SC}}{2}; \quad P_{OUT} = \frac{P_{TEG}}{2} = V_{OC}^2 \frac{R_{OUT}}{(R_{INT} + R_{OUT})^2} \quad (11)$$

$$P_{TEG} = \frac{V_{OC}^2}{(R_{INT} + R_{OUT})} \quad (12)$$

Rate that the power supplied varies according to the load resistance and the temperature gradient. For this reason, it is necessary for the load R_{OUT} to be variable to track the variations of R_{INT} which change according to the Seebeck coefficient, while also remaining constant when required.

To obtain a fixed voltage, a DC–DC converter with a Perturb and Observe (P&O)-based MPPT algorithm is used. This algorithm measures the output current and voltage of the TEG and adjusts the converter's duty cycle so that the resistance seen by the generator equals R_{INT} ; thus, allowing the maximum power to be extracted from the generator.

In the simulation, the inbC1-127.08HTS module from WATronix Inc. (West Hills, CA, USA) was used in the Simulink/MATLAB (Version R 2023a). The simulation was adapted from the model provided by [16]. A system composed of 20 TEGs was simulated, arranged as two sets connected in parallel, with 10 TEGs in series in each set. The goal was to simulate a system with a converter capable of supplying 30 W at a constant 12 V to a load. The module used can generate 3.5 W of power with a voltage of 2.4 V and a current of 1.45 A under a temperature gradient of 100 °C. Based on the model developed in [16,20,21], the modules were assembled as shown in Figure 7, using a voltage source dependent on temperature parameters, the Seebeck coefficient, and the number of TEGs in series. Additionally, an internal resistance with a value equivalent to the series resistances was included.

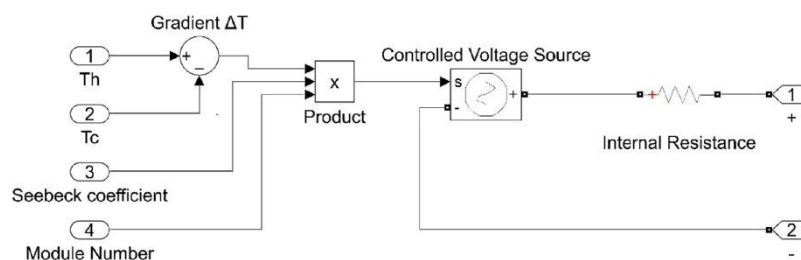


Figure 7. Internal view of the thermoelectric modules in Simulink®.

In the simulation, the gradient block (T_h and T_c) calculates the difference between, which is then multiplied by the Seebeck coefficient and the number of modules; this will be the value of the dependent voltage source. A constant internal resistance value was used, as the data could not be obtained from the module manufacturer. The value used was the average measured internal resistance multiplied by the number of modules in series. The Seebeck coefficient and the internal resistance were calculated from the module power curve under a temperature gradient of 100 °C. Table 1 shows the data values used in the open circuit simulation.

Table 1. Open Circuit Simulation Data.

Description	Value
Seebeck Coefficient	0.048 V/K
Internal Resistance (series)	16.55 Ω
Module number in series	10
Gradient	From 0 °C to 80 °C
Gradient increment interval	5 °C

The results of the computational simulation are presented in Figure 8, which shows the graph of the open circuit voltages of the system as the gradient varies from 5 °C to 80 °C with a 5 °C increment.

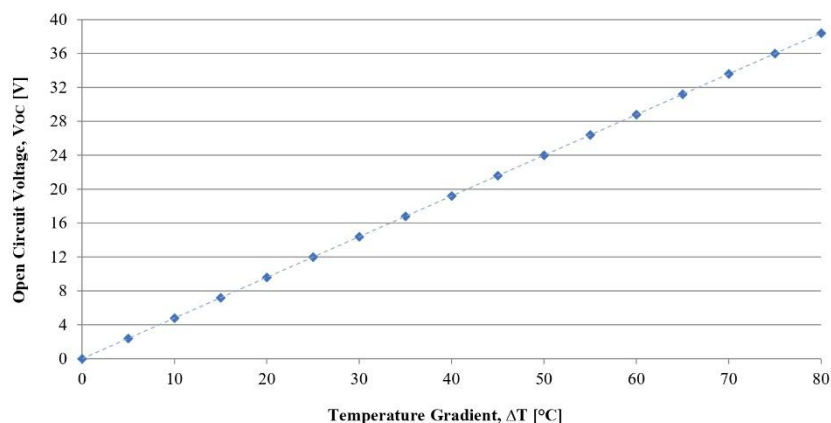


Figure 8. Computational simulation results (no load) test (INBC1-127.08HTS).

The open circuit voltage is a straight line, as the Seebeck coefficient used is constant. Next, a variable load was added to measure the output values of the TEGs and obtain the voltage versus current curve, as well as the power versus voltage and power versus current curves. Figure 9 shows the system with the variable load and the meters.

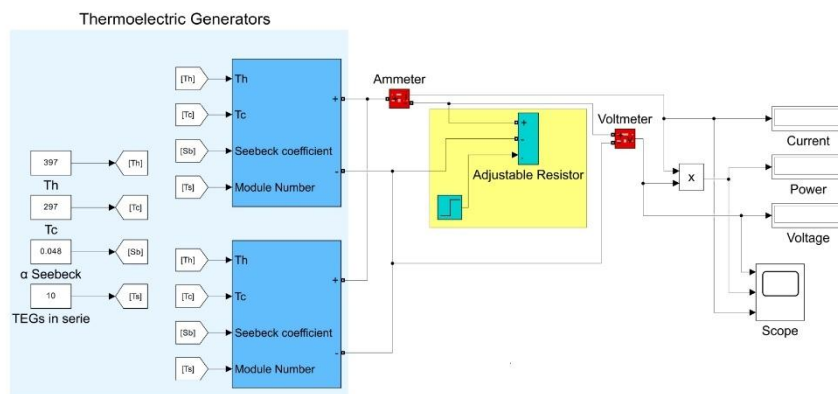


Figure 9. Demonstration of circuit modeling with variable load.

As in the no load simulation, the same input values were used in both modules. The component and simulation data are presented in Table 2.

Table 2. Variable Load Circuit Simulation Data.

Description	Value
Seebeck Coefficient	0.048 V/K
Internal Resistance (series)	16.55 Ω
Module number in series	10
Gradient	From 0 °C to 80 °C
Gradient increment interval	5 °C
Loads (Ω)	0, 1.25, 5, 7.5, 10, 12.5, 25, 37.5, 50, 60, 75.

Figure 10a shows the graphs generated from the simulation data. The first graph shows the variation of the output voltage relative to the current as a function of the temperature gradients.

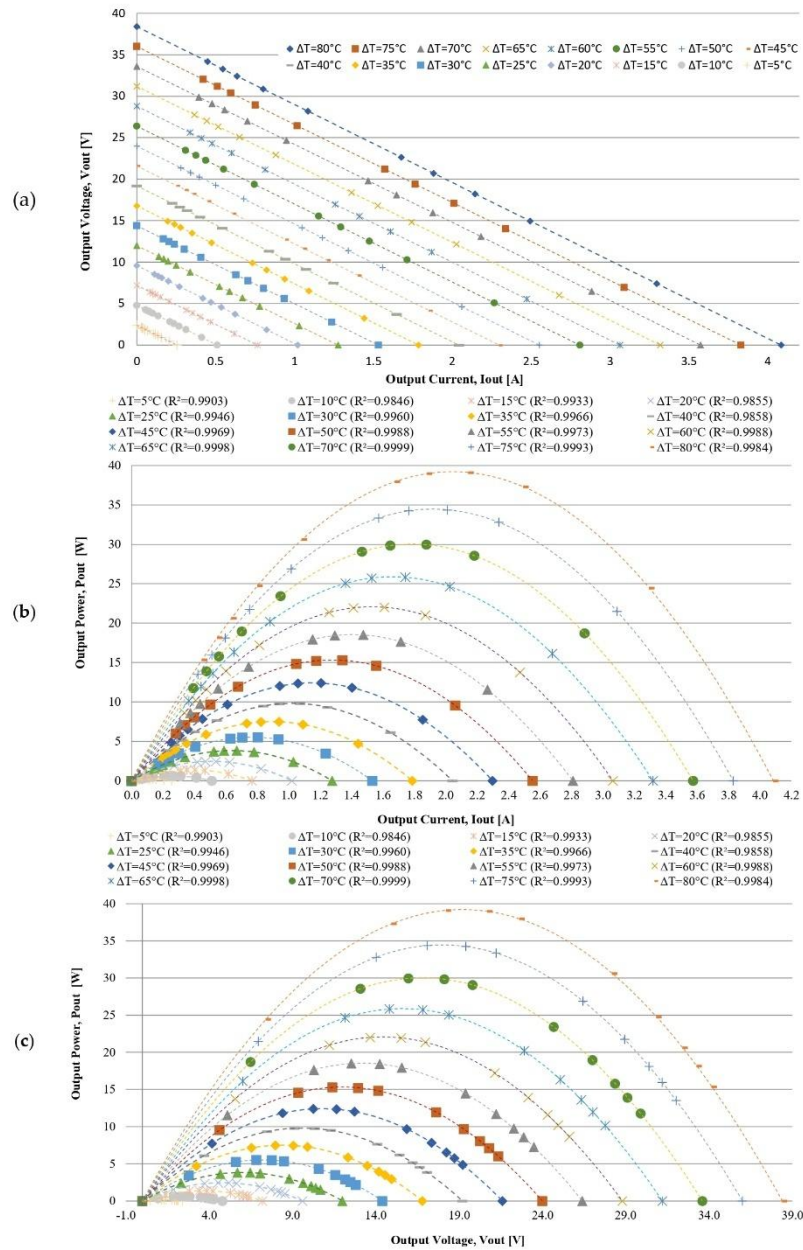


Figure 10. Presents of computational simulation results (with load): (a) the output voltage versus output current curve; (b) the output power versus output current curve; and (c) the output power versus output voltage curve as a function of the temperature gradient.

The graph shows that the higher the temperature gradient, the farther from the origin the obtained line is. With a gradient of 80 °C, the voltage reaches up to 35 V under open-circuit conditions. However, the maximum power point is around 17 V–1.7 A. Very high or very low load resistance values relative to the TEG's internal resistance result in an operating point close to one of the graph's axes.

The power versus current graph (Figure 10b) shows a maximum of approximately 32 W–1.9 A operating under a gradient of 80 °C. As expected, the power increased until it reached a maximum point. After this point, the power begins to decrease as the current continues to increase until it reaches the short-circuit current limit of 3.7 A.

Meanwhile, Figure 10c shows the previous graph, where the power versus voltage graph exhibits a peak of maximum power around 32 W–17 V. As seen in the other graph, the highest voltage is the open-circuit voltage, occurring at 35 V when operating under a gradient of 80 °C.

5. Development and Experimental Analysis

This section outlines the development and experimental analysis of the TEG system, designed to output 30 W at 12 Vdc, with a maximum operating temperature of +200 °C. The system utilizes 20 thermoelectric modules (INBC1-127.08HTS—WATRONIX [29,30]). The experimental analysis was conducted with temperature gradients below the system's maximum operating limit ($T_h = 170$ °C) and a maximum temperature gradient (ΔT) of 80 °C. This limitation was necessary due to laboratory infrastructure constraints, particularly to comply with safety standards and ensure accurate data acquisition, as detailed in references [22–24]. The results of the experimental analysis are presented in Figure 11.

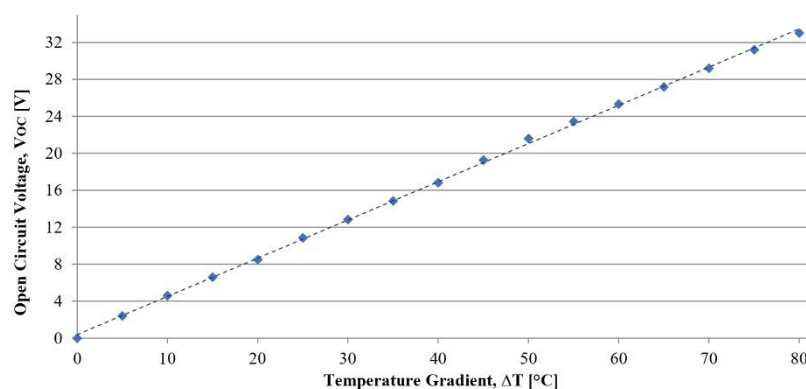


Figure 11. Presentation of experimental results (no load)—a graph of the output voltage in the open circuit test (INBC1-127.08HTS).

The open circuit test involves subjecting the system to a defined temperature gradient and measuring its thermal properties, such as the temperatures of the hot and cold sources, along with the electrical voltage generated at the open terminals (V_{out}), with no load connected. Figure 11 illustrates the graph obtained from the open circuit test, depicting how the output voltage (V_{out}) increases with varying temperature gradients (ΔT). The results clearly indicate a linear relationship between the generated voltage and the temperature gradient. By applying the least squares method to the output voltage (V_{out}) data, Equation (13) is derived, which characterizes the open circuit voltage. To maintain a constant output voltage, the use of a DC–DC converter is necessary.

$$V_{out} = 0.4306\Delta T[V] \quad (13)$$

To determine the voltage–current (V-I) characteristics of the thermoelectric generator, a series of resistors were employed as the load to measure the output voltage (V_{out}) in volts

[V] and the output current (I_{out}) in amperes [A] across various temperature gradients (ΔT) ranging from 5 °C up to the maximum operating limit of 80 °C. The results are depicted in Figure 12a, where the dashed lines represent linear regressions obtained using the least squares method, with each line corresponding to 5 °C intervals of temperature gradient.

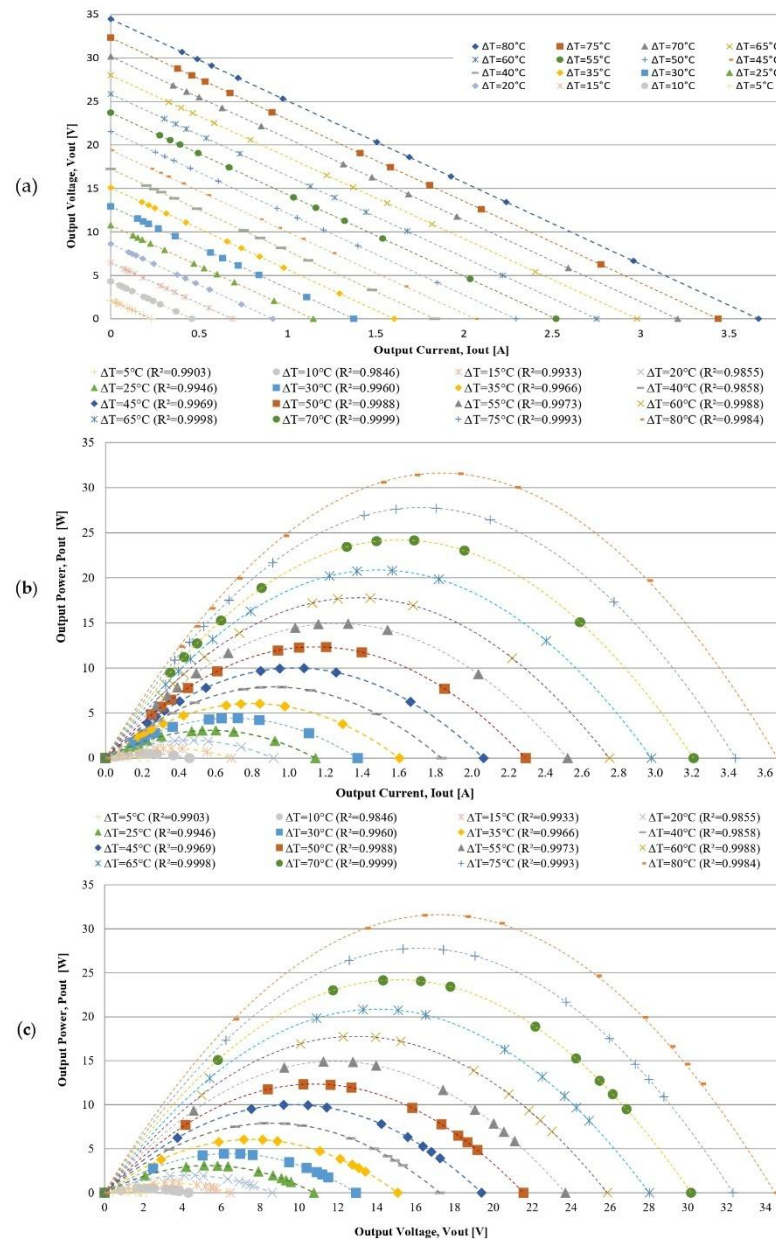


Figure 12. Presentation of experimental results (with load): (a) the output voltage versus output current curve; (b) the output power versus output current curve; and (c) the output power versus output voltage curve as a function of the temperature gradient.

From examining the relationship between output voltage (V_{out}) and output current (I_{out}) at different temperature gradients ($\Delta T = T_H - T_C$ [°C]) in Figure 12a, it is clear that both V_{out} and I_{out} increase proportionally as the temperature gradient (ΔT) rises. This leads to a substantial increase in output power (P_{out}) at higher temperature gradients. The curves in Figure 12a exhibit a degree of linearity across different temperature gradients, which is attributed to the linear response of the module's internal resistance (R_{int}) relative to the temperature gradient during the testing.

To determine the maximum power curve delivered by the solid-state generator, data from the open circuit test (Figure 11) and the voltage-current curve (Figure 12a) were employed. These data establish a direct proportional relationship between the temperature gradient (ΔT) and the power output (P_{out}) in watts [W] for a given fixed load resistance (R_L) in ohms [Ω]. According to basic circuit analysis principles, the power dissipated in the external load is given by $P_{out} = R_L I_{out}^2$ [W]. Using this equation with different resistance values as the fixed load (RL), Figure 12b shows the curve of maximum power output (P_{out}) as a function of output current (I_{out}) for various temperature gradients (ΔT). Figure 12c illustrates the maximum power output (P_{out}) curve as a function of output voltage (V_{out}) for different temperature gradients. The dashed curves in Figure 12b,c were derived by multiplying the linear regression lines from Figure 12a by the current delivered by the module to the load.

By examining the power output (P_{out}) curve as a function of the output current (I_{out}) in Figure 12b, the maximum current and power that the thermoelectric generator can supply at different temperature gradients (ΔT) can be identified. Similarly, by analyzing the maximum power curve (P_{out}) as a function of output voltage (V_{out}) shown in Figure 12c, the maximum power output (P_{out}) and corresponding voltage (V_{out}) at the output terminals of the solid-state thermoelectric generator can be determined for various temperature gradients.

6. Results and Discussion

In this section, the comparative results of the analytical, computational numerical, and experimental methodologies for the design and analysis of thermoelectric generators (TEGs) are presented and discussed. The analysis focuses on the main performance indicators: output power, voltage, and current. The results obtained with a temperature gradient of 80 °C for each methodology are detailed and compared below. Table 3 summarizes the results for the variables of power (P), voltage (V), and current (I) in the different methods. As observed, there are significant differences in the error percentages between the analytical, computational numerical, and experimental methods.

Table 3. Results obtained with a temperature gradient of 80 °C.

Value		Analytical			Computational Simulation			Experimental		
ΔT (°C)	U (V)	I (A)	Q (W)	U (V)	I (A)	Q (W)	U (V)	I (A)	Q (W)	
5	1.25	0.20	0.25	1.14	0.13	0.15	1.21	0.01	0.01	
10	2.50	0.40	1.00	2.27	0.27	0.61	2.30	0.24	0.54	
15	5.00	0.60	3.00	3.42	0.40	1.38	3.31	0.34	1.13	
20	6.25	0.80	5.00	4.56	0.54	2.44	4.25	0.44	1.86	
25	7.00	0.90	6.30	5.70	0.67	3.82	5.59	0.56	3.13	
30	7.50	1.00	7.50	6.84	0.80	5.50	6.61	0.66	4.37	
35	8.75	1.05	9.19	7.98	0.94	7.49	7.65	0.77	5.86	
40	10.00	1.10	11.00	9.12	1.07	9.78	8.67	0.87	7.51	
45	12.75	1.40	17.85	10.26	1.21	12.38	9.93	0.99	9.86	
50	14.00	1.55	21.70	11.40	1.34	15.29	11.13	1.11	12.38	
55	14.75	1.65	24.34	12.54	1.48	18.50	11.60	1.21	14.01	
60	15.50	1.70	26.35	13.68	1.61	22.01	13.05	1.31	17.04	
65	17.75	2.00	35.50	14.82	1.74	25.83	14.01	1.40	19.62	
70	18.50	2.10	38.85	15.96	1.88	29.96	15.04	1.50	22.63	
75	19.25	2.20	42.35	17.09	2.01	34.37	16.08	1.61	25.85	
80	20.00	2.30	46.00	18.23	2.15	39.10	17.01	1.70	28.94	
85	22.50	2.53	56.93	19.37	2.28	44.14	-	-	-	
90	23.75	2.63	62.46	20.51	2.41	49.49	-	-	-	
95	24.50	2.71	66.40	21.65	2.55	55.14	-	-	-	
100	25.00	2.76	69.00	22.79	2.68	61.12	-	-	-	

Table 4 presents the percentage errors of the analytical and computational numerical methods in comparison to the experimental values. It is observed that the power in the analytical method showed an average error of 47.2% compared to the experimental value, indicating a significant discrepancy, suggesting that the analytical model may not capture all relevant factors. In contrast, the computational numerical method showed a smaller error of approximately 26.0%, indicating greater accuracy and alignment with the experimental data.

Table 4. Percentage errors of the analytical and computational numerical models compared to experimental results for different temperature gradients.

Value ΔT (°C)	Analytical Error			Computational Simulation Error		
	U (V)	I (A)	Q (W)	U (V)	I (A)	Q (W)
5	3.4%	96.7%	96.8%	5.9%	95.1%	94.8%
10	8.0%	40.8%	45.6%	1.1%	11.8%	10.8%
15	33.9%	43.2%	62.5%	3.3%	15.3%	18.1%
20	31.9%	45.2%	62.7%	6.7%	18.3%	23.8%
25	20.1%	37.9%	50.3%	1.8%	16.6%	18.1%
30	11.9%	33.9%	41.7%	3.3%	17.8%	20.5%
35	12.5%	27.1%	36.3%	4.1%	18.5%	21.8%
40	13.3%	21.2%	31.7%	4.9%	19.2%	23.2%
45	22.1%	29.1%	44.7%	3.2%	17.7%	20.4%
50	20.5%	28.2%	43.0%	2.4%	17.0%	19.0%
55	21.4%	26.8%	42.4%	7.5%	18.1%	24.2%
60	15.8%	23.2%	35.3%	4.6%	18.9%	22.6%
65	21.1%	30.0%	44.7%	5.5%	19.6%	24.0%
70	18.7%	28.4%	41.7%	5.7%	19.8%	24.5%
75	16.5%	26.9%	39.0%	5.9%	20.0%	24.8%
80	15.0%	26.0%	37.1%	6.7%	20.7%	26.0%
Average Error	17.9%	35.3%	47.2%	4.5%	22.8%	26.0%

The voltage in the analytical method had a percentage error of 17.9%, while the computational numerical method presented an error of only 4.5%. These results suggest that the computational model is significantly more accurate in estimating voltage, possibly because it considers temperature-dependent parameters.

As for the current, the analytical method presented an error of 35.3%, while the computational numerical method had an error of 22.8%, again showing greater accuracy of the computational model.

The 80 °C gradient was selected as it is representative of steady-state operation in practical applications. When comparing the graphs (Figures 10c and 12c), it becomes evident that the computational method offers more accurate and reliable estimates compared to the analytical method when confronted with the experimental data. This underscores the importance of using detailed computational models to obtain more realistic predictions, considering temperature variations and other influencing factors.

Although the analytical model provides quick estimates, it does not account for variations in material properties with temperature changes, which can lead to significant discrepancies in real-world scenarios where thermal conditions are dynamic. The computational model, in turn, offers more detailed and accurate insights, although it requires substantial computational resources and precise data for predictions.

The experimental approach validates the theoretical models and highlights practical challenges, such as thermal management and electrical insulation, which are crucial for the effective implementation of TEG systems. The experimentation also revealed practical issues not captured by the theoretical models, such as thermal transfer between hot and cold surfaces, which affect the accuracy of the models.

Moreover, the theoretical models assume a uniform temperature gradient throughout the TEG multi-string arrangement, which is an oversimplification. In practice, surface

roughness and other thermal resistances create significant variations in the temperature gradient and thermal losses of the TEG [25].

Therefore, each methodology has its strengths and limitations. An integrated approach that combines all three methodologies offers the most comprehensive solution for TEG system design: the analytical model is effective for initial sizing, the computational numerical model provides detailed performance analysis under variable conditions, and the experimental model validates the system's applicability on a real scale, offering directions for future optimizations.

As a continuation of this research, the focus will be on developing a computational model that incorporates the other parameters, taking into account temperature gradient fluctuations, the variation of internal resistance with temperature, and other external influencing factors such as the inclusion of thermal losses associated with coupling and temperature gradient variation along the surface of the TEG multi-strings.

Buck Converter Design: Computational and Experimental—In order to ensure that the multi-string TEG provides a stable power supply to the load at a constant voltage, it is essential to design and implement a buck converter. The design of this converter is based on the voltage and power parameters generated by the TEGs and the required values needed to power the load. Additionally, the energy utilization characteristics for DC–DC converters, as illustrated in Figure 3, were considered in the design process.

To reduce the available DC voltage from the TEGs to a lower and constant value, a buck converter was designed utilizing the fundamental equations governing such converters. Figure 13 depicts the TEG modules integrated with the buck converter circuit modeled in Simulink®. Two distinct simulations were conducted: one under open-circuit conditions (No load) and the other under loaded conditions, employing the parameters listed in Table 5.

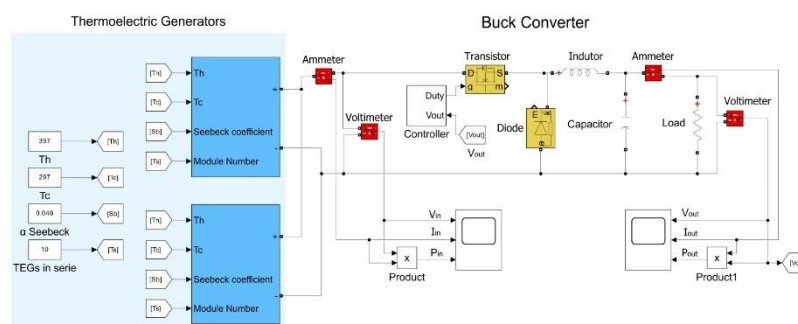


Figure 13. Demonstration of buck converter circuit with a resistive load.

Table 5. Buck converter design parameters circuit simulation.

Parameter	Value	Description
α	0.048 V/K	Seebeck Coefficient
R_{INT}	16.55 Ω	Internal Resistance (series)
N_{SERIE}	10	Module number in series
$N_{PARALLEL}$	2	Module number in parallel
ΔT	From 0 °C to 80 °C	Gradient
ΔT_{INT}	5 °C	Gradient increment interval
P_{MPP}	30 W	Maximum power output
P_{IN}	70 W	Maximum power input
V_{IN}	24 V	Input voltage
R_L	4.8 Ω	Load resistance
V_O	12 V	Maximum output voltage
I_O	2.5 A	Maximum output current

Table 5. Cont.

Parameter	Value	Description
Δi_L	5% of I_O	Maximum ripple current
ΔV_O	2% of V_O	Maximum ripple voltage
f_s	1 MHz	Switching frequency
L	33 μ H	Inductor
C	27 μ F	Capacitor

The temperature gradient was incremented in 5 °C steps up to 80 °C. For each increment, the input and output voltages of the converter were measured. The resulting graphs, presented in Figure 14, show the relationship between the input voltage and the output voltage of the converter, both under open-circuit conditions and with a 4.8 Ohm load connected at the output.

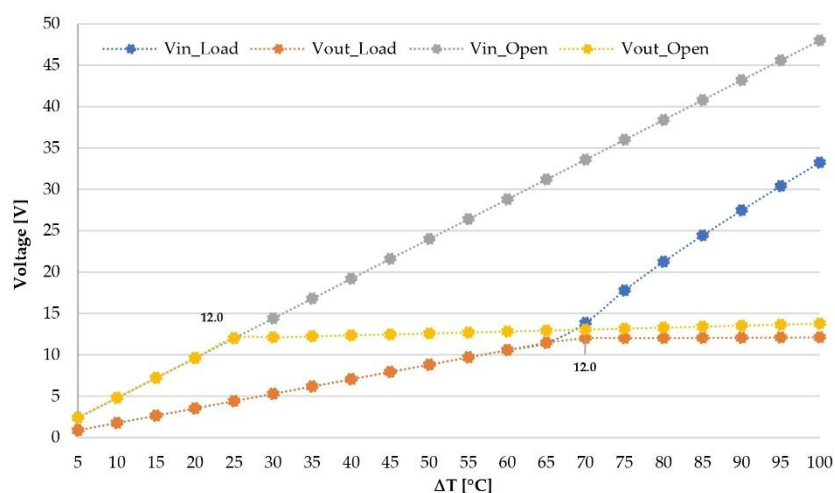


Figure 14. Computational simulation results (open circuit and with load).

When operating under open-circuit conditions (no load), the converter exhibits a slight voltage drop compared to the input voltage at a ΔT of 25 °C. Under loaded conditions, the output voltage is approximately one-third of the input voltage at a ΔT of 70 °C, successfully achieving the expected voltage output designed for the converter. Additionally, the performance of the buck converter was experimentally analyzed by calculating the overall efficiency based on the input and output values of the converter (Table 5), demonstrating an efficiency exceeding 92.5%.

7. Conclusions

This paper presents a comprehensive comparative analysis of the accuracy of various methodologies for the design and analysis of thermoelectric generators (TEGs) operating under different temperature gradients. By employing analytical, computational numerical, and experimental approaches, the research aimed to evaluate the performance and efficiency of TEG systems in energy harvesting applications.

The findings of this study demonstrate that each methodology offers unique and valuable insights into the performance of TEG systems.

Analytical Methodology: The analytical model effectively estimated power output, voltage, and efficiency based on theoretical performance data across industrial temperature gradients. This methodology is particularly useful for initial dimensioning and config-

uration, providing quick and reliable estimates that can serve as a foundation for more detailed analyses.

Computational Numerical Model: The Simulink/MATLAB model, which incorporated temperature-dependent variations in the Seebeck coefficient and internal resistance, produced highly accurate predictions. The detailed analysis provided by the computational model under varying temperature conditions underscored the importance of accounting for these variations to achieve realistic and reliable results in the TEG system design.

Experimental Analysis: The experimental tests validated the performance of the TEG prototype, confirming the accuracy of both the analytical and computational models. Furthermore, the experimental approach identified practical challenges, such as thermal management and electrical insulation, which are critical for the successful implementation of TEG systems in real-world applications.

The comparative analysis revealed that an integrated approach, combining analytical, computational, and experimental methodologies, offers the most comprehensive solution for TEG system design. The analytical model is effective for initial design and dimensioning, the computational model provides detailed performance analysis, and the experimental analysis ensures real-world validation, making this approach robust and reliable.

In summary, this paper highlights several key contributions and potential applications of TEG systems, particularly those operating in multi-string electrical arrangements for energy harvesting. These systems have potential applications across various sectors, including wearable electronics, building integration, and automotive industries. The research demonstrates the value of an integrated approach that combines analytical, computational, and experimental methodologies for the design and analysis of TEG systems. Where, the key contributions of this study include: (i) comparative evaluation: the research successfully compared different methodologies for TEG design, providing a thorough evaluation of each approach's accuracy and efficiency. (ii) Integrated insights: the integrated methodology offered unique insights into the performance and efficiency of TEG systems, with the combined approach delivering the most robust and comprehensive solution. (iii) Experimental application: the potential for using these modeling approaches in the accurate and efficient design of TEG systems in energy harvesting contexts is significant. The innovative aspects and advantages of the methodologies are as follows:

Simplified Analytical Method: This method uses performance curves provided by manufacturers, offering a quick way to estimate TEG configuration and sizing values. Its main advantages are the ease of application and rapid estimation of electrical configuration, making it ideal for initial analyses. However, this method does not consider external factors, non-uniform temperature gradients, coupling resistance, and variations in the internal resistance of the modules, leading to a higher margin of error.

Computational Method Integrated with the Analytical Model: The integration of the computational method with the analytical model allows for the inclusion of critical factors such as internal losses, variations in temperature gradients between strings, and coupling resistances. This approach offers greater accuracy by considering the variation of internal resistance as a function of temperature, enabling a more realistic estimate of the system output. When used together, the computational model enhances the precision of the results, providing a detailed analysis of real operating conditions.

Practical Implications and Future Research Directions: The methodologies developed in this study significantly contribute to the understanding and implementation of TEGs in energy harvesting systems, promoting energy efficiency and sustainability. The study facilitates the practical application of TEGs, especially in self-powered systems, standing out for its practical approach and adaptability. Future research should focus on developing models that integrate dynamic temperature gradient variations and external parameters, as well as exploring new materials that could improve TEG performance under extreme conditions.

Challenges in Practical Applications: Among the main challenges identified are the precise control of temperature gradients and the need to manage thermal losses and coupled resistances, which directly affect TEG performance. Practical implementation requires careful adaptation of theoretical models to reflect the complexities of real operating conditions.

The integrated approach proposed in this study offers a robust and accessible pathway for the design and analysis of multi-string TEGs, enhancing prediction accuracy and promoting broader use in diverse sectors. The methodologies developed serve as a foundation for future research and practical applications, enhancing the efficiency and sustainability of energy harvesting technologies. As a continuation of this research, it is proposed to develop an integrated model for the sizing of the heat transfer system and the MPPT converter with an optimized power conditioner. This model should combine thermal and electrical simulations using computational tools to maximize TEG efficiency, utilizing advanced techniques to optimize energy extraction and storage for energy harvesting applications.

Author Contributions: Conceptualization: O.H.A.J., E.A.d.S., E.R.d.L., S.V.B.D. and J.P.P.d.C.; methodology: O.H.A.J., E.A.d.S., E.R.d.L., S.V.B.D. and J.P.P.d.C.; validation: O.H.A.J., S.V.B.D. and J.P.P.d.C.; investigation and simulation: O.H.A.J., E.A.d.S. and E.R.d.L.; writing—original draft preparation: O.H.A.J., E.A.d.S., E.R.d.L., S.V.B.D. and J.P.P.d.C.—review and editing: O.H.A.J., E.A.d.S., E.R.d.L., S.V.B.D. and J.P.P.d.C.; project administration: O.H.A.J.; funding acquisition: O.H.A.J. and J.P.P.d.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was partially supported by the FACEPE agency (Fundação de Amparo a Pesquisa de Pernambuco) throughout the project with references APQ-0616-9.25/21 and APQ-0642-9.25/22. O.H.A.J. was funded by the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), grant numbers 407531/2018-1, 303293/2020-9, 405385/2022-6, 405350/2022-8 and 406662/2022-3, as well as the Program in Energy Systems Engineering (PPGESE) Academic Unit of Cabo de Santo Agostinho (UACSA), Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE) and the Federal University of Latin American Integration (UNILA).

Data Availability Statement: The original contributions presented in the study are included in the article, further inquiries can be directed to the corresponding author.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Rowe, D.M. *CRC Handbook of Thermoelectrics*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 1995.
- Riffat, S.B.; Ma, X. Thermoelectrics: A Review of Present and Potential Applications. *Appl. Therm. Eng.* **2003**, *23*, 913–935. [[CrossRef](#)]
- Snyder, G.J. Small Thermoelectric Generators. *Electrochem. Soc. Interface* **2008**, *17*, 54–56.
- Ding, L.C.; Akbarzadeh, A.; Tan, L. A review of power generation with thermoelectric system and its alternative with solar ponds. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *81*, 799–812.
- Gao, M. *Thermoelectric Energy Harvesting*; Artech House: Norwood, MA, USA, 2010; Volume 413–414, pp. 325–336.
- Ando Junior, O.H.; Maran, A.L.O.; Henao, N.C. A Review of the Development and Applications of Thermoelectric Microgenerators for Energy Harvesting. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *91*, 376–393. [[CrossRef](#)]
- Gao, M.; Rowe, D.M. Conversion Efficiency of Thermoelectric Combustion Systems. *IEEE Trans. Energy* **2007**, *22*, 528–534.
- Martins, J.; Goncalves, L.M.; Antunes, J.; Brito, F. *Thermoelectric Exhaust Energy Recovery with Temperature Control through Heat Pipes*; SAE International: Warrendale, PA, USA, 2011; pp. 1–23.
- Ismail, B.I.; Ahmed, W.H. Thermoelectric Power Generation Using Waste-Heat Energy as an Alternative Green Technology. In *Recent Patents on Electrical Engineering*; Bentham Science Publishers Ltd.: Potomac, MD, USA, 2009; Volume 2, pp. 27–39.
- Fairbanks, J. Vehicular Thermoelectric Applications. In Proceedings of the 6th European Conference on Thermoelectrics, Paris, France, 2–4 July 2008. Available online: <http://ect2008.icmpe.cnrs.fr> (accessed on 24 September 2012).
- Azarbayjani, M.; Anderson, J. Assessment of Solar Energy Conversion Technologies—Application of Thermoelectric Devices in Retrofit Office Building. In Proceedings of the Sixteenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates, Plano, TX, USA, 15–17 December 2008.
- Omer, S., A.; Infield, D.G. Design optimization of thermoelectric devices for solar power generation. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **1998**, *53*, 67–82.

13. Dalola, S.; Ferrari, V.; Guizzetti, M.; Marioli, D.; Sardini, E.; Serpelloni, M.; Taroni, A. Autonomous Sensor System with RF Link and Thermoelectric Generator for Power Harvesting. In Proceedings of the International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Victoria, BC, Canada, 12–15 May 2008.
14. Fernández-Yáñez, P.; Gómez, A.; García-Contreras, R.; Armas, O. Evaluating thermoelectric modules in diesel exhaust systems: Potential under urban and extra-urban driving conditions. *J. Clean. Prod.* **2018**, *182*, 1070–1079.
15. Kwan, T.H.; Wu, X.; Yao, Q. Multi-objective genetic optimization of the thermoelectric system for thermal management of proton exchange membrane fuel cells. *Appl. Energy* **2018**, *217*, 314–327.
16. Mamur, H.; Üstüner, M.A.; Bhuiyan, M.R.A. Future Perspective and Current Situation of Maximum Power Point Tracking Methods in Thermoelectric Generators. *Sustain. Energy Technol. Assess.* **2022**, *50*, 101824. [CrossRef]
17. Qasim, M.A.; Alwan, N.T.; PraveenKumar, S.; Velkin, V.I.; Agyekum, E.B. A New Maximum Power Point Tracking Technique for Thermoelectric Generator Modules. *Inventions* **2021**, *6*, 88. [CrossRef]
18. Shao, R.; Yang, B.; Chen, N.; Han, Y. Maximum Power Point Tracking of Thermoelectric Generation Systems Under Nonuniform Temperature Distribution: A State-of-the-Art Evaluation. *Front. Energy Res.* **2022**, *10*, 857261. [CrossRef]
19. Dalala, Z.M.; Saadeh, O.; Bdour, M.; Zahid, Z.U. A New Maximum Power Point Tracking (MPPT) Algorithm for Thermoelectric Generators with Reduced Voltage Sensors Count Control [†]. *Energies* **2018**, *11*, 1826. [CrossRef]
20. Mamur, H.; Coban, Y. Detailed Modeling of a Thermoelectric Generator for Maximum Power Point Tracking. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* **2020**, *28*, 124–139. Available online: <https://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/vol28/iss1/9> (accessed on 2 August 2023). [CrossRef]
21. Mamur, H.; Taşkin, S.; Aliüstüner, M. Modeling and Validation of the Thermoelectric Generator with Considering the Change of the Seebeck Effect and Internal Resistance. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* **2022**, *30*, 2688–2706. [CrossRef]
22. Ando, O.H.; Izidoro, C.L.; Gomes, J.M.; Correia, J.H.; Carmo, J.P.; Schaeffer, L. Acquisition and Monitoring System for TEG Characterization. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* **2015**, *11*, 531516. [CrossRef]
23. Izidoro, C.L.; Ando Junior, O.H.; Carmo, J.P.; Schaeffer, L. Characterization of Thermoelectric Generator for Energy Harvesting. *Measurement* **2017**, *106*, 283–290. [CrossRef]
24. Ando Junior, O.H.; Calderon, N.H.; De Souza, S.S. Characterization of a Thermoelectric Generator (TEG) System for Waste Heat Recovery. *Energies* **2018**, *11*, 1555. [CrossRef]
25. Kramer, L.R.; Maran, A.L.O.; de Souza, S.S.; Ando Junior, O.H. Analytical and Numerical Study for the Determination of a Thermoelectric Generator's Internal Resistance. *Energies* **2019**, *12*, 3053. [CrossRef]
26. Chamby Espejo, S.C.; Silva de Souza, S.; Ando Junior, O.H. Development of a Biochemical Oxygen Demand Incubator Prototype Based on Thermoelectric Effect with Monitoring System. *IEEE Lat. Am. Trans.* **2020**, *18*, 2037–2046. [CrossRef]
27. Oliveira Maran, A.L.; Guerrero Martin, C.A.; Montes-Páez, E.; Ando Junior, O.H. Modelling and Simulation of a Thermoelectric Waste Heat Recovery System—TWRHS. *DYNA* **2021**, *88*, 265–272. [CrossRef]
28. Calderón-Henao, N.; Venturini, O.J.; Franco, E.H.M.; Eduardo Silva Lora, E.; Scherer, H.F.; Maya, D.M.Y.; Ando Junior, O.H. Numerical-Experimental Performance Assessment of a Non-Concentrating Solar Thermoelectric Generator (STEG) Operating in the Southern Hemisphere. *Energies* **2020**, *13*, 2666. [CrossRef]
29. Ando Junior, O.H. Microgerador termoelétrico para captação de energia baseado no efeito seebeck com sistema de transferência de calor intercambiável. BR n° BR1020130279471, 30 out. 2013, 04 fev. 2014. Revista da Propriedade Industrial, v. 1, n. 2254, 2014.
30. Oliveira, F.M.; Ledesma, J.J.G.; Ando Junior, O.H. *Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT) Para Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica: Técnicas, Implementação e Desempenho sob Sombreamento Parcial*; CRV: Curitiba, Brazil, 2024; Volume 1, p. 284. [CrossRef]
31. Watanabe, R.B.; Ando Junior, O.H.; Leandro, P.G.M.; Salvadori, F.; Beck, M.F.; Pereira, K.; Brandt, M.H.M.; de Oliveira, F.M. Implementation of the Bio-Inspired Metaheuristic Firefly Algorithm (FA) Applied to Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Systems. *Energies* **2022**, *15*, 5338. [CrossRef]
32. Oliveira, F.M.; Mariano, A.C.S.; Salvadori, F.; Ando Junior, O.H. Power Management and Power Quality System Applied in a Single-Phase Nanogrid. *Energies* **2022**, *15*, 7121. [CrossRef]
33. Oliveira, F.M.; Brandt, M.H.M.; Salvadori, F.; Izquierdo, J.E.E.; Cavallari, M.R.; Ando Junior, O.H. Development of an MPPT-Based Genetic Algorithm for Photovoltaic Systems versus Classical MPPT Techniques in Scenarios with Partial Shading. *Inventions* **2024**, *9*, 64. [CrossRef]
34. Barbi, I. *Eletrônica de Potência*; Edição do Autor: Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2005. Available online: <https://inep.ufsc.br/livros/> (accessed on 2 August 2023).
35. Barbi, I.; Martins, D.C. *Conversores CC-CC Básicos Não Isolados*; Edição dos Autores: Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2000. Available online: <https://inep.ufsc.br/livros/> (accessed on 2 August 2023).
36. Dileep, G.; Singh, S.N. Selection of non-isolated DC-DC converters for solar photovoltaic system. *Renew. Sustain. Energy Reviews* **2017**, *76*, 1230–1247. [CrossRef]

37. inbThermoelectric. inbC1-127.08HTS Thermoelectric Power Generation Datasheet. Available online: <http://www.inbthermoelectric.com/Thermoelectric-Peltier-Modules/Power-Generators/inbC1-127.08HTS.html> (accessed on 24 April 2024).
38. Thermonamic. *TEHP1-24156-1.2 Thermoelectric Module Datasheet*; Thermonamic: Xiamen, China, 2022. Available online: <https://www.thermonamic.com/TEHP1-24156-1.2-English.pdf> (accessed on 19 April 2024).

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.



Article

Design and Performance Analysis of MPPT Algorithms Applied to Multistring Thermoelectric Generator Arrays Under Multiple Thermal Gradients

Emerson Rodrigues de Lira ^{1,2}, Eder Andrade da Silva ^{2,3}, Sergio Vladimir Barreiro Degiorgi ¹, João Paulo Pereira do Carmo ⁴ and Oswaldo Hideo Ando Junior ^{2,3,*}

¹ Postgraduate Program in Physics Engineering (PPGENGFIS), Academic Unit of Cabo de Santo Agostinho (UACSA), Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE), Cabo de Santo Agostinho 54518-430, PE, Brazil; emerson.rlira@ufrpe.br (E.R.d.L.); sergio.barreiro@ufrpe.br (S.V.B.D.)

² Research Group on Energy & Energy Sustainability (GPEnSE), Center for Alternative and Renewable Research (CEAR), Federal University of Paraíba (UFPB), João Pessoa 58051-900, PB, Brazil; ea.silva.2020@aluno.unila.edu.br

³ Interdisciplinary Postgraduate Program in Energy & Sustainability (PPGIES), Federal University of Latin American Integration—UNILA, Paraná City 85867-000, PR, Brazil

⁴ Group of Metamaterials Microwaves and Optics (GMeta), Department of Electrical Engineering (SEL), University of São Paulo (USP), Avenida Trabalhador São-Carlense, Nr. 400, Parque Industrial Arnold Schmidt, São Carlos 13566-590, SP, Brazil; jcarmo@sc.usp.br

* Correspondence: oswaldo.junior@cear.ufpb.br

Abstract

Thermoelectric systems configured in multistring arrays of thermoelectric generators (TEGs) represent a promising solution for energy harvesting in environments with non-uniform thermal gradients. However, the presence of multiple maximum power points (MPPs) in such configurations poses significant challenges to energy extraction efficiency. This study presents a comprehensive performance evaluation of four maximum power point tracking (MPPT) algorithms, Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (InC), Particle Swarm Optimization (PSO), and Genetic Algorithm (GA), applied to multistring thermoelectric generator (TEG) arrays under multiple and asymmetric thermal gradients. The simulated systems, modeled in MATLAB/Simulink, replicate real-world thermoelectric configurations by employing series-parallel topologies and eleven distinct thermal scenarios, including uniform, localized, and sinusoidal temperature distributions. The key contribution of this work lies in demonstrating the superior capability of metaheuristic algorithms (PSO and GA) to locate the global maximum power point (GMPP) in complex thermal environments, outperforming classical methods (P&O and InC), which consistently converged to local maxima under multi-peak conditions. Notably, PSO achieved the best average convergence time (0.23 s), while the GA recorded the fastest response (0.05 s) in the most challenging multi-peak scenarios. Both maintained high tracking accuracy (error $\approx 0.01\%$) and minimized power ripple, resulting in conversion efficiencies exceeding 97%. The study emphasizes the crucial role of algorithm selection in maximizing energy harvesting performance in practical TEG applications such as embedded systems, waste heat recovery, and autonomous sensor networks. Future directions include physical validation through prototypes, incorporation of dynamic thermal modeling, and development of hybrid or AI-enhanced MPPT strategies.

Keywords: thermoelectric generators (TEGs); multistring arrays; maximum power point tracking (MPPT); thermal gradient simulation; energy harvesting



Academic Editors: Stanislav Boldyryev, Bohong Wang and Timothy Gordon Walmsley

Received: 16 November 2025

Revised: 8 December 2025

Accepted: 14 December 2025

Published: 18 December 2025

Citation: Lira, E.R.d.; Silva, E.A.d.; Degiorgi, S.V.B.; Carmo, J.P.P.d.; Ando Junior, O.H. Design and Performance Analysis of MPPT Algorithms Applied to Multistring Thermoelectric Generator Arrays Under Multiple Thermal Gradients. *Energies* **2025**, *18*, 6613. <https://doi.org/10.3390/en18246613>

Copyright: © 2025 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

In recent years, thermoelectric power generation systems based on thermoelectric generator modules (TEGs) have emerged as promising alternatives for low-power applications and waste heat recovery [1–4]. These devices, based on the Seebeck effect, directly convert temperature differences into electrical energy, offering advantages such as the absence of moving parts, low maintenance, and modular scalability [5]. However, the conversion efficiency of TEGs remains limited, being strongly influenced by the applied thermal gradients and the characteristics of the semiconductor materials employed [6,7].

Beyond the intrinsic physical limitations of the thermoelectric material, the energy performance of TEG systems also depends on the proper use of electronic converters and maximum power point tracking (MPPT) techniques [8]. In environments with thermal variation and dynamic load behavior, MPPT algorithms become fundamental to ensuring operation near the point of maximum energy transfer, minimizing losses, and optimizing power extraction from the generators [9–11].

Several approaches have been proposed in the literature to implement MPPT in thermoelectric systems [12,13]. While extensive comparisons exist for Photovoltaic (PV) systems, specific literature regarding Multistring TEG arrays remains less comprehensive. Current methodologies range from classic methods like Perturb and Observe (P&O) and Incremental Conductance (InC) [14] to meta-heuristic techniques such as Particle Swarm Optimization (PSO) and Genetic Algorithms (GAs) [15–18]. Each of these methods has specific characteristics regarding accuracy, response time, robustness against environmental variations, and computational complexity [19,20]. However, most comparative studies focus on uniform thermal conditions, often neglecting the complex multi-peak phenomena that arise in large-scale multistring TEG configurations under asymmetric gradients.

This research is part of a broader line of research and development (R&D) by the Energy and Sustainability Research Group (GPEnSE), focused on the development of solid-state generators, self-powered devices, and autonomous sensors based on energy harvesting [21–29]. While previous comprehensive design methodologies developed by the group were crucial for optimizing TEG proofs of concept, the selection of effective control strategies remains a fundamental subset for ensuring maximum power extraction in these autonomous devices. The comparative analysis of MPPT algorithms, therefore, becomes an essential step for the practical implementation of such systems.

In this context, the present study aims to conduct a comprehensive comparative analysis of different MPPT algorithms applied to TEG systems, considering various thermal operation scenarios and gradient distribution profiles. For this purpose, computational models were developed in the MATLAB/Simulink environment, encompassing thermoelectric generation blocks, boost converters, and controllers based on each tracking method. The simulation, based on 11 distinct scenarios, evaluates indicators such as tracking efficiency, convergence time, and steady-state stability, with a particular focus on behavior under multiple maximum power points (MPPs).

The main contributions of this study are summarized as follows:

Development of a Scalable Simulation Framework: A reproducible MATLAB/Simulink environment for multistring TEG arrays (up to 196 modules), capable of simulating complex series-parallel configurations and asymmetric thermal gradients often omitted in standard PV-centric literature.

Comparative Assessment of Control Strategies: A rigorous evaluation of four MPPT algorithms (P&O, InC, PSO, and GA) under identical constraint conditions, establishing benchmarks for convergence speed, steady-state ripple, and tracking accuracy in multi-peak scenarios.

Analysis of Algorithm Limitations in Non-Uniform Gradients: The study explicitly categorizes failure modes of classical algorithms in specific thermal asymmetry scenarios, providing design guidelines for selecting control strategies in real-world waste heat recovery applications where thermal uniformity cannot be guaranteed.

This paper is structured to guide the reader through the modeling, development, and performance analysis of MPPT algorithms for thermoelectric energy harvesting. Section 2 presents the conceptual design of the simulation framework, including the computational modeling of thermoelectric modules, implementation of the four MPPT algorithms (P&O, InC, PSO, GA), and the construction of eleven thermal scenarios. Section 3 details the numerical analysis of the simulations and presents a comparative performance evaluation based on convergence time, tracking accuracy, and power ripple. Section 4 discusses the results and highlights the strengths and limitations of each algorithm in ideal and complex scenarios. Finally, Section 5 summarizes the main conclusions and outlines future research directions for experimental validation and modeling improvements.

2. Design, Computational Modeling, and Development

This section details the methodology employed in the development and simulation of the system components. It addresses the modeling of the thermoelectric generator (TEG), the implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms, and finally, the design of the thermal and electrical scenarios used to validate and compare the performance of the methods. The computational tools and simulation parameters are described to ensure the reproducibility of the results.

2.1. Thermoelectric Module Modeling

The modeling focuses on the power generation of thermoelectric generator (TEG) modules, primarily considering the Seebeck coefficient, internal electrical resistance, and temperature gradients. Thermal resistance and convection aspects were disregarded, as they are assumed to not significantly alter the steady-state P-V curve shape for the purpose of MPPT algorithm comparison.

The MATLAB[®] and Simulink[®] (Version R2023a) software programs were employed for modeling and simulation. MATLAB[®] was used for algorithm testing and graph generation, while Simulink[®] allowed for the assembly of the converter circuit, TEG blocks, and MPPT methods, leveraging its libraries of electrical components, logic gates, and controllers.

The simulation parameters were based on [30,31]. The Seebeck coefficient and internal resistance parameters were extracted from the inbC1-127.08HTS module datasheet and applied uniformly to all TEGs, varying only the thermal gradient and the series/parallel configuration. The primary data of the TEG modules used in the simulations are summarized in Table 1.

Table 1. Data of the TEGs used in the Scenario simulations.

Description	Value
Seebeck coefficient	0.048 V/°C
Individual internal resistance	1.655 Ω
Number of modules in series	6
Gradients	From 0° to 80 °C
Gradient increment interval	5 °C

The structure of the TEG simulation block is presented in Figure 1. The internal view (a) shows the “ΔT Gradient” block calculating the difference between the TH and TC temperatures. This gradient is multiplied by the Seebeck coefficient and the number of

modules in series, resulting in the open-circuit voltage (VOC) applied to a controlled voltage source and internal resistance. The external view (b) shows the block as implemented in Simulink.

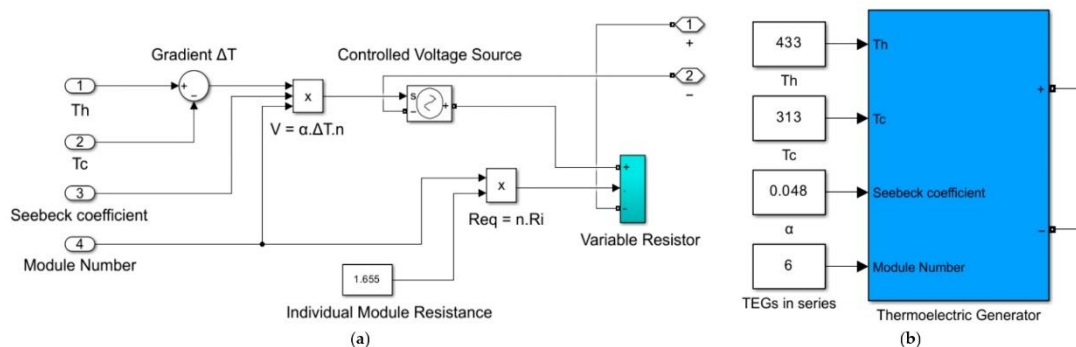


Figure 1. Internal (a) and external (b) view of the implemented thermoelectric modules.

Figure 2 illustrates the linearity of the Seebeck law. It is important to highlight the limitations of this modeling approach. The simulation treats TEGs as voltage sources dependent on temperature difference and internal resistance, explicitly disregarding dynamic thermal resistance, convection losses, and the Peltier effect (cooling due to current flow). While these factors influence the absolute magnitude of power generation and thermal settling times in physical systems, the primary objective of this study is the comparative logic of MPPT algorithms under instantaneous electrical P-V curves. The formation of local and global maxima (multi-peak behavior) results fundamentally from the electrical interconnection of modules under different gradients. Therefore, this simplified electrical model is sufficient and valid for stress-testing the tracking algorithms' ability to navigate complex search spaces, which is the core contribution of this work.

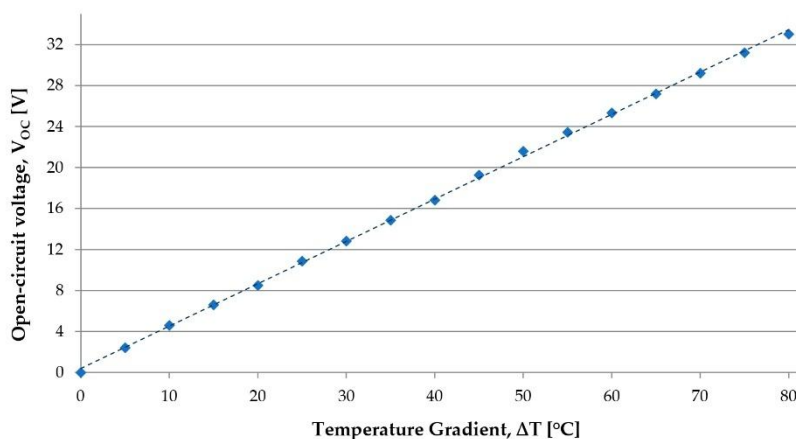


Figure 2. Graph of open-circuit voltages.

To obtain the characteristic power curves, a variable load circuit, detailed in Figure 3, was used. This circuit allowed for sweeping the TEG's operation and generating the I-V (a) and P-V (b) curves presented in Figure 4, which are fundamental for the analysis of the maximum power point (MPP).

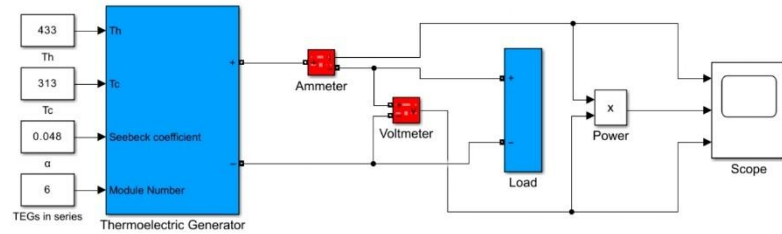


Figure 3. Demonstration of the circuit with a variable load.

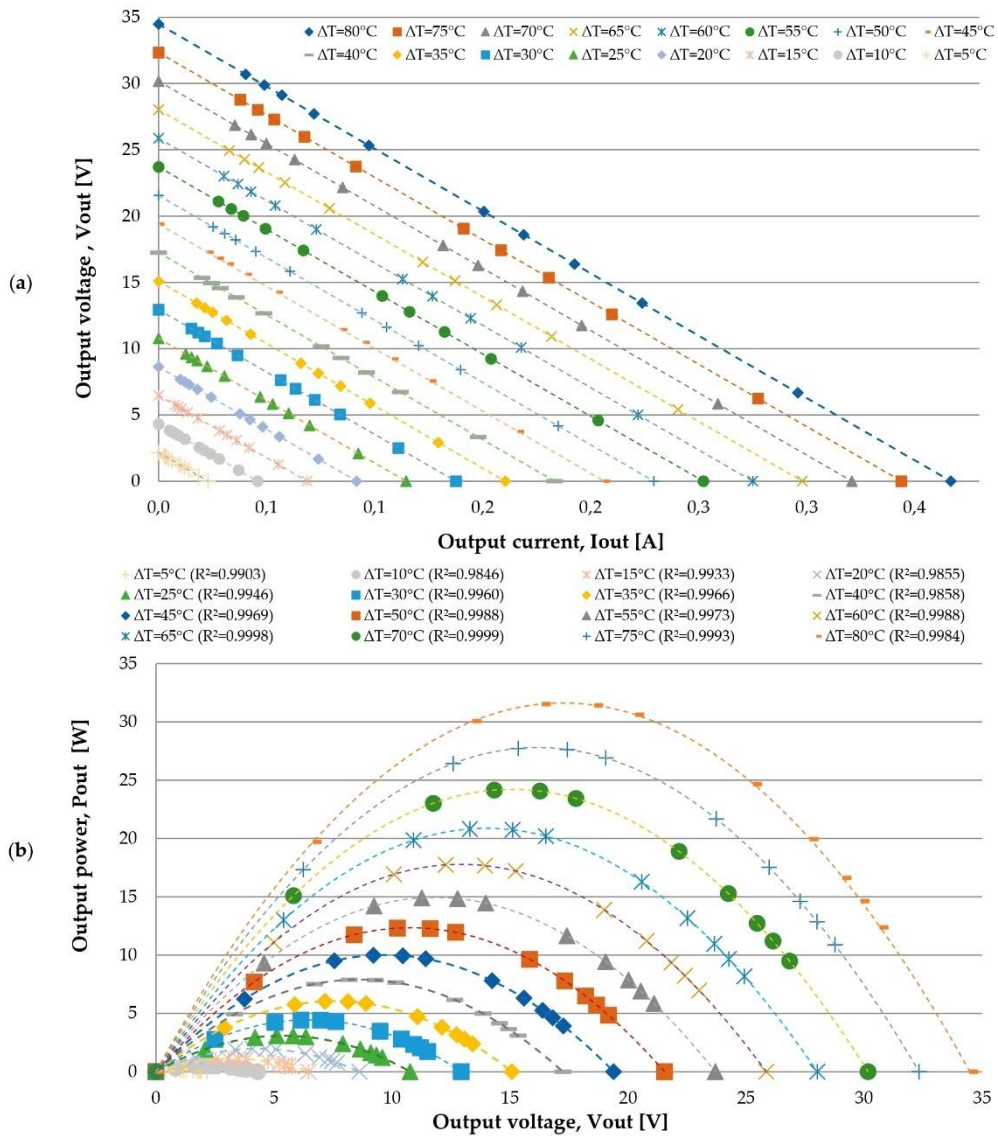


Figure 4. Graphs of current versus voltage (a) and power versus voltage (b) with resistive load.

2.2. MPPT Algorithm Implementation

The MPPT block controls the duty cycle of the DC-DC converter based on voltage and current measurements, generating a PWM signal via a comparator and a triangular wave generator. The logic of each algorithm is encapsulated in a MATLAB Function block in Simulink®, with voltage, current, and timer inputs. To smooth the ripple of the DC-DC signals, which affects the measurements, a digital moving average (low-pass) filter with a 100-sample window was adopted. The sampling frequency was ten times higher than the PWM frequency, satisfying the Nyquist criterion and preserving the mean value of the signal. Four distinct MPPT algorithms were implemented for comparison.

The Perturb & Observe (P&O) algorithm, based on [30], calculates the input power at each period T and compares the voltage (ΔV) and power (ΔP) variations to adjust the duty cycle D_0 . The adjustment parameters used for the P&O method are detailed in Table 2.

Table 2. Adjustments for the P&O and InC methods.

Description	Value
Period T	20 ms
Increment Δd	0.03
Initial Duty cycle D_0	0.65

Similarly, the Incremental Conductance (InC) algorithm replaces the absolute variations with approximated derivatives $\Delta V \rightarrow \Delta V$ and $\Delta I \rightarrow \Delta I$. The adjustment parameters for InC, were kept identical to those of P&O to allow for a direct performance comparison.

For the P&O and InC methods, a fixed step size ($\Delta d = 0.03$) was selected. While variable step-size algorithms exist to optimize the trade-off between speed and oscillation, a fixed step was chosen to establish a standardized baseline. This ensures that the comparison focuses on the algorithms' inherent ability (or failure) to escape local maxima, rather than on the tuning optimization of adaptive steps. The Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, introduced by Kennedy and Eberhart [32] and adapted from the implementation by Raza [33], begins with a population of N individuals (duty cycles) randomly generated. The velocity (v_i) and position (x_i , or duty cycle) of each particle are updated at each iteration, according to Equations (1) and (2), respectively.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (1)$$

$$v_i(t+1) = w \times v_i(t) + c_1 \times \text{rand}(0,1) \times (P_{best}(i) - x_i(t)) + c_2 \times \text{rand}(0,1) \times (G_{best} - x_i(t)) \quad (2)$$

Stopping criteria include the maximum number of iterations or a percentage approximation to the theoretical power. A re-initialization criterion is activated if the power (ΔP) or voltage (ΔV) variation exceeds a threshold, as per Equation (3).

Regarding the stopping criteria, the simulation utilizes a threshold based on the theoretical maximum power to precisely quantify the "Time to Convergence" metric during benchmarking. It must be emphasized that in a physical hardware implementation, where the theoretical global maximum is unknown, the stopping criterion would rely on standard steady-state detection or a fixed generation limit, as is standard in metaheuristic deployments. The theoretical power reference is used here strictly as a simulation validation tool. The adjustment parameters for PSO are defined in Table 3.

In the simulation environment, the stopping criterion for the PSO algorithm and GA was defined as a percentage approximation of the theoretical maximum power. This approach was adopted exclusively for benchmarking purposes, allowing for a standardized

and measurable comparison of convergence times and accuracy across all MPPT techniques under controlled conditions.

Table 3. Adjustments for the PSO method.

Description	Value
Particle measurement/re-initialization trigger interval	8 ms
Population	15
Iterations	3
Inertia factor	0.9
Local correction factor c_1	0.5
Global correction factor c_2	0.5
Stopping criterion ΔP	<0.4%
Re-initialization criterion	$P_{medido} < 95\% P_{global}$ $P_{medido} > 105\% P_{global}$

However, it is essential to emphasize that this criterion is not applicable in real-world implementations, since the actual global maximum power point (GMPP) is unknown during operation. Consequently, the use of the theoretical power as a reference may artificially favor global search algorithms, such as PSO and the GA, by guiding them directly toward the known optimal region in simulation.

In practical hardware-based systems, alternative and realistic stopping criteria should be used instead, such as: (i) A fixed maximum number of iterations; (ii) A minimal change in fitness or output power across successive iterations; (iii) Detection of steady-state conditions using sliding windows or thresholds; and (iv) Derivative-based convergence (e.g., when dP/dt approaches zero).

Therefore, the use of the theoretical power reference in this study should be interpreted as a simulation-only tool, with no implication or advantage in physical systems. Future work should consider implementing more realistic criteria to better reflect the behavior of MPPT algorithms in embedded applications or real thermoelectric systems.

$$\Delta P < \left| \left(1 - \frac{P_{medida}}{P_{teórica}} \right) \right| \quad (3)$$

The Genetic Algorithm (GA) begins with a population of bit sequences (genes) converted into duty cycles. At each generation, selection by relative fitness occurs, followed by random single-point crossover and bit-wise mutation with a probability p_m . Table 4 demonstrates the crossover process. The GA configuration parameters are listed in Table 5.

Table 4. Demonstration of crossover in GA.

Variable	Bit Set
Individual 1	10101010
Individual 2	11001100
Offspring 1	10101100
Offspring 2	11001010

Table 5. Adjustments for the GA method.

Description	Value
Particle measurement/re-initialization trigger interval	10 ms
Population	16

Table 5. Cont.

Description	Value
Generations	3
Gene size (bits)	8
Mutation rate	0.02
Stopping criterion ΔP	<0.4%
Re-initialization criterion	$P_{medido} < 95\% P_{global}$ $P_{medido} > 105\% P_{global}$

2.3. Thermal Scenario Development

To comprehensively evaluate the stability, efficiency, and convergence time of the MPPT algorithms, eleven distinct scenarios were designed. The rules for scenario selection were defined to test the algorithms' performance under multiple critical operating conditions [34].

Table 6 summarizes the configuration data for each of the eleven simulated scenarios, including the gradient range, theoretical maximum power (MPP), thermal profile, and the number of TEGs. Figure 5 illustrates the TEG connections, while the scenarios analyzed in this research include:

Table 6. Simulation scenario data.

Scen.	ΔT (°C)	P (W)	Thermal Prof.	N° TEG	Objective
1	120 °C	114.8	Constant	24	Measure performance under ideal conditions
2	30–120 °C	15.77	Constant	24	Measure performance on modules with a P-V curve with 1 LMPP and 1 MPP
3	30–100 °C	19.59	Constant	24	Measure performance on modules with a P-V curve with 2 LMPPs and 1 MPP
4	105–120 °C	101.3	Constant	24	Measure performance on modules with a higher gradient located in the center
5	110–120 °C	103.6	Constant	24	Measure performance on modules with a higher gradient located at the end
6	80–120 °C	114.8	Sinusoidal	24	Evaluate adaptation to gradient changes
7	70–120 °C	71.03	Constant	24	Compare convergence time and efficiency
8	100–120 °C	96.02	Constant	24	Compare convergence time and efficiency
9	120 °C	962.9	Constant	196	Verify convergence time
10	60–120 °C	454.9	Constant	196	Measure performance on modules with a higher gradient located in the center
11	60–120 °C	591.2	Constant	196	Measure performance on modules with a higher gradient located in a central band

Ideal Conditions (Scenario 1): A constant and uniform thermal gradient to measure baseline performance.

Multiple Maxima Conditions (Scenarios 2–5, 10, 11): Non-uniform gradients (stepped or banded) that create P-V curves with multiple local maximum power points (LMPPs) and a single global maximum power point (GMPP), testing the algorithms' ability to avoid local optima.

Dynamic Conditions (Scenario 6): A sinusoidal gradient profile to assess the algorithms' adaptation speed and stability to thermal changes.

Gradient Variations (Scenarios 7, 8): Constant profiles but with different average gradient levels.

Scalability (Scenarios 9–11): An increase in the number of TEG modules (from 24 to 196) to verify convergence time in larger systems.

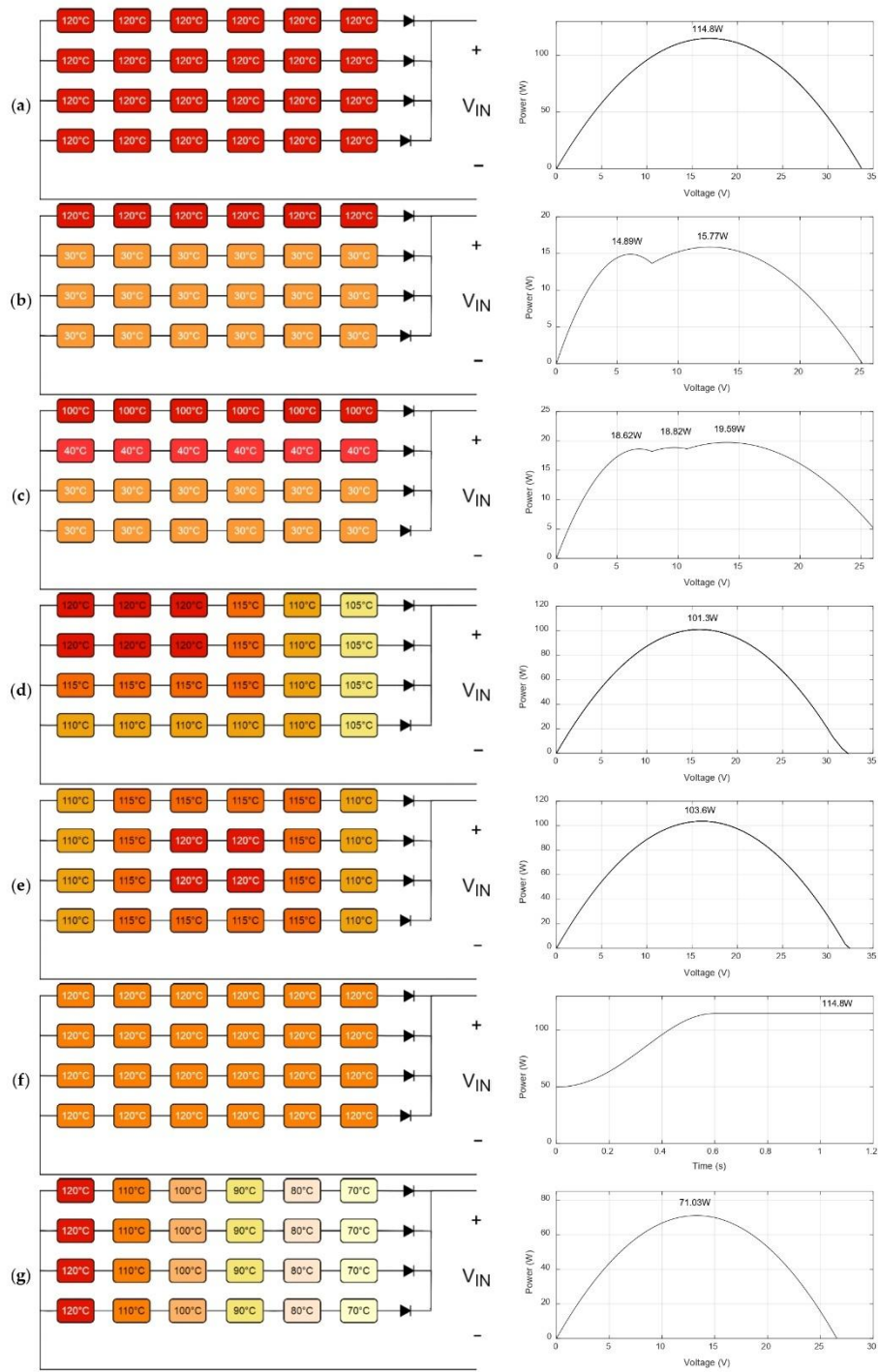


Figure 5. Cont.

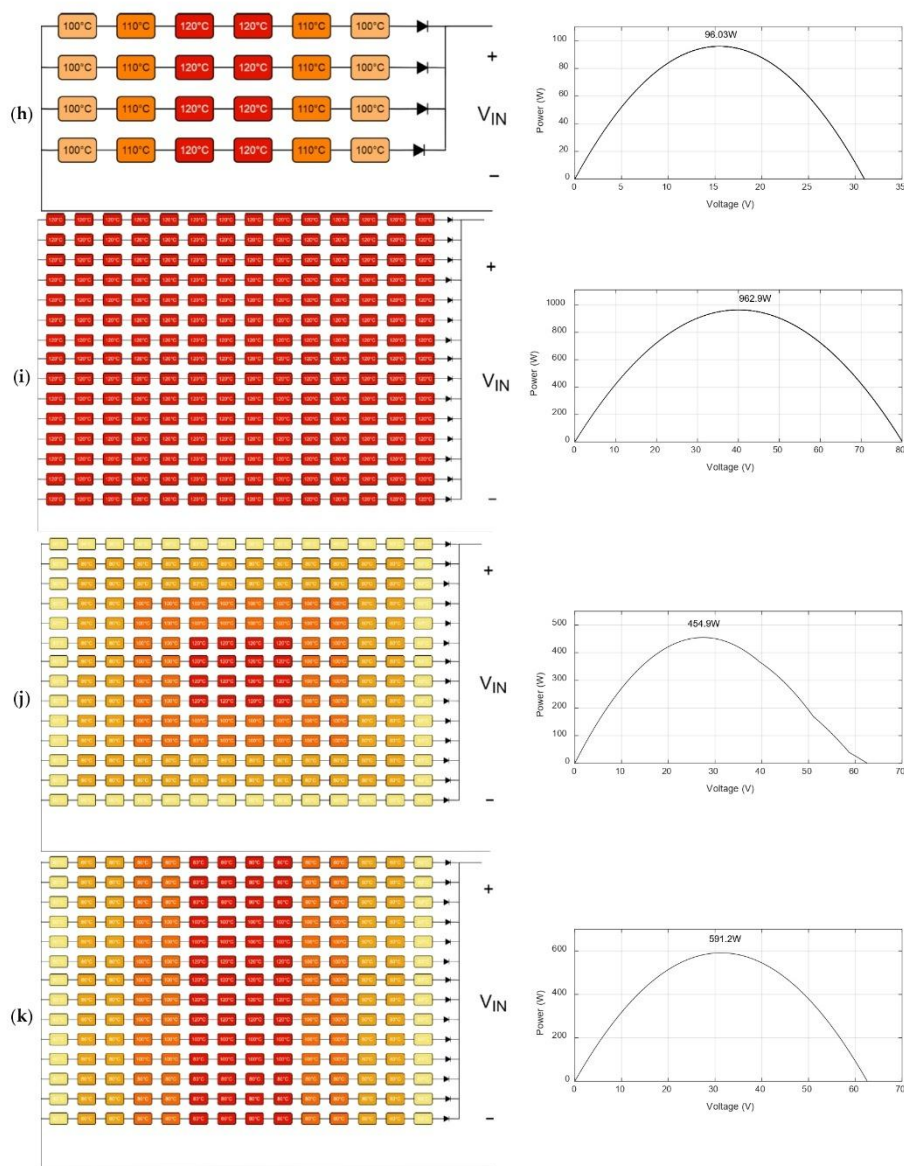


Figure 5. TEG connection, gradient distribution, and P-V curves for the scenarios (a–k).

To provide a visual basis for performance comparison, Figure 5 illustrates the TEG connections, the spatial distribution of the thermal gradient, and the resulting P-V curves for each of the eleven scenarios (a–k). This figure is crucial for understanding the complexity that each scenario imposes on the MPPT algorithms, especially the formation of multiple power peaks in the non-uniform gradient scenarios.

3. Computational Numerical Analysis and Results

This section presents the numerical simulation results, beginning with the definition of the DC-DC converter design parameters. It then details the comparative analysis

of the MPPT algorithms in three selected validation scenarios (ideal, intermediate, and complex), which evaluate the accuracy, speed, and robustness of each method. The section culminates in a general performance evaluation, comparing the algorithms across all eleven simulated scenarios.

3.1. Converter Design Parameters

The converter parameters were chosen considering all implemented simulation scenarios, ensuring that the duty cycles corresponding to the GMPPs and LMPPs remained within the 0.1 to 0.9 range. For this, a load resistance of 16Ω was selected, the input power was determined, and Equations (4) and (5) were used to guarantee the duty cycles within this range. The inductor and capacitor calculations were performed using Equations (6) and (7), respectively.

$$D = 1 - \frac{V_{IN}}{V_{OUT}} \quad (4)$$

$$R_{OUT} = \frac{V_{OUT}^2}{P_{IN}} \quad (5)$$

$$L = \frac{DV_{IN}}{f\Delta i_L} \quad (6)$$

$$C = \frac{DI_{OUT}}{f\Delta V_C} \quad (7)$$

They were calculated for all scenarios, and the highest values for both were selected; subsequently, the nearest higher value from the E24 series was chosen for both. The selected switching frequency was 10 kHz, with a current ripple (Δi_L) of 30% of the maximum output current and a voltage ripple (ΔV_{OUT}) of 1% of the output voltage. It is important to note that for the large-scale scenarios (up to 196 modules), output voltages can exceed 120 V. Consequently, the component selection implies the use of capacitors and semiconductors with voltage ratings sufficient to withstand these stresses (e.g., >150 V) in a physical implementation. The resulting converter components are summarized in Table 7.

Table 7. Converter design parameters used in the simulation.

Parameters	Value	Description
R_L	16Ω	Load resistance
$V_{OUT,max}$	124.12 V	Input voltage
$I_{OUT,max}$	7.76 A	Maximum output current
Δi_L	30% of i_L	Ripple current (pk-pk)
ΔV_O	1% of V_O	Ripple voltage (pk-pk)
f	10 kHz	Switching frequency
L	750 μ H	Inductor
C	430 μ F	Capacitor

3.2. Scenario Selection Criteria

To evaluate the performance of the MPPT algorithms in representative situations, three scenarios were selected from the eleven simulated. The selection rules prioritized representativeness of operation, covering an ideal scenario (Scenario 1), an intermediate one with two power peaks (Scenario 2), and a complex one with three peaks (Scenario 3), to encompass different tracking challenges. Furthermore, realism was sought by using conditions of constant and asymmetrically distributed thermal gradients, typical of real thermoelectric system operation (e.g., shading, partial obstructions, gradient variations). Finally, the robustness criterion was applied to evaluate the operational stability, conversion efficiency, and convergence speed of each algorithm under these distinct conditions.

Scenario 1 uses 24 modules under a constant gradient (120 °C) with a single MPP. Scenario 2 simulates partial shading (30–120 °C gradients), generating one LMPP and one GMPP. Scenario 3, the most complex, features varied gradients (100 °C, 40 °C, 30 °C), resulting in three close power peaks, demanding greater exploration capability.

3.3. Analysis of Results for Scenario 1: Ideal Conditions

This subsection analyzes the performance of the four algorithms in Scenario 1, an ideal condition with a uniform gradient of 120 °C and a single maximum power point (GMPP) of 114.8 W. This scenario serves as a baseline to measure accuracy and convergence stability under conditions without local maxima.

The Perturb & Observe (P&O) method tracked an input power (P_{IN}) of 114.36 W, corresponding to a relative error of 0.38% compared to the GMPP. The observed power ripple was 2.39 W (2.09%), and the convergence time was 0.30 s, starting from an initial duty cycle of 0.65 and settling at 0.60. The detailed simulation data for P&O are presented in Table 8. Despite good accuracy in finding the MPP, the algorithm exhibited high ripple, a characteristic behavior of this method which uses constant perturbations. The power and duty cycle curves over time, shown in Figure 6, demonstrate the incremental nature of the algorithm, which continuously adjusts the duty cycle around the MPP.

Table 8. Results for the P&O algorithm in Scenario 1.

Parameter	P&O Algorithm	Description
P_{IN}	114.36 W	Input power
P_{OUT}	111.33 W	Output power
V_O	42.20 V	Output voltage
I_O	2.64 A	Output current
Δi_L	30 mA	Load ripple current (pk-pk)
ΔV_O	450 mV	Load ripple voltage (pk-pk)
D	0.60	Average duty cycle
ΔD	0.019	Duty cycle oscillation
$t(s)$	0.30	Convergence time
η	97.3%	Conversion efficiency

The Incremental Conductance (InC) algorithm resulted in a tracked power of 114.37 W, with a relative error of 0.38% from the MPP and a power ripple of 1.68 W (1.47%), with a convergence time of 0.30 s. This behavior, detailed in Table 9, shows convergence equal to P&O but with smaller oscillations. Efficiency remained at 97.3%, with a (P_{OUT}) of 111.33 W. The power and duty cycle curves in Figure 7 show a response and output ripple similar to P&O.

Table 9. Results for the InC algorithm in Scenario 1.

Parameter	InC Algorithm	Description
P_{IN}	114.37 W	Input power
P_{OUT}	111.33 W	Output power
V_O	42.21 V	Output voltage
I_O	2.64 A	Output current
Δi_L	30 mA	Load ripple current (pk-pk)
ΔV_O	450 mV	Load ripple voltage (pk-pk)
D	0.60	Average duty cycle
t	0.30	Convergence time
η	97.3%	Conversion efficiency

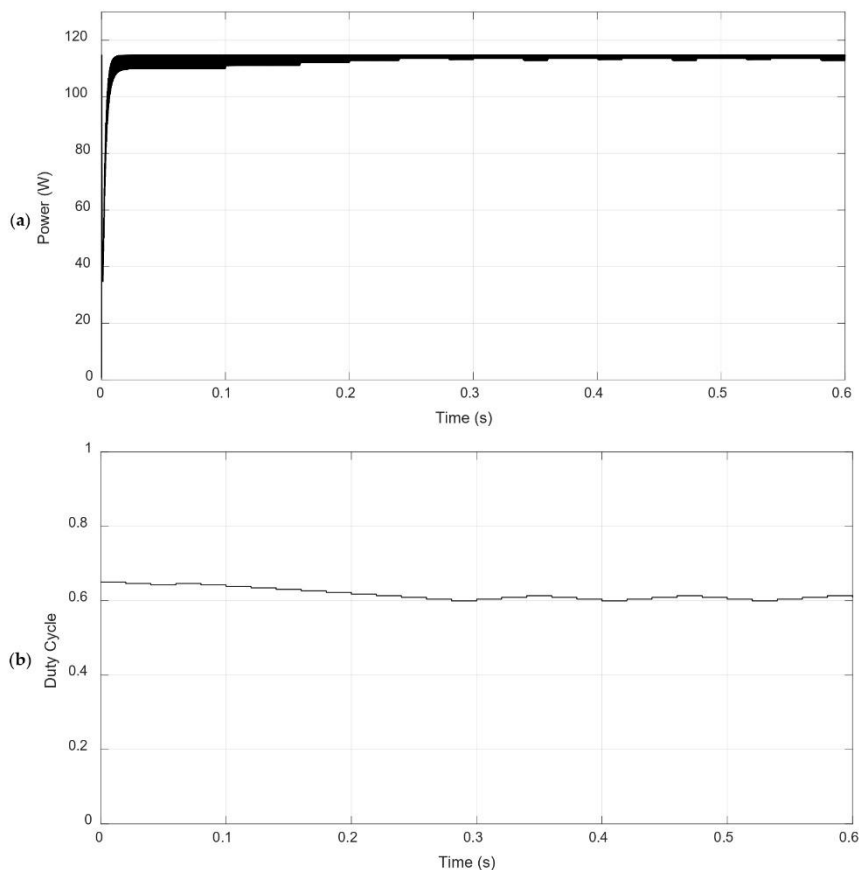


Figure 6. Power vs. time (a) and duty cycle vs. time (b) curves for the P&O method in Scenario 1.

To compensate for the randomness of Particle Swarm Optimization (PSO), an average of 10 simulations was performed. The average (P_{IN}) was 114.34 W (0.40% error), and the average convergence time was 0.24 s, the fastest among all methods in this scenario, as consolidated in Table 10. The output voltage and current remained at 42.20 V and 2.64 A, with 97.3% efficiency. The duty cycle evolution curves in Figure 8 show an active search for the MPP, respecting the stopping criterion (99.6% of theoretical power) or the end of iterations, resulting in efficient and stable convergence.

Table 10. Results for the PSO algorithm in Scenario 1.

Parameter	PSO Algorithm	Description
P_{IN}	114.34 W	Input power
P_{OUT}	111.31 W	Output power
V_O	42.20 V	Output voltage
I_O	2.64 A	Output current
Δi_L	20 mA	Load ripple current (pk-pk)
ΔV_O	370 mV	Load ripple voltage (pk-pk)
D	0.60	Average duty cycle
t	0.24 s	Convergence time
η	97.3%	Conversion efficiency

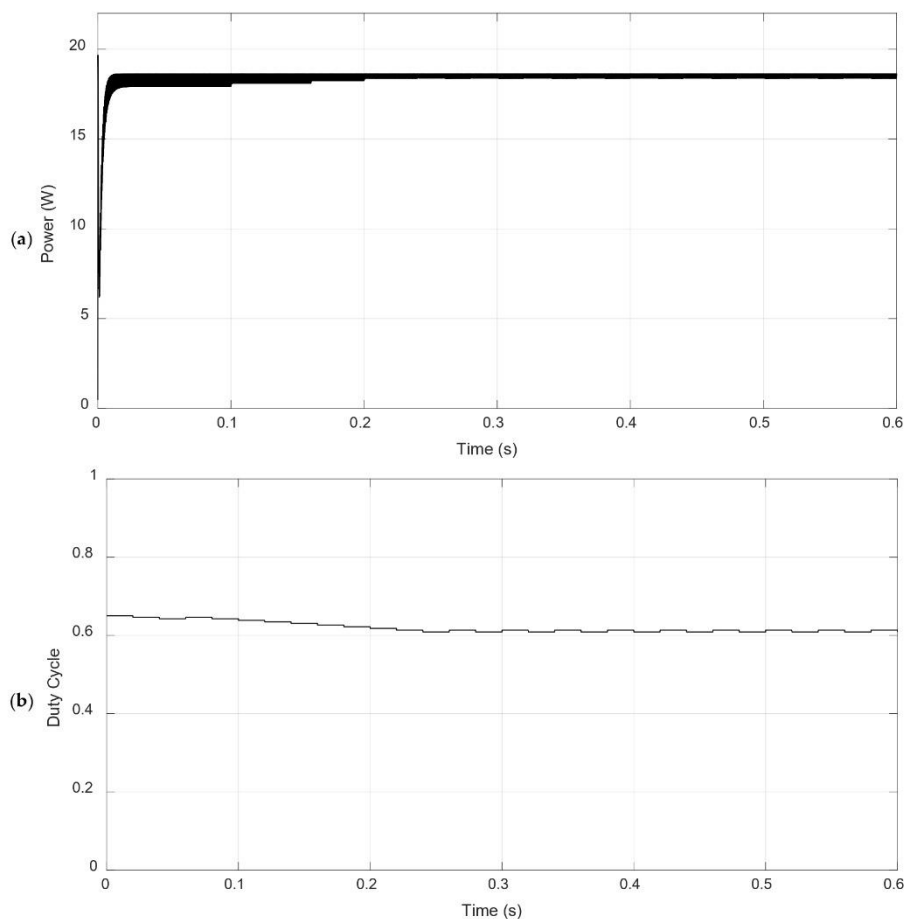


Figure 7. Power vs. time (a) and duty cycle vs. time (b) curves for the InC method in Scenario 1.

The Genetic Algorithm (GA), also averaged over 10 rounds, tracked $P_{IN} = 114.27$ W (0.42% error), with a ripple of 1.80 W (1.56%) and an average convergence time of 0.27 s, as detailed in Table 11. The average output voltage was 42.19 V, with $I_O = 2.64$ A and 97.3% efficiency. The duty cycle behavior in Figure 9 shows selection and genetic crossover converging to the MPP in a few generations, with stability comparable to PSO.

Table 11. Results for the GA in Scenario 1.

Parameter	GA	Description
P_{IN}	114.27 W	Input power
P_{OUT}	111.23	Output power
V_O	42.19 V	Output voltage
I_O	2.64 A	Output current
Δi_L	20 mA	Load ripple current (pk-pk)
ΔV_O	380 mV	Load ripple voltage (pk-pk)
D	0.60	Average duty cycle
t	0.27 s	Convergence time
η	97.3%	Conversion efficiency

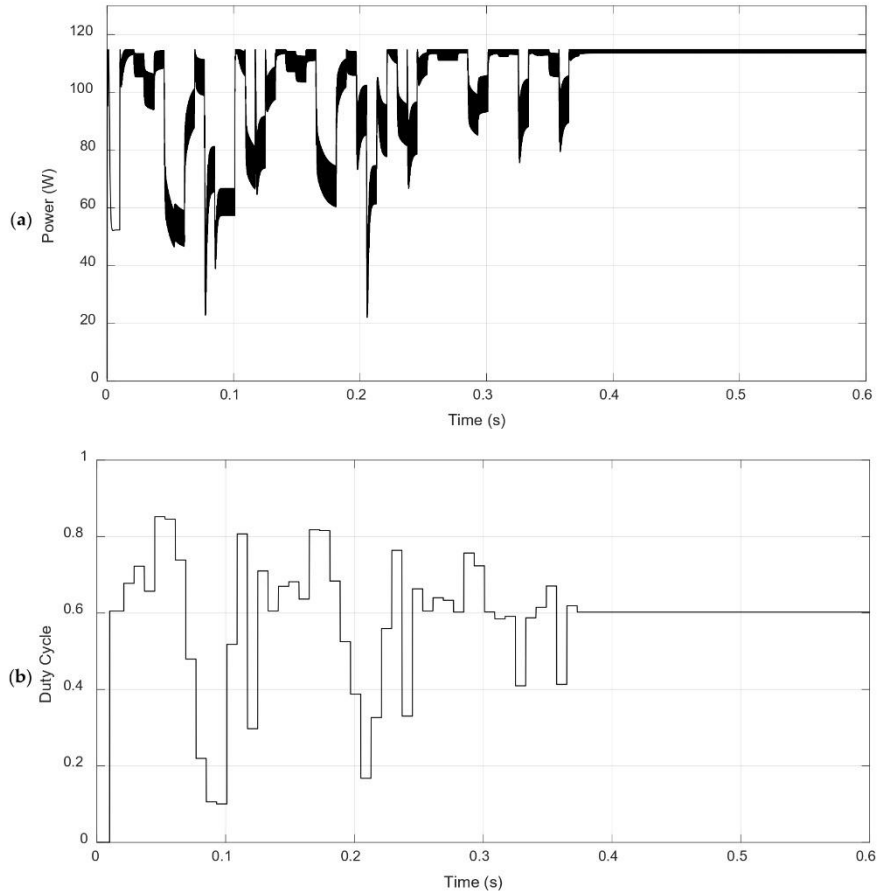


Figure 8. Power vs. time (a) and duty cycle vs. time (b) curves for the PSO method in Scenario 1.

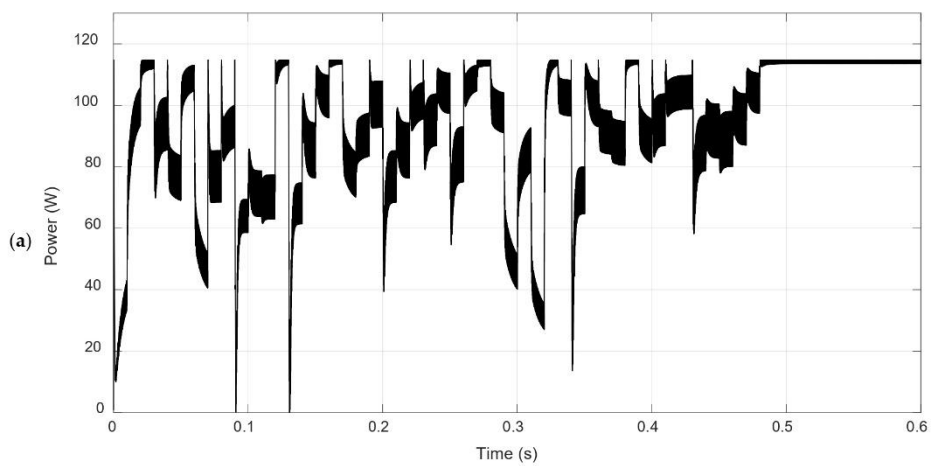


Figure 9. Cont.

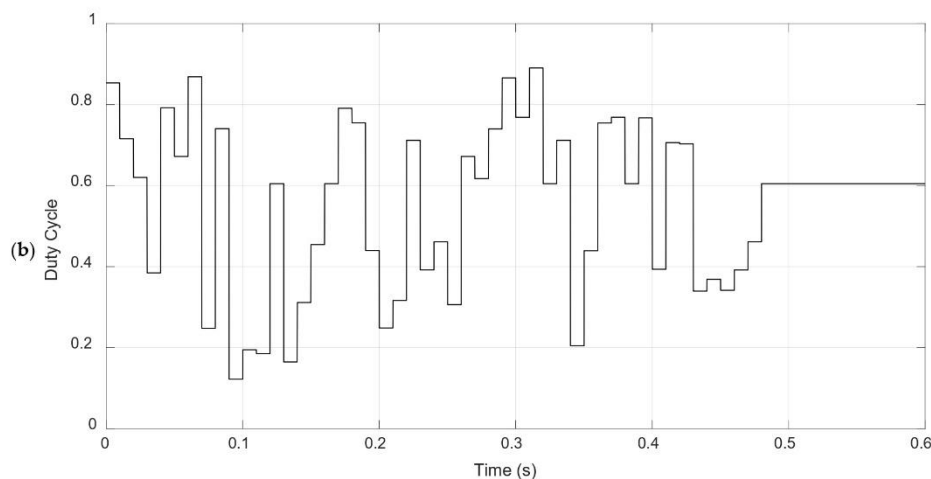


Figure 9. Power vs. time (a) and duty cycle vs. time (b) curves for the GA-based method—Scenario 1.

In summary, under ideal conditions (Scenario 1), all methods achieved errors below 0.5% and efficiency near 97.3%. PSO obtained the shortest convergence time (0.24 s), followed by the GA (0.27 s) and the P&O and InC methods (0.30 s). In terms of ripple, PSO and the GA showed lower voltage and current fluctuations, offering greater stability in power delivery, while P&O and InC, although accurate, maintain higher oscillation levels.

3.4. Analysis of Results for Scenario 2: Intermediate Gradients

In Scenario 2, the algorithms are challenged by a P-V curve with two power peaks (one LMPP and one GMPP of 15.77 W), simulating partial shading conditions. This scenario tests the methods' ability to avoid local optima.

The Perturb & Observe (P&O) tracked $P_{IN} = 14.83$ W, with a relative error of 5.9%, ripple of 0.31 W (2.12%), and a convergence time of 0.30 s. The algorithm converged to a duty cycle of 0.60, near the local maximum (LMPP), resulting in an output power of 13.96 W (94.1% efficiency), as detailed in Table 12.

Table 12. Results for the P&O algorithm in Scenario 2.

Parameter	P&O Algorithm	Description
P_{IN}	14.83 W	Input power
P_{OUT}	13.96 W	Output power
V_O	14.95 V	Output voltage
I_O	0.93 A	Output current
Δi_L	10 mA	Load ripple current (pk-pk)
ΔV_O	170 mV	Load ripple voltage (pk-pk)
D	0.60	Average duty cycle
t	0.30 s	Convergence time
η	94.1%	Conversion efficiency

The Incremental Conductance (InC) achieved $P_{IN} = 14.84$ W (5.91% error), ripple of 0.19 W (1.3%), and convergence in 0.26 s (see Table 13). The output power was 13.97 W (94.1% efficiency), demonstrating precision and speed similar to P&O, and like it, failing to locate the GMPP.

Table 13. Results for the InC algorithm in Scenario 2.

Parameter	InC Algorithm	Description
P_{IN}	14.84 W	Input power
P_{OUT}	13.97 W	Output power
V_O	14.95 V	Output voltage
I_O	0.93 A	Output current
Δi_O	10 mA	Load ripple current (pk-pk)
ΔV_O	16 mV	Load ripple voltage (pk-pk)
D	0.6	Average duty cycle
t	0.26 s	Convergence time
η	94.1%	Conversion efficiency

The Particle Swarm Optimization (PSO) tracked an average P_{IN} of 15.77 W (0.01% error), ripple of 0.45 W (2.9%), and an average convergence time of 0.07 s. The average output power was 14.92 W (94.5% efficiency). The data in Table 14 show a superior ability to find the GMPP compared to P&O and InC.

Table 14. Results for the PSO algorithm in Scenario 2.

Parameter	PSO Algorithm	Description
P_{IN}	15.77 W	Input power
P_{OUT}	14.92 W	Output power
V_O	15.45 V	Output voltage
I_O	0.97 A	Output current
Δi_L	3 mA	Load ripple current (pk-pk)
ΔV_O	50 mV	Load ripple voltage (pk-pk)
D	0.21	Average duty cycle
t	0.07 s	Convergence time
η	94.5%	Conversion efficiency

The Genetic Algorithm (GA) obtained an average power of 15.77 W (0.01% error), average ripple of 0.43 W (2.7%), and an average convergence time of 0.06 s, being the fastest in this scenario. As shown in Table 15, the GA demonstrated the best performance, locating the GMPP with slightly lower ripple values than PSO.

Table 15. Results for the GA in Scenario 2.

Parameter	GA	Description
P_{IN}	15.77 W	Input power
P_{OUT}	14.91 W	Output power
V_O	14.44 V	Output voltage
I_O	0.97 A	Output current
Δi_L	3 mA	Load ripple current (pk-pk)
ΔV_O	53.3 mV	Load ripple voltage (pk-pk)
D	0.21	Average duty cycle
t	0.06 s	Convergence time
η	94.5%	Conversion efficiency

In summary, in Scenario 2, the GA and PSO found the GMPP with the lowest error (0.01%) and similar, rapid average convergence times, with the GA being slightly faster (0.06 s) than PSO (0.07 s). P&O and InC failed to locate the GMPP, converging on a local maximum and confirming their limitations on curves with multiple peaks.

3.5. Analysis of Results for Scenario 3: Complex Multi-Peak Gradients

Scenario 3 represents the most complex condition, with three close power peaks (GMPP of 19.59 W) due to varied thermal gradients (100 °C, 40 °C, 30 °C). This analysis tests the exploration capability and robustness of the algorithms.

The Perturb & Observe (P&O) method tracked $P_{IN} = 18.55$ W (5.3% error), ripple of 0.39 W (2.11%), and converged in 0.30 s. However, as detailed in Table 16, it remained at the first local maximum (LMPP), resulting in an output power of 17.56 W (94.7% efficiency).

Table 16. Results for the P&O algorithm in Scenario 3.

Parameter	P&O Algorithm	Description
P_{IN}	18.55 W	Input power
P_{OUT}	17.56 W	Output power
V_O	16.76 V	Output voltage
I_O	1.05 A	Output current
Δi_L	10 mA	Load ripple current (pk-pk)
ΔV_O	190 mV	Load ripple voltage (pk-pk)
D	0.60	Average duty cycle
t	0.30 s	Convergence time
η	94.7%	Conversion efficiency

The Incremental Conductance (InC) also converged to the same LMPP, tracking $P_{IN} = 18.56$ W (5.3% error) and taking 0.26 s, with a ripple of 0.25 W (1.3%). The data in Table 17 show that P_{OUT} was 17.57 W (94.7% efficiency), exhibiting the same limitation as P&O.

Table 17. Results for the InC algorithm in Scenario 3.

Parameter	InC Algorithm	Description
P_{IN}	18.56 W	Input power
P_{OUT}	17.57 W	Output power
V_O	16.77 V	Output voltage
I_O	1.05 A	Output current
Δi_L	10 mA	Load ripple current (pk-pk)
ΔV_O	180 mV	Load ripple voltage (pk-pk)
D	0.60	Average duty cycle
t	0.26 s	Convergence time
η	94.7%	Conversion efficiency

The Particle Swarm Optimization (PSO) tracked an average P_{IN} of 19.59 W (0.01% error), ripple of 0.58 W (3.0%), and converged, on average, in 0.07 s. The average P_{OUT} was 18.63 W (Efficiency 95%). Table 18 demonstrates PSO's good exploration capability in the presence of three peaks.

Table 18. Results for the PSO algorithm in Scenario 3.

Parameter	PSO Algorithm	Description
P_{IN}	19.59 W	Input power
P_{OUT}	18.63 W	Output power
V_O	17.26 V	Output voltage
I_O	1.08 A	Output current
Δi_O	3 mA	Load ripple current (pk-pk)

Table 18. Cont.

Parameter	PSO Algorithm	Description
ΔV_O	50 mV	Load ripple voltage (pk-pk)
D	0.21	Average duty cycle
t	0.07 s	Convergence time
η	95.0%	Conversion efficiency

The Genetic Algorithm (GA) obtained $P_{IN} = 19.59$ W (0.01% error), ripple of 0.53 W (2.7%), and converged in an average time of 0.05 s, with $P_{OUT} = 18.63$ W (Efficiency 95.0%). Table 19 indicates that the GA showed robustness at the GMPP and the shortest search time in this scenario.

Table 19. Results for the GA in Scenario 3.

Parameter	GA	Description
P_{IN}	19.59 W	Input power
P_{OUT}	18.63 W	Output power
V_O	17.26 V	Output voltage
I_O	1.08 A	Output current
Δi_L	4 mA	Load ripple current (pk-pk)
ΔV_O	60 mV	Load ripple voltage (pk-pk)
D	0.21	Average duty cycle
t	0.05 s	Convergence time
η	95%	Conversion efficiency

In the most complex scenario, the meta-heuristic algorithms (PSO and GA) were highly effective, both locating the GMPP with near-zero error (0.01%). The GA was the fastest algorithm, converging in just 0.05 s, followed closely by PSO at 0.07 s. P&O and InC failed to bypass the first local maximum, resulting in significant power losses (5.3% error).

3.6. General Comparison Metrics Across All Scenarios

Using the results obtained from the simulations of all eleven proposed scenarios, Table 20 was prepared with the main performance indicators of the analyzed algorithms, aiming to allow a comprehensive comparison between the different MPPT approaches. The table presents, for each scenario and method, values such as the tracked power at the converter input (P_{IN}), the percentage error relative to the theoretical maximum power (ϵ), the power effectively delivered to the load (P_{OUT}), the convergence time (t) in seconds, and the converter efficiency (η).

Table 20. Consolidated simulation results across all scenarios.

Scenarios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
GMPP (W)	114.8	15.77	19.59	101.3	103.6	114.8	71.03	96.02	962.9	454.9	591.2
P&O											
P_{in} (W)	114.36	14.83	18.55	100.96	103.26	114.36	70.78	95.68	960.80	453.98	589.92
ΔP_{in} (W)	1.89	0.29	0.35	1.65	1.69	1.89	1.13	1.56	11.50	5.30	6.95
V_{in} (V)	16.81	6.16	6.87	15.81	15.98	16.81	13.26	15.39	39.48	27.18	30.96
ΔV_{in} (V)	4.21	1.54	1.72	3.95	4.00	4.21	3.32	3.85	7.14	4.91	5.59
I_{in} (A)	6.85	2.43	2.72	6.43	6.51	6.85	5.38	6.26	24.44	16.77	19.13
ΔI_{in} (A)	1.69	0.62	0.69	1.59	1.61	1.69	1.34	1.55	4.31	2.97	3.38
P_{out} (W)	111.33	13.96	17.56	98.16	100.42	111.33	68.55	92.98	947.43	446.33	580.66

Table 20. Cont.

Scenarios	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
GMPP (W)	114.8	15.77	19.59	101.3	103.6	114.8	71.03	96.02	962.9	454.9	591.2
P&O											
ΔP_{out} (W)	2.39	0.31	0.39	2.11	2.16	2.39	1.48	2.00	24.17	11.41	14.83
V_{out} (V)	42.20	14.95	16.76	39.63	40.08	42.20	33.12	38.57	123.12	84.51	96.38
ΔV_{out} (V)	0.45	0.17	0.19	0.43	0.43	0.45	0.36	0.42	1.57	1.08	1.23
I_{out} (A)	2.64	0.93	1.05	2.48	2.51	2.64	2.07	2.41	7.70	5.28	6.02
ΔI_{out} (A)	0.03	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.10	0.07	0.077
D	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.68	0.68	0.67
t (s)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.92	0.30	0.30	0.44	0.44	0.44
ϵ (%)	97.3%	94.1%	94.7%	97.2%	97.2%	97.3%	96.8%	97.2%	98.6%	98.3%	98.4%
InC											
P_{in} (W)	114.37	14.84	18.56	100.96	103.27	114.36	70.78	95.68	960.74	453.92	589.86
ΔP_{in} (W)	1.68	0.19	0.25	1.50	1.53	1.68	1.09	1.43	9.99	4.87	6.25
V_{in} (V)	17.03	6.08	6.78	16.01	16.19	17.07	13.43	15.59	40.34	27.77	31.64
ΔV_{in} (V)	3.79	1.38	1.54	3.57	3.61	3.79	2.99	3.47	7.24	4.98	5.68
I_{in} (A)	6.76	2.46	2.76	6.35	6.43	6.75	5.31	6.18	23.92	16.41	18.72
ΔI_{in} (A)	1.53	0.55	0.62	1.44	1.45	1.53	1.21	1.40	4.37	3.01	3.43
P_{out} (W)	111.33	13.97	17.57	98.16	100.43	111.34	68.55	92.98	947.32	446.25	580.57
ΔP_{out} (W)	2.39	0.30	0.38	2.11	2.16	2.39	1.48	2.00	24.85	11.73	15.25
V_{out} (V)	42.21	14.95	16.77	39.63	40.08	42.21	33.12	38.57	123.11	84.50	96.38
ΔV_{out} (V)	0.45	0.16	0.18	0.43	0.43	0.45	0.36	0.42	1.62	1.11	1.27
I_{out} (A)	2.64	0.93	1.05	2.48	2.51	2.64	2.07	2.41	7.69	5.28	6.02
ΔI_{out} (A)	0.03	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.10	0.07	0.08
D	0.60	0.61	0.61	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.67	0.67	0.67
t (s)	0.30	0.26	0.26	0.30	0.30	0.92	0.30	0.30	0.22	0.22	0.22
ϵ	97.3%	94.1%	94.7%	97.2%	97.2%	97.4%	96.8%	97.2%	98.6%	98.3%	98.4%
PSO											
P_{in} (W)	114.34	15.77	19.59	100.91	103.26	114.39	70.77	95.67	960.43	453.47	589.29
ΔP_{in} (W)	1.53	0.45	0.58	1.50	1.32	1.22	0.97	1.31	9.69	4.96	6.41
V_{in} (V)	16.98	12.86	14.37	16.16	16.10	16.81	13.46	15.51	40.95	28.09	32.01
ΔV_{in} (V)	3.33	3.27	3.58	3.15	3.17	3.32	2.63	3.05	5.95	4.09	4.66
I_{in} (A)	6.78	1.24	1.38	6.29	6.46	6.85	5.30	6.21	23.54	16.22	18.50
ΔI_{in} (A)	1.34	0.35	0.38	1.27	1.28	1.34	1.06	1.23	3.60	2.47	2.81
P_{out} (W)	111.31	14.92	18.63	98.11	100.42	111.36	68.54	92.97	946.98	445.80	579.99
ΔP_{out} (W)	1.95	0.09	0.11	1.71	1.77	1.97	1.20	1.63	18.38	8.66	11.26
V_{out} (V)	42.20	15.45	17.26	39.62	40.08	42.21	33.12	38.57	123.09	84.45	96.33
ΔV_{out} (V)	0.37	0.05	0.05	0.34	0.35	0.37	0.29	0.34	1.19	0.82	0.94
I_{out} (A)	2.64	0.97	1.08	2.48	2.51	2.64	2.07	2.41	7.69	5.28	6.02
ΔI_{out} (A)	0.02	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.07	0.05	0.06
D	0.60	0.21	0.20	0.60	0.60	0.61	0.60	0.60	0.66	0.67	0.67
t (s)	0.24	0.07	0.07	0.20	0.27	0.67	0.23	0.29	0.15	0.22	0.18
ϵ	97.3%	94.5%	95.0%	97.2%	97.3%	97.3%	96.8%	97.2%	98.6%	98.3%	98.4%
GA											
P_{in} (W)	114.27	15.77	19.59	100.74	102.86	114.34	70.43	95.61	960.43	453.05	588.74
ΔP_{in} (W)	1.80	0.43	0.53	2.05	2.33	1.53	1.86	1.53	9.69	6.10	7.89
V_{in} (V)	17.02	12.70	14.24	15.95	16.43	16.68	13.66	15.54	40.95	27.91	31.80
ΔV_{in} (V)	3.34	3.38	3.67	3.14	3.18	3.31	2.64	3.05	5.96	4.08	4.65
I_{in} (A)	6.77	1.26	1.39	6.38	6.32	6.90	5.21	6.20	23.54	16.33	18.62
ΔI_{in} (A)	1.34	0.36	0.39	1.26	1.28	1.34	1.06	1.23	3.60	2.47	2.81
P_{out} (W)	111.23	14.91	18.63	97.94	100.02	111.31	68.20	92.90	946.96	445.38	579.44
ΔP_{out} (W)	1.99	0.10	0.12	1.81	1.75	1.98	1.20	1.66	18.92	8.97	11.68
V_{out} (V)	42.19	14.44	17.26	39.59	40.00	42.20	33.03	38.55	123.09	84.42	96.29
ΔV_{out} (V)	0.38	0.05	0.06	0.37	0.35	0.37	0.29	0.35	1.23	0.85	0.97
I_{out} (A)	2.64	0.97	1.08	2.47	2.50	2.64	2.06	2.41	7.69	5.28	6.02
ΔI_{out} (A)	0.02	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.08	0.05	0.06
D	0.60	0.22	0.21	0.60	0.60	0.61	0.59	0.60	0.67	0.67	0.67
t (s)	0.27	0.06	0.05	0.34	0.32	0.98	0.35	0.40	0.19	0.27	0.23
ϵ	97.3%	94.5%	95.0%	97.2%	97.2%	97.3%	96.8%	97.2%	98.6%	98.3%	98.4%

This table allows for an objective analysis of the advantages and limitations of each technique. It was observed, for example, that the P&O and InC methods maintained low errors (<0.5%) only in simple, single-peak scenarios, but demonstrated high error rates (>5%) and failed to find the GMPP in complex scenarios (e.g., 2, 3, 10, 11). On the other hand, algorithms like PSO and the GA demonstrated superior robustness and agility in convergence, successfully finding the GMPP in complex cases, with times often below 0.20 s. The table demonstrates how the performance of the algorithms is directly related to the complexity of the P-V curve.

It is also important to note that although the PSO algorithm and GA were executed independently 10 times to enable statistical evaluation, all simulation runs produced identical results for tracked power, convergence time, and ripple. This outcome reflects the fully deterministic nature of the simulation environment, which excludes noise, randomized initialization, or thermal perturbations. As a result, dispersion metrics such as standard deviation and variance are exactly zero. These zero-dispersion values are nevertheless included in the results tables to reinforce the consistency of the computational model. In contrast, physical implementations using real-world hardware are inherently subject to external influences such as sensor noise, quantization errors, and thermal instability, which would naturally introduce variability. These factors are expected to be addressed in future experimental validations.

Table 21 synthesizes the average performance of the methods in the three validation scenarios (1, 2, and 3), considering relative error, convergence time, average ripple, and conversion efficiency.

Table 21. Average performance metrics of algorithms in the validation scenarios (1, 2, and 3).

Algorithm	Average Error (%)	Average Time (s)	Average Ripple (%)	Average Efficiency (%)
P&O	1.27	0.39	2.21	97.0
InC	1.27	0.33	1.34	97.0
PSO	0.28	0.23	1.5	97.1
GA	0.41	0.31	1.87	97.1

In summary, the P&O and InC methods show large errors and high ripple scenarios with local maxima, though they converge adequately in simple conditions. PSO and the GA demonstrate high robustness and are indicated for systems with multiple peaks; PSO balances precision with the fastest overall average speed (0.23 s), while the GA, also fast on average (0.31 s), proved to be the most agile in the most complex scenarios (2 and 3).

It is important to note that the use of the theoretical global maximum power point (GMPP) as a stopping criterion in PSO and the GA represents a controlled simulation artifact. While it facilitates precise benchmarking by standardizing convergence metrics, this approach is not transferable to real-world systems, where the true GMPP is unknown. Consequently, the results presented here may overestimate the effectiveness of global optimization algorithms under idealized conditions. In practical implementations, convergence would rely on alternative real-time criteria, such as plateau detection, derivative thresholds, or predefined iteration limits. This distinction must be kept in mind when interpreting the reported performance gains of metaheuristic algorithms and highlights the need for experimental validation using realistic termination strategies.

4. Comparative Analysis and Discussion

The comparative analysis of the four MPPT algorithms (P&O, InC, PSO, and GA) demonstrated significant performance differences as a function of the simulated scenarios.

The efficacy of each technique is directly linked to the complexity of the P-V curve generated by the TEG module array and the distribution of thermal gradients.

Under ideal conditions (Scenario 1), featuring a P-V curve without multiple peaks, all methods located the GMPP with an error below 0.5%. PSO was the fastest (0.24 s), with the GA presenting similar performance but with a slightly longer convergence time (0.27 s). The traditional methods, P&O and InC, showed satisfactory stability and precision but with a higher power ripple due to their perturbative logic.

This robustness, however, was tested in Scenarios 2 and 3, which simulated conditions of thermal shading and asymmetric distribution. In these cases, the meta-heuristic algorithms (PSO and GA) excelled, proving capable of locating the GMPP with near-zero errors ($\approx 0.01\%$), even with nearby local peaks. In contrast, the P&O and InC methods converged to local maxima, exhibiting errors exceeding 5%. This highlights their structural limitation: as “hill-climbing” algorithms, they are inherently trapped by the first local maximum power point (LMPP) they encounter, lacking the mechanism to scan the P-V curve to find the global maximum (GMPP). This finding aligns with the challenges identified in [12,13].

The analysis of dynamic performance (Scenario 6—Sinusoidal) revealed a critical distinction in tracking mechanics. While P&O exhibited a significantly slower convergence time (0.92 s) compared to PSO (0.67 s), this gap is attributed to the nature of the algorithms. P&O relies on a step-by-step perturbation approach; when the gradient shifts rapidly, the algorithm consumes multiple periods oscillating to determine the new derivative direction (dP/dV). In contrast, the PSO algorithm utilizes a re-initialization trigger (Equation (3)) that detects abrupt power changes and effectively “resets” the particles across the search space. This allows the swarm to jump to the new optimal region almost immediately, ensuring faster recovery in time-varying thermal environments.

The metrics for speed and stability also revealed a clear trade-off. The output ripple was consistently lower in the PSO and GA methods, especially in Scenario 3 (oscillation $< 3\%$), reinforcing their suitability for stable power delivery. Considering the average convergence time (Table 21), PSO proved to be the fastest overall (≈ 0.23 s), followed by the GA (≈ 0.31 s), InC (≈ 0.33 s), and P&O, which, although slower (≈ 0.39 s), maintained acceptable performance in simple scenarios (Scenario 1), and it consistently underperformed under multi-peak conditions. As seen in Table 21, PSO and the GA maintained $< 1\%$ error across complex scenarios, while P&O exceeded 5%.

It is noteworthy that while the GA had a slightly higher average time than PSO, it was the fastest in the most complex, multi-peak scenarios (0.06 s and 0.05 s), suggesting high efficiency in difficult search spaces. This agility reinforces the GA's potential as a preferred algorithm in real-time embedded implementations with high gradient variability.

A critical design consideration raised in this comparative study is the trade-off between computational complexity and energy harvesting efficiency. It is acknowledged that metaheuristic algorithms (PSO and GA) impose a higher computational load regarding floating-point operations compared to the simple logic of P&O. However, in the context of modern low-power microcontrollers (e.g., ARM Cortex-M series), the energy consumption required to execute these additional cycles is in the order of milliwatts. Conversely, the energy “loss” caused by a classical algorithm getting trapped in a local maximum (as observed in Scenarios 2 and 3) can represent a significant portion of the total generated power (losses $> 5\%$). Therefore, the net energy gain achieved by accurately tracking the GMPP using metaheuristics vastly outweighs the marginal increase in the microcontroller's power consumption.

Finally, the scalability of the methods was validated in scenarios involving up to 196 TEG modules (Scenarios 9, 10, and 11). Metaheuristic algorithms preserved tracking precision and convergence efficiency even with the increased system size, demonstrating

robustness in large-scale multistring architectures. Such scalability is fundamental for practical deployments in waste heat recovery and industrial energy harvesting systems.

In summary, the comparative results highlight that while classical methods are computationally efficient and easy to implement, they are insufficient in dynamic or complex environments. Metaheuristic strategies, although more resource-intensive, provide superior tracking performance, scalability, and resilience, key attributes for modern embedded applications that demand high reliability and adaptability.

5. Conclusions and Recommendations

This paper presented a comparative and critical analysis of four maximum power point tracking algorithms applied to thermoelectric systems based on thermoelectric generators, modeled and simulated in the MATLAB/Simulink environment. The evaluated methods (Perturb and Observe, Incremental Conductance, Particle Swarm Optimization, and Genetic Algorithm) were tested under eleven distinct thermal gradient scenarios, including conditions featuring multiple power peaks and gradient asymmetries. The simulation results revealed that:

Under ideal conditions (Scenario 1), all methods successfully located the global maximum power point (GMPP), achieving relative errors below 0.5% and conversion efficiencies around 97.3%. However, classical methods (P&O and InC) exhibited higher power ripple compared to PSO and the GA.

In multi-peak scenarios (Scenarios 2, 3, 10, 11), the metaheuristic algorithms clearly outperformed the classical ones. Both PSO and the GA achieved near-zero errors ($\approx 0.01\%$) in locating the GMPP, while P&O and InC were trapped in local maxima, resulting in average errors exceeding 5%.

In terms of convergence time, the GA demonstrated the fastest response in complex thermal conditions (as low as 0.05 s in Scenario 3), while PSO presented the best overall average time (≈ 0.23 s), maintaining robust performance across all scenarios.

These considerations help contextualize the findings and establish the scope of applicability. It is crucial to acknowledge the limitations of the simplified modeling approach adopted. The simulation treated TEGs as voltage sources dependent on temperature difference and internal resistance, explicitly disregarding dynamic thermal resistance, convection losses, and the Peltier effect (cooling due to current flow). While this abstraction is valid for comparing the logical tracking capabilities of the algorithms against instantaneous P-V curves, it does not capture the thermal settling times or the dynamic interaction between load current and temperature gradient found in physical prototypes.

The outcomes emphasize that advanced MPPT algorithms, particularly PSO and the GA, significantly enhance the energy harvesting capabilities of TEG systems in asymmetric environments. While these methods carry a slightly higher computational cost, the discussion highlighted that the net energy gain from accurate GMPP tracking vastly outweighs the marginal power consumption of modern low-power microcontrollers required to run them.

In summary, the objectives outlined in the Introduction were fully achieved. The study developed a complete modeling and digital implementation of four MPPT algorithms (P&O, InC, PSO, and GA) within a robust MATLAB/Simulink framework simulating a multistring thermoelectric generator array [34]. Through eleven carefully designed thermal gradient scenarios, the research demonstrated the superior performance of metaheuristic methods in complex environments.

Finally, to extend this research and enhance the applicability of the results, several directions are recommended [35]. Future works should focus on constructing physical prototypes of multistring TEG arrays to validate algorithmic performance under real-world

thermal dynamics and incorporating detailed thermal-electrical coupling, including the Peltier effect and thermal lag, to refine simulation accuracy regarding transient responses. Furthermore, it is essential to investigate the impact of sensor noise and quantization errors in low-cost hardware, implementing robust digital filtering stages to prevent false peaks in metaheuristic search spaces. Additionally, a practical measurement of the energy consumption of the microcontroller running GA/PSO algorithms versus P&O is suggested to experimentally quantify the trade-off between computational load and energy harvesting gain.

Furthermore, it is recommended that future studies replace the theoretical power-based stopping criterion with more realistic and implementable strategies. In real-world applications, the global maximum power is not known a priori, and practical convergence must be based on observable metrics such as steady-state detection, minimal power variation, or fixed iteration limits. Adopting these practical criteria in experimental setups will ensure a more accurate assessment of the robustness and efficiency of metaheuristic MPPT algorithms and avoid any artificial advantage resulting from simulation-specific assumptions.

Author Contributions: Conceptualization: E.R.d.L., E.A.d.S., S.V.B.D., J.P.P.d.C. and O.H.A.J.; methodology: E.R.d.L., E.A.d.S., S.V.B.D., J.P.P.d.C. and O.H.A.J.; validation: E.A.d.S., S.V.B.D., J.P.P.d.C. and O.H.A.J.; investigation and simulation: E.R.d.L., E.A.d.S. and O.H.A.J.; writing—original draft preparation: E.R.d.L., E.A.d.S. and O.H.A.J. writing—review and editing: E.A.d.S., J.P.P.d.C. and O.H.A.J.; project administration: O.H.A.J.; funding acquisition: J.P.P.d.C. and O.H.A.J. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was partially supported by the FACEPE agency (Fundação de Amparo a Pesquisa de Pernambuco) throughout the project with references APQ-0616-9.25/21 and APQ-0642-9.25/22. O.H.A.J. was funded by the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), grant numbers 407531/2018-1, 303293/2020-9, 405385/2022-6, 405350/2022-8 and 406662/2022-3. Additionally, the authors gratefully acknowledge the financial support provided by PROAP-CAPES, PRPPG, and Interdisciplinary Graduate Program in Energy and Sustainability (PPGIES) at Federal University of Latin American Integration (UNILA).

Data Availability Statement: The original contributions presented in the study are included in the article, further inquiries can be directed to the corresponding author.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Snyder, G.J. Thermoelectric Energy Harvesting. In *Energy Harvesting Technologies*; Priya, S., Inman, D.J., Eds.; Springer: Boston, MA, USA, 2008; pp. 325–336. [\[CrossRef\]](#)
2. Tohidi, F.; Holagh, S.G.; Chitsaz, A. Thermoelectric Generators: A comprehensive review of characteristics and applications. *Appl. Therm. Eng.* **2022**, *201*, 117793. [\[CrossRef\]](#)
3. Orr, B.; Akbarzadeh, A.; Lappas, P. An exhaust heat recovery system utilising thermoelectric generators and heat pipes. *Appl. Therm. Eng.* **2017**, *126*, 1185–1190. [\[CrossRef\]](#)
4. Liu, S.; Wang, H.; Li, D.; Ouyang, D.; He, J.; Li, Y.; Wang, Q. Micro-thermoelectric generators based on through glass pillars with high output voltage enabled by large temperature difference. *Appl. Energy* **2018**, *225*, 600–610. [\[CrossRef\]](#)
5. Jaziri, N.; Boughamoura, A.; Müller, J.; Mezghani, B.; Tounsi, F.; Ismail, M. A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. *Energy Rep.* **2020**, *6*, 264–287. [\[CrossRef\]](#)
6. Goldsmid, H.J. The Seebeck and Peltier effects. In *The Physics of Thermoelectric Energy Conversion*; Morgan & Claypool Publishers: San Rafael, CA, USA, 2017. [\[CrossRef\]](#)
7. Chen, L.; Liu, R.; Shi, X. General principles of thermoelectric technology. In *Thermoelectric Materials and Devices*; Elsevier: Cambridge, MA, USA, 2021; pp. 1–18.
8. Shang, L.; Guo, H.; Zhu, W. An improved MPPT control strategy based on incremental conductance algorithm. *Prot. Control Mod. Power Syst.* **2020**, *5*, 14. [\[CrossRef\]](#)

9. Montecucco, A.; Siviter, J.; Knox, A.R. The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series and parallel. *Appl. Energy* **2014**, *123*, 47–54. [\[CrossRef\]](#)
10. Dalala, Z.M. Energy harvesting using thermoelectric generators. In Proceedings of the 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), Leuven, Belgium, 4–8 April 2016; pp. 1–6. [\[CrossRef\]](#)
11. Ruzaimi, M.S.M.; Dahlan, M.S.H.M.; Alghoul, M.A.; Zulkifli, K.A.M.; Sopian, K. Performance analysis of thermoelectric generator implemented on non-uniform heat distribution of photovoltaic module. *Energy Rep.* **2021**, *7*, 2379–2387. [\[CrossRef\]](#)
12. Elzalik, M.; El-Shahat, A.; Abdel-Aziz, Y.; Algazar, M. Thermoelectric power generation system-simulation and experimental investigation. In Proceedings of the 2018 International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, 18–20 December 2018; pp. 298–303. [\[CrossRef\]](#)
13. Bollipo, R.B.; Mikkili, S.; Bonthagorla, P.K. Critical review on PV MPPT techniques: Classical, intelligent and optimisation. *IET Renew. Power Gener.* **2020**, *14*, 1433–1452. [\[CrossRef\]](#)
14. Elzalik, M.; El-Shahat, A.; Abdel-Aziz, Y.; Algazar, M. Electrical performance analysis of thermoelectric generating system with INC-MPPT algorithm. *Gazi Univ. J. Sci.* **2020**, *33*, 74–88. [\[CrossRef\]](#)
15. Indrasari, W.; Tjahjono, A.; Mardiana, S.; Fahmi, M.I.; Nur, M. Implementation of the MPPT particle swarm optimization algorithm on a hybrid PV-TEG solar panel with a DC-DC buck converter. *J. Phys. Conf. Ser.* **2024**, *2866*, 012050. [\[CrossRef\]](#)
16. Oliveira, F.M.; Dutra, D.A.L.; Oliveira, L.F.M.; Cardoso, R. Development of an MPPT-based genetic algorithm for photovoltaic systems versus classical MPPT techniques in scenarios with partial shading. *Inventions* **2024**, *9*, 64. [\[CrossRef\]](#)
17. Goldberg, D.E. A Gentle Introduction to Genetic Algorithms. In *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*; Addison-Wesley Publishing Company: Boston, MA, USA, 1989; pp. 1–26.
18. Belboula, A.; Bendaoud, A.; Drid, S.; Tiar, M. Comparative study of maximum power point tracking algorithms for thermoelectric generator. In *Renewable Energy for Smart and Sustainable Cities*; Hatti, M., Ed.; Springer International Publishing: Tipaza, Algeria, 2019; pp. 329–338. [\[CrossRef\]](#)
19. El-Shahat, A.; Bhuiyan, M.S.R. Thermoelectric generator performances and efficiency analysis integrated with MPPT techniques. In Proceedings of the 2021 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET), Hyderabad, India, 21–23 January 2021; pp. 1–7. [\[CrossRef\]](#)
20. Laird, I.; Lovatt, H.; Savin, R.; Agelidis, V.G. Comparative study of maximum power point tracking algorithms for thermoelectric generators. In Proceedings of the 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Sydney, Australia, 14–17 December 2008; pp. 1–6.
21. Ando Junior, O.H.; Izidoro, C.L.; Gomes, J.M.; Correia, J.H.; Carmo, J.P.; Schaeffer, L. Acquisition and Monitoring System for TEG Characterization. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* **2015**, *11*, 531516. [\[CrossRef\]](#)
22. Izidoro, C.L.; Ando Junior, O.H.; Carmo, J.P.; Schaeffer, L. Characterization of Thermoelectric Generator for Energy Harvesting. *Measurement* **2017**, *106*, 283–290. [\[CrossRef\]](#)
23. Ando Junior, O.H.; Calderon, N.H.; De Souza, S.S. Characterization of a Thermoelectric Generator (TEG) System for Waste Heat Recovery. *Energies* **2018**, *11*, 1555. [\[CrossRef\]](#)
24. Kramer, L.R.; Maran, A.L.O.; de Souza, S.S.; Ando Junior, O.H. Analytical and Numerical Study for the Determination of a Thermoelectric Generator's Internal Resistance. *Energies* **2019**, *12*, 3053. [\[CrossRef\]](#)
25. Chamby Espejo, S.C.; Silva de Souza, S.; Ando Junior, O.H. Development of a Biochemical Oxygen Demand Incubator Prototype Based on Thermoelectric Effect with Monitoring System. *IEEE Lat. Am. Trans.* **2020**, *18*, 2037–2046. [\[CrossRef\]](#)
26. Oliveira Maran, A.L.; Guerrero Martin, C.A.; Montes-Páez, E.; Ando Junior, O.H. Modelling and Simulation of a Thermoelectric Waste Heat Recovery System—TWRHS. *DYNA* **2021**, *88*, 265–272. [\[CrossRef\]](#)
27. Calderón-Henao, N.; Venturini, O.J.; Franco, E.H.M.; Silva Lora, E.E.; Scherer, H.F.; Maya, D.M.Y.; Ando Junior, O.H. Numerical–Experimental Performance Assessment of a Non-Concentrating Solar Thermoelectric Generator (STEG) Operating in the Southern Hemisphere. *Energies* **2020**, *13*, 2666. [\[CrossRef\]](#)
28. Ando, O.H., Jr. Microgerador Termoelétrico para Captação de Energia Baseado no Efeito Seebeck com Sistema de Transferência de Calor Intercambiável. BR Patent BR1020130279471A2, 4 February 2014.
29. Ando Junior, O.H.; da Silva, E.A.; de Lira, E.R.; Degiorgi, S.V.B.; do Carmo, J.P.P. Comparative Analysis and Integrated Methodology for the Electrical Design and Performance Evaluation of Thermoelectric Generators (TEGs) in Energy Harvesting Applications. *Energies* **2024**, *17*, 5176. [\[CrossRef\]](#)
30. Mamur, H.; Çoban, Y. Detailed modeling of a thermoelectric generator for maximum power point tracking. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* **2020**, *28*, 9. [\[CrossRef\]](#)
31. Üstüner, M.A.; Mamur, H.; Taşkın, S. Modeling and validation of the thermoelectric generator with considering the change of the Seebeck effect and internal resistance. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* **2022**, *30*, 2688–2706. [\[CrossRef\]](#)
32. Kennedy, J.; Eberhart, R. Particle swarm optimization. In Proceedings of the ICNN'95—International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 27 November–1 December 1995; pp. 1942–1948.

33. Raza, M. Article Swarm Optimization (PSO) MATLAB® Code Explanation. Simulation Tutor. Available online: <https://simulationtutor.com/particle-swarm-optimization-pso-matlab-code-explanation/> (accessed on 20 August 2024).
34. Lira, E.R.; Da Silva, E.A.; De Giorgi, S.V.B.; Ando Junior, O.H. Dataset Preprocessing for MPPT Algorithms Simulation and Thermoelectric Generators under Multiple Thermal Gradient Scenarios. *IEEE Dataport* **2025**. [[CrossRef](#)]
35. Ando Junior, O.H.; Bretas, A.S.; Leborgne, R.C. Methodology for Calculation and Management for Indicators of Power Quality. *IEEE Lat. Am. Trans.* **2015**, *13*, 2217–2224. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Article

Self-Powered System Development with Organic Photovoltaic (OPV) for Energy Harvesting from Indoor Lighting

Eder Andrade da Silva ^{1,2}, Werner Moreira Chaves Filho ², Marco Roberto Cavallari ^{2,3} 
and Oswaldo Hideo Ando Junior ^{1,2,4,*} 

- ¹ Interdisciplinary Postgraduate Program in Energy & Sustainability (PPGIES), Federal University of Latin American Integration—UNILA, Foz do Iguaçu 85867-000, PR, Brazil; ea.silva.2020@aluno.unila.edu.br
 - ² Research Group on Energy & Energy Sustainability (GPEnSE), Academic Unit of Cabo de Santo Agostinho (UACSA), Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE), Cabo de Santo Agostinho 54518-430, PE, Brazil; wener@ufrpe.br (W.M.C.F.); mrcavall@unicamp.br (M.R.C.)
 - ³ Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Av. Albert Einstein 400, Campinas 13083-852, SP, Brazil
 - ⁴ Program in Energy Systems Engineering (PPGESE) Academic Unit of Cabo de Santo Agostinho (UACSA), Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE), Cabo de Santo Agostinho 54518-430, PE, Brazil
- * Correspondence: oswaldo.ando@ufrpe.br

Abstract: The increase in demand for electricity due to industrial development and the growing use of electronic equipment has led to the need for new alternative energy sources, such as photovoltaic solar energy conversion. In this context, organic photovoltaic (OPV) stands out as an efficient way of generating energy indoors. An electrical power supply system (EPS) was developed to power a commercial electronic lock, using OPV as the energy source. The system was designed with a charging control to match the panel voltage to a supercapacitor charge accumulator and a boost converter. Tests on the bench and in a real scenario demonstrated the viability and effectiveness of the system, showing that it is capable of operating self-sufficiently with a minimum daily illuminance of 250 lux for 12 h. The results indicate that the system can be applied to various loads with low energy consumption, promoting energy efficiency in different contexts.

Keywords: electronic equipment; alternative energy sources; solar energy; supercapacitor; boost converter; energy efficiency



Citation: Silva, E.A.d.; Filho, W.M.C.; Cavallari, M.R.; Ando Junior, O.H. Self-Powered System Development with Organic Photovoltaic (OPV) for Energy Harvesting from Indoor Lighting. *Electronics* **2024**, *13*, 2518. <https://doi.org/10.3390/electronics13132518>

Academic Editor: Elias Stathatos

Received: 28 May 2024
Revised: 21 June 2024
Accepted: 23 June 2024
Published: 27 June 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The constant development of the world's industrial sector, together with the increased use of electronic equipment, has meant that the demand for electricity has increased exponentially in recent decades, causing bottlenecks in energy generation systems [1,2].

With the introduction of new alternative energy sources as a means of solving a growing energy demand and in order to reduce the use of traditional sources of energy generation that cause severe environmental impacts, the demand for the development of technologies that make it possible to accelerate this energy transition has been growing exponentially. Among the options available, photovoltaic solar energy conversion stands out as one of the most important forms of energy generation in the energy transition. In this context, new photovoltaic technologies have been introduced, such as organic photovoltaic (OPV), a light and semi-transparent organic photovoltaic film, which, due to its high efficiency in indoor micro-generation applications, has gained visibility in the market and created a growing demand for equipment that enables its application on a large scale [3,4].

Motivated by this scenario, a partner company requested the development of an electrical power supply system (EPS) that uses the OPV as a source of energy generation to power a commercial electronic lock. This request aligns with the growing interest in sustainable and renewable energy solutions, particularly in applications where traditional

batteries can be impractical due to frequent replacement needs and environmental concerns. The OPV technology, with its high efficiency in converting indoor lighting to electrical energy, presents a promising alternative [3,4]. To address the specific energy requirements of the electronic lock, the EPS was designed to include a charging control mechanism that optimizes the voltage from the OPV panels, a supercapacitor for efficient energy storage, and a boost converter with extremely low standby power consumption. Comprehensive testing under various lighting conditions confirmed the system's capability to maintain self-sufficient operation with a minimum daily illuminance of 250 lux for 12 h, thereby validating its practicality and effectiveness for real-world applications [4,5]. This development not only demonstrates the feasibility of using OPV for low power electronic devices but also highlights the potential for broader application in the pursuit of energy-efficient solutions.

Following the introduction and motivation for the project are the details of the methodological outline for the survey of the bibliographic portfolio, the analysis of the state of the art, the development and manufacture of the prototypes, the results and discussions on the prototype development process, and, finally, the conclusions of the development.

2. Energy Harvesting for Self-Powered Systems

The search, analysis, and selection of relevant scientific works, known as the bibliographic portfolio (BP), is a fundamental stage in any academic research or development. The BP is used to support the theoretical framework. In this work, the scientific literature review on the subject of Energy Harvesting for Self-Powered Systems (EHSPS) was carried out using the Proknow-C scientific and constructivist approach methodology [6,7].

The Proknow-C method consists of a sequence of procedures that systematize the survey of a bibliographic portfolio of works relevant to the research topic. To this end, Proknow-C includes the following stages [6]: (A) Selection of a portfolio of articles relevant to the research topic; (B) Bibliometric analysis of the portfolio; (C) Systemic analysis of the bibliographic portfolio; (D) Definition of the research question and objectives. For this work, in order to obtain a bibliographic portfolio on the subject, phases "A" and "C" were carried out, which correspond to the stages of surveying and defining the works present in the BP.

2.1. Selection of the Bibliographic Portfolio

As a first step in the method, keywords (PCs) and their combinations were identified to guide the search. The combinations are: (i) "Organic Photovoltaic" AND "Supercapacitor"; (ii) "Organic Photovoltaic" AND "buck-boost" and (iii) "Organic Photo-voltaic" AND "Self-powered".

A search was then carried out using Publish or Perish[®] bibliographic reference search software (version: 8.8.4383) in three major academic article databases. These were: Google Scholar (GS), SCOPUS (SCP), and Web of Science (WoS). The results of the searches carried out are described in Table 1.

Table 1. Definition of key words and combinations.

Searched Combinations	Scopus	WoS	GS
"Organic Photovoltaic" AND "Supercapacitor"	35	17	200
"Organic Photovoltaic" AND "Buck-Boost"	125	4	102
"Organic Photovoltaic" AND "Self-Powered"	80	15	200
Total paper	240	36	502
Raw Paper Base			778

The search results were exported to the Excel[®] spreadsheet tool and submitted to a Python script to filter out the articles with the most relevant titles for the development of this project. The result was a database of 101 articles with compatible titles, which were selected to make up the "K" and "P" repositories.

The “K” repository is made up of 13 articles, which accumulate 80% of the total citations in the filtered portfolio, with a cut-off score of 50 citations. The remaining articles were analyzed in relation to their titles and were included in the “P” repository, made up of 28 publications, which, according to [6], form repository “C,” listed in Table 2.

Table 2. Research in Scientific Databases.

Repository C	Cit.	Ref.
A new senseless hybrid MPPT algorithm based on fractional short-circuit current measurement and P&O MPPT	384	[8]
Energy harvesting technologies for achieving self-powered wireless sensor networks in machine condition monitoring: A review	181	[9]
An efficient ultra-flexible photo-charging system integrating organic photovoltaics and supercapacitors	61	[10]
Ternary Blend Strategy for Achieving High-Efficiency Organic Photovoltaic Devices for Indoor Applications	34	[11]
A review of solar energy harvesting electronic textiles	33	[12]
Integration designs toward new-generation wearable energy supply-sensor systems for real-time health monitoring: A minireview	32	[13]
Understanding the charge storage mechanism of supercapacitors: in situ/operando spectroscopic approaches and theoretical investigations	30	[14]
Energy harvesting strategies for wireless sensor networks and mobile devices: A review.	25	[15]
A Critical Review On The Voltage Requirement In Hybrid Cells With Solar Energy Harvesting And Energy Storage Capability	15	[16]
Energy harvesting based on printed organic photovoltaic cells for RFID applications	9	[17]
Combined organic photovoltaic cells and ultra-low power CMOS circuit for indoor light energy harvesting	9	[18]
Integrating Photovoltaic (PV) solar cells and supercapacitors for sustainable energy devices: A review	8	[19]
A fully autonomous ultra-low power hybrid RF/photovoltaic energy harvesting system with -25 dBm sensitivity	6	[4]
Development of an organic photovoltaic energy harvesting system for wireless	5	[20]
Organic photovoltaic devices with concurrent solar energy harvesting and charge storage capability	5	[21]
Conversion of radiophotoluminescence irradiation into electricity in photovoltaic cells. A review of theoretical considerations and practical solutions	4	[22]
a hybrid energy harvesting system based on solar radiation and mechanical vibration	3	[23]
performance analysis of triple port DC–DC converter for energy harvesting systems	2	[24]
critical review on interrelationship of electro-devices in PV solar systems with their evolution and future prospects for MPPT applications	2	[3]
Flexible temperature logger powered by solar cell and supercapacitor	1	[25]
Micropower energy harvesting using high-efficiency indoor organic photovoltaics for self-powered sensor systems	1	[26]

Table 2. Cont.

Repository C	Cit.	Ref.
Flexible energy supply for distributed electronics powered by organic solar cell and printed supercapacitor	0	[27]
Dual-Input, Single-Output Step-Up DC/DC power electronic interface for energy harvesting systems	0	[28]
Application of non-isolated bidirectional DC–DC converters for renewable and sustainable energy systems: a review	0	[1]
Evaluation of charging efficiency for power management integrated circuits and their compatibility with indoor light energy harvesting devices for IoT sensors	0	[2]
Power management and power quality system applied in a single-phase nanogrid	0	[29]
An indoor light-powered sensor system integrated with organic photovoltaics	0	[30]
Thermomechanical energy converters for harvesting thermal energy: A review	0	[31]

Of the 28 articles in the PB, 13 are reviews on the subject, making up 46.42% of the articles in the PB. The remainder revolved around the development of projects, proposing new self-powered integration methods.

In order to compose the state of the art and contribute to the development of this work, we propose an analysis of the remaining 15 articles (53.58%), which provide an exploratory and experimental approach to EHSPS projects.

Thus, of the articles in the PB of this experimental nature, after reading them in full, the articles mentioned in the next section were selected to make up the state of the art in EHSPS, taking into account their contribution to the topic and to this project.

2.2. Systemic Analysis Bibliographic Portfolio

After selecting the articles, it is essential to carry out a systemic analysis of the bibliographic portfolio. At this stage, the content of each paper is assessed in terms of its contribution to the state of the art. The techniques and materials used, the difficulties encountered, and the positive and negative points of each work are analyzed, as well as the similarities between the articles in the BP. This analysis makes it possible to obtain information that helps to synthesize and interpret the results, as well as directing future work.

Among the articles selected from repository C, there is a focus on the development of self-powered systems with flexible supercapacitors as a means of energy storage, and the development of DC–DC converters. A secondary theme is a description of the use and implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) techniques.

Self-powered systems are applications of the energy harvesting concept in systems where there is a partial or complete supply from the system itself. There is the following cycle: the energy available in the environment is captured, conditioned, stored, and used to power the load. Micro-generators (energy harvesting) act to capture the energy present in the environment, which is commonly indoor in this type of arrangement. The energy harvested is controlled and conditioned by the system's EPS equipment, which converts, manages, and stores the energy to be consumed by the load present in the system. A simplified diagram of this type of system is shown in Figure 1.

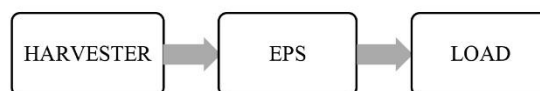


Figure 1. Simplified Diagram of the Self-Powered OPV System.

In [17], a self-powered system utilizing organic photovoltaic (OPV) technology is developed to power an SL900A-TAG RFID tag sensor. Initially, the OPV module's characteristics, including I-V and power-versus-voltage (P-V) curves, are evaluated. The system's performance is subsequently compared with that of a 0.5 W Si-PV silicon solar panel and a 3.3 V coin-shaped lithium battery when connected to the sensor. A test bench is utilized to gather input and output data for comprehensive analysis and comparison.

Additionally, ref. [17] details the fabrication process of printing a flexible supercapacitor directly onto an OPV to form a monolithically integrated energy module. This integrated system's performance was assessed over a period of 90 h, demonstrating a capacitor voltage measurement of 1000 mV. Additionally, the development includes integrating printed supercapacitors with OPV cells to power a flexible temperature recorder. This recorder incorporates an integrated circuit (IC), a coil antenna, and an energy source. While the IC enables on-demand temperature measurements and autonomous data logging, it requires an additional 3 V lithium battery for operation.

In [3], the application of flexible supercapacitors (SCs) combined with organic photovoltaic (OPV) cells in self-sufficient systems is highlighted. These systems leverage the flexibility of OPV cells and SCs to provide energy to devices or sensors, particularly emphasizing applications in wearable technology due to their adaptability. As detailed in [3], a self-powered system has been developed integrating a 3 μm thick OPV with a 40 μm flexible capacitor, achieving an impressive energy conversion efficiency of 96%.

In applications that use energy from photovoltaic panels, DC–DC converters are essential to adjust the output voltage of the photovoltaic cells according to the load that needs to be supplied. To do this, it is necessary to increase or decrease the cell's output voltage [10].

The article [32] presents a novel glass/polysiloxane/glass laminate PV panel with integrated lithium accumulators, designed for emergency power supply in building-attached PV systems. It highlights the scarcity of data on the long-term outdoor thermal performance of such integrated systems. A year-long study showed that, even at +40 $^{\circ}\text{C}$ ambient temperature, the lithium accumulators' temperature rose by only +13 $^{\circ}\text{C}$ during charging/discharging cycles. With an operational temperature limit of +65 $^{\circ}\text{C}$, this system is suitable for areas with ambient temperatures up to +50 $^{\circ}\text{C}$. The article also details the design of the 165 \times 99 cm, 260 W PV panel with a new compact cooling box for the 40 Ah accumulators.

The study by [1] presents an extensive review of bidirectional DC–DC converters based on buck-boost architecture. The article proposes a non-isolated topology to reduce efficiency losses in these systems. It presents various IC topologies and proposes modifications to the circuit configuration and analyzes the advantages and disadvantages of these modifications. It presents a comprehensive review of the different types of DC–DC converters and how they work.

In [2], there is a comparison of two unnamed ICs, identified by their specifications and mode of operation. The purpose of the exercise is to compare the efficiency of DC–DC converter chips with boost mode operation mechanisms based on inductors and capacitor switching. The selected converters, together with an OPV, were subjected to tests with battery simulators, tests with active battery voltage control, and finally tests without any battery voltage control, simulating a real application. Overall, the inductor-based IC achieved greater efficiency. This can be useful in the process of selecting an IC to convert energy from a self-powered system.

The MPPT technique involves continuous monitoring of the photovoltaic panel's maximum power point (MPP), enabling greater efficiency in energy generation. It is

nothing more than an algorithm implemented in the control of the DC–DC converter that interfaces between the module and the load. Through a feedback signal between the panel and the DC–DC converter, MPPT allows the module’s voltage levels to be stabilized in its MPPT [3]. The study in [3] covers MPPT techniques such as: perturb and observe (P&O); incremental conductance (InC); fractional open-circuit voltage (FOCV); and fractional short-circuit current (FSCC). Using P&O as a basis, the study proposes changes with a combination of the techniques covered. Instead of having a fixed initial operating point, the method searches for the approximate maximum power point using FSCC and then searches for the exact MPP using P&O with a small step size, tracking the MPP without isolating the photovoltaic panel. The system controlled by the proposed algorithm was able to maintain greater stability than the conventional P&O algorithm.

3. Hardware Development

The project was carried out in three stages divided into topics, each assigned a purpose that was directly dependent on the previous or subsequent one. This ensures a logical evolution as progress is made, with the aim of reducing rework. Each stage, as well as its purpose, was intuitively defined to ensure progress in development, following the chronology of the stages. Figure 2 shows the stages: Specifications; Development; and Manufacture and assembly.

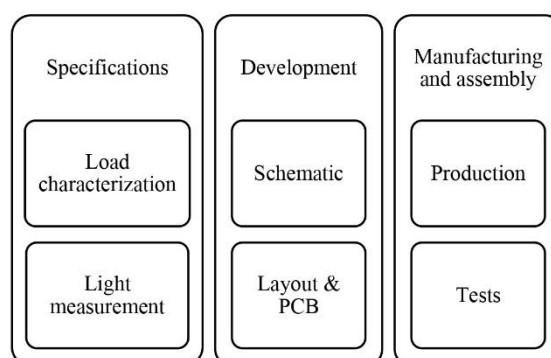


Figure 2. Diagram of project development stages.

For the first stage of development, the electronic lock was analyzed and its operating characteristics measured with a multimeter model UT61E+. According to the datasheet specifications provided by the manufacturer, to measure the standby current, the 220.00 μA range was selected, offering a resolution of 0.01 μA and a precision of $\pm 0.5\%$ plus 10 units. The recorded standby current was stable at 37.00 μA . For measuring the operating current, the 220.00 mA range, with a resolution of 10 μA and identical precision to the previous scale, was chosen, yielding a stable value of 69.70 mA. These measurements were conducted while the device was powered by three AAA batteries, resulting in a measured voltage of 4.531 V on the 22.000 V scale, which offers a resolution of 1 mV and a precision of $\pm 0.05\%$ plus 5 units.

Next, the luminosity measurement was carried out in an installation considered to be the target of the project. A set of cupboards located in a corridor with artificial lighting, consisting of 44 cupboards locked with the same model of electronic lock powered by three AAA batteries each, for a total of one hundred and 32 batteries in this corridor alone.

Organic photovoltaic (OPV) film technology stands out here. According to [33], these cells are made up of several organic semiconductor photovoltaic films in series or parallel arrangements, which have characteristics that physically guarantee a diversity of sizes and shapes, and electrically, despite a shorter service life, a higher efficiency, reaching 20% higher than silicon cells for indoor applications.

This efficiency in indoor environments is due to the lighting spectrum in which OPVs perform better when compared to polycrystalline silicon inorganic cell panels, Figure 3a, which is different from the solar lighting spectrum, Figure 3b, in which silicon-based panels perform better.

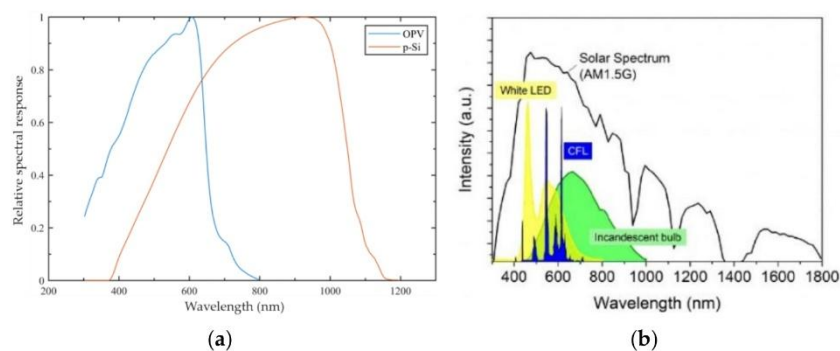


Figure 3. Demonstrated (a) OPV and poly-Si relative spectral response [34] and (b) Spectrum of different light sources [35].

A UT383BT Mini Light Meter with an accuracy of $\pm 4\%$ plus 8 units was used to measure the lighting in the room. The measurement was taken at the center of each cabinet door in order to generate a panorama of all the intended installation points. The lowest value obtained in the measurement was 250 lux in the bottom row of the cabinet and the highest value was 800 lux in the center of the top row. The most critical case is the one with the lowest illumination, so, as can be seen in Figure 4a, the OPV was installed in the cabinet in the bottom right-hand corner to test the device's operation.

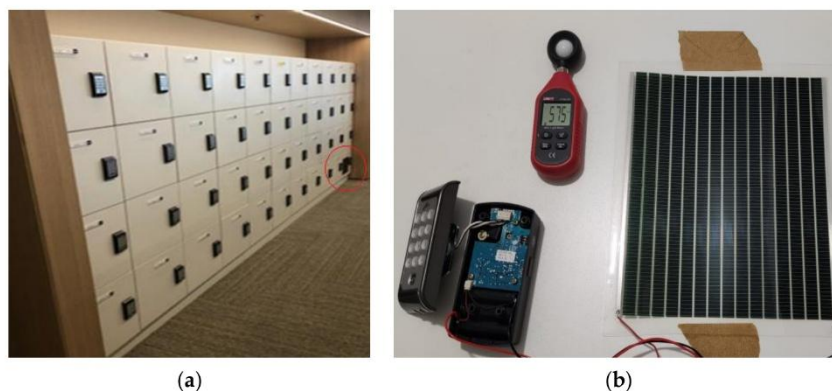


Figure 4. Demonstrated (a) Cabinet with electronic locks and (b) Self-powered development with organic photovoltaic.

The output voltage of the OPV used in an indoor environment naturally fluctuates, as it depends on the lighting conditions to which it is subjected, which in this type of environment tend to be variable. In this installation, the environment is illuminated during office hours, which are 12 noon from Monday to Friday. This fact was taken into account when sizing the system and, as a safety measure, a maximum interval of 72 h without light was stipulated, ensuring that even if the system is left in the dark for this length of time, it will remain operational.

The OPV used, Figure 4b, was developed specifically for the application and, according to the manufacturer, it has a V_{oc} voltage of 15 V when the lighting is over 1000 lux and I_{sc} of 1.5 mA. The tests carried out on the lighting range of the cabinets showed a current variation between 354.10 μ A and 800.05 μ A and a voltage variation between 4.532 V and 8.765 V.

To carry out the second stage, two electronic circuit possibilities were considered for the system solution, both focusing on reduced cost and operational safety. Operating safety is achieved by controlling the voltage on the supercapacitor, which is the critical element of the device. Considering the low voltage supplied by the OPV, the supercapacitor selected was CDA (Zhifengwei Technology, Taichung City, Taiwan)[®] LIC0813Q3R8206, with 20 F and a nominal voltage of 3.8 V, maximum of 4.2 V, with energy storage of 23 mWh and a maximum discharge current of 500 mA, meeting the needs of the intended load.

OPVs are known for being flexible and cheaper to produce than traditional photovoltaic panels, but their energy conversion efficiency is still relatively low. This means that to generate the same amount of energy as conventional panels, you would need a larger space or more OPV panels, which may not be feasible in all situations, especially in urban areas with limited space.

In addition, very low current and voltage values make it difficult to integrate OPVs with existing power systems, which are generally designed to higher specifications.

Therefore, to overcome these limitations, the first circuit designed was an electronic load to dissipate the excess energy after the supercapacitor's maximum voltage is reached. It is a simple circuit that uses a transistor as the active element to control the capacitor's voltage. As the values involved are in the order of μ A, the transistor bias circuit was designed with $M\Omega$ resistors and the transistor selected was a Darlington type with an Hfe of ten thousand. When the capacitor voltage rises, the transistor's base current increases, causing it to discharge the capacitor on the resistor used as a load. The model of this simplified circuit can be seen in Figure 5a.

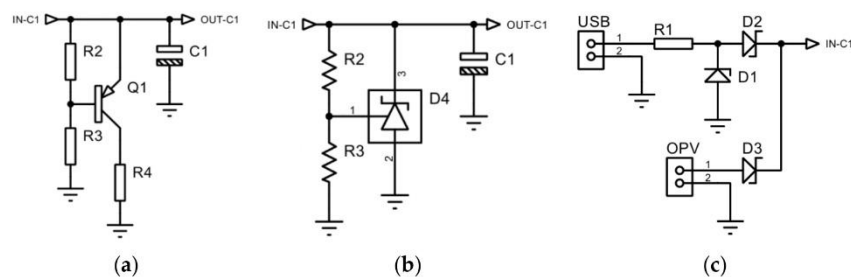


Figure 5. Diagrams of (a) the electronic load, (b) the shunt regulator and (c) the input protection circuit.

The second circuit considered was a shunt regulator, Figure 5b, which works in a similar way to the previous one by diverting the current when the capacitor voltage reaches the desired value. To ensure minimum consumption of the circuit, the bias resistors are also of the order of $M\Omega$ for this model.

In addition to the voltage-limiting circuit on the capacitor, a Schottky diode was added for reverse current protection in the OPV, an auxiliary USB connection charging circuit with current and voltage limiting by Zener diode, protected against reverse current by a Schottky diode as shown in Figure 5c. Schottky diodes were chosen because of the low voltage drop in direct polarization.

With the input circuits defined, it was necessary to implement a PFM-type synchronous boost converter with high conversion efficiency, low power consumption, and high operating frequency. The chip selected was Microone (Nanjing Micro One Elec, Nanjing, China)[®] ME2188A50PG, which uses a PFM control circuit to automatically change the duty cycle

coefficient according to the value of the load current, in order to achieve low ripple, high efficiency, and a wide output voltage range. The chip's integrated synchronous switching tube and low current consumption effectively improve the efficiency of the DC–DC conversion and the life cycle of the equipment. Only three peripheral components are needed to complete the increase in input voltage to the required operating voltage in the system, Figure 6.

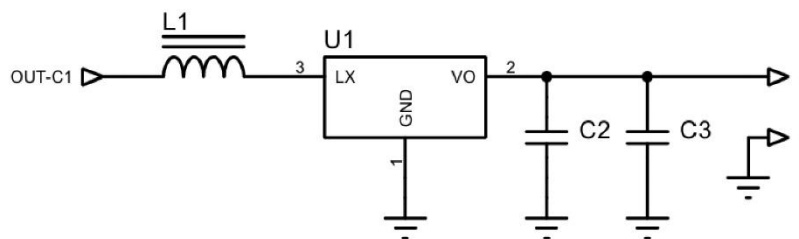


Figure 6. Boost converter diagram.

With the schematics defined, two PCB versions were made: Figure 7a shows the supercapacitor voltage control circuit carried out by the transistor and Figure 7b the circuit with the control carried out by the shunt regulator. Both versions have the same layout on the top side of the board. The choice of miniaturized components made it possible to develop the board in dimensions similar to those of a compartment for three AAA batteries.



Figure 7. Electronic load circuit layout (a) and shunt regulator circuit layout (b).

Both models were produced in stage three on 1.6 mm thick 1 Oz glass fiber PCBs, as shown in Figure 8a,b. In addition, the connectors were inserted to facilitate installation and bench testing.

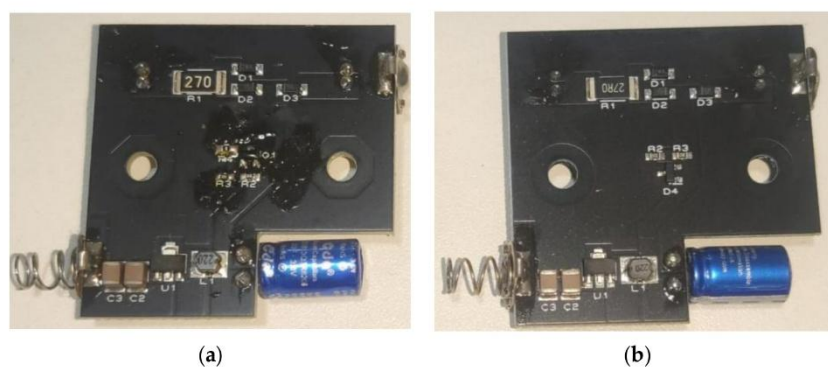


Figure 8. Demonstrated (a) PCB circuit with electronic load and (b) PCB shunt regulator circuit.

The bench tests consisted of determining the consumption of each part of the system in the voltage operating range of the supercapacitor as reported by the manufacturer, i.e., from 2.5 V to 4.2 V. To do this, nine measurements were made between 2.6 V and 4.2 V with a 200 mV step in both circuits. In the case of the circuit with the electronic load, the current in the load resistor was measured, and in the case of the shunt regulator circuit, the current in the anode of the shunt regulator was measured. The consumption of the boost converter over the entire range was also measured and the results will be discussed in the next section.

4. Results

In both circuits, the boost converter had a stable consumption of 17.05 μA over the entire voltage range of the supercapacitor and kept the output regulated and without oscillation in order to keep the lock operating normally.

The circuit with the electronic load showed the values indicated in Table 3 and the circuit with the shunt regulator showed consumption of 35.01 μA over the entire voltage range of the supercapacitor.

Table 3. Electronic load consumption.

Voltage (V)	Current in R4 (μA)
4.20	525.00
4.00	209.00
3.80	75.20
3.60	25.10
3.40	7.94
3.20	2.42
3.00	0.72
2.80	0.21
2.60	0.08

In line with the supercapacitor manufacturer's recommendation, the 5.0 V USB connection auxiliary charging circuit with a 3.6 V Zener diode current and voltage limiter was also tested and, as a result, a maximum charging current of 51.85 mA was obtained, operating at almost half the maximum limit. This circuit is used when the system is installed to charge the capacitor for the first time, in the event of a long period without exposure to light or in the event of a fault to enable the lock to be activated.

The circuits were mounted one at a time in the cabinet, as shown in the illustration above, during a test period of 30 days for each circuit. The electronic lock was used four times a day from Monday to Friday, at the beginning and end of each shift. In both circuits, the lighting activation metric was maintained for a period of 12 h a day.

At the start of the test on each circuit, the supercapacitor was charged to the capacitor's nominal operating voltage using the auxiliary charging connection, and the installations were carried out at the beginning of the week just before the start of the first daily shift.

The operation was observed daily, but without intervention with the devices, precisely to validate their use in real application conditions. On the twenty-second day, the circuit with the electronic load failed to open the lock at the start of the first shift, requiring a recharge of the supercapacitor auxiliary, at which point the capacitor voltage was 1.823 V.

The same usage metric was applied to the shunt regulator circuit and no intervention was required during the 30 days. At the end of the last shift on day 30, the voltage measurement on the capacitor was carried out and the value obtained was 3.789 V, i.e., the capacitor was charged to its nominal operating voltage, validating the effectiveness of the circuit developed.

After this test, situations with lower lighting values were simulated, in which the current supplied by the OPV was reduced by 50 μA per simulation, generating the graph shown in Figure 9, which represents the relationship between the current supplied by the OPV and the number of days that the system would continue to operate while maintaining the consumption pattern of the situation previously presented.

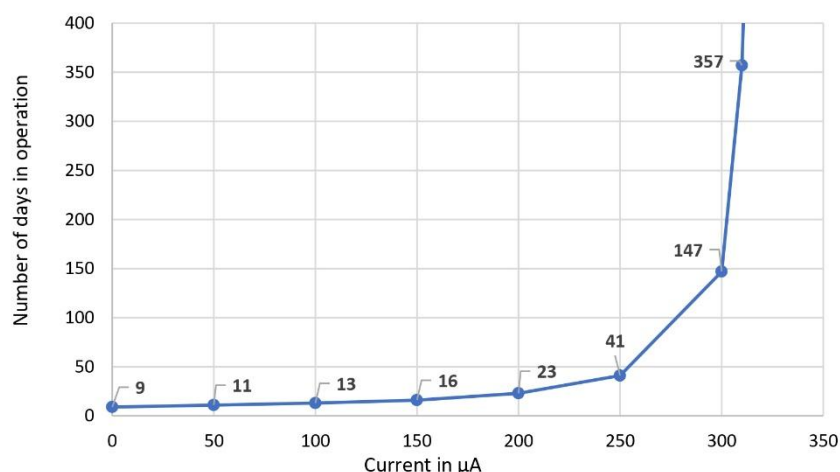


Figure 9. Relationship between current supplied by the OPV and days in operation.

Without the OPV supply, and with the supercapacitor fully charged, the system operates for eight days and shows energy insufficiency on day nine. With the OPV supplying 200 μA , the system operates for 22 days and shows energy insufficiency on day 23, while with 310 μA the system expands its operating capacity to three hundred and 57 days and from 320 μA the system is self-sufficient. It is worth noting that to supply 350 μA to this system requires approximately 250 lux.

5. Discussion

Considering that the validation of the self-powered lock in terms of its operational age took place in a scheme that guaranteed the availability of light provided by a real scenario and made it possible to validate its energy quantities, in order to analyze the behavior of both the charging and discharging cycles of the circuits and their self-sufficiency over time. And, as mentioned in Section 3, the system was installed in the most critical case, where

the illumination level was 250 lux. The result presented in the circuit tests is justifiable due to the difference in efficiency of each one.

According to the results presented, with the supercapacitor at 3800 V, the electronic load circuit consumes 75.20 μA and circuit two only 35.01 μA , i.e., less than half the consumption and, considering that both the load and the converter used maintain the same consumption in both applications, the OPV necessarily needs to deliver more energy for the circuit with the electronic load to remain operational, so the lighting would need to be higher than 250 lux.

The minimum illuminance levels for interiors, as per international standards, vary based on the type of environment and activities conducted. For instance, in offices and administrative areas, the recommended illuminance levels typically range from 500 to 1000 lux, ensuring visual comfort, safety, and operational efficiency within indoor spaces. Thus, achieving a minimum of 250 lux is feasible in standard indoor settings. The device created has a broad range of applications, suitable for all loads under 1 W. Figure 10 illustrates various potential applications based on power consumption, highlighting the system's versatility across scenarios such as sensor node networks and home automation devices [36].

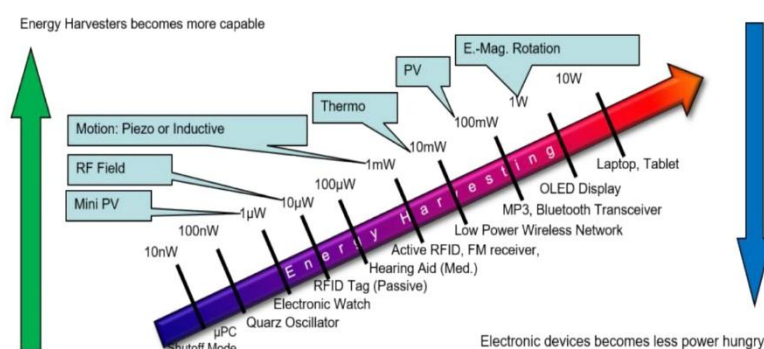


Figure 10. Energy harvesting resources versus requirements [36].

Knowing that the amount of accumulated load is equal to the current multiplied by the time, it is possible to calculate the amount of accumulated load over a twelve-hour period and use this value to analyze the weekly accumulation of load, discounting the daily consumption of the lock's drives.

The sum of the consumption current of the lock on standby with the consumption of the inverter and the shunt regulator circuit is 89.06 μA , giving a total daily consumption of 7.69 C and minimum generation in 12 h for a current of 350.00 μA totals 15.12 C, which results in a daily surplus of 7.42 C. Removing the consumption of the lock's four daily actuations leaves 3.24 C of charge, thus keeping the capacitor charged. With the same conditions for circuit one, the daily load deficit is 0.23 C.

This analysis shows the system's consumption agents (Figure 11). The highest consumption is due to the four drives of the electronic lock (35%), followed by standby consumption (27%), almost the same value as the shunt regulator (26%) and supplemented by the 12% of the boost converter (12%).

In view of the autonomy results and the configuration of the tests carried out, the application of the Self-Powered lock with OPV is recommended in environments with an illuminance level above 250 lux, provided that the values presented in Table 4 characterizing the operability and energy sufficiency of the system used are observed.

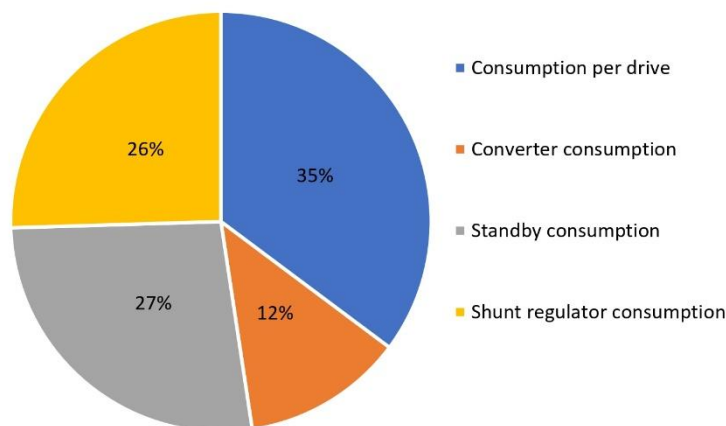


Figure 11. Daily load consumption of the components, in relation to the total load consumed by the system per day.

Table 4. Characterization of the System's Operability and Energy Sufficiency.

Operating Specifications	Value
Maximum capacitor voltage [V]:	4.20
Minimum capacitor voltage [V]:	2.50
Maximum time without recharging [h]:	72.00
Charging time per day [h]:	12.00
Interval between recharging [h]:	12.00
Minimum charging current [μ A]:	350.00
Capacitance [F]:	20.00
Standby load consumption [μ A]:	37.00
Load consumption under normal conditions [mA]	69.70
Number of operations between recharge intervals:	4.00
Amount of load accumulated per day [C]:	15.12
Amount of standby charge consumed in 24 h [C]:	7.69
Recharge surplus per day [C]:	3.24

6. Conclusions

The aim of this work was to investigate and test techniques and materials for the application of self-sufficient energy systems indoors, with integration into a commercial electronic lock. Initially, a systematic literature review was carried out using the Proknow-C methodology, resulting in a bibliographic portfolio with 30 relevant articles on the subject, but none of them addressed an implementation for integrating the OPV into this type of equipment.

Next, two circuits were developed to integrate the OPV with the supercapacitor and a commercial load. Based on bench tests, it was possible to create a device that connects the OPV to the supercapacitor, obtaining satisfactory results for the operational functioning of the system in real scenarios.

To assess the system's energy self-sufficiency, an implementation was carried out in an application scenario and the system was tested over 30 days to analyze its performance. The results obtained proved the viability and effectiveness of the system. With a minimum daily illuminance of 250 lux for 12 h, for self-sufficient operation. With the results obtained, it can be concluded that the range of applications for the device created is very wide, making it suitable for all loads under 1 W. Mainly sensor node networks and home automation devices.

Finally, the successful implementation of this system opens up opportunities for its expansion and application in other electronic devices with similar characteristics in

terms of energy consumption and storage. This makes it possible to use this approach in various contexts, broadening its potential impact and promoting energy efficiency in various applications, resulting in the patent application [37].

Author Contributions: Conceptualization: E.A.d.S., W.M.C.F., M.R.C. and O.H.A.J.; methodology: E.A.d.S., W.M.C.F. and O.H.A.J.; validation: E.A.d.S. and O.H.A.J.; investigation and simulation: E.A.d.S., W.M.C.F. and O.H.A.J.; writing—original draft preparation: E.A.d.S., W.M.C.F., M.R.C. and O.H.A.J.; writing—review and editing: E.A.d.S. and O.H.A.J.; project administration: E.A.d.S. and O.H.A.J.; funding acquisition: M.R.C. and O.H.A.J. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was partially supported by the FACEPE agency (Fundação de Amparo a Pesquisa de Pernambuco) throughout the project with references APQ-0616-9.25/21 and APQ-0642-9.25/22. O.H.A.J. was funded by the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), grant numbers 407531/2018-1, 303293/2020-9, 405385/2022-6, 405350/2022-8 and 40666/2022-3, as well as the Program in Energy Systems Engineering (PPGESE) Academic Unit of Cabo de Santo Agostinho (UACSA), Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE). M.H.M.B. and F.M.O. were funded by the Federal University of Latin American Integration (UNILA). M.R.C. was funded by UNICAMP (State University of Campinas) throughout the Auxílio Início de Carreira (Docente), FAEPEX, process number 2095/23, as well as the Programa de Incentivo a Novos Docentes (PIND), FAEPEX, process number 2419/23.

Data Availability Statement: Data are contained within the article.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Sutikno, T.; Aprilianto, R.A.; Purnama, E.H.S. Application of non-isolated bidirectional DC–DC converters for renewable and sustainable energy systems: A Review. *Clean Energy* **2023**, *7*, 293–311. [\[CrossRef\]](#)
2. Kaushalya, T.; Littow, M.; Virta, E.; Ruotsalainen, T.; Juuti, J.; Bai, E.Y. Evaluation of charging efficiency for power management integrated circuits and their compatibility with indoor light energy harvesting devices for IOT sensors. *SSRN*, 2023; *preprint*. [\[CrossRef\]](#)
3. Mohamad-Saleh, W.-H.T.E.J. Critical review on interrelationship of electro-devices in PV solar systems with their evolution and future prospects for MPPT applications. *Energies* **2023**, *16*, 850. [\[CrossRef\]](#)
4. Bito, J.; Hester, J.G.; Tentzeris, M.M. A fully autonomous ultra-low power hybrid RF/Photovoltaic energy harvesting system with –25 dbm sensitivity. In Proceedings of the 2017 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), Taipei, Taiwan, 10–12 May 2017; pp. 1–4. [\[CrossRef\]](#)
5. Jung, S.; Oh, J.; Yang, U.J.; Lee, S.M.; Lee, J.; Jeong, M.; Cho, Y.; Kim, S.; Baik, J.M.; Yang, C. 3D Cu ball-based hybrid triboelectric nanogenerator with non-fullerene organic photovoltaic cells for self-powering indoor electronics. *Nano Energy* **2020**, *77*, 105271. [\[CrossRef\]](#)
6. Maciel, J.N.; Ledesma, J.J.G.; Ando Junior, O.H. Forecasting solar power output generation: A systematic review with the ProKnow-C. *IEEE Lat. Am. Trans.* **2021**, *19*, 612–624. [\[CrossRef\]](#)
7. Ensslin, S.R.; Ensslin, L.; Yamakawa, E.K.; Nagaoka, M.P.T.; Aoki, A.R.; Siebert, L.C. Processo estruturado de revisão da literatura e análise bibliométrica sobre avaliação de desempenho de processos de implementação de eficiência energética. *Rev. Bras. Energ.* **2014**, *20*, 21–50.
8. Sher, H.A.; Murtaza, A.F.; Noman, A.; Addoweesh, K.E.; Al-Haddad, K.; Chiaberge, M. A new sensorless hybrid mppt algorithm based on fractional short-circuit current measurement and P&O MPPT. *IEEE Trans. Sustain. Energy* **2015**, *6*, 1426–1434. [\[CrossRef\]](#)
9. Tang, X.; Wang, X.; Cattley, R.; Gu, F.; Ball, E.A. Energy harvesting technologies for achieving self-powered wireless sensor networks in machine condition monitoring: A Review. *Sensors* **2018**, *18*, 4113. [\[CrossRef\]](#)
10. Liu, R.; Takakuwa, M.; Li, A.; Inoue, D.; Hashizume, D.; Yu, K.; Umezue, S.; Fukuda, K.; Someya, T. An efficient ultra-flexible photo-charging system integrating organic photovoltaics and supercapacitors. *Adv. Energy Mater.* **2020**, *10*, 2000523. [\[CrossRef\]](#)
11. Singh, R.; Shin, S.C.; Lee, H.; Kim, M.; Shim, J.W.; Cho, K.; Lee, J.J. ternary blend strategy for achieving high-efficiency organic photovoltaic devices for indoor applications. *Chem. Eur. J.* **2019**, *25*, 6154–6161. [\[CrossRef\]](#)
12. Satharasinghe, A.; Hughes-Riley, T.; Dias, T. A review of solar energy harvesting electronic textiles. *Sensors* **2020**, *20*, 5938. [\[CrossRef\]](#)
13. Tang, Y.; Li, X.; Lv, H.; Wang, W.; Zhi, C.; Li, E.H. Integration designs toward new-generation wearable energy supply-sensor systems for real-time health monitoring: A Minireview. *InfoMat* **2020**, *2*, 1109–1130. [\[CrossRef\]](#)

14. Patra, A.; Namsheer, K.; Jose, J.R.; Sahoo, S.; Chakraborty, B.; Rout, C.S. Understanding the charge storage mechanism of supercapacitors: In situ/operando spectroscopic approaches and theoretical investigations. *J. Mater. Chem. A* **2021**, *9*, 25852–25891. [CrossRef]
15. Grossi, M. Energy harvesting strategies for wireless sensor networks and mobile devices: A Review. *Electronics* **2021**, *10*, 661. [CrossRef]
16. Takshi, A.; Aljafari, B.; Kareri, T.; Stefanakos, E. A critical review on the voltage requirement in hybrid cells with solar energy harvesting and energy storage capability. *Batter. Supercaps* **2021**, *4*, 252–267. [CrossRef]
17. AAbdelnour, A.; Hallet, A.; Dkhil, S.B.; Pierron, P.; Kaddour, D.; Tedjini, S. Energy harvesting based on printed organic photovoltaic cells for RFID applications. In Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (Rfid-Ta), Pisa, Italy, 25–27 September 2019; pp. 110–112. [CrossRef]
18. Batista, D.; Oliveira, L.B.; Paulino, N.; Carvalho, C.; Oliveira, J.P.; Farinhas, J.; Charas, A.; dos Santos, P.M. Combined organic photovoltaic cells and ultra low power CMOS circuit for indoor light energy harvesting. *Sensors* **2019**, *19*, 1803. [CrossRef]
19. Nordin, N.A.; Ansari, M.N.M.; Nomanbhay, S.M.; Hamid, N.A.; Tan, N.M.; Yahya, Z.; Abdullah, I. Integrating photovoltaic (PV) solar cells and supercapacitors for sustainable energy devices: A Review. *Energies* **2021**, *14*, 7211. [CrossRef]
20. Zhang, S.; Bristow, N.; David, T.W.; Elliott, F.; O'mahony, J.; Kettle, E.J. Development of an organic photovoltaic energy harvesting system for wireless sensor networks; application to autonomous building information management systems and optimisation of OPV module sizes for future applications. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **2022**, *236*, 111550. [CrossRef]
21. Takshi, A.; Tevi, T.; Rahimi, F. Organic photovoltaic devices with concurrent solar energy harvesting and charge storage capability. In Proceedings of the SPIE Optics + Photonics for Sustainable Energy, San Diego, CA, USA, 9–13 August 2015; Volume 9562. [CrossRef]
22. Iwan, A.; Pellowski, W.; Bogdanowicz, K.A. Conversion of radiophotoluminescence irradiation into electricity in photovoltaic cells. A review of theoretical considerations and practical solutions. *Energies* **2021**, *14*, 6186. [CrossRef]
23. Rahman, M.S.; Chakravarty, U.K. A hybrid energy harvesting system based on solar radiation and mechanical vibration. In *Volume 1: Advances in Aerospace Technology*; American Society of Mechanical Engineers: Pittsburgh, PA, USA, 2018; p. V001t03a017. [CrossRef]
24. Lavanya, A.; Navamani, J.D.; Vijayakumar, K. Performance analysis of triple port dc-dc converter for energy harvesting systems. In Proceedings of the 11th National Conference on Mathematical Techniques and Applications, Chennai, India, 11–12 January 2019; p. 020012. [CrossRef]
25. Lupo, D.; Keskinen, J.; Taavela, J.; Sirén, H.; Virtanen, J.; Mäntysalo, M. Flexible Temperature Logger Powered by Solar Cell and Supercapacitor. Poster Session Presented at innoLAE 2019, Cambridge, UK, 2019. Available online: <https://researchportal.tuni.fi/en/publications/flexible-temperature-logger-powered-by-solar-cell-and-supercapaci> (accessed on 20 May 2024).
26. Biswas, S.; Lee, Y.; Kim, H. Micropower energy harvesting using high-efficiency indoor organic photovoltaics for self-powered sensor systems. *J. Sens. Sci. Technol.* **2021**, *30*, 364–368. [CrossRef]
27. MARvani, M.; Keskinen, J.; Mansfeld, S.; Railanmaa, A.; Rokaya, C.; Lupo, D.; Hiltunen, A.; Vivo, P. Flexible energy supply for distributed electronics powered by organic solar cell and printed supercapacitor. In Proceedings of the 2020 IEEE 20th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO), Montreal, QC, Canada, 29–31 July 2020; pp. 257–262. [CrossRef]
28. Mashali, S.; Varjani, A.Y. Dual-Input, Single-Output Step-Up Dc/Dc power electronic interface for energy harvesting systems. In Proceedings of the 2023 14th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC), Babol, Iran, 31 January–2 February 2023; pp. 1–5. [CrossRef]
29. Oliveira, F.M.; Mariano, A.C.S.; Salvadori, F.; Ando Junior, O.H. Power management and power quality system applied in a single-phase nanogrid. *Energies* **2022**, *15*, 7121. [CrossRef]
30. Kim, W.; Cho, K.; Lee, J.; Ko, D.; Jung, E.S. An indoor light-powered sensor system integrated with organic photovoltaics. *Adv. Mater. Technol.* **2023**, *8*, 2202040. [CrossRef]
31. Dimitriev, O.P. Thermomechanical energy converters for harvesting thermal energy: A Review. *J. Renew. Mater.* **2023**, *11*, 1555–1600. [CrossRef]
32. Poulek, V.; Dang, M.-Q.; Libra, M.; Beránek, V.; Safránková, J. PV panel with integrated lithium accumulators for BAPV applications—One year thermal evaluation. *IEEE J. Photovolt.* **2020**, *10*, 150–152. [CrossRef]
33. Izidoro, C.L.; Chaves Filho, W.M.; Cavallari, M.R.; Ando Junior, O.H. Organic Photovoltaic (OPV) with electronic protection system: A systematic review. *Braz. Arch. Biol. Technol.* **2024**, *67*, e24230786. [CrossRef]
34. Neves, L.A.; Leite, G.C.; by Paula Vieira, K.C.; MacKenzie, R.; Porto, M.P. Analysis of the performance of organic and inorganic photovoltaic cells under different air masses using numerical simulation. In Proceedings of the VIII Brazilian Congress of Solar Energy, Fortaleza, Brazil, 1–5 June 2020.
35. Kjellby, R.A.; Johnsrud, T.E.; Loetveit, S.E.; Cenkeramaddi, L.R.; Hamid, M.; Beferull-Lozano, B. Self-Powered IoT device for indoor applications. In Proceedings of the 31th International Conference on VLSI Design and 17th International Conference on Embedded Systems, Pune, India, 6–10 January 2018.

-
36. Foelkel, L. Energy Harvesting is not Fiction Anymore. In Proceedings of the 2nd PCNS, Bucharest, Romania, 10–13 September 2019.
 37. Ando Junior, O.H.; Chaves Filho, W.M.; Silva, E.A.D. *System for Conditioning, Feeding, Storing, and Managing Energy for Sensors and/or Electronic Devices Self-Powered by Photovoltaic Cell*; BR1020240088069; National Institute of Industrial Property (INPI): Rio de Janeiro, Brazil, 2024.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.