

POTÊNCIA TRANSFORMADORA E SUSTENTABILIDADE

na Engenharia de Energia

Claudia Leites Luchese
João Manoel Lenz
(org.)



EDUNILA



POTÊNCIA TRANSFORMADORA E SUSTENTABILIDADE

na Engenharia de Energia



UNIVERSIDADE FEDERAL DA INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA

Diana Araujo Pereira *Reitora*

Rodne de Oliveira Lima *Vice-reitor*

EDUNILA – EDITORA UNIVERSITÁRIA

Julio da Silveira Moreira *Coordenador da EDUNILA*

Leonel Gandi dos Santos *Vice-coordenador da EDUNILA
e Bibliotecário-documentalista*

Andréia Moassab *Membra da Coordenação Executiva*

Ailda Santos dos Prazeres *Assistente em administração*

Claudinéia Pires *Assistente em administração*

Francieli Padilha Bras Costa *Programadora visual*

Ricardo Fernando da Silva Ramos *Assistente em administração*

CONSELHO EDITORIAL

Julio da Silveira Moreira *Presidente do Conselho*

Leonel Gandi dos Santos *Vice-presidente do Conselho*

Débora Viletti Zuck *Representante dos/as técnico-administrativos/as em educação
da UNILA*

Raulandis Magdariaga Perez *Representante dos/as discentes de graduação da UNILA*

Janice Scheila Kieling *Representante dos/as discentes de pós-graduação da UNILA*

Selma Passos Cardoso *Representante do Instituto Latino-Americano de Tecnologia,
Infraestrutura e Território (ILATIT - UNILA)*

Diego Chozas Ruiz-Belloso *Representante do Instituto Latino-Americano de Arte, Cultura
e História (ILAACH - UNILA)*

Luiz Roberto Ribeiro Faria Junior *Representante do Instituto Latino-Americano de Ciências da
Vida e da Natureza (ILACVN - UNILA)*

Ramon Blanco de Freitas *Representante do Instituto Latino-Americano de Economia,
Sociedade e Política (ILAESP - UNILA)*

Avacir Gomes dos Santos Silva *Representante externa - Professora Associada no Curso de
Pedagogia da Universidade Federal de Rondônia (UNIR)*

Edilma de Jesus Desidério *Representante externa - Professora voluntária no Campus do
Sertão da Universidade Federal de Alagoas (UFAL)*

Lilibeth Janneth Zambrano Contreras *Representante externa - Coordenadora da Rede Internacional
de Pesquisadores de Literatura Comparada - REDILIC, do
Instituto de Pesquisa Literária "Gonzalo Picón Febres", da
Faculdade de Ciências Humanas e Educação, da Universidade de
Los Andes, Mérida, Venezuela*

Ricardo Scavone Yegros *Representante externo - Membro da Academia Paraguaya de la
Historia e Diretor Geral da Academia Diplomática e Consular
do Ministério de Relações Exteriores do Paraguai*

Jorge Luiz Favaro *Representante externo - Docente em Extensão e
Desenvolvimento Rural na UNICENTRO*

Claudia Leites Luchese
João Manoel Lenz
(org.)

POTÊNCIA TRANSFORMADORA E
SUSTENTABILIDADE
NA ENGENHARIA DE ENERGIA

Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil

EDUNILA

Editora da
Universidade Federal da
Integração Latino-Americana

2026

© 2026 EDUNILA – Editora Universitária

EQUIPE EDITORIAL

Julio da Silveira Moreira *Edição e Preparação de Originais*

Nicolly Rocha de Souza [Órbita] *Normalização e Revisão*

Heloise Reis Ventura *Revisão de Texto*

Hanna Lara Martins Lobo [Órbita] *Projeto Gráfico e Diagramação*

Catálogo na Publicação (CIP)

P861 Potência transformadora e sustentabilidade na engenharia de energia / Claudia Leites Luchese; João Manoel Lenz (org.). -- Foz do Iguaçu: EDUNILA, 2026.

PDF (135 p.) : il.

ISBN: 978-65-86342-73-4

1. Biocombustíveis. 2. Eficiência Térmica. 3. Energia Elétrica. 4. Sistemas Energéticos. I. Luchese, Claudia Leites. II, Lenz, João Manoel. III. TítuloEDUNILA, 2026.

CDD 629

CDU 62

Ficha Catalográfica elaborada por Leonel Gandi dos Santos CRB9/2269

Todos os direitos reservados e protegidos pela Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998. É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios sem autorização prévia, por escrito, da editora.

Direitos adquiridos pela EDUNILA – Editora Universitária.

Editora associada à:



EDUNILA
Editora da
Universidade Federal da
Integração Latino-Americana

EDUNILA – Editora Universitária

Campus Integração - Av. Tancredo Neves, 3147

Foz do Iguaçu – PR – Brasil | CEP: 85857-970

editora@unila.edu.br | <https://portal.unila.edu.br/editora>

PALAVRAS DA EDITORA

“De los libros honestos, piadosos y fortalecedores hablamos, que con espíritu americano, estudian problemas de América. No tanto de libros pomposos y retóricos, y de conocimientos abstractos universales, – cuanto de esos otros concretos y beneméritos, escritos al calor de nuestro sol, y en el fragor de nuestras luchas generosas, sangrientas como todas las entrañas”.

José Martí, Biblioteca Americana, 1884

A Coleção Semillas nasce da convicção de que a universidade pública, latino-americana e fronteiriça, deve valorizar e difundir os conhecimentos produzidos também em seus cursos de graduação. O que se apresenta aqui não são introduções genéricas, nem textos adaptados à lógica de manuais. São obras que emergem da vivência concreta de estudantes, docentes e técnicos em seus contextos formativos, das práticas acadêmicas que se cruzam no cotidiano do ensino, da pesquisa e da extensão.

Estes livros não apenas refletem, mas também projetam os percursos formativos da UNILA. As experiências de cada curso se expressam em objetos de estudo enraizados nos territórios, nas culturas e nos dilemas do continente. A graduação aparece, assim, como espaço legítimo de produção de conhecimento, no qual se praticam metodologias, constroem-se modelos, testam-se hipóteses, analisam-se dados e elaboram-se perguntas e respostas sobre a realidade.

Na UNILA, essa realidade se estende para além das fronteiras nacionais. Muitos estudantes desenvolvem pesquisas e ações de extensão nos países de onde vêm, estabelecendo uma troca ativa e crítica de saberes entre contextos latino-americanos diversos. A

formação universitária ganha, assim, uma dimensão internacional que não se dá por meio de transplantes teóricos, mas pela partilha situada de experiências e problemas.

A Editora da UNILA e a Pró-Reitoria de Graduação prestam reconhecimento ao trabalho das graduações da universidade, às suas estruturas curriculares, seus colegiados, professores e professoras, e sobretudo ao protagonismo estudantil que tem marcado o percurso institucional desde os primeiros anos, a exemplo dos componentes do Ciclo Comum de Estudos. As pesquisas e estudos desenvolvidos na graduação seguirão produzindo debate, diálogo e novas perguntas sobre os problemas e os caminhos da nossa região e da América Latina.

Sumário

APRESENTAÇÃO..... 11

ENERGIA QUÍMICA: BIOCOMBUSTÍVEIS

EFEITO DA NUTRIÇÃO ANIMAL NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS..... 18

Aline Thais Gomes Rodrigues, Rodrigo Monteiro Eliott e
Andreia Cristina Furtado

Avaliação do biogás resultante do processo de
digestão anaeróbia..... 19

USO DE DIFERENTES BIOMASSAS NO PROCESSO DE PIRÓLISE..... 28

Jhon Steven Navarro Hoyos e Rodrigo Monteiro Eliott

Reações de pirólise primária: principais
parâmetros cinéticos 30

Reações de pirólise secundária e desenvolvimento
do processo 32

Avaliação dos rendimentos do processo de
pirólise rápida 34

RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE GÁS DE ATERROS 41

Maiara Fernanda Garcia, Ricardo Morel Hartmann e
Luís Evelio Garcia Acevedo

Determinação das vazões médias de gás de
aterro geradas 45

ENERGIA MECÂNICA: EFICIÊNCIA TÉRMICA

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA BIBLIOTECA 53

Melanie Gissel Urdangarín Gamarra e Fabyo Luiz Pereira

Modelo de consumo elétrico e determinação das zonas térmicas..... 54

Avaliação do consumo elétrico mensal do modelo base e das proposições.....58

ENERGIA ELÉTRICA: ESTIMATIVA E PLANEJAMENTO

CVAR NO PLANEJAMENTO DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL 67

Diana Vanessa López Maldonado, Rafael José de Andrade e Jorge Javier Gimenez Ledesma

Avaliação dos impactos causados pelas mudanças nos parâmetros do CVaR 69

SERIES TEMPORALES PARA PREVISIÓN DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA 79

Vanessa Maria Serrano Ardila, Joylan Nunes Maciel y Oswaldo Hideo Ando Junior

Etapas del algoritmo STD: WEIGHTED and FIG (Fuzzy Information Granular)..... 80

Configuración experimental 85

Aprendizaje y pronóstico..... 86

Simulación de potencia 88

ALGORITMO MICROGENÉTICO APLICADO NA PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO 96

Jose Alejandro Encinas Riveros e Jorge Javier Giménez Ledesma

Dispositivos de proteção do sistema de distribuição	98
Metodologia de validação do estudo de caso	100
Funcionamento do sistema sem falta e com falta.....	102
Execução do algoritmo microgenético e ajustes novos para relés	103
Avaliações dos diferentes cenários	104

PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

SISTEMA HÍBRIDO DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA.....113

Benhur Azambuja Possatto e Walfrido Alonso Pippo

Ciclo base de cogeração	114
Sistema heliotérmico	115
Proposta de sistema híbrido	118

DIMENSIONAMIENTO DE UNA PLANTA PILOTO DE HIDRÓGENO..... 125

Angel Ambrocio Quispe y Luís Evelio Garcia Acevedo

Experimentaciones en la planta de producción de hidrógeno	127
Dimensionamiento técnico de los equipos: aspecto económicos y socioambientales	129

SOBRE OS ORGANIZADORES.....134

APRESENTAÇÃO

O conceito de energia, oriundo do século XIX, desempenha papel essencial em todas as áreas do conhecimento que, juntas, integram a ciência moderna. A energia é fundamental nas três principais áreas que compõem o curso de Engenharia de Energia, sendo elas: mecânica, química, elétrica, e na área de gestão e projetos, assim como em outras áreas interrelacionadas com as diretrizes do curso, tais como ciências biológicas, administração, economia e áreas de cunho social.

Essas particularidades conferem ao profissional interessado no estudo de aproveitamento da energia uma visão abrangente, transversal e multidisciplinar, cuja característica principal está relacionada com a abordagem da temática como tópico interdisciplinar que, permeando as diferentes áreas do conhecimento, entende e domina a energia em benefício social. Também é importante ressaltar que o projeto pedagógico do curso possui um caráter diferenciado uma vez que aborda as questões relacionadas com a integração latino-americana e o desenvolvimento dos países da América Latina, que são prioridades acadêmicas da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, UNILA.

Histórico do Curso

A UNILA foi criada em 12 de janeiro de 2010, quando da sanção da Lei nº 12.189. Está vinculada ao Ministério da Educação do Brasil, com sede e foro na cidade de Foz do Iguaçu, Estado do Paraná. O projeto inicial do curso de Engenharia de Energia foi proposto pela Itaipu Binacional (IB) e Fundação Parque Tecnológico Itaipu (FPTI), a pedido da Comissão de Implantação da

UNILA. Inicialmente, foi idealizado como curso de Engenharia Ambiental de Energias Renováveis (EAER), entretanto, foi implementado como Engenharia de Energia (CEEN).

O curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal da Integração Latino – Americana foi criado pela Portaria UNILA 11/2010, publicada dia 1º de junho de 2010. Em agosto do mesmo ano, foram iniciadas suas atividades acadêmicas. A Portaria 420/2011, já com o curso em funcionamento, alterou o turno da carreira e as aulas, inicialmente realizadas apenas no turno da manhã, passaram a ocorrer em tempo integral, com concentração nos turnos matutino e vespertino.

Após a consolidação da equipe de trabalho dos professores engenheiros do CEEN, que ocorreu somente no começo de 2013, foi feita uma avaliação global da situação do curso onde foram apontadas várias dificuldades no que diz respeito à estrutura, matriz curricular, requerimentos legais, corpo docente, entre outros. Com este cenário a equipe iniciou a busca imediata de medidas que levassem ao bom andamento do curso. Cientes da importância de opiniões diversas, emitidas por atores experientes no assunto da engenharia (não apenas brasileiros, mas também em toda a América Latina), foi realizado o I Fórum Latino – Americano de Engenharia – I FLAE “Perspectiva para integração, educação e desenvolvimento”, o qual guardou, dentre seus objetivos, a rediscussão dos rumos do curso de Engenharia de Energia da UNILA.

Paralelamente ao fórum, às ações concretas para a institucionalização da UNILA, à discussão de currículo com diferentes instituições (UNB, UFSC e a ABENGE), foram, também, realizadas iniciativas de discussão e capacitação com a participação de professores em eventos, tais como: Encontro Nacional de Coordenadores de Engenharia Mecânica – III ENACEM, realizado nos dias 26, 27 e 28 de agosto de 2013 na cidade de Bonito MS; Fórum de Docentes realizado pelo Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Paraná (CREA-PR), em Curitiba nos dias 8 a 10 de outubro de 2013; Reunião Nacional sobre Engenharia de Energia no

Sistema CONFEA/CREA, realizada em Brasília, no dia 22 de outubro de 2013; Simpósio Internacional Sobre Interdisciplinaridade no Ensino, na Pesquisa e na Extensão – Região Sul – SIIPE, realizado em Florianópolis, entre os dias 23 e 25 de outubro de 2013.

Uma das principais conclusões obtidas neste processo foi o entendimento, conforme alinhamentos nacionais, de que a abordagem da energia do ponto de vista tecnológico é um tópico interdisciplinar, o qual permeia diferentes áreas do conhecimento e demanda um curso de engenharia com visão sistêmica na área, exigindo, principalmente, profissionais formados e atuantes nas áreas de engenharia química, engenharia mecânica e engenharia elétrica. Com esse intuito multidisciplinar, na Tabela A está apresentada a atual composição do corpo docente do Curso de Engenharia de Energia da UNILA, assim como suas respectivas formações acadêmicas. Atualmente o curso conta com 12 docentes efetivos (dedicação exclusiva) que são responsáveis por ministrar as disciplinas obrigatórias, tais como: Fundamentos de Cinética Química, Processos Termoquímicos de Conversão de Energia, Biocombustíveis e Operações Unitárias para Engenharia de Energia diretamente relacionadas com as áreas de Engenharia Química e Engenharia Mecânica; Eletrônica básica, Conversão Eletromecânica de Energia I e II, Sistemas de Energia Solar, Acionamentos, Sistemas de Controle, Sistemas de Energia Eólica e Sistemas Hidroelétricos, diretamente relacionados com as áreas de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica, além das disciplinas do núcleo de conteúdos básicos do curso de Engenharia de Energia, das disciplinas núcleo de conteúdos profissionalizantes e das disciplinas do ciclo comum de estudos. O curso de Engenharia de Energia recebeu nota quatro na última avaliação realizada pelo MEC em 2017. O processo seletivo de ingresso na UNILA é realizado anualmente, via inscrição no SISU, sendo que a classificação dos alunos é pela pontuação do ENEM.

Tabela A – Relação atual de professores e sua formação acadêmica dos docentes do Curso de Engenharia de Energia da UNILA

Docente	Formação
Cláudia Leites Luchese	Engenharia Química
Fabyo Luiz Pereira	Engenharia Mecânica
Gustavo Adolfo Ronceros Rivas	Engenharia Mecânica – Termofluidos
João Manoel Lenz Vianna da Silva	Engenharia Elétrica
Jorge Javier Gimenez Ledesma	Engenharia Eletromecânica –Sistemas Elétricos
Luis Evelio Garcia Acevedo	Engenharia Mecânica
Maicon Coelho Evaldt	Engenharia Elétrica
Manuel Salomon Salazar Jarufe	Engenharia Industrial
Ricardo Morel Hartmann	Engenharia Mecânica
Rodrigo Delfim Guarizi	Engenharia Elétrica
Rodrigo Monteiro Elliott	Engenharia Química
Walber Ferreira Braga	Engenharia Mecânica

Dentre os ingressantes no curso de Engenharia de Energia da UNILA, entre os anos de 2010 e 2024, aproximadamente 58% são brasileiros e cerca de 42% são estrangeiros, provenientes de diferentes países, tais como: Paraguai (37%), Colômbia (10%), Haiti (9%), Bolívia (7,5%), Peru (7%), Equador (5%), Uruguai (5%), Argentina (4,5%), Chile (3%) e Venezuela (3%); ingressantes de outros países como Costa Rica, Cuba, El Salvador, Guatemala, Guiné-Bissau, Honduras, Panamá, Paquistão e República Dominicana juntos representam aproximadamente 8%.

Até o presente momento, 84 bacharéis em Engenharia de Energia foram formados pela UNILA e estão atuando em diferentes áreas de trabalho e ao redor do mundo. Enquanto a maioria destes profissionais atuam no Brasil, muitos hoje trabalham em empresas pela América Latina (como Colômbia, Peru, Paraguai, entre outros), Europa, América do Norte e Oriente Médio. Os egressos do curso de Engenharia de Energia também atuam em

distintos setores e funções: engenheiros(as) na indústria, projetistas em empresas de energia solar, eólica, biogás e plantas de hidrogênio, operação e análise no setor elétrico (geração, transmissão, distribuição), comissionamento de novas usinas de energia. A formação do curso também dá subsídios para os egressos que atuam em pesquisa e desenvolvimento, em educação no nível superior, ou em áreas correlatas, como são os casos, por exemplo, dos que atuam nos campos de *Data Science* e agricultura inteligente.

Esta obra objetiva demonstrar a multidisciplinariedade envolvida na formação profissional dos Engenheiros de Energia apresentando uma coletânea de Trabalhos de Conclusão de Curso que foram selecionados utilizando os seguintes critérios: a) complexidade do assunto; b) qualidade da metodologia e resultados; c) teor de inovação e potencial de continuidade; d) importância do estudo para a ciência e para a sociedade e e) formatação, organização e escrita.

Estes trabalhos também estão relacionados com a atual demanda energética e como ela impacta no contexto de mudanças climáticas e transição energética, gera curiosidade e necessidade de melhorar o entendimento dos sistemas e processos de geração de energia. Segundo dados de 2022 divulgados pelo Balanço Energético Nacional (BEN), a matriz energética brasileira é composta aproximadamente por 78% de fontes renováveis, enquanto a média mundial atinge valores próximos a 30%, significativamente inferiores à média brasileira, segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA). Esses números destacam a importância e o elevado potencial do Brasil para gerar energia a partir do uso de fontes renováveis. Além disso, a diversificação da matriz energética e o uso de diferentes fontes de energia possibilita a geração de índices relacionados com a independência socioeconômica das nações, sendo, portanto, requerida a forte atuação de profissionais altamente capacitados em áreas de processamento e gestão energética estratégica a fim de potencializar o uso de diferentes fontes renováveis de energia.

A titulação de Bacharel em Engenharia de Energia na UNILA está prevista para ser obtida em dez semestres (cinco anos) regulares de acordo com a carga horária prevista no Projeto Pedagógico do Curso (PPC), englobando disciplinas básicas de Cálculo, Física, Química, Línguas (Português e Espanhol), Desenho Técnico e Geometria Analítica e disciplinas específicas diretamente relacionadas com a área de energia, tais como: Fundamentos de Cinética Química, Processos Termoquímicos de Conversão de Energia, Biocombustíveis, Tecnologia do Hidrogênio, Operações Unitárias para Engenharia de Energia, Eletrônica Básica, Conversão Eletromecânica de Energia I e II, Sistemas de Energia Solar, Acionamentos, Sistemas de Controle, Sistemas de Energia Eólica e Sistemas Hidroelétricos, Engenharia Econômica, Transmissão e Distribuição de Energia, Centrais Termoelétricas e de Cogeração, Planejamento de Sistemas Energéticos, entre outras. Sendo essas disciplinas usadas como referencial e base para o desenvolvimento, realização e apresentação dos Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC) dos alunos de graduação como uma forma de finalização do curso. O Trabalho de Conclusão de Curso é um dos requisitos necessários para a integralização do bacharelado em Engenharia de Energia da Universidade Federal da Integração Latino –Americana, UNILA. A construção do TCC envolve a aplicação de conhecimentos teórico-prático e/ou de formação profissional, assim como outras atividades a serem realizadas pelo aluno em conformidade com a área de abrangência escolhida. Durante a construção desse trabalho final propõe-se a realização de um planejamento e elaboração de uma proposta de projeto de pesquisa referente à investigação do tema escolhido. Sendo recomendado estabelecer a fundamentação teórica, escrever a revisão bibliográfica, realizar as etapas de coleta de dados, quando for o caso, propor e realizar as etapas de desenvolvimento do projeto, assim como obter, analisar e discutir os resultados. Ainda, seções de conclusão e referências bibliográficas devem ser escritas, culminando na geração de um documento técnico-científico que será apresen-

tado para uma banca examinadora como requisito para obtenção do título de Bacharel no referido curso de Graduação. Também é importante ressaltar que o projeto pedagógico do curso possui um caráter diferenciado uma vez que aborda as questões relacionadas com a integração latino-americana e o desenvolvimento dos países da América Latina, que são prioridades acadêmicas da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, UNILA.

Em virtude da elevada significância desses trabalhos, uma das atividades de comemoração dos dez anos do Curso de Engenharia de Energia da UNILA possibilitou realizar a publicação desse livro como um compilado de TCCs defendidos nos últimos anos para apresentar ao leitor algumas aplicações e oportunidades que estão inseridas nessa temática de estudo. A seleção dos trabalhos apresentados nesse livro foi realizada levando-se em consideração os seguintes critérios: a) complexidade do assunto; b) qualidade da metodologia e resultados; c) teor de inovação e potencial de continuidade; d) importância do estudo para a ciência e para a sociedade e e) formatação, organização e escrita. Sendo assim, o livro está estruturado em capítulos objetivando evidenciar a multidisciplinariedade do curso de Engenharia de Energia da UNILA que possui quatro grandes áreas de atuação acadêmica e profissional, sendo elas: Gestão e Projetos, Engenharia Química, Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica.

ENERGIA QUÍMICA: BIOCOMBUSTÍVEIS

EFEITO DA NUTRIÇÃO ANIMAL NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS*

Aline Thais Gomes Rodrigues,
Rodrigo Monteiro Elliott e
Andreia Cristina Furtado

A utilização da biomassa como matriz energética é antiga em nossa sociedade, sendo que as primeiras fontes de biomassa utilizadas foram a lenha e o carvão vegetal (Vasconcelos, 2002). Entretanto, como os recursos fósseis são finitos, substitutos que desempenhem as mesmas funções causando menor impacto ambiental são necessários. Uma das soluções de substituição é a utilização de bioenergia. Em seu emprego, é prestado pela biomassa o papel de matéria prima para geração de energia sustentável, onde o material pode ser residual de outros processos ou obtido com facilidade na região.

Executando um processo fermentativo chamado biodigestão, a biomassa pode ser convertida a biogás, o Centro Internacional de Energias Renováveis – CIBIOGÁS, define biogás como: “um tipo de biocombustível produzido a partir da decomposição de materiais orgânicos (de origem vegetal ou animal), que são decompostos, produzindo uma mistura de gases” (CIBIOGÁS, 2022). O biogás é um biocombustível, podendo ser considerado renovável pois seu tempo de produção e de consumo são iguais.

* Este capítulo é baseado em *Avaliação do efeito da nutrição animal no potencial de produção de biogás a partir de dejetos de gado leiteiro*, Trabalho de Conclusão de Curso por Aline Thais Gomes Rodrigues, apresentado e aprovado em 2022, orientado por Prof. Dr. Rodrigo Monteiro Elliott, Profa. Dra. Andreia Cristina Furtado.

Os setores de energia e de alimentação estão entre os principais poluidores do mundo (BREEAM, 2021). Produtos lácteos fazem parte de nossa alimentação há séculos, ao redor do mundo existem grandes empresas do setor, que possuem uma grande variedade de mercadorias. A produção destas mercadorias resulta em consequências para os animais e o meio ambiente (Hussain, 2022). Uma delas é a liberação de dejetos orgânicos, resíduos prejudiciais ao meio ambiente, que podem ser aproveitados como biomassa.

Este projeto objetiva estudar as diferenças entre os dejetos de dois grupos de animais bovinos (gados) com diferentes alimentações, realizando a caracterização, determinando seu potencial de produção de biogás, analisando, assim, a influência do tipo de alimentação nas propriedades físico-químicas do resíduo. O desenvolvimento deste estudo permite que produtores de leite tenham conhecimento de propriedades específicas do dejetos de gado leiteiro. Facilitando o aproveitamento dos resíduos como matéria-prima para geração de energia renovável.

Avaliação do biogás resultante do processo de digestão anaeróbia

A produção de produtos lácteos tem como resultado a geração de resíduos como os de dejetos bovinos que causam graves impactos ambientais, caso sejam descartados de forma incorreta. Este projeto visa estudar esses resíduos, para melhor compreendê-los, fazendo sua caracterização e avaliando seu comportamento na degradação anaeróbia. Para isso, foram coletadas duas amostras de dejetos, para serem analisadas, sendo elas de gados da mesma raça, que se alimentam de formas opostas. Enquanto um tipo é de bovino de pasto que se alimenta principalmente de pasto natural, o outro tipo tem sua alimentação mais concentrada, focada em ração e silagem específicas. Objetiva-se avaliar o potencial de bio-

gás resultante da digestão anaeróbia de dejetos de gado do setor de produção de laticínios, identificando o efeito do tipo de alimentação do rebanho.

Para esse propósito, foi necessário estabelecer os seguintes objetivos específicos: a) realizar a caracterização físico-química dos dejetos bovinos; b) determinar o potencial de produção de biogás dos resíduos e c) realizar a identificação do efeito do tipo de alimentação do rebanho no potencial de produção de biogás do dejetos.

Os bovinos produtores dos dejetos são da raça Jersey, eles possuem as seguintes especificações alimentares: Gado 1: os animais vivem no pasto espaçoso e se alimentam à vontade de pastagem natural, recebem somente 1800 g em média, de ração por animal para complementação. Esta ração é produzida em uma relação de 50 kg de farelo de soja, 150 kg de milho moído e dez kg de sal mineral e Gado 2: os animais estão em confinamento intensivo, possuem alimentação controlada. Cada animal recebe em média 25,5 kg de alimento por dia, composta por silagem, ração e complemento. De silagem são oferecidos 21 kg, sendo composta de milho. De ração são disponibilizados três kg, esta ração é fabricada em proporções iguais de milho e soja. A alimentação ainda é complementada com 500 g de casca de soja, 500 g de feno e 500 g milho Rólon (espiga moída). Em pesquisa feita na propriedade, foi informado ao produtor que sua ração possui 27% de amido e sua silagem 26% de amido.

Para executar a caracterização da biomassa, as amostras de dejetos foram caracterizadas tendo como base a metodologia definida pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Através da normativa de análise 2540-G, determina-se os sólidos totais (ST), sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV) para amostras sólidas e semi-sólidas.

A primeira amostra de fezes foi coletada no Colégio Agrícola de Foz do Iguaçu, as vacas leiteiras possuem vasto pasto. A segunda amostra foi coletada na propriedade rural de Douglas Maurina, localizada em Camargo, no Rio Grande do Sul.

Após a coleta, as amostras foram congeladas até a realização dos experimentos. Para o momento de execução elas foram descongeladas à temperatura ambiente por 24 horas. Todos os testes foram realizados no Laboratório de Biocombustíveis da UNILA, localizado no Parque Tecnológico de Itaipu (PTI), na cidade de Foz do Iguaçu, no estado do Paraná. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

Conquista-se tempo na decomposição de matéria orgânica adicionando-se inóculo residual de outro processo de digestão anaeróbia, porque é fornecido ao material uma população de microrganismos já adaptados, agitando a população de microrganismos (Xavier; Júnior, 2010).

Para esse estudo foi adicionado inóculo proveniente de biodigestor que opera com dejetos de bovinos e suínos, disponibilizado pela equipe do CIBIOGÁS. O material recebe diversas substâncias distintas para que haja a presença de várias classes de bactérias. Segundo dados fornecidos pelo CIBIOGÁS, a amostra de inóculo possuía 63,71% de sólidos voláteis e 4,26% de sólidos totais, a normativa utilizada para esta caracterização foi a VDI 4630. A proporção entre inóculo e dejetos foi escolhida baseada em estudos de experimentos de inóculos, objetivando-se obter o pico de geração de biogás já nos primeiros dias. Como a análise era feita em triplicata foram montados três reatores para cada análise. As amostras foram de:

1. inóculo puro: 50 mL do inóculo puro;
2. mistura entre dejetos de gado de pasto e inóculo: 50 mL de mistura, na proporção de 3/5 dejetos e 2/5 inóculo;
3. mistura entre dejetos de gado confinado e inóculo: 50 mL de mistura, na proporção de 3/5 dejetos e 2/5 inóculo.

A fim de controlar o processo de biodigestão, foram montados reatores com amostras. Para este procedimento não foi utilizado normativa padrão, as escolhas foram feitas através da observação de experimentos similares.

Após a preparação das misturas nas proporções definidas acima, foi adicionado nitrogênio aos reatores, durante um minuto, com o objetivo de retirar todo o oxigênio presente no sistema reacional.

O reator empregado neste estudo pode ser considerado como biodigestor. Biodigestor é um tipo de reator onde acontecem, dependendo do processo, sob condições controladas de temperatura e substratos, os processos biológicos que geram o biogás (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022). Inserida dentro de um biodigestor a biomassa sofre um processo de decomposição mais rápido (Teixeira *et al.*, 2022).

O processo metabólico de digestão anaeróbia que ocorre no biodigestor é complexo, requer condições controladas e um ambiente livre de oxigênio, como executado. Nele existe a atividade conjunta de uma associação de microrganismos, que transformam o material orgânico essencialmente em metano e dióxido de carbono (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2022).

A análise do volume de gás produzido a partir dos dejetos foi feita também em triplicata, no entanto, foi constatado vazamento em um dos reatores alimentado com dejetos de gado confinado. Sendo assim, para este dejetos em específico, os resultados apresentados se referem à média entre apenas dois reatores.

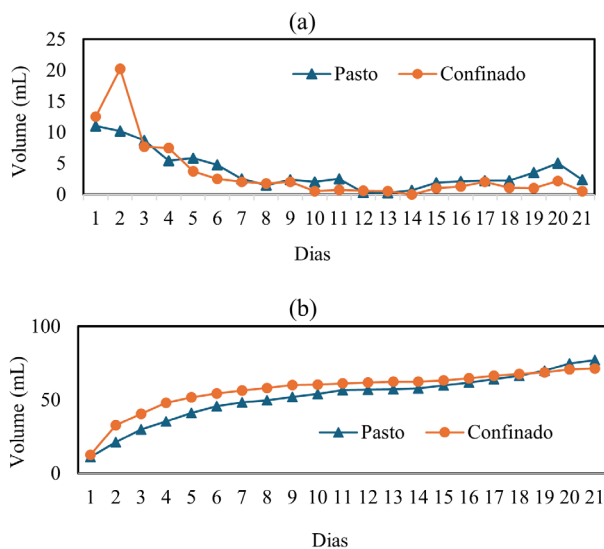
Na Figura 1 estão apresentados os gráficos comparativos dos valores médios de volume de gás produzido diariamente e dos valores médios acumulados. O volume acumulado representa a soma dos volumes produzidos diariamente.

Entende-se mediante a observação dos resultados apresentados na Figura 1 (a) e (b) que inicialmente o dejetos de gado confinado teve uma produção diária maior, acumulando mais gás, porém o dejetos de gado de pasto produziu mais no decorrer do tempo.

Analisando os resultados obtidos em cada referencial nota-se que são distintos. Além do que o gado confinado possui uma maior divergência nos valores do que o gado de pasto, isso se deve pois os demais estudos comparativos não foram produzidos com dejetos de gado confinado e sim gado de pasto.

O teor de sólidos voláteis do gado de pasto foi de 78,66%, enquanto o teor de sólidos do gado confinado foi de 93,61%. Uma vez que esse percentual de voláteis é um parâmetro da quantidade de matéria orgânica que pode ser convertida em biogás, pois ele quantifica os substratos para as bactérias metanogênicas produzirem o metano. Era esperado conforme a caracterização dos dejetos que o gado confinado obtivesse uma maior geração de biogás. Entretanto, considerando os desvios padrão das duas amostras de pasto (3,06%) e confinado (4,93%), os valores podem ser considerados estatisticamente equivalentes.

Figura 1 – Volume diário (a) e volume acumulado (b) para os dejetos de gado de pasto e confinado



Fonte: Os Autores (2026).

A bioenergia é um instrumento para redução de emissão de gases poluentes na atmosfera, buscando assim diminuir os impactos climáticos e ambientais causados. A oferta de biomassa local determina qual tipo de biocombustível é a mais atrativa para a produção.

Aplicando a biodigestão anaeróbica, nos resíduos bovinos, tem-se uma solução viável, pois promove a redução do impacto ambiental, tornando o processo produtivo mais sustentável. Este método é altamente eficiente para reciclagem de recursos e fechamento do ciclo de produção. Essa matéria orgânica residual que antes seria descartada, pode se tornar fonte energética e seu remanescente ainda se tornar biofertilizante.

Os resíduos provenientes da pecuária, podem ser utilizados para a produção de energia, atenuando a poluição gerada e permitindo que seja utilizada energia renovável no processo produtivo, tornando o leite que chega às prateleiras para o cliente um produto mais sustentável.

Foram analisadas neste trabalho, as diferenças entre dois tipos de dejetos resultantes dos dois principais tipos de produção do gado leiteiro, para que os produtores de leite obtenham mais conhecimento, e consigam aplicar a bioenergia no processo de fabricação do produto. Deste modo, duas biomassas, uma de dejetos de pasto com alimentação livre, e primordialmente natural, a outra de gado confinado com alimentação controlada composta majoritariamente de silagem e ração, foram caracterizadas e comparadas para descobrir suas características e qual o volume da sua produção de biogás, facilitando assim, a escolha de quais melhores condições para a produção de biogás.

Após os resultados serem comparados, chegou-se à conclusão de que os resultados do teor de sólidos são capazes de prever que a amostra de dejetos de bovino confinado oferece maior geração de biogás. Entretanto, constatou-se que os animais que vivem livres

tiveram uma maior produção, considerando o desvio padrão os valores estão na mesma faixa de produção de volume acumulado de biogás.

Um aumento na produção de biogás no dejetos de gado de pasto conforme os resultados da caracterização não era esperado, porém, é importante ressaltar que os valores de produção foram muito próximos e que o presente estudo não analisou as características do biogás gerado, somente foi avaliada a quantidade de biogás gerada. Entende-se que ainda que próximos no volume acumulado, o biogás de melhor qualidade é gerado a partir do dejetos de gado confinado, devido ao teor de sólidos voláteis.

Futuros projetos podem utilizar os dados obtidos neste trabalho para estimar a produção de biogás em fazendas e indústrias que produzem leite, analisando as características de cada propriedade como quantidade de bovinos, necessidades individuais e comportamento sazonal de cada produto. Com um local com disponibilidade de dejetos, as opções são grandes de aplicação do biogás como combustível, podendo ser fonte de energias como térmica, mecânica, elétrica. Seria simplesmente necessário dimensionar um projeto que atenda a demanda do produtor de laticínio. Ademais, seria interessante uma análise da composição de gases produzidos por bovinos leiteiros analisando-se a composição do biogás produzido, juntamente com o volume acumulado.

REFERÊNCIAS

BREEAM ES. **Los sectores más contaminantes del planeta y sus soluciones**. Postagem de blog. Madrid, Espanha: BREEAM® ES, 23 jun. 2021. Disponível em: <https://breeam.es/sectores-mas-contaminantes-del-planeta/>. Acesso em: 08 dez. 2025.

CIBIOGÁS. **O que é biogás?** Foz do Iguaçu: CIBiogás Energias Renováveis, 2022. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/o-que-e-biogas/>. Acesso em: 08 dez. 2025.

HUSSAIN, G. **What you should know about the world's top dairy companies**. New York, NY: Sentient Media, 25 out. 2022. Disponível em: <https://sentientmedia.org/dairy-companies/>. Acesso em 01 nov. 2022.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. do. Fundamentals of anaerobic digestion, biogas purification, use and treatment of digestate. *In: BIOGÁS: produção, purificação e uso*. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2022. p. 13-26.

TEIXEIRA, B. C.; LIMA, G. B. DE M.; DOMINGUES, G. H. F.; GUERRERO, V. D. **Estudo da utilização do lodo residual da estação de tratamento de água para geração de bioenergia**. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Técnico em Açúcar e Álcool) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, Faculdade de Tecnologia de Fernandópolis, Fernandópolis, 2022.

VASCONCELOS, G. F. **Biomassa – a eterna energia do futuro**. São Paulo: SENAC, 2002. 142 p.

XAVIER, C. A. N.; JÚNIOR, J. de L. Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 212-223, 2010.

USO DE DIFERENTES BIOMASSAS NO PROCESSO DE PIRÓLISE*

Jhon Steven Navarro Hoyos e

Rodrigo Monteiro Eliott

A crescente demanda por fontes alternativas de energia, motivada pelo esgotamento das reservas fósseis e pela preocupação ambiental, impulsiona o uso de recursos renováveis, como a biomassa. A biomassa é definida como toda matéria orgânica de origem vegetal, animal ou microbiana que pode ser transformada em energia (Ganesh *et al.*, 2001). A pirólise, um processo antigo utilizado para produzir carvão vegetal, ganhou destaque nas últimas décadas com a chamada “pirólise rápida”, realizada a cerca de 500 °C em tempos curtos. Esse método apresenta alto rendimento de líquidos, conhecidos como bioóleos, até 75% em massa, úteis em diversas aplicações, inclusive como fonte de energia (Sánchez, 2003).

A ampla aplicabilidade da pirólise rápida na indústria e na pesquisa científica torna essencial prever e otimizar o processo. Os softwares de simulação de processos são ferramentas valiosas nesse sentido, permitindo projetar, modificar e otimizar plantas industriais, avaliar riscos, custos e monitorar procedimentos de forma econômica e remota (Cardoso *et al.*, 2014).

Os países latino-americanos e caribenhos são grandes produtores de milho e soja, segundo a FAO (2015).

* Este capítulo é baseado em Simulação computacional de Processo de Pirólise Rápida, utilizando o software UNISIM®, para estudos de variação na temperatura e na composição da reação química de diversos tipos de biomassa, Trabalho de Conclusão de Curso por Jhon Steven Navarro Hoyos, apresentado e aprovado em 2019, orientado por Prof. Dr. Rodrigo Monteiro Eliott.

Apesar de seus resíduos serem geralmente usados como adubo, há potencial para gerar energia através da produção de bio-óleos por pirólise rápida. Isso poderia beneficiar o setor industrial da região, oferecendo um uso mais nobre aos resíduos como fonte de energia.

Assim, o objetivo deste trabalho é realizar uma simulação computacional no software *UNISIM*[®] (de uso livre) para estudar a pirólise rápida de biomassa vegetal, utilizando equações cinéticas da literatura, variando a composição química, e comparando diferentes tipos de biomassas para análise.

Neste trabalho, serão considerados os componentes mais relevantes propostos por Tan e Li (2000) e Meng *et al.* (2013) para o processo de pirólise de biomassas vegetais usando a norma ASTM D-7544 (2012) de especificação de biocombustíveis líquidos obtidos por pirólise como referencial. Esses componentes estão listados na Tabela 1, cada um acompanhado de seu nome, fórmula molecular e identificação correspondente no software *UNISIM*[®].

Para simular reatores, é necessário incorporar reações no programa, exigindo o conhecimento da estequiometria e cinética das reações. As reações foram divididas em dois grupos: pirólise primária e secundária. Na pirólise primária, ocorre a decomposição inicial formando alcatrão, carvão e gás, tipicamente entre 220 e 400 °C. Já na pirólise secundária, os produtos gerados na pirólise primária são decompostos, geralmente acima de 400 °C até cerca de 600 °C (Ranzi *et al.*, 2008).

Tabela 1 – Componentes usados na simulação da pirólise de biomassa vegetal

ESPÉCIE QUÍMICA	FÓRMULA MOLECULAR	ID SIMULAÇÃO	ESPÉCIE QUÍMICA	FÓRMULA MOLECULAR	ID SIMULAÇÃO
Ácido Aspártico	C ₄ H ₇ NO ₄	Ácido Aspártico*	Glioxal	C ₂ H ₂ O ₂	Glyoxal
Ácido Cianídrico	HCN	HCN	Hemicelulose	C ₅ H ₈ O ₄	HEMICELL*
Ácido Fórmico	CH ₂ O ₂	FormicAcid	Hemicelulose ativa 1	C ₅ H ₈ O ₄	Hemi_ativa_1*
Ácido Glutâmico	C ₅ H ₉ NO ₄	L-GlutamAcid	Hemicelulose ativa 2	C ₅ H ₈ O ₄	Hemi_ativa_2*
Ácido Isocianídrico	HNCO	Isoyanic acid*	Hidroximetil-furfural	C ₅ H ₄ O ₂	H-furfural*
Ácido Linoleico	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	LinolenAcid	Hidroxiacetal- deído	C ₂ H ₂ O ₂	HAA
Água	H ₂ O	H ₂ O	Lignina	C ₁₀ H _{11,6} ^o _{3,9}	LIGNIN*
Amônia	NH ₃	Ammonia	Lignina ativa	C ₁₀ H _{11,6} ^o _{3,9}	Lig_ativa*
Anidrido Itacônico	C ₃ H ₄ O ₃	M-Maleic_Anh	Metano	CH ₄	Methane
Benzeno	C ₆ H ₆	Benzene	Metanol	CH ₃ O	Methanol
Carbono	C	Carbon	Metanotiol	CH ₃ S	Metanotiol*
Celulose	C ₆ H ₁₀ O ₅	CELL2*	Metilacetileno	C ₃ H ₄	M-Acetylene
Celulose ativa	C ₆ H ₁₀ O ₅	Celulo_atv*	Metional	C ₄ H ₈ OS	Methional*
Dióxido de Carbono	CO ₂	CO ₂	Propilonitrila	C ₃ H ₃ N	C ₃ -Nitrile
Etano	C ₂ H ₆	Ethane	p-Tolual	C ₈ H ₈ O	p-Tolual
Etanol	C ₂ H ₅ O	Ethanol	Sacarose	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	Sucrose
Etileno	C ₂ H ₄	Ethylene	Succinimida	C ₄ H ₅ NO ₂	SUCCINIMIDE*
Fenol	C ₆ H ₆ O	Phenol	Sulfato de cálcio	CaSO ₄	Calcium Suphate*
Formaldeído	CH ₂ O	Formaldehyde	Sulfato de potássio	K ₂ SO ₄	POTASSIUM-SU LFATE*
Furfural	C ₅ H ₄ O ₂	Furfural	SiO ₂	SiO ₂	*terra
Gás hidrogênio	H ₂	Hydrogen	Tolueno	C ₇ H ₈	Toluene
Glicose	C ₆ H ₁₂ O ₆	Dextrose	Vinil-formato	C ₃ H ₄ O ₂	VinylFormate
			Xilose	C ₅ H ₁₀ O ₅	Xylose*

Fonte: Adaptado de Tan e Li (2000); Meng *et al.* (2013).

Reações de pirólise primária: principais parâmetros cinéticos

As reações propostas por Ranzi *et al.* (2008) para a pirólise primária da celulose, hemicelulose e lignina em biomassas vegetais foram adaptadas na Tabela 2, destacando que alguns caminhos de reação foram assumidos de acordo com o sugerido por Zhang *et*

al. (2014) e por Huang *et al.* (2010). Os parâmetros cinéticos das reações de pirólise primária apresentadas na Tabela 2 estão especificados na Tabela 3.

Tabela 2 – Reações usadas durante a pirólise primária

REAÇÕES DE PIRÓLISE PRIMÁRIA	EQUAÇÃO
<i>Celulose</i> → <i>Celulose Ativa</i>	(1)
<i>Celulose Ativa</i> → 0,42 CO ₂ + 0,26 CO + 1,04H ₂ O + 0,3CH ₃ CHO + 0,3	(2)
<i>Hemicelulose</i> → 0,5 <i>Hemicelulose ativa 1</i> + 0,5 <i>Hemicelulose ativa 2</i>	(3) ^o
<i>Hemiceluloseativa1</i> → 0,6Xilose + 0,1667CH ₃ COOH + 0,3322Furfural	(4) ^o
<i>Lignina activa</i> → 0,05 H ₂ + 1,84 H ₂ O + 0,38CO ₂ + 0,665 CH ₄ + 0,09	(5) ^o
<i>Glicose</i> → Ácido acético + OCHCHO + CH ₃ CHO + H ₂ O	(6)*
<i>Glicose</i> → Furfural + CH ₂ O + 3H ₂ O	(7)*
<i>Glicose</i> → Ácido acético + CH ₃ COCH ₂ OH + CO + H ₂ O	(8)**
<i>Glicose</i> → 3,6 H ₂ O + 1,2 Hidroximetilfurfural	(9)**
C ₅ H ₉ NO ₄ → C ₄ H ₇ NO + H ₂ O + CO ₂	(10)
C ₄ H ₇ NO ₄ → 0,85714C ₄ H ₅ NO ₂ + 1,14284H ₂ O + 0,57144CO ₂ + 0,14286NH ₃	(11)
C ₅ H ₁₁ NO ₂ S → NH ₃ + C ₄ H ₈ OS + CO	(12)
C ₁₈ H ₃₂ O ₂ → 0,2214 C ₆ H ₁₄ + 1,35746 C ₆ H ₆ + 0,55 C ₅ H ₁₀ + 0,201 CO ₂ +	(13)
C ₆ H ₆ O ₆ → CO ₂ + H ₂ O + C ₅ H ₄ O ₃	(14)

^o Caminho de Reação Sugerido por Ranzi *et al.* (2008).

* Caminho de Reação Sugerido por Zhang *et al.* (2014).

** Caminho de Reação Sugerido por Huang *et al.* (2010).

Fonte: Adaptado de Ranzi *et al.* (2008), Zhang *et al.* (2014) e Huang *et al.* (2010).

Tabela 3 – Parâmetros cinéticos das reações de pirólise primária

Reação	Parâmetros Cinéticos
$r = k * C_{reativo}^n$	$k_i = A_{o,i} * \exp\left(\frac{-E_{a,i}}{RT}\right); A_o = s^{-1}; E_a = [J/mol]$
Equação (1)	$k_1 = 1,5949 * 10^{19} * \exp\left(\frac{-252300}{RT}\right)$
Equação (2)	$k_3 = 8 * 10^7 * \exp\left(\frac{-133900}{RT}\right)$
Equação (3)	$k_5 = 1 * 10^{18} * \exp\left(\frac{-246500}{RT}\right)$
Equação (4)	$k_8 = 3 * TEMP * \exp\left(\frac{-46000}{RT}\right)$
Equação (5)	$k_{11} = 3,5 * 10^{14} * \exp\left(\frac{-194000}{RT}\right)$
Equação (6)	$k_{13} = 2,35 * 10^{15} * \exp\left(\frac{-348108,8}{RT}\right)$
Equação (7)	$k_{14} = 1,49 * 10^{14} * \exp\left(\frac{-3637773,6}{RT}\right)$
Equação (8)	$k_{15} = 1,773 * 10^{13} * \exp\left(\frac{-297600}{RT}\right)$
Equação (9)	$k_{16} = 3,667 * 10^{13} * \exp\left(\frac{-284500}{RT}\right)$
Equação (10)	$k_{18} = 4,29 * 10^{11} * \exp\left(\frac{-151280}{RT}\right)$
Equação (11)	$k_{19} = 4,29 * 10^{11} * \exp\left(\frac{-151280}{RT}\right)$
Equação (12)	$k_{20} = 4,29 * 10^{11} * \exp\left(\frac{-151280}{RT}\right)$
Equação (13)	$k_{21} = 1,7 * 10^4 * \exp\left(\frac{-92450}{RT}\right)$
Equação (14)*	$k_{22} = 4,29 * 10^{11} * \exp\left(\frac{-151280}{RT}\right)$

*Parâmetro cinético assumido por falta de dados na literatura, correlacionado com as Equações (11), (12) e (13).

Fonte: Adaptado de Ranzi *et al.* (2008).

Reações de pirólise secundária e desenvolvimento do processo

As reações de pirólise secundária propostas para a decomposição do alcatrão pirolítico a gases e outros componentes são apresentadas na Tabela 4. Neste trabalho se considera uma “cinética global” da pirólise secundária do alcatrão, como é sugerido por Boroson *et al.* (1989).

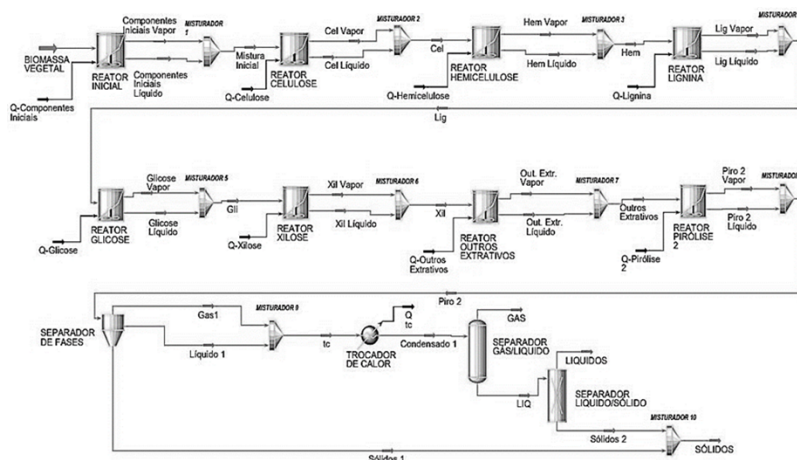
Tabela 4 – Reações usadas durante a pirólise secundária

REAÇÕES DE PIRÓLISE SECUNDÁRIA	EQUAÇÃO
$r = k * C_{reativo}^n \quad k_i = 1.0 * 10^{4.98} * \exp(-93300/RT); A_{o} = s^{-1}; \quad E_a = [J/mol]$ <p style="text-align: center;">Boroson et al. (1989)</p>	
<i>Xilose</i> → 2,6666 H_2O + 0,3333 CO + 1,3333 C + 0,3333 CH_3COCl	(15)
<i>Hidroxiacetilfurfural</i> → 0,45454 C_7H_8 + 1,81818 CO + 0,181817 H_2O	(16)
<i>Furfural</i> → 2 CO + 0,5 C_3H_4 + 0,5 C_5H_2 + 0,25 C_2H_4	(17)
C_8H_8O → CO + 0,25 C_2H_4 + 0,5 C_6H_6 + 0,5 C_7H_8	(18)
<i>Ácido acético</i> → CO + H_2 + 0,25 CH_4 + 0,5 CH_2O_2 + 0,25 C	(19)
<i>Levoglucosano</i> → CO + 1,25 H_2O + 0,5 CH_3CHO + 0,125 C_2H_4 + 0,2	(20)

Fonte: Adaptado de Ranzi *et al.* (2008).

Na Figura 1 é apresentado o fluxograma do processo de pirólise rápida de biomassa vegetal obtido no software utilizado.

Figura 1 – Fluxograma processo de pirólise rápida de biomassa vegetal no UNISIM®



Fonte: Elaboração própria no UNISIM® (2019).

O processo começa com a alimentação de biomassa vegetal em um reator, seguido pela decomposição térmica em reatores subsequentes, abordando os componentes primários e secundários, conforme a ordem de celulose, hemicelulose, lignina, glicose, xilose, outros extrativos e, por último, os componentes remanescentes da pirólise secundária. Após isso, ocorre a separação de gases, líquidos e sólidos para avaliar os rendimentos, com foco no rendimento da fase líquida para a produção de bioóleos. O UNISIM® permite simulações com reatores CSTR, com um tempo reacional de 5 segundos recomendado para 500 °C. O volume do reator é determinado com base na densidade mássica calculada a partir da composição da corrente, considerando uma vazão de biomassa vegetal de dois kg/h,

$$Volume\ do\ reator = \frac{Q_{ent} \cdot t_{reação}}{\rho_{corrente}} \quad (1)$$

Avaliação dos rendimentos do processo de pirólise rápida

Para implementar o modelo de pirólise no UNISIM®, é essencial ter a composição da biomassa na corrente de entrada da planta simulada. Decidiu-se realizar simulações para diversos tipos de biomassa. As composições químicas dessas biomassas, expressas em porcentagem de massa de componente por massa total (%), estão detalhadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição de biomassas para utilizar na simulação computacional

Biomassa	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Extrativos (%)	Referência
Palha de Milho	41,18	57,49	14,14	1,52	28,53	(Silva et al. 2008)
Soja	40,50	51,25	16,66	2,80	29,8	(Reis et al. 2009)
Bagaço de Cana	42,70	26,50	20,50	7,00	15,2	(Silva et al. 2008)
Casca de Arroz	31,30	24,30	17,50	18,10	7,7	(Silva et al. 2008)
Madeira	39,70	24,00	24,70	9,00	10,70	(Menezes et al. 2013)
Ramas de Algodão	94,00	1,60	2,20	1,20	1,00	(Maluf & Kolbe, 2003)

Fonte: Os autores (2026).

A alteração da composição da biomassa leva à alteração da densidade da corrente. Como a densidade é utilizada no cálculo do volume do reator é necessário refazer este cálculo para cada biomassa utilizada, para garantir o tempo de residência de cinco segundos. O volume foi calculado de acordo com a equação (1), e os resultados estão apresentados na Tabela 6. Os processos foram simulados na condição de 500 °C de temperatura.

Tabela 6 – Volumes de reatores necessários a cada biomassa

Biomassa	Massa específica (kg/m ³)	Volume do reator (m ³)
Palha de Milho	3.563	7,80 * 10 ⁻⁴
Soja	5.826	4,77 * 10 ⁻⁴
Bagaço de Cana	3.913	7,10 * 10 ⁻⁴
Casca de Arroz	7.332	3,79 * 10 ⁻⁴
Madeira	3.627	7,66 * 10 ⁻⁴
Ramas de Algodão	3.258	8,53 * 10 ⁻⁴

Fonte: Adaptado de UNISIM® (2019).

Os rendimentos das frações sólidas, líquidas e gasosas obtidas nas simulações computacionais estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Variação dos rendimentos do processo com diferentes biomassas

BIOMASSA	SÓLIDO (%)	LÍQUIDO (%)	GÁS (%)
Palha de milho	25,40	53,70	20,90
Soja	22,30	49,80	27,90
Bagaço de cana	18,50	57,60	23,90
Casca de arroz	37,80	45,20	17,00
Madeira	28,40	57,90	13,70
Ramas de algodão	55,00	44,50	0,50

Fonte: Adaptado de *UNISIM*® (2019).

Os maiores rendimentos líquidos na pirólise rápida são observados para o Bagaço de Cana e Madeira, mas essas biomassas têm outros usos prioritários, como combustão industrial, produção de etanol e açúcar. No entanto, a Palha de Milho, Soja e Casca de Arroz também mostram rendimentos favoráveis, próximos aos das biomassas principais, indicando sua viabilidade para produção de bioóleos.

O estudo abordou a simulação computacional da pirólise rápida de biomassas vegetais no software *UNISIM*®, com base em equações cinéticas da literatura. Para a Palha de Milho, a temperatura de 500 °C mostrou o melhor rendimento de produto líquido, conforme desejado para a pirólise rápida. Além disso, o teor de água na fase líquida atende às especificações para uso como combustível, segundo a norma ASTM D-7544 (2012).

Os resultados indicam que o Bagaço de Cana e a Madeira apresentam os maiores rendimentos de líquidos na pirólise rápida. Apesar de terem outros usos prioritários, a produção de bioóleos pode ser considerada devido aos altos rendimentos. A Palha de Milho e a Soja também mostram rendimentos favoráveis, sugerindo sua viabilidade para produção de bioóleos, especialmente dada sua abundância na América Latina e no Caribe.

Este estudo pode contribuir para avanços na simulação de pirólise rápida de biomassas vegetais, oferecendo conhecimentos úteis para o setor industrial. A pesquisa pode facilitar a avaliação de custos e a seleção de matérias-primas com alto potencial de rendimento.

REFERÊNCIAS

ASTM-D75. **Standard specification for pyrolysis liquid biofuel.** Easton, MD: American Society for Testing and Materials, 2012. 5 p.

BOROSON, M. L.; HOWARD, J. B.; LONGWELL, J. P.; PETERS, W. A. Product yields and kinetics from the vapor phase cracking of wood pyrolysis tars. **Aiche Journal**, Cambridge, v. 35, n. 1, p. 120-128, 1989.

CARDOSO, A. Z.; ARRUDA, L. D. P.; SILVA, R. N. A. DA. **Desenvolvimento de ecoindicadores para uma planta de ciclohexano via simulação.** 2014. 149 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2014.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **O próximo celeiro global:** como a América Latina pode alimentar o mundo. Washington: [s.n.], 2015. 60 p. Disponível em: www.iadb.org/foodsecuritystudy. Acesso em: 11 maio 2020.

GANESH, A.; BANERJEE, R. Biomass pyrolysis for power generation, a potential technology. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY AND ENVIRONMENTAL MANAGEMENT (ICEEM), 2., 1998, New Delhi. **Proceedings** [...]. New Delhi: IIT Delhi, 2001. p. 9-14.

HUANG, J. *et al.* Density functional theory studies on pyrolysis mechanism of beta-D-glucopyranose. **Journal of Molecular Structure: THEOCHEM.** Amsterdam: Elsevier, v. 958, n. 1-3, p. 64-70, 2010.

MALUF, E.; KOLBE, W. **Manual dados técnicos do algodão para a indústria**. São Paulo: Embrapa/FAPESP, 2003. 337 p.

MENEZES, R. S. *et al.* Produtividade de biomassa em sistemas agroflorestais e tradicionais no Cariri Paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental – AGRI – AMBI**, João Pessoa, v. 17, n. 11, p. 1163-1170, 2013.

MENG, A. *et al.* Quantitative and kinetic tg-ftir investigation on three kinds of biomass pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. Amsterdam: Elsevier, v. 104, p. 28–37, 2013.

RANZI, E. *et al.* Chemical kinetics of biomass pyrolysis. **Energy & Fuels**. Washington, D.C.: American Chemical Society (ACS), v. 22, n. 6, p. 4292-4300, 2008.

REIS, M. S. *et al.* Qualidade fisiológica de sementes de cultivares e linhagens de soja no estado de minas gerais. *In*: SEMINÁRIO NACIONAL DE SEMENTES, 16., 2009, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: ABRATES, 2009. p. 307-312.

SÁNCHEZ, C. **Apostila do curso de Tecnologia de Gaseificação de Biomassa – IM 338**. Curso de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2003.

SILVA, A. M.; BENTES, M. A.; MEDRADO, S. B.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Estudo da utilização da biomassa em substituição parcial ao carvão mineral na fabricação do coque na coqueira da csn. **Revista Tecnologia em Metalurgia e Materiais**. São Paulo, v. 5, n. 1, p. 40-45, 2008.

TAN, L. L. Li, C.-Z. Formation of NO_x and SO_x precursors during the pyrolysis of coal and biomass. Part I. Effects of reactor configuration on the determined yields of HCN and NH₃ during pyrolysis. **Fuel**. Oxford: Elsevier, v. 79, n. 15, p. 1883-1889, 2000.

ZHANG, Y.; LIU, X.; XIE, H. C. Mechanism studies on beta-D-glucopyranose pyrolysis by density functional theory methods. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. Amsterdam: Elsevier, v. 105, p. 23-34, 2014.

RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE GÁS DE ATERROS*

Maiara Fernanda Garcia,
Ricardo Morel Hartmann e
Luís Evelio Garcia Acevedo

O crescimento da população e seu consumo inconsequente em nível global vem afetando de forma negativa e irreversível o meio ambiente com diversas formas de contaminação como os resíduos, ameaçando o equilíbrio da biosfera e a própria existência humana. A gestão dos resíduos sólidos urbanos abrange aspectos ambientais, econômicos e energéticos e se torna necessária na atualidade. No Brasil, a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e suas orientações para destinação final ambientalmente adequada abriu oportunidade para a recuperação energética por meio de processos termoquímicos, rotas que se tem demonstrado tecnicamente viáveis.

Sendo assim, o desenvolvimento de tecnologias e metodologias aplicadas à gestão dos resíduos sólidos buscam, por um lado, mitigar o impacto ambiental e os riscos à saúde pública e, por outro, explorar as possibilidades de aproveitamento econômico e energético dos resíduos. Em 2010 sancionou-se a Lei 12.305/10, que instituiu a PNRS, sendo os seus principais objetivos a redução na geração de resíduos e a eliminação de lixões a céu aberto com a implementação de aterros sanitários (Brasil, 2010). Por outro lado, a Resolução Normativa número 482/2012 estabelece

* Este capítulo é baseado em *Análise teórica de tecnologias de recuperação energética do gás de aterro em Foz do Iguaçu*, Trabalho de Conclusão de Curso por Maiara Fernanda Garcia Possatto, apresentado e aprovado em 2018, orientado por Prof. Dr. Ricardo Morel Hartmann e Prof. Dr. Luís Evelio Garcia Acevedo.

condições para o sistema de compensação de energia elétrica, permitindo que a energia excedente gerada pela unidade consumidora com micro ou minigeração seja injetada na rede da distribuidora (Brasil, 2012). Nos aterros sanitários é gerado gás combustível devido à decomposição da fração orgânica em um processo anaeróbico, que, dada a alta concentração de metano, permite seu aproveitamento como fonte de energia, que em geral é feita através de processos termoquímicos em máquinas térmicas, como por exemplo, caldeiras, turbinas e motores. A população estimada de Foz do Iguaçu é de 263.647 habitantes e possui um aterro sanitário de grande porte para destinação dos resíduos sólidos urbanos (RSU), em operação desde 2001, ele já conta com duas células encerradas e uma terceira que iniciou suas atividades em julho de 2017, que recebe diariamente aproximadamente 224 toneladas de RSU/dia (PMFI, 2018). O objetivo geral do trabalho é avaliar o potencial de aproveitamento energético do biogás gerado no aterro sanitário municipal e identificar entre as tecnologias de recuperação energética a qual possui mais benefícios do ponto de vista energético.

A classificação dos resíduos sólidos, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), os segrega em três classes distintas de acordo com os riscos potenciais gerados ao meio ambiente e à saúde pública. Classe I – Resíduos Perigosos, Classe IIA – Não perigosos – Não Inertes, Classe IIB – Não perigosos – Inertes. Outra classificação de resíduos sólidos válida é a citada no Art.13º da Lei N°12.305/2010, onde é feita de duas formas: segundo a fonte geradora ou quanto à periculosidade (Brasil, 2010). A classificação adotada para o desenvolvimento deste trabalho foi através da origem do resíduo, uso da classe de RSU, que contempla a) resíduos Sólidos Urbanos, correspondente aos resíduos domiciliares e de limpeza urbana; b) resíduos da Construção Civil; c) resíduos Industriais; d) resíduos Sólidos do Transporte Rodoviário e Ferroviário; e) resíduos de Serviços de Saúde; f) resíduos Sólidos de Mineração e g) resíduos Sólidos Agrossilvopastoris. A ABRELPE,

define o termo «recuperação energética» como um conjunto de métodos e processos industriais que permitem recuperar parte da energia contida nos resíduos sólidos (ABRELPE, 2012). As técnicas envolvidas nos processos de recuperação energética, também denominadas de tecnologias *waste to energy*, são divididas em duas rotas: térmica e biológica. A Figura 1 apresenta um resumo com as principais características de cada uma destas vias tecnológicas. A Norma Técnica NBR 8419 (ABNT, 1992) define aterro sanitário como uma técnica de disposição de RSU que se baseia em conceitos da engenharia para armazenar o maior volume de resíduos na menor área possível, preocupando-se em minimizar impactos ambientais e evitar danos à saúde pública. Define-se o gás de aterro como um produto da decomposição anaeróbica de matéria orgânica composto de metano e dióxido de carbono, e apresenta em menores quantidades monóxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio, ácido sulfídrico, amônia, e há presença de materiais particulados e siloxanos (Persson; Jonsson; Wellinger, 2006).

O início da produção de gases ocorre após o intervalo de alguns meses da disposição do RSU, o IPCC (2006) denomina este período como “*delay-time*” e estipula uma faixa de duração entre seis e 18 meses.

Diversos autores entre eles Tchobanoglous e Kreith (2002) conduziram pesquisas na área e constataram que a degradação dos rejeitos ocorre em 5 fases sendo elas: a) ajuste inicial; b) transição; c) ácida; d) metanogênica e e) maturação.

Figura 1 – Rotas tecnológicas de recuperação energética



Fonte: Adaptado de ABRELPE (2012).

Os modelos para se estimar a quantidade de metano emitido por um aterro sanitário, mais aceitos foram os desenvolvidos por: a) *United States Environmental Protection Agency – USEPA*; b) Banco Mundial e c) *Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*, sendo esta última a técnica aplicada no presente trabalho. As três metodologias utilizam equações cinéticas de primeira ordem e possuem os mesmos parâmetros de entrada: a) Massa de resíduo depositado no aterro anualmente; b) Tempo de operação do aterro e/ou após o encerramento e c) Taxa de geração de metano (k) (ano^{-1}). Dentre as tecnologias de conversão de energia aplicadas ao gás de aterro sanitário, destacam-se: a) o grupo moto gerador (GMG); b) turbina e microturbinas a gás e c) turbinas a vapor (ABRELPE, 2016).

A metodologia foi dividida em quatro etapas: a) Estimativa da produção de Gás de Aterro, (esta etapa inicial foi realizada durante a execução do projeto de pesquisa desenvolvido na UNILA com o título de “Estudo do potencial de recuperação energética a partir de resíduos sólidos em Foz do Iguaçu”, ENCIT-2018); b) Avaliação do Potencial Térmico do Gás de Aterro que teve como base a teoria de Dulong e foi adaptada de forma compatível com os dados existentes sobre a amostra de gás de aterro; c) Simulação de Sistemas de Conversão de Energia Térmica em Elétrica e d) Quarta Etapa: Balanço Energético. Os parâmetros utilizados para tal avaliação

foram: energia mecânica útil e rendimento térmico. A escolha da modelagem termodinâmica foi realizada por meio da análise de três parâmetros como apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação dos parâmetros: energia mecânica útil e rendimento térmico

% Parâmetro	Moto Gerador	Turbina e microturbina a gás	Turbina a vapor
Eficiência	33%	28%	18%
Consumo de combustível (kJ/kWh)	10.972	12.872	19.202
Emissão de NOx ($\mu\text{g}/\text{kJ}$)	56,6	15	16
Emissão de CO ($\mu\text{g}/\text{kJ}$)	56,6	19	18,9

Fonte: Bove e Lunghi (2006).

O modelo termodinâmico avaliou dois ciclos de planta: Ciclo Brayton Regenerativo Aberto e Ciclo Otto. A modelagem consistiu na resolução de um sistema de equações obtidas com base na Primeira Lei da Termodinâmica aplicada a cada um dos volumes de controle considerados. Foram estabelecidas as condições de operação, simulado cada um dos equipamentos dos ciclos, calculados os estados termodinâmicos e os parâmetros das reações químicas, e aplicados balanços de conservação de massa e energia para resolver as incógnitas.

Determinação das vazões médias de gás de aterro geradas

O aterro sanitário ocupa uma área total de 389.737,44 m² dividida em três células, conforme pode-se observar na Figura 2. As células 1 e 2 são compostas por seis camadas cada e têm área de 58.387,15 m² e 61.584,01 m², respectivamente. O período de operação da primeira compreende de 2001 a 2010 e da segunda, de 2010 a 2017. A terceira célula, tem área de 64.780,63 m², iniciou

suas atividades em julho de 2017 e estima-se que receba aproximadamente 224 toneladas/dia de resíduos sólidos oriundos da Coleta Pública Domiciliar e da Limpeza Urbana (PMFI, 2018).

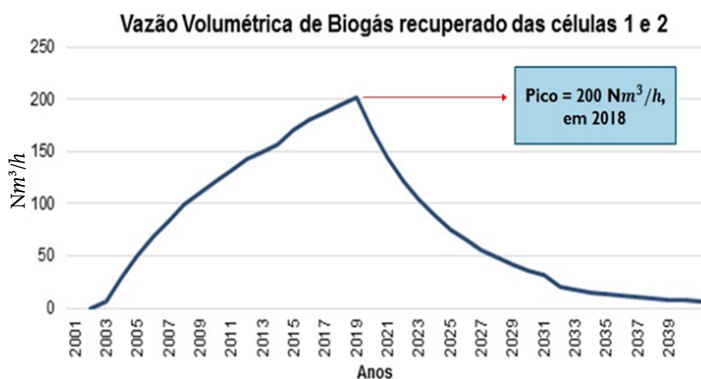
Os resultados obtidos para as vazões médias de gás de aterro calculadas para as células 1 e 2, mostram que o pico de produção de gás para a primeira célula ocorreu em 2011, com vazão média anual igual à 142,18 Nm³/h, enquanto que, para a célula 2, o pico acontecerá no ano de 2018 e corresponderá a vazão média anual de 155,98 Nm³/h. O potencial total de gás de aterro que poderá ser recuperado do aterro sanitário, a maior vazão, é estimado para o ano de 2018, sendo igual a 200,9 Nm³/h conforme está apresentado na Figura 3.

Figura 2 – Vista aérea do aterro sanitário



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

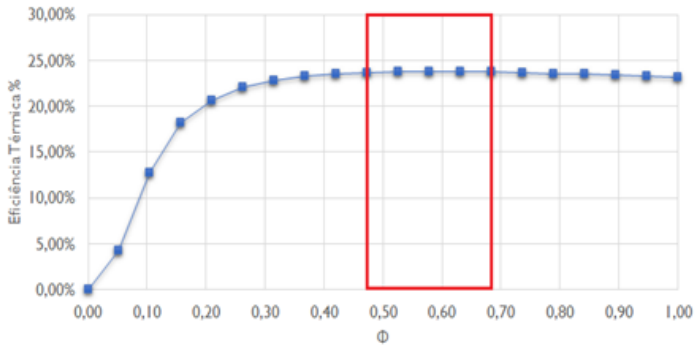
Figura 3 – Vazão volumétrica anual de gás de aterro recuperado nas células 1 e 2



Fonte: Os Autores (2026).

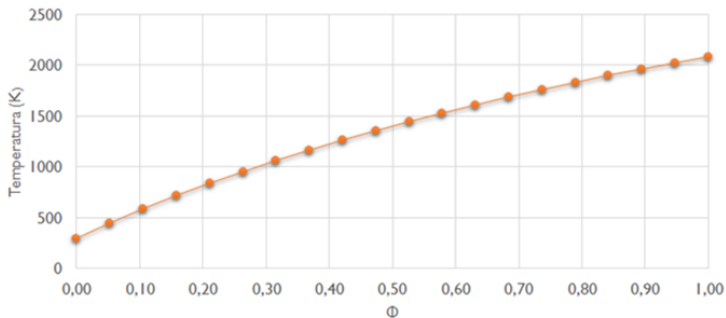
Para determinação do potencial térmico do gás de aterro a partir da equação de Dulong, considerou-se que a fração volumétrica de metano neste caso igual a 50% com o qual se obteve o PCI deste gás de aterro é 445.266,6 kJ/kmol. Foi realizada análise da combustão para os dois ciclos, visto que as condições de queima não se alteraram, exceto o cálculo da temperatura adiabática de chama. Simulou-se um cenário variando o valor da relação de equivalência Φ , de zero a um. O objetivo desta análise foi identificar qual faixa de Φ em que se obtém os maiores coeficientes de eficiência térmica e, selecioná-la para uma análise mais completa. A variação do Φ com a eficiência térmica e com a temperatura adiabática de chama para o ciclo Brayton Regenerativo são apresentadas nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

Figura 4 – Eficiência Térmica x Variação de Φ



Fonte: Os Autores (2026).

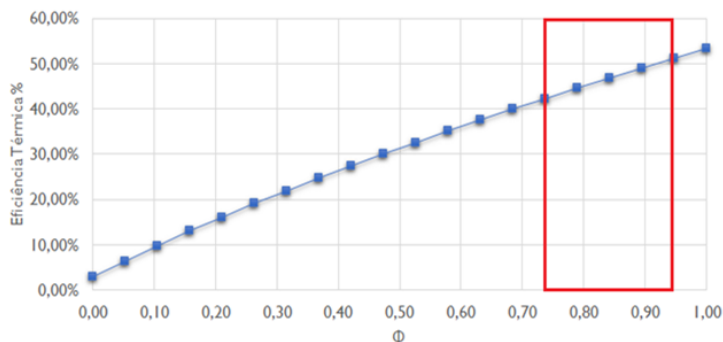
Figura 5 – Variação de Φ vs. Temperatura adiabática de chama



Fonte: Os Autores (2026).

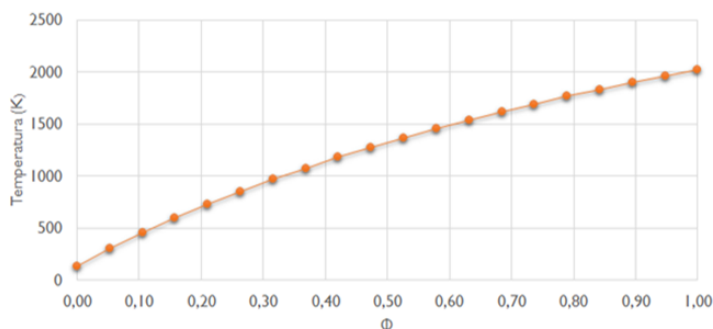
A variação do Φ com a eficiência térmica e com a temperatura adiabática de chama para o Ciclo Otto estão apresentadas nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

Figura 6 – Variação de Φ vs. Eficiência Térmica



Fonte: Os Autores (2026).

Figura 7 – Variação de Φ vs. Temperatura adiabática de chama



Fonte: Os Autores (2026).

Constatou-se que a melhor opção de tecnologia a ser aplicada é o Grupo Motor Gerador (GMG), com razão de equivalência igual a 0,75. Na Tabela 2 é apresentada a comparação entre os dois ciclos. Além disso, deve-se ponderar outro ponto positivo relativo a esta tecnologia que é um método convencional, e que já está consolidado no mercado.

Tabela 2 – Tabela comparativa entre os dois ciclos dimensionados

Parâmetro	Ciclo Otto	Ciclo Brayton Regenerativo
Eficiência Térmica	42,30%	23,82%
Consumo de combustível (kmol/kJ)	4,13E-06	9,62E-06
Potência instalada recomendada (kVa)	200	85,53
PTCE (kWh/dia)	1.393,2	596,12
Quantidade de residências supridas	266	113

Fonte: Os Autores (2026).

As estimativas apresentadas basearam-se em dados de coleta de 2001, ano de início de operação do aterro sanitário, e realizaram-se projeções para 30 anos a partir do início de operação de cada célula. Analisando o somatório entre as duas células, a maior vazão ocorreu no ano de 2018, sendo igual a 197,07 Nm³/h, potencial suficiente para recomendar a instalação de um sistema de aproveitamento de gás. Foram dimensionadas duas tecnologias de conversão do potencial térmico do biogás para eletricidade, uma microturbina a gás motivada principalmente pela possibilidade de maximização do poder calorífico do gás com a aplicação de um ciclo Brayton regenerativo, e o de motogerador, motivado principalmente por ser uma tecnologia já estabelecida no mercado e com altos índices de eficiência. A tecnologia escolhida foi o motogerador utilizando razão de equivalência igual a 0,75. Para este caso o sistema dimensionado deveria ter a potência instalada de 200 kVA, gerando 1393,2 kWh/dia, considerando dez horas de operação da planta e fator de potência igual à 0,8. Este potencial de geração, consegue suprir a necessidade energética de aproximadamente 266 residências, sendo que o consumo médio de eletricidade para a classe residencial é de 157 kWh/mês.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: apresentação de projetos de aterros. Versão corrigida: 1996. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 7 p.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Caderno informativo**: recuperação energética. São Paulo: ABRELPE, 2012. 32 p.

ABRELPE– ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: ABRELPE, 2016. 96 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 69 p.

BOVE, R.; LUNGI, P. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. **Energy Conversion and Management**. Elsevier, v. 47, n. 11, p. 1391–1401, 2006.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012. **Estabelece condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências**. Brasília, DF: ANEEL, 2012.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Brasília, DF, 2010. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Seção 1, p. 3.

IPCC – PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Guidelines for national greenhouse gas inventories**. 2006. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>. Acesso em: 26 abr. 2017.

PERSSON, M.; JONSSON, O.; WELLINGER, A. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection. *In: IEA Bioenergy, Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas*. Paris: IEA Bioenergy, 2006. p. 1-32.

PMFI – PREFEITURA MUNICIPAL DE FOZ DO IGUAÇU. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. **Dados PMFI**. Foz do Iguaçu, 2018.

TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. **Handbook of solid waste management**. New York: McGraw-Hill, 2002. 950 p.

ENERGIA MECÂNICA: EFICIÊNCIA TÉRMICA

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA BIBLIOTECA*

Melanie Gissel Urdangarín Gamarra e

Fabyo Luiz Pereira

No Brasil, as edificações consomem metade da energia elétrica, sendo que em prédios públicos o condicionamento de ar responde por 48% do total. Logo, reduzir o consumo energético de condicionamento de ar é um fator chave para reduzir significativamente o consumo em edificações. Na edificação real em estudo, em uma biblioteca, os consumos elétricos dos sistemas de condicionamento de ar, iluminação e equipamentos de escritório são, respectivamente, 76,1%, 16,2%, e 7,7% do total. Este trabalho propõe um sistema de condicionamento de ar mais eficiente e o uso de películas de controle solar para diminuir a carga térmica. Para fazer as simulações computacionais foi usado o software *EnergyPlus*.

A biblioteca possui 43 condicionadores de ar do tipo split, atendendo uma carga térmica de 87 TR. Os splits são indicados para aplicações residenciais (Quadri, 2001), porém quando utilizadas múltiplas unidades tornam-se uma opção pouco eficiente (Pita, 2002). Uma alternativa viável e adequada às características da edificação em questão é um sistema de vazão de refrigerante

* Este capítulo é baseado em *Simulação termo-energética de uma biblioteca visando aumento da eficiência energética: um estudo de caso*, Trabalho de Conclusão de Curso por Melanie Gissel Urdangarín Gamarra, apresentado e aprovado em 2017, orientado por Prof. Me. Fabyo Luiz Pereira.

variável (VRV), no qual se usa um compressor de velocidade variável e válvulas de expansão eletrônicas em cada unidade interna para variar a vazão de refrigerante.

As películas de controle solar são produtos flexíveis feitos de múltiplas camadas de poliéster revestidas ou tratadas quimicamente, que permitem regular a penetração da luz e do calor, reduzindo o brilho e a radiação UV (Plummer, 2015).

Diversos trabalhos usaram simulação computacional para comparar sistemas VRV com outros sistemas em diferentes tipos de edificações, obtendo expressivos potenciais de redução do consumo energético do sistema de condicionamento de ar: 48,0% em Pasquali *et al.* (2011); 30,0% em Grass (2013), que reportaram não haver retorno do investimento num prazo de 30 anos; 22,4% em Souza (2010); 25% em Baggio (2011); entre 27,1% e 57,9% em Aynur *et al.* (2009); e 22,2% em Zhou *et al.* (2007). Zanata e Dutra (2011) concluíram que os sistemas VRV são mais adequados para aplicações de pequeno porte, com carga térmica limite entre 200 e 300 TR.

Diversos trabalhos usaram simulação computacional para estudar o efeito do uso de películas nos vidros das fachadas de edificações, obtendo expressivos potenciais de redução do consumo energético total (11,5% em Pereira (2005); 8% em Yin *et al.* (2012); 2% em Jahromi *et al.* (2017); e 3,7% em Wang *et al.* (2017)), e de redução no consumo energético do sistema de condicionamento de ar (26,0% em Pereira (2005); 27,5% em Yin *et al.* (2012); 35,0% em Jahromi *et al.* (2017); 13,1% em Li *et al.* (2015); e 6,9% em Li *et al.* (2008)).

Modelo de consumo elétrico e determinação das zonas térmicas

A primeira etapa do trabalho consistiu em criar um modelo 3D da biblioteca no *EnergyPlus*, para simular o consumo elétrico ao longo do ano, validando-a através da comparação com o consumo

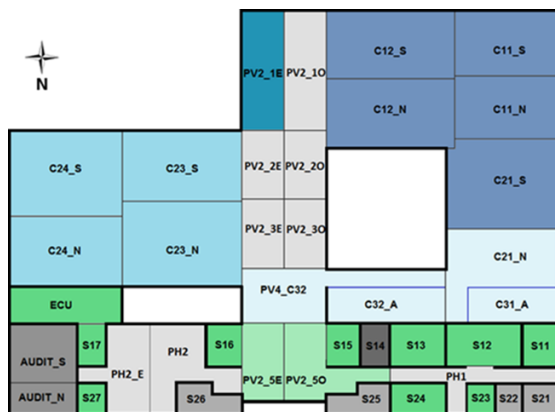
real medido *in loco*. A segunda etapa consistiu em dimensionar o novo sistema de condicionamento de ar e escolher as películas de controle solar, para, através das simulações, quantificar a economia no consumo elétrico. Finalmente, foi realizada uma análise econômica para determinar se as soluções estudadas são economicamente viáveis.

A edificação, com 2.263 m², está localizada dentro de Itaipu Binacional, em Foz do Iguaçu-PR, e está orientada ao norte com azimute zero. A zona bioclimática é a três (ABNT, 2005), e segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima na cidade é subtropical sem estação seca.

A biblioteca foi dividida em 41 zonas térmicas, conforme disposição dos condicionadores de ar instalados (Figura 1). Cada espaço entre o forro e a cobertura foi definido como uma outra zona térmica. Logo, o edifício foi dividido em 66 zonas térmicas: acervo bibliográfico (C11 S, C11 N, C12 S, C12 N e C21 S), permanência de alunos (cúpulas maiores C23 S, C23 N, C24 S e C24 N, cúpulas menores C21 N, C31 A, PV4 C32 e C32 A, e corredor PV2 1E), recepção (PV2 5E e PV2 5O), salas administrativas (S11, S12, S13, S15, S16, S17, S23, S24, S27 e ECU), auditório (AUDIT S e AUDIT N), corredores (PV210, PV22E, PV22O, PV23E, PV23O, PH1, PH2 e PH2 E), banheiros (S21, S22, S25 e S26), e *datacenter* (S14).

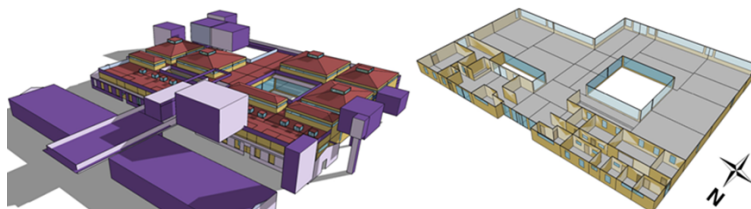
O modelo 3D da biblioteca, mostrado na Figura 2, foi criado no *EnergyPlus*, utilizando as plantas do projeto arquitetônico. Os dados das características construtivas dos materiais da envoltória, cobertura, piso e esquadrias, tais como as principais propriedades termofísicas, foram inseridas no modelo, sendo a maioria consultada em ASHRAE (2005).

Figura 1 – Divisão da edificação em zonas térmicas (Traço grosso – parede divisória, traço fino – limite imaginário, cor azul – piso superior)



Fonte: Os Autores (2026).

Figura 2 – Modelo geométrico tridimensional gerado no *EnergyPlus*



Fonte: Os Autores (2026).

Foram inseridos no modelo as características detalhadas de ocupação diária, do sistema de iluminação e dos equipamentos elétricos, e a infiltração de ar. O modelo resultante foi denominado modelo base. Para validar o modelo, foram comparados os consumos mensais simulados com os medidos entre novembro de 2016 e maio de 2017 para a edificação inteira, que inclui algumas salas em dois blocos em sua frente (Figura 2, em cor roxa). Após ajustar o modelo base para incluir o consumo destas salas extras, comparou-se, na Tabela 1, os resultados da simulação com os dados medidos.

Tabela 1 – Validação da simulação por comparação com dados medidos

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Simulação (kWh)	14.645	13.574	20.563	11.608	9.269	6.131	6.387	10.263	9.861	13.981	12.421	15.867
Medidor (kWh)	14.885	13.630	19.417	11.224	10.234	-	-	-	-	-	12.003	16.543
Diferença (%)	1,61	0,41	-5,90	-3,42	9,43	-	-	-	-	-	-3,48	4,09

Fonte: Os Autores (2026).

O sistema VRV foi simulado em modo *autosize*, usando os dias de projeto estatísticos definidos em ASHRAE (2005). As unidades evaporadoras e condensadoras escolhidas são da marca LG, e suas principais características (LG, 2012), bem como a carga térmica de cada zona, são descritas em detalhes em Gamarra (2017).

Foram escolhidas películas de controle solar da marca 3M de três séries diferentes (Prestige, Ceramic e Neutral) (3M, 2012), e suas propriedades óticas foram obtidas em LBNL (2017). As películas de controle solar foram adicionadas nas janelas e claraboias orientadas ao leste, norte e oeste da região do acervo bibliográfico, permanência de alunos e corredor central. A fachada sul foi deixada fora por ser a menos ensolarada.

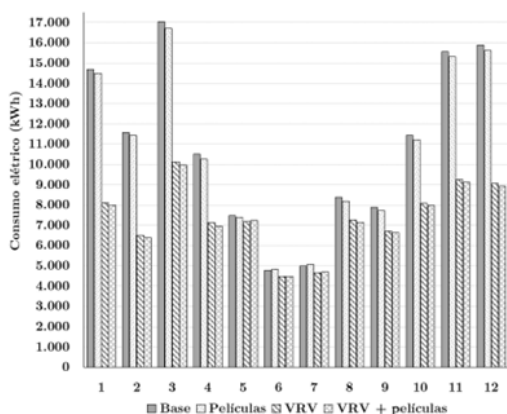
Além do modelo base, as três propostas estudadas são:

- a) Proposta 1: Troca do sistema de splits no modelo base pelo sistema VRV;
- b) Proposta 2: Modelo base com aplicação de películas nos vidros;
- c) Proposta 3: Troca do sistema de splits no modelo base pelo sistema VRV com aplicação de películas nos vidros.

Avaliação do consumo elétrico mensal do modelo base e das proposições

A Figura 3 apresenta o consumo elétrico mensal do modelo base e das três propostas estudadas. Na proposta dois, o resultado corresponde à simulação com a película Neutral 35. A proposta dois não apresenta redução significativa no consumo, mas nas propostas um e três a redução é bastante significativa entre outubro e março.

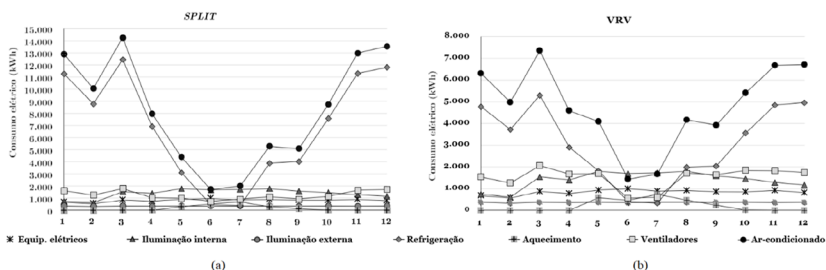
Figura 3 – Consumo elétrico mensal dos casos estudados



Fonte: Os Autores (2026).

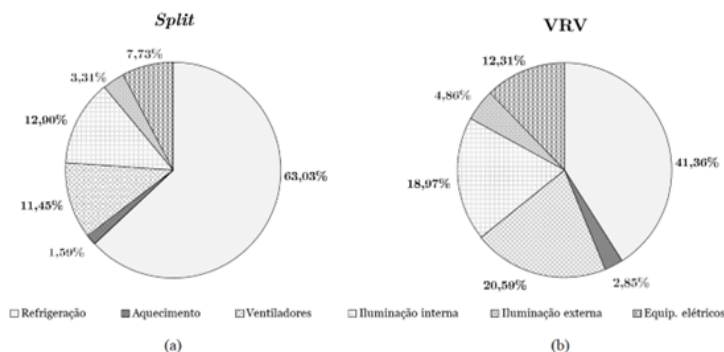
O consumo elétrico mensal por serviço do modelo base e da proposta um são mostrados na Figura 4, onde se observa que os perfis são iguais, porém na proposta um houve uma redução no consumo energético anual total e de condicionamento de ar, respectivamente, de 32,01% e 42,08%. A participação percentual de cada serviço no consumo anual é mostrada na Figura 5, onde se observa que no modelo base e na proposta um, o condicionamento de ar responde, respectivamente, por 76,07% e 64,80%.

Figura 4 – Consumo elétrico mensal por serviço: (a) Modelo base, (b) Proposta 1



Fonte: Os Autores (2026).

Figura 5 – Contribuição de cada serviço no consumo anual: (a) Modelo base, (b) Proposta 1



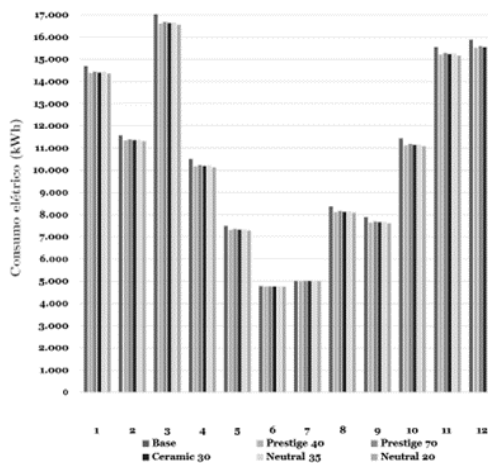
Fonte: Os Autores (2026).

As simulações usando as películas selecionadas resultaram nos consumos mensais mostrados na Figura 6. Em ordem decrescente, as películas que proporcionaram maior economia foram: Neutral 20, Prestige 40, Ceramic 30, Neutral 35 e Prestige 70, conforme a redução térmica de cada uma delas. A redução no consumo energético total da proposta dois em relação ao modelo base foi de 2,14%, indicando que o uso apenas de películas não gera redução significativa no consumo. A redução no consumo energético total da proposta três em relação ao modelo base foi de 32,80%. Como o sistema VRV é bem mais eficiente que o modelo base, a redução

de consumo proporcionada pelas películas nesse caso é menor que quando utilizadas junto ao modelo base, 1,17% e 2,15% anual, respectivamente.

Considerando a inflação e a evolução das tarifas elétricas da COPEL entre 1999 e 2016, foram estabelecidos três cenários para a análise econômica, conforme a Tabela 2: cenário referência (tarifa elétrica cresce 3% acima da inflação); cenário bom (tarifa elétrica cresce 9% acima da inflação); e cenário contraproducente (inflação cresce acima da tarifa de energia em 3%).

Figura 6 – Consumo elétrico mensal com uso de películas de controle solar



Fonte: Os Autores (2026).

Tabela 2 – Cenários para a análise econômica

	Cenário Referência	Cenário Bom	Cenário Contraproducente
Alterações tarifárias (%)	7,33	13,33	1,33
IPCA (%)	4,33	4,33	4,33
Diferença (%)	3,00	9,00	-3,00

Fonte: Os Autores (2026).

As variáveis de entrada necessárias para a análise econômica da proposta 1 são mostradas na Tabela 3. A Taxa Média de Atratividade (TMA) utilizada corresponde à média da poupança (P) nos últimos 10 anos, com a inflação.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados da análise econômica da proposta 1 obtidos para o Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), *Payback* Descontado (PBD) e Custo Anual Uniformizado (CAU). O sistema VRV é mais vantajoso nos cenários referência e bom, mas para o cenário contraproducente é uma opção mais cara.

Tabela 3 – Variáveis de entrada para a análise econômica da proposta 1

P(%)	1,0900
TMA (%)	5,4672
Tarifa elétrica (R\$/kWh)	0,640
Investimento VRV (R\$)	743.237
Consumo VRV (kWh/ano)	88.508
Investimento Split (R\$)	219.000
Consumo Split (kWh/ano)	130.179
Vida útil VRV (anos)	20
Vida útil Split (anos)	10

Fonte: Os Autores (2026).

Tabela 4 – Resultados da análise econômica da proposta 1

Cenário	VPL (R\$)	TIR (%)	PBD (anos)	CAU Split (R\$)	CAU VRV (R\$)	CAU (R\$)
Sem financiamento						
Referências	204.862	8,85%	13,93	-185.558	-168.462	17.096
Bom	649.369	13,52%	10,74	-245.165	-187.218	57.946
Contraprod.	-169.050	1,37%	-	-88.713	-102.820	-14.108
Com financiamento						
Referências	176.093	9,72%	15,18	-191.236	-176.541	14.695
Bom	665.600	16,72%	12,39	-250.843	-195.298	55.545
Contraprod.	-69.210	3,27%	-	-105.124	-110.900	-5.776

Fonte: Os Autores (2026).

O custo das películas foi obtido de uma empresa do ramo. Os resultados da análise econômica da proposta dois para o cenário bom mostram inviabilidade para todas as películas, não sendo necessário, portanto, repetir a análise para os demais cenários.

O mesmo método de análise econômica também foi aplicado para a proposta três, e os resultados indicam viabilidade econômica, pois o investimento nas películas é diluído no investimento do sistema de condicionamento de ar. Entretanto, a proposta três é menos atrativa que a proposta um. Mais detalhes sobre as variáveis de entrada e os resultados das análises econômicas podem ser encontradas em Gamarra (2017).

Assim, este trabalho quantificou a economia no consumo elétrico em uma edificação real através do estudo das seguintes propostas: troca do sistema de condicionamento de ar do tipo split por um sistema VRV, aplicação de películas de controle solar nos vidros, e ambas propostas juntas.

Usou-se o *EnergyPlus* como ferramenta de simulação. Primeiramente foi feita a simulação do consumo atual e validação dos resultados comparando com medições reais de consumo, em

seguida as propostas foram dimensionadas e simuladas para quantificar a economia obtida, e finalmente foi realizada uma análise econômica para determinar suas viabilidades.

O sistema VRV obteve uma economia de consumo de energia anual em condicionamento de ar de 42,08% com relação aos splits. As economias no consumo elétrico total anual foram de 32,01%; 2,14% e 32,80%, respectivamente para as propostas 1, 2 e 3.

A análise econômica da proposta 1 resultou que o investimento é recuperado em 15 anos, tendo um CAU de R\$14.695 ao ano. A aplicação de películas de controle solar se mostrou economicamente inviável.

REFERÊNCIAS

3M. **Window film manual**. Saint Paul, MN, EUA: 3M, Renewable Energy Division, 2012. 72 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 124 p.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Handbook of fundamentals**. Atlanta: ASHRAE, 2013. 800 p.

AYNUR, T. N. *et al.* Simulation comparison of vav and vrf air conditioning systems in an existing building for the cooling season. **Energy and Buildings**. Amsterdam: Elsevier, v. 41, n. 12, p. 1956–1965, 2009.

BAGGIO, P. **Simulação computacional para comparação de sistemas de ar-condicionado**. 2011. 70 p. (Monografia). Curso de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

GAMARRA, M. G. U. **Simulação termo-energética de uma biblioteca visando aumento da eficiência energética**: estudo de caso. 2017. 18 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energia). Universidade Federal da Integração Latino-Americana, UNILA, Foz do Iguaçu, 2017.

GRASS, J. C. S. **Eficiência de sistemas de ar-condicionado em um prédio residencial**. 2013. 55 p. (Monografia). Curso de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

JAHROMI, A. B. *et al.* Impact of window films on the overall energy consumption of existing uk hotel buildings. **SustainableCity**. Basel: MDPI, v. 9, n. 4, p. 574, 2017.

LBNL – LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. **Berkeley lab window 7.5**. Berkeley, CA: LBNL, 2017. 120 p.

LG. **Multi V IV**: engineering manual. [s.l.]: LG Eletronics, [2012]. 100 p.

LI, C. *et al.* Experimental and theoretical study on the effect of window films on building energy consumption. **Energy and Buildings**. Amsterdam: Elsevier, v. 102, p. 308–315, 2015.

LI, D. H. *et al.* Lighting and cooling energy consumption in an open-plan office using solar film coating. **Energy**. Amsterdam: Elsevier, v. 33, n. 5, p. 770–780, 2008.

PASQUALI, F. E.; BEYER, P. O.; HENNES, A. M. Potential for energy savings in retrofiting of an office building in São Paulo/ Brazil. *In*: Proceedings of Building Simulation, 2011, Sydney. **Proceedings** [...]. Sydney: IBPSA, 2011. p. 2865-2872.

PEREIRA, F. L. **Determinação computacional da influência de parâmetros físicos no comportamento termoenergético de uma edificação**. 2005. 125 p. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

PITA, E. **Air conditioning principles and systems**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002. 550 p.

PLUMMER, J. R. **Window film**: a cost effective window retrofit. 2015. Disponível em: <https://www.greenbuildermedia.com/blog/window-film-a-cost-effective-window-retrofit>. Acesso em: 08 dez. 2025.

QUADRI, N. **Sistemas de aire acondicionado**. Buenos Aires: Alsina, 2001. 520 p.

SOUZA, W. B. **Comparação entre dois sistemas de ar-condicionado para um prédio histórico**. 2010. 78 p. (Monografia). Curso de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

WANG, X. *et al.* Energy-saving analysis for the modern wing of the art institute of Chicago and green city strategies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Oxford: Elsevier, v. 73, p. 1104–1114, 2017.

YIN, R. *et al.* Case study: energy savings from solar window film in two commercial buildings in shanghai. **Energy and Buildings**. Amsterdam: Elsevier, v. 45, p. 182–189, 2012.

ZANATA, F. A.; DUTRA, R. C. **Caracterização, aplicação e comparação entre sistemas de fluxo variável de refrigerante e sistemas de água gelada**. 2011. 60 p. (Monografia). Curso de Engenharia. Universidade de Brasília, UnB, Brasília, DF, 2011.

ZHOU, Y. *et al.* Energy simulation in the variable refrigerant flow air-conditioning system under cooling conditions. **Energy and Buildings**. Amsterdam: Elsevier, v. 39, n. 1, p. 24–30, 2007. **Window Film Manual**, 2005.

ENERGIA ELÉTRICA: ESTIMATIVA E PLANEJAMENTO

CVAR NO PLANEJAMENTO DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL*

Diana Vanessa López Maldonado,

Rafael José de Andrade e

Jorge Javier Gimenez Ledesma

Este trabalho aborda a crise hídrica e energética enfrentada pelo Brasil, exacerbada por mudanças climáticas e crescimento populacional, que impactam severamente a geração hidroelétrica. Em resposta, foram adotadas medidas como aumento da geração térmica e importação de energia, refletindo-se no aumento dos custos energéticos. O estudo propõe recalibrar parâmetros de aversão ao risco do Valor Condicionado a um dado Risco (CVaR) para tornar os modelos mais adaptáveis a cenários críticos, visando melhorar a precisão das previsões e reduzir a dependência de despachos térmicos emergenciais, especialmente observados em 2021 (CPAMP, 2013; WMO, 2021; CEPEL, 2021; ONS, 2021; Escalante *et al.*, 2022, ONU, 2022).

Analisando o desenvolvimento e aplicação do CVaR (Valor em Risco Condicional) no setor elétrico brasileiro, fundamentado em pesquisas desde sua introdução em 2004 por Marzano (2004). Inicialmente proposto para otimização de portfólios de

* Este capítulo é baseado em Aplicação do CVaR no planejamento da operação do Sistema Interligado Nacional, Trabalho de Conclusão de Curso por Diana Vanessa López Maldonado, apresentado em 2022, orientado pelo Prof. Dr. Jorge Javier Gimenez Ledesma e Eng. Rafael José de Andrade.

contratos de energia, o CVaR foi recomendado como medida de risco devido a suas propriedades matemáticas robustas. Estudos posteriores, como os de Philpott e De Matos (2012), destacaram sua aplicação no planejamento hidrotérmico para mitigar riscos operacionais e reduzir custos em situações adversas, como observado entre 2011 e 2013 (CCEE, 2022; CNPE, 2013).

A evolução do CVaR continuou com estudos em 2014 por Maceira *et al.* (2014) e 2015 por Maceira *et al.* (2015), que refinaram seus parâmetros para melhor ajuste nos modelos de planejamento energético, influenciando decisões estratégicas em leilões de energia e operação do sistema (Rufino, 2022; MME, 2022). A partir de 2017, ajustes nos parâmetros do CVaR foram deliberados em consultas públicas (Luz *et al.*, 2017; CPAMP, 2019; CPAMP, 2021; ABRACEEL, 2022; CPAMP, 2022; CPAMP, 2022), culminando em sua recalibração em 2022 (CPAMP, 2022; CPAMP, 2022) diante de crises hídricas e aumento da demanda, reafirmando sua relevância na gestão de riscos e operação eficiente do sistema elétrico nacional.

Os conceitos teóricos fundamentais para o entendimento da pesquisa, focando no planejamento da operação no setor elétrico são:

a) Planejamento da Operação: visa minimizar o custo total integrando geração hidroelétrica e termoelétrica para eficiência econômica e redução de impacto socioambiental, considerando decisões de curto e longo prazo (CCEE, 2022);

b) Modelos de Planejamento: NEWAVE usa Programação Dinâmica Dual Estocástica para políticas de operação baseadas em afluências estocásticas (Andrade, 2019; CEPEL, 2012); DECOMP otimiza operação de curto prazo para o PMO (CCEE, 2022; Andrade, 2019; CEPEL, 2021);

c) Valor Condicionado ao Risco (CVaR): Incorpora aversão ao risco priorizando cenários hidrológicos críticos na Função de Custo Futuro, ajustando a função objetivo para decisões robustas e econômicas no setor elétrico (CPAMP, 2013; CEPEL, 2021).

Avaliação dos impactos causados pelas mudanças nos parâmetros do CVaR

Para avaliar o impacto de mudanças nos parâmetros do CVaR (α , λ) mais restritivos (50, 100) em relação aos valores utilizados nos anos de 2021 e 2022 (50, 35), comparativos foram feitos com os dados oficiais do CVaR. A metodologia incluiu uma análise de operação sombra, onde cenários alternativos foram processados com ajustes metodológicos para avaliar as diferenças nos resultados do Programa Mensal de Operação (PMO) [34]. O estudo foi dividido em várias etapas sequenciais:

Pesquisa Bibliográfica: revisão de estudos relacionados para embasar o trabalho;

Aquisição de Dados: *download* dos arquivos oficiais do sistema SINtegre do ONS, incluindo os arquivos “Deck NEWAVE Definitivo” e “Deck e Resultados DECOMP – Valor Esperado” de cada mês de 2021 até dezembro de 2022 (ONS, 2022);

Alteração do CVaR no NEWAVE: implementação dos novos parâmetros de aversão ao risco ($\alpha = 50\%$, $\lambda = 100\%$) nos arquivos do NEWAVE para avaliação do impacto nos resultados operacionais;

Processamento no NEWAVE: garantia de que os resultados processados com os novos parâmetros do NEWAVE fossem consistentes com o modelo oficial;

Processamento no DECOMP: inclusão dos arquivos *cortes.dat* e *cortesh.dat* gerados pelo NEWAVE para processamento e análise de dados no DECOMP, considerando as mesmas condições do modelo oficial.

Dificuldades encontradas: durante o processamento no DECOMP, algumas dificuldades surgiram devido à não convergência do modelo para alguns meses de 2021 e 2022, exigindo ajustes mínimos nos dados de entrada para viabilizar os cenários de simulação. Essas adaptações foram feitas sem comprometer significativamente os resultados obtidos (ONS, 2022).

Este estudo analisou o impacto da alteração dos parâmetros do CVaR nos resultados do Plano Mensal de Operação (PMO), comparando os anos de 2021 e 2022 com os pares (50, 35) e (50, 100), respectivamente. Foram investigadas as seguintes variáveis durante as semanas operativas desses anos:

a) geração hidroelétrica do SIN: a análise dos impactos da alteração dos parâmetros do CVaR na geração hidroelétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN), revelou que em 2021 houve uma redução significativa na geração hidrelétrica devido à adoção de parâmetros mais avessos ao risco. O caso modificado registrou uma diminuição de 1.564 MW_{med}, equivalente a 3,2% em relação ao caso oficial, especialmente nos subsistemas SE/CO, Sul e Nordeste durante o período seco de maio a outubro.

Em contrapartida, para o ano de 2022, a mudança nos parâmetros do CVaR teve um impacto menos pronunciado em comparação a 2021. O caso modificado mostrou uma redução média de 211 MW, correspondendo a 0,4% em relação ao caso oficial, devido principalmente à menor geração no subsistema SE/CO no início do ano, refletida na curva do SIN. A partir de fevereiro de 2022, ambos os casos de estudo apresentaram comportamento similar, indicando que parâmetros mais avessos ao risco permitem ao modelo perceber melhor os momentos críticos do sistema, economizando água para preservar os níveis de armazenamento dos reservatórios e ajustando a geração de forma mais eficiente entre os subsistemas;

b) geração térmica: a alteração nos parâmetros de risco CVaR impactou a geração térmica do Sistema Interligado Nacional (SIN) nos anos de 2021 e 2022. Em 2021, houve um aumento significativo na geração térmica, especialmente nos meses secos de setembro e outubro, com um acréscimo médio anual de 1.481 MW_{med}, representando um aumento de 16% em relação ao caso oficial. Este aumento foi uma resposta à redução na geração hidrelétrica, visando manter os níveis de armazenamento.

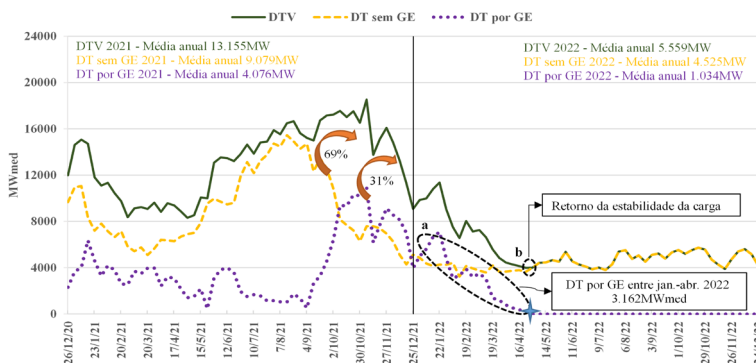
No ano seguinte, em 2022, observou-se um aumento mais modesto de 170 MWmed na geração térmica em comparação ao caso oficial, equivalente a um aumento de 4,3%. Este comportamento indica uma resposta semelhante do modelo DECOMP às condições hidrológicas desafiadoras, com uma sensibilidade maior durante períodos críticos e uma redução na geração térmica quando as condições hidrológicas melhoraram, especialmente a partir do final de fevereiro de 2022;

E c) Despacho Térmico Efetivamente Realizado: na análise do Despacho Térmico Efetivamente Realizado, representado na Figura 1, são observadas três modalidades ao longo dos anos de 2021 e 2022 para as usinas que possuem representação individualizada nos modelos. Em 2021 (lado esquerdo da Figura 1), o Despacho Térmico Verificado (DTV) alcançou uma média total de 13.155 MW, com o Despacho Térmico por motivo de Garantia Energética (DT por GE) representando 4.076 MWmed, equivalente a 31% do DTV. O Despacho Térmico sem Garantia Energética (DT sem GE) foi de 9.079 MWmed, representando 69% do DTV. As curvas mostram como o DTV é a soma do DT por GE e do DT sem GE.

Em 2022, até abril (lado direito da Figura 1), o DT por GE alcançou 3.162 MWmed, destacando-se no período de janeiro a abril, conforme indicado pela linha tracejada (a). A Figura 1 também mostra que as curvas de DTV e DT sem GE se igualam quando o DT por GE é zero, representado pela linha tracejada (b), indicando estabilidade da carga e normalização dos níveis nas bacias do SIN.

A Figura 1 é analisada em duas partes. Na primeira parte (lado esquerdo da Figura 1), durante o Despacho Térmico por motivo de GE, o DTV realizado foi de 11.696 MWmed, com o caso modificado indicando 9.215 MWmed, comparado aos 7.951 MWmed do caso oficial.

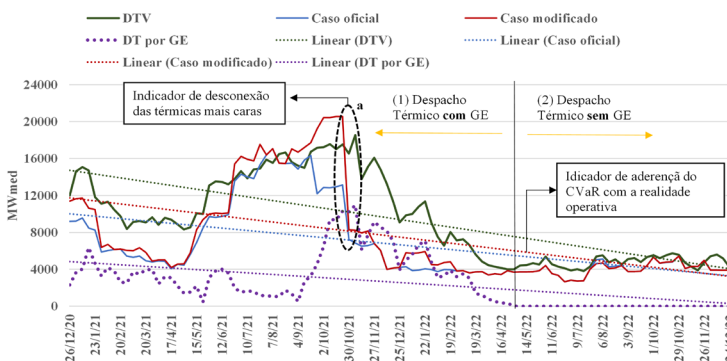
Figura 1 – Despacho Térmico efetivamente realizado nos anos de 2021 e 2022



Fonte: Os Autores (2026).

Na segunda parte (lado direito da Figura 2), sem Despacho Térmico por motivo de GE, o DTV realizado foi de 4.789 MWmed, com valores próximos entre os casos oficial (4.061 MWmed) e modificado (4.028 MWmed). No caso modificado, a sensibilidade aos parâmetros de risco mais rigorosos permitiu a desconexão de usinas térmicas mais caras (linha tracejada (a) da Figura 2) na transição para o período úmido, evitando despachos térmicos desnecessários ao longo do ano.

Figura 2 – Comportamento do caso modificado com o Despacho Térmico Verificado



Fonte: Os Autores (2026).

A metodologia do CVaR demonstrou ser eficaz ao se mostrar mais aderente à realidade operativa e às necessidades do sistema elétrico, conforme mostrado pelas trajetórias das curvas de DTV nos períodos analisados.

A alteração do parâmetro CVaR em 2021 resultou em uma menor geração hidroelétrica em várias semanas operativas, sendo compensada pelo aumento na geração térmica. Ao adotar parâmetros mais avessos ao risco, o modelo revelou maior sensibilidade para identificar momentos críticos, economizando água nos reservatórios e otimizando a distribuição da geração hidroelétrica entre os subsistemas para atender às demandas do sistema. Isso também se refletiu no CMO de 2021, que apresentou valores superiores ao caso oficial, porém inferiores ao Custo de Déficit, indicando que o modelo proposto desligou térmicas mais caras na transição para o período úmido para evitar custos desnecessários. Esses resultados corroboram estudos anteriores, destacando a eficácia do CVaR em aumentar ou reduzir o Despacho Térmico conforme necessário, em resposta às condições hidroenergéticas. Para futuros trabalhos de recalibração do CVaR, é recomendado considerar o impacto crescente da Micro e Minigeração Distribuída (MMGD), cuja capacidade instalada já supera 14.000 MW e tende a crescer significativamente, influenciando o despacho das usinas individualizadas e os resultados dos modelos de otimização da operação elétrica.

REFERÊNCIAS

ABRACEEL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS COMERCIALIZADORES DE ENERGIA ELÉTRICA. CPAMP recomenda o uso do CVaR (50,35) em 2022. In: **Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia**. Brasília, DF: ABRACEEL, 2021. Disponível em: <https://abraceel.com.br/blog/2021/08/cpamp-recomenda-o-uso-do-cvar-5035-em-2022/>. Acesso em: 11 jul. 2022.

ANDRADE, R. J. de. **Visões 2023 – impactos nos resultados do modelo de planejamento NEWAVE de mudanças na representação da ITAIPU, tendo como base o PDE 2027**. Rio de Janeiro/Foz do Iguaçu: Fundação Getúlio Vargas / União Dinâmica de Faculdades Cataratas, 2019. 35 p.

CCEE – CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA; ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Treinamento NEWAVE – DECOMP: o SIN e os modelos de planejamento da operação energética**. Rio de Janeiro: CCEE/ONS, [2022]. p. 5–27. Disponível em: <https://acortar.link/ci6H5J>. Acesso em: 08 jul. 2022.

CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de referência, modelo NEWAVE**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2012. Disponível em: https://simsee.org/simsee/biblioteca/Brasil/NW201203/ManualReferencia_Newave_comentado.pdf. Acesso em: 08 jul. 2022.

CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Modelo DECOMP – determinação da coordenação da operação a curto prazo – manual do usuário**. Brasília, DF: ANEEL, 2021. Disponível em: <https://acortar.link/mFHCpT>. Acesso em: 13 jul. 2022.

CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Notas técnicas referentes ao projeto NEWAVE emitidas em 2012 e 2013**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2013. Disponível em: <http://www.cepel.br/?s=notas+t%C3%A9cnicas>. Acesso em: 15 ago. 2022.

CEPEL – CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. **Projeto NEWAVE, modelos de planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos interligados de longo e médio prazo – manual do usuário**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2021. p. 1–2.

CNPE – CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICAS ENERGÉTICAS. Resolução n. 3, de 6 de março de 2013. *In: Ministério de Minas e Energia*. Brasília, DF: MME, 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2013>. Acesso em: 17 ago. 2022.

CPAMP – COMISSÃO PERMANENTE PARA ANÁLISE DE METODOLOGIAS E PROGRAMAS COMPUTACIONAIS DO SETOR ELÉTRICO. Ata da reunião extraordinária de 7/04/2022. *In: Ministério de Minas e Energia*. Brasília, DF: MME, 2022. Disponível em: <https://acortar.link/Mcjf9D>. Acesso em: 02 jun. 2022.

CPAMP – COMISSÃO PERMANENTE PARA ANÁLISE DE METODOLOGIAS E PROGRAMAS COMPUTACIONAIS DO SETOR ELÉTRICO. **Consulta pública n. 121 de 10/02/2022 – consulta pública sobre aprimoramentos propostos pela CPAMP (ciclo 2021-2022)**. Brasília, DF: MME, 2022. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/pt/web/guest/servicos/consultas-publicas>. Acesso em: 02 jun. 2022.

CPAMP – COMISSÃO PERMANENTE PARA ANÁLISE DE METODOLOGIAS E PROGRAMAS COMPUTACIONAIS DO SETOR ELÉTRICO. Memória reunião plenária CPAMP – reunião 10.06.2019. *In: Ministério de Minas e Energia*. Brasília, DF: MME, 2019. Disponível em: <https://acortar.link/b9ouY0>. Acesso em: 08 ago. 2022.

CPAMP – COMISSÃO PERMANENTE PARA ANÁLISE DE METODOLOGIAS E PROGRAMAS COMPUTACIONAIS DO SETOR ELÉTRICO. Memória reunião plenária extraordinária CPAMP. *In: Ministério de Minas e Energia*. Brasília, DF: MME, 2021. Disponível em: <https://acortar.link/3ET1jv>. Acesso em: 08 ago. 2022.

CPAMP – COMISSÃO PERMANENTE PARA ANÁLISE DE METODOLOGIAS E PROGRAMAS COMPUTACIONAIS DO SETOR ELÉTRICO. **Relatório técnico**: desenvolvimento, implementação e testes de validação das metodologias para internalização de mecanismos de aversão a risco nos programas computacionais para estudos energéticos e formação de preço. Brasília, DF: MME, 2013. Disponível em: <https://acortar.link/F6mC5i>. Acesso em: 15 ago. 2022.

ESCALANTE, R. A. F.; MALDONADO, D. V. L.; ANDRADE, R. J. de. Impacto das medidas restritivas de combate ao COVID-19 na carga do sistema interligado nacional em 2020. *In: XV SEPOPE*, 2022, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: PUC-Rio/SBEE, 2022. Disponível em: <https://acortar.link/R0xOZp>. Acesso em: 04 ago. 2022.

LUZ, D. R. M. R.; ANDRADE, R. J.; FAVORETO, R. Relato de acompanhamento dos modelos: impacto da alteração dos parâmetros do cvar no modelo newave. *In: ITAIPU Binacional*, vol. RAM 14. Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2017. p. 1-25.

MACEIRA, M. E. P.; MARZANO, L. G. B.; PENNA, D. D. J.; DINIZ, A. L.; JUSTINO, T. C. Application of cvar risk aversion approach in the expansion and operation planning and for setting the spot price in the brazilian hydrothermal interconnected system. **Int. J. Electr. Power Energy Syst.** Amsterdam: Elsevier, v. 72, p. 126–135, 2015. doi: 10.1016/j.ijepes.2015.02.025.

MACEIRA, M. E. P.; MARZANO, L. G. B.; PENNA, D. D. J.; DINIZ, A. L.; JUSTINO, T. C. Aplicação do mecanismo de aversão a risco CVaR no planejamento da expansão e da operação energética e na formação do PLD do Sistema Interligado Nacional. *In: XIII SEPOPE – Symp. Simp. Spec. Electr. Oper. Expans. Plan.*, 2014, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: SBEE, 2014. p. 21941–911.

MARZANO, L. G. B. **Otimização de portfólio de contratos de energia em sistemas hidrotérmicos com despacho centralizado**. 2004. 243 p. (Tese de Doutorado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Portaria n. 41, de 7 de fevereiro de 2017. *In: Diário Oficial da União*. Brasília, DF, 08 fev. 2017. Seção 1, p. 7. Disponível em: <https://acortar.link/hP8PGP>. Acesso em: 22 ago. 2022.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Avaliação das condições de atendimento eletroenergético do sistema interligado nacional – estudo prospectivo agosto a novembro de 2021**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://acortar.link/AePkLb>. Acesso em: 13 jan. 2022.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Preço horário da energia – ‘operação sombra’**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.ons.org.br/ccee>. Acesso em: 27 jan. 2022.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Programação da operação, visão geral, processos**. Rio de Janeiro: SINtegre, 2022. Disponível em: <https://sintegre.ons.org.br/sites/9>. Acesso em: 17 ago. 2022.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Climate change, population increase fuel looming water crisis: WMO. *In: **United Nations News***. Nova York, 2021. Disponível em: <https://news.un.org/en/story/2021/10/1102162>. Acesso em: 12 jan. 2022.

PHILPOTT, A. B.; DE MATOS, V. L. Dynamic sampling algorithms for multi-stage stochastic programs with risk aversion. **Eur. J. Oper. Res.** Amsterdam: Elsevier, v. 218, n. 2, p. 470–483, 2012. doi: 10.1016/j.ejor.2011.10.056.

RUFINO, R. D. Despacho n. 2.978, de 27 de agosto de 2013. *In: **Diário Oficial da União*** : seção 1. Brasília, DF, n. 166, p. 77, 28 ago. 2013. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/dsp20132978.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2022

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **2021 state of climate services, WATER**. Genebra, Suíça: WMO, 2021. 45 p. Disponível em: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10826. Acesso em: 07 jan. 2022.

SERIES TEMPORALES PARA PREVISIÓN DE LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA *

Vanessa Maria Serrano Ardila,

Joylan Nunes Maciel y

Oswaldo Hideo Ando Junior

La Energía Solar Fotovoltaica (ESF) es una fuente de energía que aporta a la diversificación de la matriz energética. Según IRENA en Suramérica en el 2010 la capacidad instalada de SFV fue de 0,44 GW y en el 2019 fue de 6 GW, representando un aumento del 99,3%. Con este crecimiento aparecen desafíos como la variabilidad e incertidumbre de la fuente, los pronósticos de generación de ESF son fundamentales para enfrentarlos. Dado este contexto, el objetivo de este trabajo es evaluar dos métodos de Series de Tiempo Difusas (STD) en la predicción de generación de ESF de corto plazo.

Se define el recorte temporal con que se realizan los pronósticos, el enfoque y las escalas temporales. Los principales enfoques en el pronóstico de ESF son el directo e indirecto (Antonanzas *et al.*, 2016). Se definen también las escalas temporales de corto, medio o largo plazo (Maciel *et al.*, 2021).

Las métricas para la evaluación de rendimiento son, el error de sesgo medio (MBE), el error cuadrático medio (RMSE) (Blaga *et al.*, 2019), el teste de normalidade de Kolmogorov –Smirnov (KS) (Paik; Thayamballi, 2009) y el coeficiente de determinación (R^2) (Gueymard, 2014).

* Este capítulo é baseado em *Fuzzy Time Series Methods Applied to Short – Term Photovoltaic Power Forecasting*, Trabalho de Conclusão de Curso por Vanessa Maria Serrano Ardila, apresentado e aprovado em 2021, orientado pelo Prof. Dr. Oswaldo Hideo Ando Junior e Prof. Dr. Joylan Nunes Maciel.

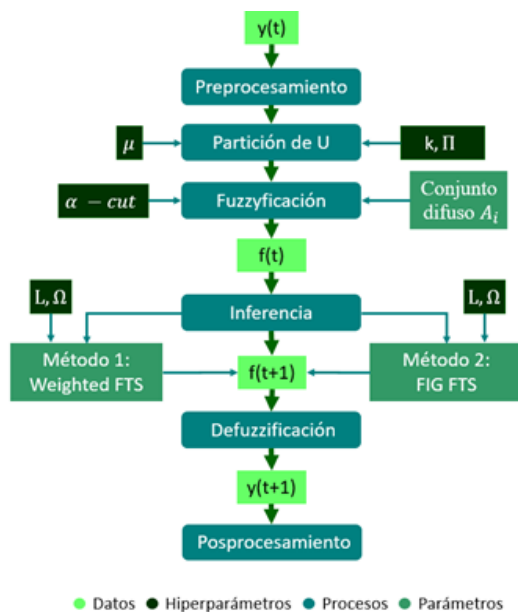
Las STD son métodos no paramétricos para el pronóstico de series de tiempo basados en la Lógica Difusa (Song; Chissom, 1993). Permiten la flexibilidad del sistema al considerar circunstancias naturales (Silva *et al.*, 2019).

La principal diferencia entre las series de tiempo convencionales y las series de tiempo difusas es que las observaciones de las primeras son números reales, mientras que de las segundas son conjuntos difusos (Song; Chissom, 1993). Los conjuntos difusos conforman el universo del discurso: dada $Y \in R^1$ y sus valores $y(t) \in Y$ para $t = 0, 1, \dots, T$, el Universo del Discurso (U) es delimitado por los valores máximos y mínimos de Y tal que $U = [(Y), (Y)]$ en el cual los conjuntos difusos $f_i(t)$, ($t = 1, 2, 3 \dots$) son definidos y $F(t)$ es la colección de f_i , así $F(t)$ es llamada Serie de Tiempo Difusa en $Y(t)$ (Song; Chissom, 1993).

Etapas del algoritmo STD: WEIGHTED and FIG (Fuzzy Information Granular)

Se representa en la Figura 1 el método con los hiperparámetros del modelo mostrados en la Tabla 1. En el preprocesamiento, se escalan los datos dentro de un intervalo y se eliminan tendencia y/o estacionalidad. Durante el proceso de *fuzzy* ficación cada elemento de la serie de tiempo numérica $Y(t)$ será reemplazado por el conjunto difuso con un valor de membresía máximo, y se crea la Serie de Tiempo Difusa $F(t)$ (Minds, 2019).

Figura 1 – Algoritmo del proceso de pronóstico STD



Fuente: Los Autores (2026).

Tabla 1 – Hiperparámetros del modelo STD

Símbolo	Parámetro	Descripción
$k \in N$	Número de particiones	Número de conjuntos difusos
$\mu : U \rightarrow [0, 1]$	Función de Membresía	Valor de membresía de un valor $y \in U$
n	Método de partición	División del universo del discurso
$\alpha \in [0, 1]$	El α – cut,	Grado mínimo de membresía
$\Omega \in N$	Orden	Numero de atrasos
$L \in N \times N$	Índice de atrasos	Vector de índices Ω y $1 \leq L[i] < L[i + 1]$ para $i = 0, \dots, \Omega$
$\kappa \in N$	kNN	El número de vecinos cercanos

Fuente: Los Autores (2026).

Después, durante la inferencia, dado que los métodos son multivariantes, se define la variable endógena, variable objetivo y las variables exógenas, explicativas (Silva, 2019), utilizando las siguientes metodologías.

Método multivariable de orden 1: aplica ponderaciones cronológicas (YU, 2005). Suponiendo el pronóstico de $F(t)$ es $A_{j1}, A_{j2}, \dots, A_{jk}$ los pesos para $A_{j1}, A_{j2}, \dots, A_{jk}$ dichos w_1, w_2, \dots, w_k son especificados. Después de formar la matriz de pesos $W(T) = [w'_1, w'_2, \dots, w'_k]$, debe satisfacer:

$$\sum_{h=1}^k w'_h = 1. \quad (1)$$

Por lo tanto, w_1, w_2, \dots, w_k deben ser estandarizados. Se obtiene así la siguiente matriz de pesos:

$$W(T) = \left[w'_1, w'_2, \dots, w'_k \right] = \left[\frac{w_1}{\sum_{h=1}^k w_h}, \frac{w_2}{\sum_{h=1}^k w_h}, \dots, \frac{w_k}{\sum_{h=1}^k w_h} \right]. \quad (2)$$

Método multivariable de orden superior: la serie de tiempo resultante F queda compuesta por $f(t) \in F$ que representan la secuencia de Gránulos de Información Difusa G_i que contiene un conjunto difuso de variables lingüísticas V_i relativo a cada variable V_i (De Lima; Silva *et al.*, 2019). Existe una variable lingüística global que es la unión de todos los, los cuales a su vez son la combinación de uno de los conjuntos difusos por cada variable,

$G_i = \left\{ A_j^{V_i} \right\}, \forall V_i \in V$ y su FM es dada por $\mu_{G_i} = \cap \mu_{A_j^{V_i}}$. El conjunto FIG es indexado por puntos medios de sus conjuntos difusos.

Con la variable lingüística FIG el proceso de fuzzyficación transforma cada punto de datos multivariable $y(t) \in Y$ en $G_i \in FIG$ tal que $f(t) = G_i$ (De Lima; Silva *et al.*, 2019).

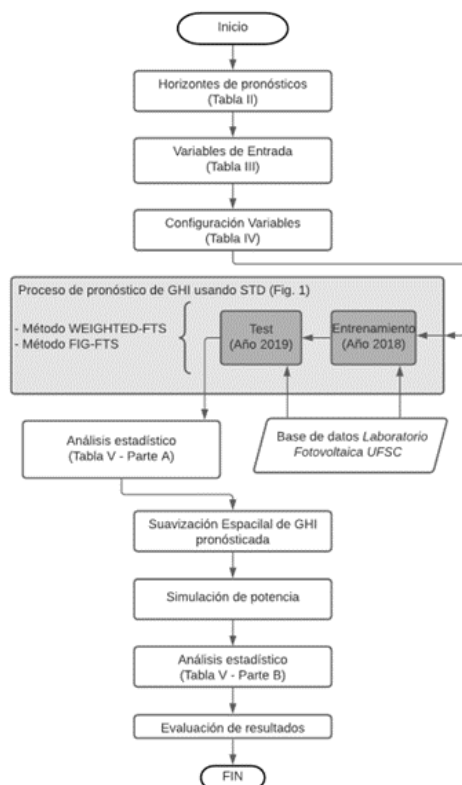
Posteriormente, durante la defuzzyficación, el objetivo es transformar $f(t + 1)$ en un valor numérico estimado $y(t + 1)$. Finalmente en el posprocesamiento se realiza la suavización espacial aplicando el filtro a la GHI pronosticada obteniendo a la salida un valor suavizado de irradiancia espacial $G_s(t)$ (Marcos *et al.*, 2011). La aplicación del modelo inicia con la serie de tiempo de irradiancia espacial $G_s(t)$ a partir de los valores de la serie de tiempo de GHI que fue pronosticada $G(t)$. Una vez obtenida la irradiancia espacial es posible obtener una potencia simulada del SFV dada por:

$$P_{sim}(t) = \frac{G_s(t) \cdot P^*}{G_{STC}} \left[1 - 0,004(T(t) - T_{STC}) \right], \quad (3)$$

donde $G_{STC} = 1000 \frac{W}{m^2}$ es la irradiancia STC y la temperatura de contacto T_{STC} (Diaz, 2019).

Los experimentos comparan el método WEIGHTED y FIG con tres horizontes de corto plazo de 5, 15 y 30 min, después se aplica el método de suavización espacial para obtener una simulación de potencia (Figura 3).

Figura 2 – Fluxograma delo algoritmo utilizado en el modelo



Fuente: Los Autores (2026).

La base de datos de irradiación usada para entrenar y realizar pruebas con el modelo es de un SFV de 2,2 kWp ubicado en la ciudad de Florianópolis/Brasil con 12 meses para *train* y 12 meses para *test* como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2 – Base de Datos de entrada para el modelo

Horizonte Temporal	Entrenamiento (Año 2018)	Test (Año 2019)
5 <i>min</i>	105.121	105.121
51 <i>min</i>	35.041	35.041
30 <i>min</i>	17.521	17.521

Fuente: Los Autores (2026).

Configuración experimental

En la Tabla 3 son mostradas las variables que componen la base de datos y la salida del modelo. A continuación, son mostrados los hiperparámetros, las reglas difusas y el proceso de aprendizaje del modelo, así como el pronóstico de GHI y la simulación de potencia. Se resalta que la elección del valor de los hiperparámetros es empírica y dependiente de los datos (Silva *et al.*, 2019). En la Tabla 3. se muestran los valores seleccionados.

Tabla 3 – Variables utilizadas en el modelo

Parámetro	Descripción	Tipo
<i>data</i>	min, hora, día y mes	Entrada
<i>tem_amb</i>	Temperatura Ambiente	Entrada
<i>ghi</i>	Irradiación Global Horizontal	Entrada/Salida
<i>pot</i>	Potencia generada	Entrada
<i>temp_contacto</i>	Temperatura del módulo	Entrada
<i>pot_modelada</i>	Potencia simulada	Salida

Fuente: Los Autores (2026).

A las variables exógenas se les asignó el mismo valor de $\alpha - cut$ y la misma μ . Con la variable endógena se usa una FM gaussiana con el valor del grado mínimo de membresía, $\alpha - cut$, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4 – Configuración de las Variables

Variable	Función de Membresía (μ)	Particiones (k)	Grado mínimo de membresía ($\alpha - cut$)
<i>Min</i>	Triangular	60	0,30
<i>Hora</i>	Triangular	24	0,30
<i>Meses</i>	Triangular	12	0,30
<i>Temperatura</i>	Triangular	24	0,30
<i>Irradiación</i>	Gaussiana	35	0,25

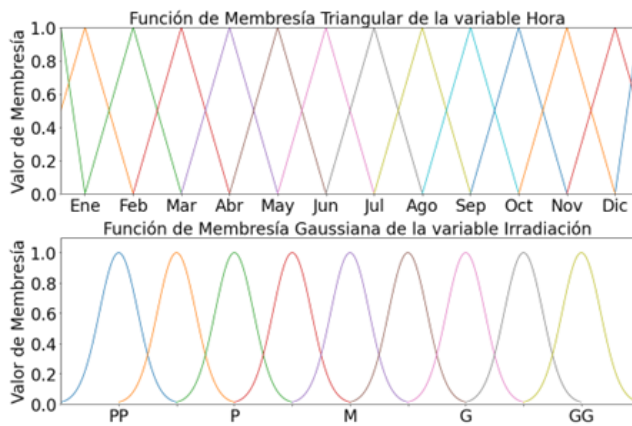
Fuente: Los Autores (2026).

Aprendizaje y pronóstico

Las particiones de la variable endógena (GHI) se separan por niveles de valores lingüísticos, PP – ‘muy pequeño’, P – ‘pequeño’, M – ‘mediano’, G – ‘grande’, GG – ‘Muy grande’, cada uno de los valores lingüísticos con siete subniveles.

El proceso creación de reglas con los métodos WEIGHTED ($\Omega = 1$) y FIG ($\Omega = 2$) y k-NN dos ($K = 2$), son el resultado del proceso de aprendizaje. La representación de las reglas se muestra a seguir:

Figura 3 – FM triangular y Gaussiana



Fuente: Los Autores (2026).

En la Figura 4 se muestra el formato *Precedente* → *Consecuente*, donde el precedente indica un conjunto en el tiempo y el consecuente el conjunto en el tiempo $t + 1$ (Silva, 2018).

Figura 4 – Resultado del proceso de aprendizaje

WEIGHTED-FTS (Orden 1):



FIG-FTS (Orden 2):



Fuente: Los Autores (2026).

Simulación de potencia

Una vez hecho el pronóstico de GHI, se obtiene la GHI espacial del SFV con 20 módulos de 110 kWp. Mediante la aplicación de (11), se simula un valor de potencia. En la Tabla 5 se reúne la configuración del modelo.

Tabla 5 – Métricas estadísticas

Modelo	WEIGHTED	FIG
Horizontes de predicción	5,15 y 30 min	5,15 y 30 min
Entrada	Data, T ambiente, GHI, Potencia generada, T de contacto	Data, T ambiente, GHI, Potencia generada, T de contacto
Hiperparámetros	$\Omega=1$	$\Omega=2, \kappa=2$
Salida parcial	GHI	GHI
Parámetros del filtro de paso bajo	T del módulo, potencia pico, GHI_STC	T del módulo, potencia pico, GHI_STC
Salida	Potencia simulada	Potencia simulada

Fuente: Los Autores (2026).

El método FIG tiene mejores resultados en el horizonte de 5 y 15 min, ya para 30 min el método de WEIGHTED tiene mejores resultados (ver Tabla 6). El método FIG de orden superior tiene un desempeño mejor cuando se trabaja con menores escalas temporales.

Tabla 6 – Métricas de cálculo de error

Método	Horizonte	MBE	RMSE	nRMSE	R ²
A – Pronóstico de Irradiación					
WEIGHTED	5 min	4,68	36,32	0,08	0,97
	15 min	3,97	36,59	0,25	0,97
	30 min	7,05	43,98	0,61	0,96
FIG	5 min	3,67	28,14	0,06	0,98
	15 min	1,82	36,27	0,25	0,97
	30 min	-1,98	53,19	0,74	0,94
B – Simulación de Potencia					
WEIGHTED	5 min	7,57	143,70	0,33	0,93
	15 min	11,31	160,24	1,11	0,91
	30 min	26,63	197,78	2,76	0,87
FIG	5 min	5,54	139,12	0,32	0,93
	15 min	6,64	134,40	0,93	0,94
	30 min	6,76	177,75	2,48	0,90

Fuente: Los Autores (2026).

La prueba KS determina si dos conjuntos de datos difieren significativamente (Espinar *et al.*, 2009). En la Tabla 7, se muestran los valores de KS son menores para el método FIG en los horizontes de tiempo de 5 y 15 min, es decir, tiene más capacidad de reproducir las distribuciones de frecuencia observadas con escalas temporales menores.

Tabla 7 – Resultado del teste KS

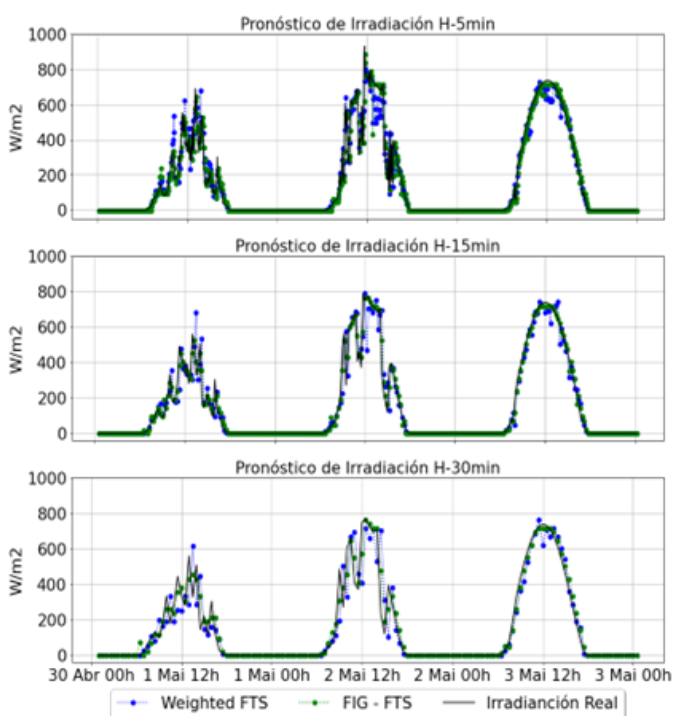
Test de Normalidad - KS	Vc	KS	Resultado
A – Pronóstico GHI			
WEIGHTED/ 5 min	0,1979	0,1195	H0 Acept.
WEIGHTED/ 15 min	0,2381	0,2325	H0 Acept.
WEIGHTED/ 30 min	0,3368	0,2646	H0 Acept.
FIG / 5 min	0,1979	0,1057	H0 Acept.
FIG / 15 min	0,2381	0,1878	H0 Acept.
FIG / 30 min	0,3368	0,2464	H0 Acept.
B – Simulación de Potencia			
WEIGHTED/ 5 min	0,1979	0,3093	H0 Rechaz.
WEIGHTED/ 15 min	0,2381	0,3498	H0 Rechaz.
WEIGHTED/ 30 min	0,3368	0,4786	H0 Rechaz.
FIG / 5 min	0,1979	0,2768	H0 Rechaz.
FIG / 15 min	0,2381	0,3146	H0 Rechaz.
FIG / 30 min	0,3368	0,4082	H0 Rechaz.

Fuente: Los Autores (2026).

El resultado del pronóstico mostrado en la Figura 5 se ven 3 días de pronósticos para los 3 horizontes temporales.

Se muestra el mejor rendimiento del método FIG en el horizonte temporal de 5 y 15 min al compararlo con el método WEIGHTED, el cual resulta en un mejor R2 cuando el modelo realiza previsiones de 30 min.

Figura 5 – Resultados de predicción de GHI

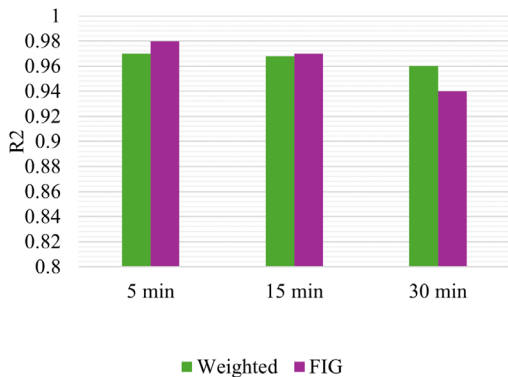


Fuente: Los Autores (2026).

Las métricas de error correspondientes a la simulación de potencia están mostradas en la Tabla 6.

Los resultados de potencia obtenidos a partir de los pronósticos del método FIG de orden 2 muestran mejor desempeño que los resultados obtenidos con el método de orden 1 (ver Figura 6). Sin embargo, es necesario señalar que el uso de un orden de modelo mayor no implica un aumento de su desempeño.

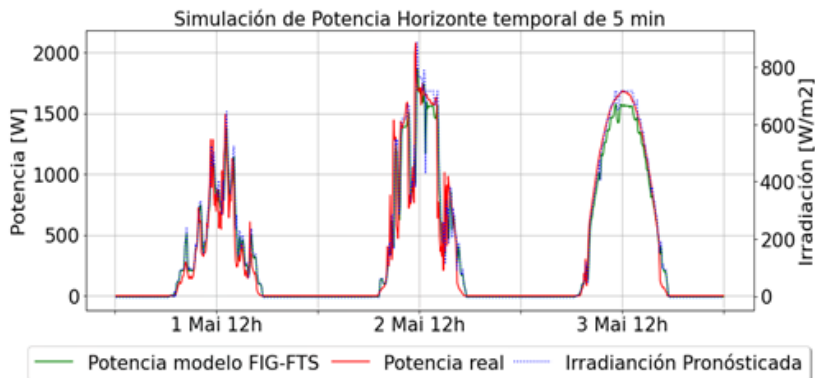
Figura 6 – Comparación del coeficiente de determinación para el pronóstico de GHI



Fuente: Los Autores (2026).

Los valores de RMSE y MBE, Tabla 6, son mayores que los presentados en los pronósticos de GHI. Esto se explica dado que además del error que se presenta en la realización del pronóstico de GHI se adiciona el error que presenta en la simulación de potencia, mostrada en la Figura 7, donde se muestra el resultado del método FIG bajo el horizonte de 5 min en 3 días de potencia generada.

Figura 7 – Simulación de potencia



Fuente: Los Autores (2026).

Fue observada la proporcionalidad directa de la potencia de un SFV con la GHI incidente y que las variaciones de irradiancia en un determinado punto tienden a ser suavizadas. Finalmente en la Tabla 7, los pronósticos de irradiación, a medida que se disminuye la escala temporal, aumentan de la precisión del método. Las métricas de RMSE y MBE arrojan mejores resultados en el horizonte de 5 min comparados con el de 15 y 30 min.

En el análisis de ambos métodos se encontró que el método FIG, de orden superior, presenta mejores resultados en el pronóstico de GHI a través de los horizontes de 5 y 15 min, lo cual se percibe en los resultados estadísticos y en el análisis de la estadística de KS representando la capacidad del modelo de reproducir la función de distribución acumulativa.

REFERENCIAS

ANTONANZAS, J. *et al.* Review of photovoltaic power forecasting. **Solar Energy**. Oxford: Elsevier, v. 136, p. 78–111, out. 2016.

BLAGA, R. *et al.* A current perspective on the accuracy of incoming solar energy forecasting. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, Elsevier, v. 70, p. 119–144, 2019.

DIAZ, V. N. S. **Avaliação de desempenho das estratégias de controle para suavização de potência ativa de sistemas fotovoltaicos com armazenamento de energia**. 2019. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), 2019.

ESPINAR, B. *et al.* Analysis of different comparison parameters applied to solar radiation data from satellite and german radiometric stations. **Solar Energy**, Oxford, Elsevier, v. 83, n. 1, p. 118–125, 2009.

GUEYMARD, C. A. A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: towards a better bankability of solar projects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Oxford: Elsevier, v. 39, p. 1024–1034, nov. 2014.

MACIEL, J. N.; GIMENEZ LEDESMA, J. J.; ANDO JUNIOR, O. H. Forecasting solar power output generation: a systematic review with the proknow-c. **IEEE Latin America Transactions**. New York, NY: IEEE, v. 19, n. 4, p. 612–624, abr. 2021.

MARCOS, J. *et al.* From irradiance to output power fluctuations: the pv plant as a low pass filter. **Progress in Photovoltaics: research and Applications**. Hoboken, NJ: Wiley, v. 19, n. 5, p. 505–510, 2011.

MINDS. **pyFTS quick start — pyFTS 1.6 documentation**. São Carlos, SP: MINDS/UFSCar, [2019].

SILVA, P. **A short tutorial on fuzzy time series**: part II. Gainesville, FL: Edição do Autor, 2019. 45 p.

SILVA, P. **Scalable models for probabilistic forecasting with fuzzy time series**. 2019. 187 f. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2019.

SILVA, P. *et al.* A new granular approach for multivariate forecasting. *In: Communications in computer and information science*. **Anais [...]**. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2019. v. 1068 CCIS. p. 41–58.

SILVA, P. *et al.* Probabilistic forecasting with seasonal ensemble fuzzy time-series. *In: WORLD CONFERENCE ON SOFT COMPUTING, 4.*, 2019, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: UNILA/PTI, 2019. p. 1–12.

SONG, Q.; CHISSOM, B. S. Fuzzy time series and its models. **Fuzzy Sets and Systems**. Amsterdam: Elsevier, v. 54, n. 3, p. 269–277, 1993.

ALGORITMO MICROGENÉTICO APLICADO NA PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO*

Jose Alejandro Encinas Riveros e

Jorge Javier Giménez Ledesma

A crescente dependência da energia elétrica torna essencial garantir a continuidade do serviço através de sistemas de proteção adequados (Rursh, 2011). Este estudo foca na proteção em sistemas de distribuição, tradicionalmente radiais e desequilibrados. A introdução de Geração Distribuída (GD) em redes de distribuição traz benefícios como a redução de perdas de energia, mas também altera perfis de corrente e tensão, impactando os esquemas de proteção clássicos (Soleymani; Kazemi, 2015). A proteção adaptativa permite ajustes no sistema de proteção para adequá-lo às mudanças operacionais, ajustando a configuração do relé para novas condições do sistema (Mamede, 2013). Este trabalho aplica um estudo de proteção de sobrecorrente em um sistema de distribuição com GD, utilizando um algoritmo microgenético para minimizar tempos de operação e cumprir critérios de seletividade no sistema IEEE de 13 nós, modelado no Matlab 2022a.

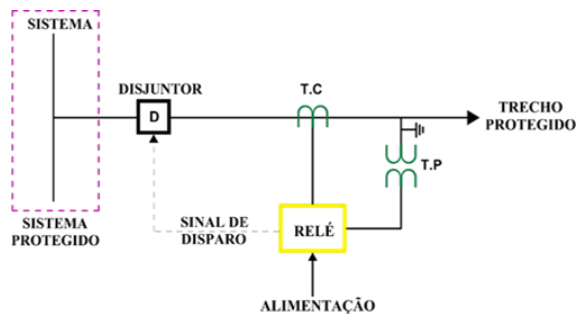
Sistemas de distribuição são protegidos por equipamentos como transformadores de corrente (TC) e potencial (TP), relés e disjuntores, que operam juntos para isolar falhas. O sistema de

* Este capítulo é baseado em *Fuzzy Time Series Methods Applied to Short – Term Photovoltaic Power Forecasting Forecasting*, Trabalho de Conclusão de Curso por Jose Alejandro Encinas Riveros, apresentado e aprovado em 2023, orientado pelo Prof. Dr. Jorge Javier Giménez Ledesma.

proteção segue princípios de sensibilidade, velocidade, seletividade, confiabilidade e custo (Sá *et al.*, 2010). Na Figura 1 está apresentado um diagrama típico de um sistema de proteção.

Sistemas de distribuição enfrentam mudanças topológicas frequentes, exigindo sistemas de proteção confiáveis para lidar com faltas sejam monofásicas, bifásicas ou trifásicas (CPFL, 2003), como: a) Transformador de Corrente (TC): mede a corrente e isola equipamentos de medição e proteção, selecionado com base na corrente nominal e de curto-circuito; b) Transformador de Potencial (TP): reduz a tensão do sistema para valores adequados aos instrumentos e c) Relés de Proteção de Sobrecorrente: detectam condições anormais e acionam o disjuntor, utilizando curvas de tempo inverso conforme a norma IEC 60255-15 (Kindermann, 2012; Blackburn; Thomas, 2006). Parâmetros importantes: a) *Trip time*: tempo de disparo determinado pelo ponto de ajuste da corrente do relé; b) TMS (Multiplicador de Configuração de Tempo): ajuste para temporizar um relé; c) Corrente de *Pick-up*: limite para definir se o sistema está em regime de falta.

Figura 1 – Diagrama típico de um sistema de proteção

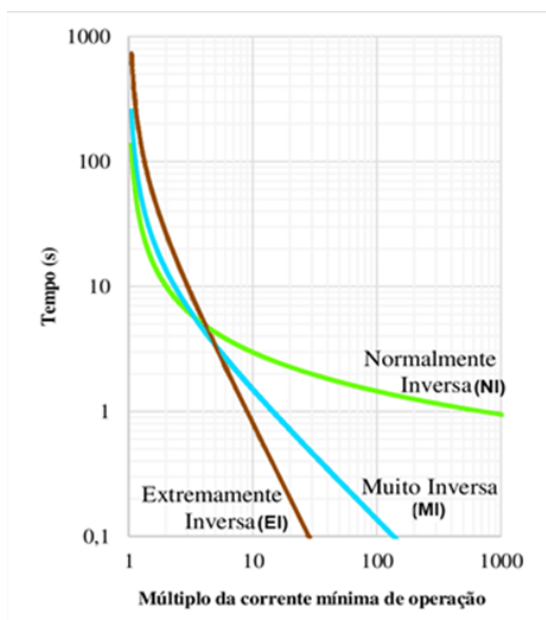


Fonte: Os Autores (2026).

Dispositivos de proteção do sistema de distribuição

Neste estudo, utilizou-se a curva Normalmente Inversa (NI) seguindo a norma IEC 60255-15, na Figura 2 estão apresentadas as inclinações das curvas de tempo inverso.

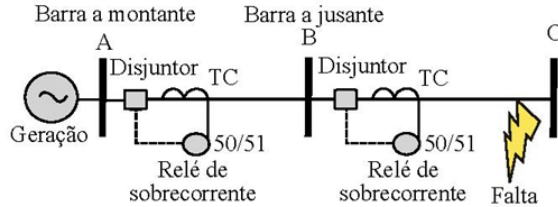
Figura 2 – Tipos de curvas características do relé



Fonte: Os Autores (2026).

A coordenação garante que o dispositivo mais próximo da falha opere primeiro, minimizando a área afetada e mantendo a continuidade do serviço conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Esquema de ligação entre relés a montante e jusante com falta

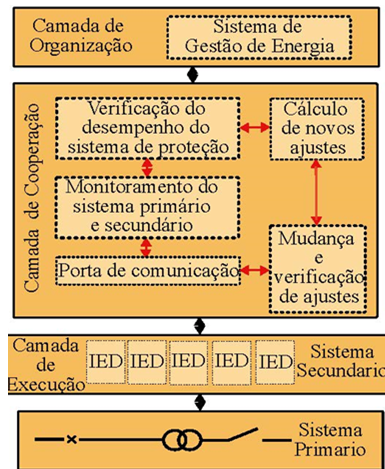


Fonte: Os Autores (2026).

A Geração Distribuída (GD) no Brasil, formalizada pelo Decreto-Lei N° 5.163/2004 e Resolução Normativa N° 482/2012 da ANEEL, traz benefícios e desafios aos sistemas de distribuição (ANEEL, 2012). A presença de GD pode causar problemas específicos na proteção, como correntes reversas, falha no desarme, e operação conflitante dos dispositivos de proteção ou fazer com que o dispositivo de proteção tenha um alcance reduzido.

A proteção adaptativa permite ajustes nos relés de proteção conforme as condições operacionais variam, aumentando a flexibilidade e eficiência do sistema (Ilik; Arsoy, 2017). A proteção adaptativa é estruturada em três camadas como mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Esquema clássico de um sistema de proteção adaptativa



Fonte: Os Autores (2026).

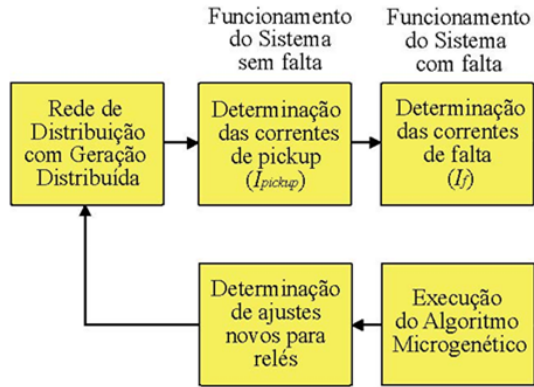
O presente trabalho está enquadrado na segunda camada, especificamente na parte de cálculo de novos ajustes, baseando-se nas informações da nova configuração do sistema.

Algoritmos microgenéticos ($A\mu G$) são versões otimizadas dos algoritmos genéticos (AG), com populações menores e menor complexidade computacional, adequados para problemas de otimização de alta dimensionalidade (Goldberg, 1989). O $A\mu G$ busca minimizar o tempo de operação dos relés e cumprir critérios de seletividade.

Metodologia de validação do estudo de caso

A metodologia para validar o estudo de caso avaliou o desempenho da estratégia de proteção conforme o esquema da Figura 5.

Figura 5 – Metodologia desenvolvida



Fonte: Os Autores (2026).

Foi modelada a rede IEEE de 13 nós, o relé direcional de sobre-corrente, e a geração distribuída (GD), representada por um parque solar fotovoltaico. A simulação do sistema completo foi de 0,1 s, com um tempo de falta de 0,05 s, permitindo avaliar o funcionamento do sistema.

A Modelagem do Sistema de Distribuição IEEE-13 Barras foi baseada na folha de dados do IEEE, o sistema de 13 barras, criado em 1992, opera em 4,16 kV com linhas aéreas, capacitores shunt, transformador em linha e carregamento desbalanceado (IEEE, 2004).

Foram configurados 12 relés direcionais ao longo do sistema, permitindo testar três faltas trifásicas em diferentes pontos. As correntes de funcionamento normal e de falta são usadas pelo $A\mu G$ para minimizar o *Trip Time* e cumprir com o critério de seletividade.

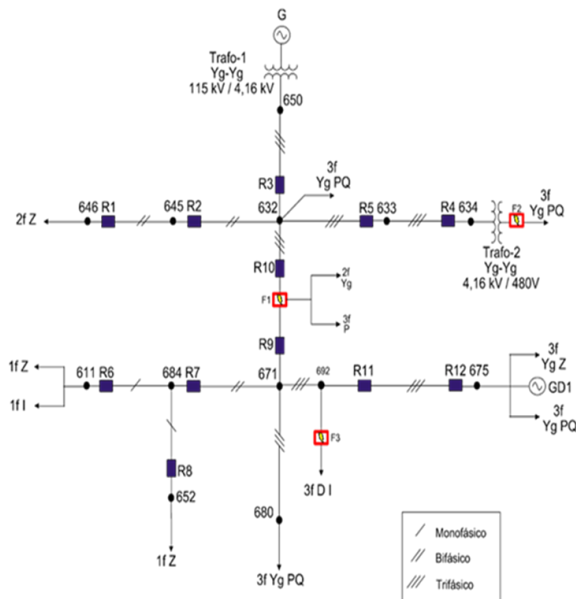
Ainda, para simular um cenário de geração distribuída, foi modelado um parque solar fotovoltaico de 100 kW com 330 módulos *SunPower*, conectados em 66 *strings* em paralelo, cada *string* com 5 módulos em série. A modelagem inclui irradiância constante de

1000 W/m² e temperatura de 25 °C. O MPPT é realizado por um conversor CC-CC tipo Boost, seguido por um inversor trifásico e um transformador para 4,6 kV.

Funcionamento do sistema sem falta e com falta

Assim, foi simulado o sistema tanto sem quanto com faltas, conforme o diagrama unifilar da Figura 6. Inicialmente, obtivemos medições das correntes de *pick-up* para ajustar os parâmetros dos relés. Posteriormente, simulamos faltas trifásicas com 0,05 segundos de duração. Os dados de corrente e tensão durante as faltas foram utilizados para ajustar os parâmetros dos relés usando o A μ G, visando minimizar tempos de operação e cumprir critérios de seletividade.

Figura 6 – Diagrama unifilar do sistema geral

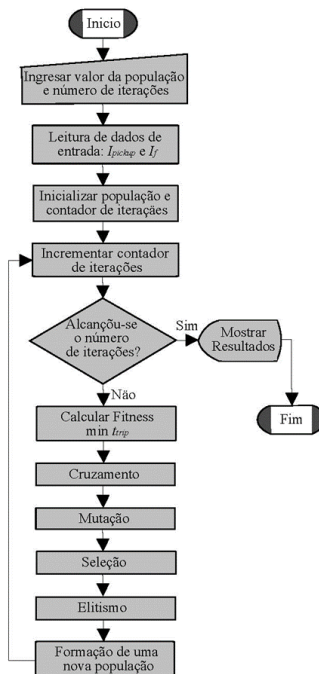


Fonte: Os Autores (2026).

Execução do algoritmo microgenético e ajustes novos para relés

O A μ G resolve problemas de otimização formulando uma função objetivo a ser maximizada ou minimizada, conforme o fluxograma da Figura 7. Começa com a seleção do número de população e de iterações (máximo de 29 e 30, respectivamente). Os dados de corrente de *pick-up* e de falta são lidos e, se o número máximo de iterações for atingido, os resultados de *Trip Time* e TMS otimizados são mostrados. Caso contrário, o processo continua com avaliação de fitness, cruzamento, mutação e seleção dos indivíduos mais aptos até atingir o número máximo de iterações.

Figura 7 – Fluxograma do algoritmo microgenético para a coordenação dos relés



Fonte: Os Autores (2026).

O último estágio consiste na determinação dos novos ajustes dos relés, ou seja, o *Trip Time* otimizado e o TMS correspondente. O $A\mu G$ oferece condições adequadas para a estratégia de proteção proposta, minimizando os tempos de operação dos relés e cumprindo o critério de seletividade.

Avaliações dos diferentes cenários

Foram analisados os resultados de três cenários de faltas no sistema, utilizando a curva de relé Normalmente Inversa (NI) conforme a norma IEC 60255-15. Parâmetros utilizados: 1) Constante (α) da curva NI = 0,02; Constante (k) da curva NI = 0,14. 2) Parâmetros do algoritmo microgenético: população inicial = 20; Iterações = 30. Valores dos parâmetros dos relés foram calculados de forma tradicional para comparação.

No cenário um, uma falta trifásica (F1) ocorre entre os nós 632 e 671 (Figura 8). Parâmetros dos relés R9 e R10 foram determinados com o $A\mu G$ (Tabela 1) e sem a estratégia adaptativa (Tabela 2). A Tabela 3 apresenta o tempo de coordenação (Δt) com e sem a aplicação do $A\mu G$. O tempo de isolamento da falta com $A\mu G$ é de 8,37 ms, enquanto sem a estratégia é de 200 ms, uma diferença significativa de 191,63 ms. Na Figura 8 estão mostradas as curvas dos relés com e sem $A\mu G$, evidenciando a redução do tempo de isolamento e o respeito ao critério de seletividade.

Tabela 1 – Valores obtidos com a aplicação do $A\mu G$

Nº Falta	TMS R ₁₀	T _f R ₁₀	TMS R ₉	T _i R ₉
1	0,0501	0,17286	0,05561	0,18123

Fonte: Os Autores (2026).

Tabela 2 – Valores obtidos sem a aplicação do $A\mu G$

Nº Falta	I_f	I_p	TMS R_{10}
1	8037	1099	0,0501
Nº Falta	$T_r R_{10}$	TMS R_9	$T_r R_9$
1	0,1728	0,1081	0,3728

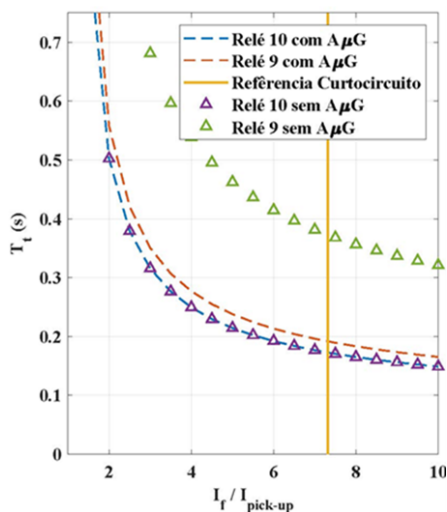
Fonte: Os Autores (2026).

Tabela 3 – Quadro Comparativo do cenário 1

	Com $A\mu G$	Sem $A\mu G$	Diferença
$\Delta t_{T_r R_9}$	8,37 ms	200 ms	191,63 ms

Fonte: Os Autores (2026).

Figura 8 – Gráfico de relés no cenário 1 com e sem o $A\mu G$



Fonte: Os Autores (2026).

No cenário dois, uma falta trifásica (F2) ocorre entre o nó 634 e uma carga trifásica no final da linha (Figura 9). Parâmetros dos relés R4 e R5 foram determinados com o $A\mu G$ (Tabela 4)

e sem a estratégia adaptativa (Tabela 5). A Tabela 6 apresenta o tempo de coordenação (Δt) com e sem a estratégia adaptativa. O tempo de isolamento da falta com A μ G é de 72,79 ms, enquanto sem a estratégia é de 200 ms, destacando uma diferença de 127,21 ms. A Figura 9 mostra as curvas dos relés R4 e R5, evidenciando a redução do tempo de isolamento e o respeito ao critério de seletividade.

Tabela 4 – Valores obtidos com a aplicação do A μ G

Nº Falta	TMS R ₄	T ₁ R ₄	TMS R ₅	T ₁ R ₅
2	0,05061	0,09572	0,08919	0,16851

Fonte: Os Autores (2026).

Tabela 5 – Valores obtidos sem a aplicação do A μ G

Nº Falta	I _r	I _p	TMS R ₄
2	4762,1	134	0,05061
Nº Falta	T ₁ R ₄	TMS R ₅	T ₁ R ₅
2	0,1048	0,1612	0,3048

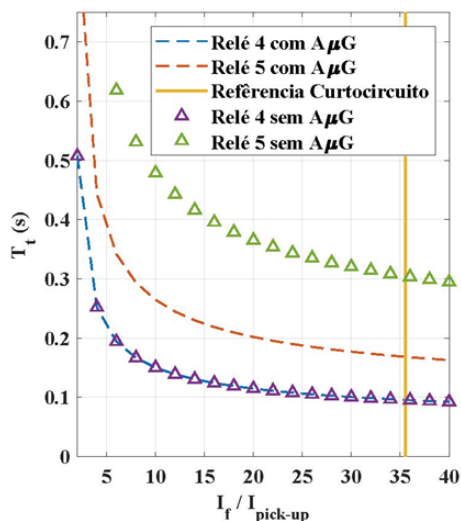
Fonte: Os Autores (2026).

Tabela 6 – Quadro Comparativo do cenário 2

	Com A μ G	Sem A μ G	Diferença
Δt_{TR_5}	72,79 ms	200 ms	127,21 ms

Fonte: Os Autores (2026).

Figura 9 – Gráfico de relés no cenário 2 com e sem o $A\mu G$



Fonte: Os Autores (2026).

No cenário 3, uma falta trifásica (F3) ocorre entre o nó 692 e uma carga trifásica no final da linha (Figura 10). Três relés (R7, R9 e R11) foram analisados. Parâmetros foram determinados com o $A\mu G$ (Tabela 7) e sem a estratégia adaptativa (Tabela 8). A Tabela 9 mostra o tempo de coordenação (Δt) com e sem a estratégia adaptativa. O tempo de isolamento da falta com $A\mu G$ é de 127,6 ms, enquanto sem a estratégia é de 300 ms, uma diferença crucial de 172,3 ms. A Figura 10 mostra as curvas dos relés R9, R11 e R7, evidenciando a redução significativa do tempo de isolamento e a eficiência do método de coordenação.

Tabela 7 – Valores obtidos com a aplicação do $A\mu G$

Nº Falta	TMS R ₉	T _t R ₉	TMS R ₁₁
3	0,0500	0,1255	0,065278
Nº Falta	T _t R ₁₁	TMS R ₇	T _t R ₇
3	0,15043	0,100845	0,25312

Fonte: Os Autores (2026).

Tabela 8 – Valores obtidos sem a aplicação do A μ G

Nº Falta	I _r	I _p
3	5864,4	388,7
TMS R ₉	TMS R ₁₁	TMS R ₇
0,0500	0,1279	0,1695
T _i R ₉	T _i R ₁₁	T _i R ₇
0,1255	0,3255	0,4255

Fonte: Os Autores (2026).

Tabela 9 – Quadro Comparativo do cenário 3

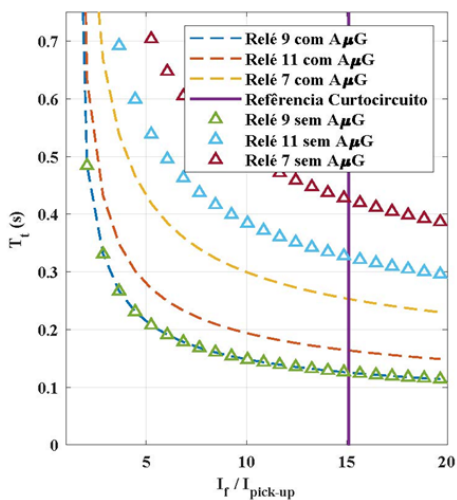
	Com A μ G	Sem A μ G	Diferença
$\Delta t_{TT} R_7^-$	127,6 ms	300 ms	172,4 ms

Fonte: Os Autores (2026).

No projeto de um sistema elétrico, confiabilidade, seletividade, velocidade e sensibilidade são cruciais para um bom desempenho. Utilizar a proteção correta é essencial para detectar e isolar partes defeituosas do sistema. Este estudo apresentou uma proteção adaptativa para sistemas de distribuição com relés de sobrecorrente direcionais, considerando a presença de geração distribuída (GD).

A metodologia proposta utilizou um algoritmo microgenético para otimizar os parâmetros dos relés de proteção, oferecendo vários benefícios em comparação com a proteção convencional, tais como: a) Melhoria da estabilidade e segurança do sistema de distribuição; b) Melhoria da qualidade da energia, aumentando a confiabilidade do fornecimento elétrico e c) Melhoria do desempenho do sistema de proteção no ponto de interligação para fontes de energia não convencionais.

Figura 10 – Gráfico de relés no cenário 3 com e sem o $A\mu G$



Fonte: Os Autores (2026).

A análise dos resultados mostrou que a metodologia oferece resultados plausíveis para cálculos de *Trip-time* e TMS dos relés direcionais. Três cenários foram testados, e os parâmetros obtidos pelo algoritmo microgenético resultaram em tempos de isolamento de faltas menores comparados aos métodos convencionais. A Tabela 10 mostra o ganho percentual no tempo de isolamento aplicando o $A\mu G$.

Tabela 10 – Ganho percentual no tempo de isolamento aplicando o $A\mu G$

Cenário	Com $A\mu G$ (ms)	Sem $A\mu G$ (ms)	Ganho Percentual
1	8,37	200	95,82%
2	72,79	200	63,61%
3	8,37	300	57,47%

Fonte: Os Autores (2026).

Este ganho é especialmente importante em sistemas de distribuição, devido aos efeitos negativos da exposição prolongada a faltas, principalmente trifásicas, que são mais severas. Em todos

os cenários, a estratégia proposta atendeu aos critérios de seletividade e coordenação dos relés. Assim, este estudo proporcionou melhorias significativas e aumentou a confiabilidade do sistema de energia.

REFERÊNCIAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012. *In: Diário Oficial da União*. Brasília, DF: ANEEL, 18 abr. 2012, Seção 1, p. 77. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br>. Acesso em: 08 ago. 2022.

BLACKBURN, J. L.; THOMAS, T. D. **Protective relaying: principles and applications**. 3. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006. 600 p.

CHANDRARATNE, R. T.; NAAYAGI, T.; LOGENTHIRAN, T. Smart grid protection through self-healing. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER, ENERGY AND CONTROL (ICPEC)*, 2017, Madurai, Índia. **Proceedings** [...]. Madurai, Índia: IEEE, 2017. p. 1–10.

CPFL. **Proteção de redes aéreas de distribuição: sobrecorrente**. Campinas, SP: CPFL, 2003. 150 p.

GOLDBERG, D. **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**. Boston, MA: Addison-Wesley, 1989. 412 p.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE PES test feeder cases**. New York, NY: IEEE, 2004. 250 p.

ILIK, S. C.; ARSOY, A. B. Effects of distributed generation on overcurrent relay coordination and an adaptive protection scheme. **IOPscience**, Bristol, IOP Publishing, v. 2017, n. 012019, p. 1–9, 2017.

KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 3. ed. Florianópolis: Edição do autor, 2012. 300 p.

MAMEDE, J. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 500 p.

RURSH, P. **Proteção e automação de redes**: conceito e aplicação. São Paulo: Edgard Blücher, 2011. 350 p.

SÁ, J. A. *et al.* Uso de um simulador em tempo real no ensino de proteção de sistemas elétricos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA (COBENGE), 2010, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: ABENGE, 2010. p. 1–8.

SOLEYMANI, A.; KAZEMI, H. Optimal protection considering fault current characteristic of wind turbines in active distribution networks. **J Renew Sustain Energy**, Melville, NY, AIP Publishing, v. 7, n. 5, p. 053139, 2015.

PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

SISTEMA HÍBRIDO DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA*

Benhur Azambuja Possatto e

Walfrido Alonso Pippo

Nos últimos anos, tem sido amplamente reconhecida a necessidade premente de diversificação das matrizes energéticas em escala global. Esta necessidade é motivada por questões de segurança energética, redução das emissões de gases de efeito estufa e mitigação dos impactos ambientais associados às fontes de energia convencionais. As energias renováveis emergem como uma resposta crucial a esses desafios, oferecendo potencial significativo para transformar o paradigma energético global (EPE, 2017).

No contexto brasileiro, historicamente dominado pela energia hidrelétrica, observa-se uma crescente importância das usinas termoelétricas devido às variações climáticas que afetam a disponibilidade dos recursos hídricos. Neste cenário, a indústria sucroenergética desempenha um papel estratégico ao utilizar o bagaço de cana-de-açúcar como uma fonte renovável de biomassa para geração de vapor, que por sua vez é convertido em eletricidade e calor, suprimindo tanto as necessidades internas das usinas quanto contribuindo para a rede elétrica nacional (ANEEL, 2017; Souza, 2014).

* Este capítulo é baseado em *Sistema híbrido de geração de potência: planta termoelétrica de cogeração a biomassa assistida por energia solar*, Trabalho de Conclusão de Curso por Benhur Azambuja Possatto, apresentado e aprovado em 2017, orientado por Prof. Dr. Walfrido Alonso Pippo.

Paralelamente às fontes convencionais, as tecnologias de energia solar, em particular a Tecnologia de Concentração Solar (CSP), têm despertado crescente interesse devido à sua capacidade de concentrar a luz solar para geração de calor e eletricidade. A CSP engloba diversas abordagens tecnológicas, como Fresnel Linear, Torre Solar, Calha Parabólica de Disco Parabólico, cada uma oferecendo características específicas em termos de eficiência energética e viabilidade técnica (Duffie; Beckman, 2013; Pitz – Paal, 2008; Kalagirou, 2014).

O desenvolvimento histórico da CSP demonstra seu potencial para integração com plantas de biomassa e combustíveis fósseis, permitindo a diversificação das fontes de energia em sistemas híbridos. A adoção de técnicas avançadas, como a geração direta de vapor, apresenta-se como uma promissora alternativa ao eliminar os fluidos de transferência de calor e aumentar a eficiência das plantas CSP (Srinivas; Reddy, 2014).

No contexto específico do Brasil, com sua vasta extensão territorial e condições climáticas favoráveis, há um potencial significativo para a cogeração integrada de energia solar com as atuais plantas de biomassa, especialmente nas regiões produtoras de cana-de-açúcar. Este enfoque não apenas poderia otimizar a eficiência energética das instalações existentes, mas também contribuir de maneira substancial para a diversificação e sustentabilidade da matriz energética nacional (Burin, 2017; Galante, 2015).

Ciclo base de cogeração

Para avaliar a integração de um sistema heliotérmico foi estudado o comportamento de um ciclo de cogeração. Foi feita uma análise minuciosa dos principais componentes e suas características operacionais, estruturando um modelo termodinâmico que representa a operação e o desempenho da planta em regime estacionário. Este ciclo de cogeração tem como referência uma planta localizada em Cosmópolis, São Paulo, cujas características opera-

cionais são fundamentadas em dados reais provenientes da Usina Açucareira Ester S.A. A planta opera sob regime de cogeração, fornecendo vapor e eletricidade para a produção de açúcar e álcool, com um consumo de vapor equivalente a 440 kg por tonelada de cana-de-açúcar processada. As demandas energéticas elétrica e mecânica são de 7 kWh e 12,32 kWh por tonelada de cana-de-açúcar processada, respectivamente. O bagaço gerado é queimado em duas caldeiras operando em diferentes níveis absolutos de pressão. Na Figura 1 estão apresentados os principais pontos do ciclo termodinâmico do caso base.

A modelagem adota princípios de conservação de massa e primeira lei da termodinâmica, assegurando condições de regime estacionário durante o período efetivo da safra de cana-de-açúcar. Na Tabela 1 são apresentados os resultados da modelagem, validados com os dados operacionais fornecidos pelos operadores da planta.

Sistema heliotérmico

Foi realizada uma análise detalhada de um sistema heliostático de coletores de calha parabólica, que são sistemas de concentração solar térmica. Esses sistemas consistem em um refletor de espelho cilíndrico com uma seção parabólica e um receptor linear ao longo do eixo da parábola. O sistema requer um mecanismo de rastreamento para permanecer focado no Sol, permitindo que a radiação direta seja concentrada no tubo absorvedor.

Os principais componentes do sistema heliostático considerado são detalhados, e a operação dos concentradores de calha parabólica para a região da planta de cogeração é modelada. Os concentradores solares são modelados de acordo com um modelo simplificado descrito por Pita (2008), levando em conta as características do coletor *Eurotrough*. São levados em conta a eficiência e as perdas dos coletores solares de calha parabólica e o pico de eficiência óptica, que é o produto da refletividade do espelho, fator de interceptação, transmitância do vidro e absorvidade do tubo, alcançando um valor máximo de 75% para o coletor *Eurotrough*. Perdas geométricas devido ao sombreamento e ao modificador de ângulo de incidência também são consideradas.

As perdas térmicas são significativas, ocorrendo tanto no tubo absorvedor quanto nos tubos do sistema, e são modeladas usando coeficientes de regressão linear. A eficiência global do coletor leva em conta todos os tipos de perdas: térmicas, ópticas e geométricas. Na Tabela 2 são apresentadas as principais características de modelos comerciais de Coletores de Calha parabólica (ou cilindro parabólicos), do inglês *Parabolic Trough Collector* (PTCs).

Proposta de sistema híbrido

Tabela 2 – Principais características de modelos comerciais de Coletores de Calha parabólica (ou cilindros parabólicos), do inglês *Parabolic Trough Collector* (PTCs)

Coletor	LS-2	LS-3	<i>Eurotrough</i>	<i>Solargenix</i>
Largura [m]	5	5,76	5,76	5
Distância focal [m]	1,49	1,71	1,71	1,49
Comprimento de um SCE [m]	8	12	12	8
Comprimento de um SCA [m]	49	99	150	49-65
Área refletora por SCA [m ²]	235	545	817	235-313
Diâmetro do tubo receptor [m]	0,07	0,07	0,07	0,07
Concentração geométrica	71:1	82:1	82:1	71:1
Mecanismo de acionamento	Mecânico	Hidráulico	Hidráulico	Mecânico ou Hidráulico
Peso [kg/m ²]	29	33	29	24
Rendimento óptico pico [%]	73	76	75	80
Referência	SEGS I e II	SEGS V-IX	Andasol I, II e III	Nevada Solar One

Fonte: Os Autores (2026).

São apresentadas três propostas para integrar campos solares no ciclo termodinâmico de uma planta de cogeração de energia. Os campos solares operam individualmente, e a análise de coletores operando simultaneamente não está dentro do escopo deste trabalho.

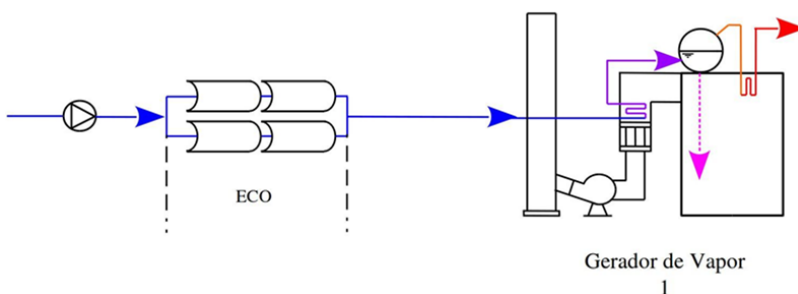
Proposta A: pré-aquecimento da água de alimentação. A primeira proposta sugere o uso de um sistema de coletores de calha parabólica para pré-aquecer a água de alimentação do gerador de vapor, promovendo economia de combustível no processo de cogeração. O campo solar é projetado para aumentar a temperatura da água de alimentação para 180 °C nas condições do projeto, consumindo menos combustível para gerar o mesmo fluxo de vapor.

Proposta B: geração de vapor saturado. O segundo layout propõe acoplar o sistema de coletores de modo que uma fração da água de alimentação seja aquecida até a condição de vapor saturado, promovendo economia de combustível.

Proposta C: geração de vapor superaquecido. A terceira proposta envolve o projeto de um campo solar que deve aquecer, evaporar e superaquecer o fluido de trabalho até a mesma condição de suprimento da caldeira, ou seja, 490 °C e 6,67 MPa.

A proposta A, apresentada na Figura 2, utiliza coletores para pré-aquecer água de alimentação do gerador de vapor. A área necessária para o campo solar é calculada em 23,495 m², utilizando 27 coletores *Eurotroughs*. Os resultados da simulação mostram que o desempenho do campo solar varia com o múltiplo solar, influenciando a eficiência global dos coletores e a economia de combustível. Durante o período de safra, a eficiência solar para eletricidade aumenta com o múltiplo solar, impactando positivamente a redução no consumo de combustível. Durante a entressafra, a planta opera continuamente, gerando energia adicional com eficiência melhorada.

Figura 2 – Proposta de integração A: pré-aquecimento de água de alimentação



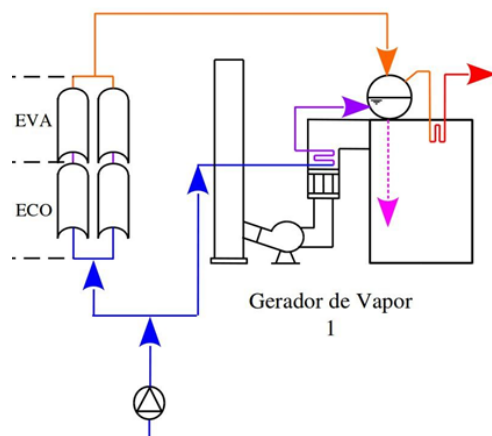
Fonte: Os Autores (2026).

A proposta B, apresentada na Figura 3, visa gerar vapor saturado através da integração de coletores de calha parabólica com o Gerador de Vapor 1 da planta de cogeração. Para isso, são necessários 101.631 m² de área refletora, utilizando 119 coletores *Eurotroughs*, totalizando 102.816 m². Durante a safra, a eficiência solar

para eletricidade e a economia de combustível aumentam com o múltiplo solar, alcançando uma redução de 32% no consumo de combustível no ponto de projeto. No entanto, a eficiência global do campo solar pode ser reduzida em baixas insolações devido à implementação da desfocalização. Durante a entressafra, a planta opera continuamente, gerando energia adicional com eficiência melhorada.

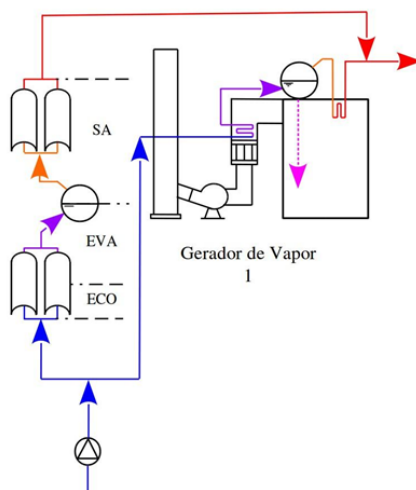
A proposta C, apresentada na Figura 4, é feita para geração de vapor superaquecido usando coletores solares. A área de superfície refletora necessária é determinada em 30.154 m² para atender à demanda de 17.218,52 kW, mantendo a potência térmica do projeto como máxima para evitar reduzir a carga do Gerador de Vapor abaixo de 50%. A área do terreno requerida é estimada em 12,1 hectares. Observa-se uma redução de 46,11% no consumo de combustível do Gerador de Vapor 1 durante o horário de ponto de projeto, com eficiência global dos coletores de calha parabólica apresentando os menores valores entre as propostas devido à maior temperatura de operação do superaquecedor.

Figura 3 – Proposta de integração B: geração de vapor saturado



Fonte: Os Autores (2026).

Figura 4 – Proposta de integração C: geração de vapor superaquecido



Fonte: Os Autores (2026).

Os resultados do trabalho permitem concluir que a hibridização de uma planta termelétrica de cogeração a bagaço com energia solar possui viabilidade técnica. A proposta A, que utiliza coletores de calha parabólica para pré-aquecer a água de alimentação do gerador de vapor, é destacada pela melhor eficiência solar para eletricidade e resultados econômicos mais favoráveis, devido às menores perdas térmicas para o ambiente.

As análises de sensibilidade enfatizam o fator de múltiplo solar como crucial, afetando diretamente a eficiência solar. A eficiência anual aumenta com o aumento do múltiplo solar em cada proposta. Além dos benefícios operacionais, como a economia de combustível, a hibridização oferece benefícios sociais, como geração de empregos e desenvolvimento de tecnologias solares. O estudo reconhece limitações, como simplificações nos modelos adotados, e sugere investigações futuras sobre per-

das de carga nos trocadores de calor, dinâmica de operação dos geradores de vapor em regime transiente e configurações de regeneração alternativas.

REFERÊNCIAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa n. 482, de 17 de abril de 2012. *In: Diário Oficial da União*, Brasília, ANEEL, 18 abr. 2012, Seção 1, p. 77. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/Operacao-CapacidadeBrasil.asp>. Acesso em: 05 ago. 2017.

BURIN, E. L. K. **Plantas de cogeração do setor sucroalcooleiro assistidas por concentradores parabólicos**. 2015. 180 f. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2015.

DUFFIE, J.; BECKMAN, W. **Solar engineering of thermal processes**. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, Inc., 2013. 928 p. ISBN 9781118418123. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118671603.fmatter>. 05 ago. 2017.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional**: relatório síntese – ano base 2016. Brasília: MME/EPE, 2017. 30 p.

GALANTE, R. M. **Análise termodinâmica de uma planta termoelétrica a biomassa assistida por energia solar**. 2015. 150 f. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2015.

KALOGIROU, S. A. Chapter 1 – introduction. *In: KALOGIROU, S. A. (ed.). Solar energy engineering* (Second Edition). Boston: Academic Press, 2014. p. 51–123. ISBN 978-0-12-397270-5. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123972705000029>. 05 ago. 2017.

PITA, M. J. M. **Análisis y propuestas de sistemas solares de alta exergía que emplean água como fluido calorífero**. 2008. 269 f. (Tese de Doutorado). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid, Espanha, 2008.

PITZ-PAAL, R. **Concentrating solar power**. Oxford: Elsevier, 2008. 274 p.

SOUZA, Z. J. D. **Bioelectricity overview**. Brasília, DF: MME/EPE, 2014. 18 p. Disponível em: <http://www.unica.com.br/multimedia>. Acesso em: 10 nov. 2016.

SRINIVAS, T.; REDDY, B. V. Hybrid solar–biomass power plant without energy storage. **Case Studies in Thermal Engineering**. Amsterdam: Elsevier, v. 2, p. 75–81, 2014.

DIMENSIONAMIENTO DE UNA PLANTA PILOTO DE HIDRÓGENO*

Angel Ambrocio Quispe y

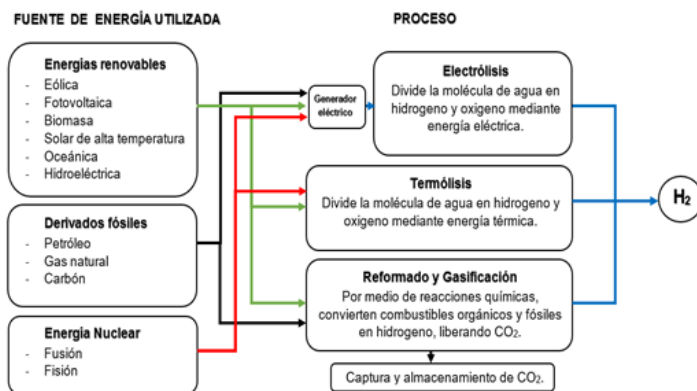
Luis Evelio Garcia Acevedo

Los cambios económicos, geopolíticos, ambientales y sociales, fortalecidos por los avances tecnológicos han configurado una nueva coyuntura de orden global, en la cual, la seguridad energética y la preservación ambiental se vuelven imprescindibles. Un nuevo paradigma está claro, la necesidad de nuevas prácticas, productos y servicios que sean ecológicamente adecuados, energéticamente eficientes y socialmente justos (Jannuzzi, 2012; Partnership, 2009). Las energías de fuentes renovables han demostrado ventajas significativas cuando comparadas con la energía de fuentes fósiles, principalmente en criterios ambientales, pero su uso masivo todavía enfrenta serios desafíos entre los cuales se destaca el hecho de ser variables y fuertemente dependientes de las condiciones climáticas diarias, esto significa que no proveen energía de manera constante por lo que requiere de sistemas de conversión y almacenamiento (Parthasarathy; Narayanan, 2014). Dispositivos de almacenamiento y conversión electroquímica demuestran potencial para solucionar esta barrera tecnológica. Entre estos se destaca la tecnología de baterías y uso energético del hidrógeno asociado a las células a combustibles. En este sentido el hidrógeno como vector energético, es hoy una de las tecnologías promisoras

* Este capítulo é baseado em *Projeto de Engenharia: análise del dimensionamiento de una Planta Piloto de producción de hidrógeno*, Trabalho de Conclusão de Curso por Angel Ambrocio Quispe, apresentado e aprovado em 2016, orientado por Prof. Dr. Luis Evelio Garcia Acevedo.

para expandir sustancialmente la utilización de las energías renovables, permitiendo almacenar y transportar con mayor eficiencia y menor costo, la energía en comparación a otras tecnologías (Moraes, 2011). Cuando el hidrógeno es producido a partir de fuentes de energía renovable, como solar, eólica, hidráulica entre otras, su uso energético en celda de combustible genera como residuo apenas agua y calor, esto da grandes ventajas desde el punto de vista del medio ambiente. Estas y otras características han permitido las propuestas de infraestructuras alternativas al actual escenario económico energético basado en hidrocarbonatos, la denominada Economía de Hidrógeno (Carvajal-Osorio, 2010). El hidrógeno en el mundo es producido a través de métodos convencionales como gasificación de carbón, reforma a vapor de hidrocarbonatos leves (nafta, gas natural, y gas licuado de petróleo), oxidación parcial de hidrocarbonatos pesados y electrólisis de agua (Souza, 2009) como presentado en la Figura 1.

Figura 1 – Esquema de las diferentes maneras de obtener hidrógeno



Fonte: Los Autores (2026).

Dentro de estos, la electrólisis de agua presenta una tecnología económicamente viable, que evita mayores emisiones de gases y empleo de combustibles fósiles. En la Tabla 1 se presentan algunas características de los principales procesos de electrólisis.

Tabla 1 – Células de electrólisis y sus características

TIPO	ALCALINO	ÁCIDO	POLÍMERO ELECTROLITO	ÓXIDO SÓLIDO
Itens				
Portador de carga	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	O ²⁻
Reactante	água	água	água	água, CO ₂
Electrolito	Hidróxido de sodio o potasio	Ácido sulfúrico o fosfórico	Polímero	Cerámico
Electrodos	Níquel	Grafito con Pt, polímero	Grafito con Pt, polímero	Níquel, cerámica
Temperatura	80°C	150°C	80°C	850°C

Fonte: Los Autores (2026).

El problema se define como ausencia de información en el proyecto de ingeniería para el diseño, distribución y construcción de plantas de producción de hidrógeno (PPH).

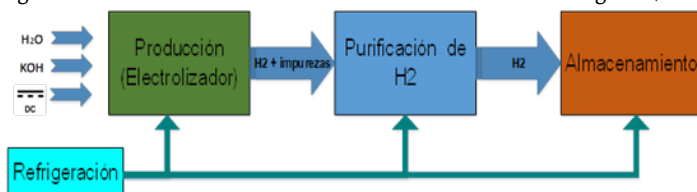
El objetivo de este trabajo de conclusión de curso, busca elaborar y dimensionar una Planta de Producción de Hidrógeno a partir del análisis de una planta existente, instalada en la Fundación Parque Tecnológico Itaipu (FPTI), caracterizando cada uno de los subsistemas y parámetros de operación, de esta forma se proponen los siguientes objetivos.

Experimentaciones en la planta de producción de hidrógeno

La Planta de Producción de Hidrógeno de la Fundación Parque Tecnológico Itaipu (PPH-FPTI), es una oportunidad para analizar experimentalmente el ciclo de vida del hidrógeno envolviendo las etapas de producción, purificación, compresión, almacenamiento, control de calidad, transporte y uso final del hidrógeno, que así facilite producir un documento técnico como guía de un proyecto básico. Desde esta perspectiva, se propone realizar un proyecto de ingeniería considerando todos los criterios de diseño, distribución, organización, caracterización y cálculo de cada equipo, llegando a una propuesta de proyecto básico.

La PPH-FPTI presenta cuatro (4) subsistemas como mostrado en la Figura 2. El subsistema de producción, es la etapa donde es producido el hidrógeno, en ella los principales insumos para su funcionamiento son el agua, electrolito y la energía eléctrica; el subsistema de purificación, es la segunda etapa donde el hidrógeno pasa por un proceso de limpieza que retira impurezas como agua, electrolito y oxígeno; el subsistema de almacenamiento, es la tercera etapa donde el hidrógeno es comprimido, almacenado y pronto para su uso; finalmente, el subsistema de refrigeración, es la etapa que mantiene a una temperatura de operación constante todo el sistema, con fin de obtener un mejor desempeño de la planta.

Figura 2 – Subsistemas de Plantas de Producción de Hidrógeno (PPH)



Fonte: Los Autores (2026).

Los equipos utilizados en el subsistema de producción son: tanque de almacenamiento de agua; bombas de alimentación de agua y electrolito; electrolizador; separador horizontal de gas; separador vertical de gas; tanque de alívio.

Subsistema de purificación: para el uso comercial, el hidrógeno producido necesita una pureza de 99,95%, para esto tiene que pasar por un proceso de limpieza, retirando todos los residuos de oxígeno y electrolito para alcanzar alta pureza. Este subsistema de purificación utiliza un tanque de presión; reactor deoxidante; filtro de hidrógeno; secadores; tanque de presión de almacenamiento de hidrógeno tipo *buffer*.

Subsistema de almacenamiento: este subsistema es donde el hidrógeno es comprimido, almacenado y listo para uso final, y sus equipos utilizados, son: compresor; tanques de almacenamiento a alta presión.

Subsistema de refrigeración: este último subsistema es instalado en etapas específicas de la planta, refrigerando desde el subsistema de producción, purificación y almacenamiento. Sus equipos utilizados son: intercambiadores de calor y *chiller*.

Dimensionamiento técnico de los equipos: aspecto económicos y socioambientales

En esta etapa fue realizado el dimensionamiento para cada uno de los equipos dentro de los subsistemas indicando especificaciones técnicas de equipos, dirección y magnitud de flujos y estados termodinámicos de los sistemas, informaciones disponibles en el proyecto que da origen a esta publicación. Los cálculos realizados dieron como resultado para el consumo de agua de $8,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$, en electrolito $0,15 \text{ m}^3$, y eficiencia total de planta de 58,04%. El consumo eléctrico está descrito en la Tabla 3.

Tabla 3 – Cuadro de cargas instaladas en la PPH

ITEM	EQUIPOS	VOLTAJE (V)	POTENCIA (kW)
1	Electrolizador	160 VDC	47,0
2	Bomba de agua	220 V	0,55
3	Bomba de electrolito	220 V	0,55
4	Reactor-oxidante	230 V	0,5
5	Dos secadores	230 V	1,0
6	Compresor	380/400 V	7,5
7	Chiller	380/400 V	5,5
8	Sistema de control	220 V	2
POTENCIA TOTAL DE CONSUMO			61,1 kW

Fuente: *SYSTEMAIR* (2016); Nitidor (2013).

Con relación a los aspectos económicos, la implantación de un proyecto de esta magnitud, posee altas inversiones iniciales, especialmente en los equipos, construcción y puesta en marcha, una estimativa de las inversiones envueltas está mostrada en la Tabla 4.

Tabla 4 – Costo de instalación de PPH

DESCRIPCIÓN	COSTO (\$)	PARTICIPACIÓN (%)
Costo asociado al sistema de electrólisis	552,151.26	56,4%
Costo asociado al sistema de almacenamiento	11,747.90	1,2%
Costo asociado a la infraestructura civil	103,773.11	10,6%
Costo asociado a los gastos de construcción	97,899.11	10,0%
Costo asociado al sistema de compresión	11,747.90	1,2%
Costo de ingeniería y supervisión	115,521.01	11,8%
Costo asociado a las contingencias	86,151.26	8,8%
TOTAL	978,991.60	100,0%

Fuente: FPTI (2014); Godoy (2008); Gambetta (2010).

En lo que respecta a la parte socio ambiental, la producción de hidrógeno tiene un potencial de poner fin a la dependencia que el mundo tiene del petróleo importado y sus trágicas consecuencias. El solo hecho de producir hidrógeno genera una alternativa donde la sociedad dispondría de energía de una manera democrática y descentralizada, esto significa que cada país podría convertirse en un productor y consumidor de su propia energía. Por otro lado, la PPH, va asociada a una reducción drástica de impacto ambiental frente a la producción convencional. Lo que la convierte en una tecnología nula en contaminación y cero en producción de gases de efecto invernadero, contrariamente a lo que ocurre con las fuentes no renovables (Zeng; Zhang, 2010).

Los resultados obtenidos, evidenciaron que el cálculo y la selección de equipos están fuertemente condicionados a las variables operacionales de la planta, características termodinámicas del fluido que son necesarias para satisfacer la demanda.

La electrólisis alcalina del agua presenta ventajas con relación a otras tecnologías, ya que reside en el hecho de ser una tecnología madura y robusta en escala industrial. Los cálculos realizados demostraron que la eficiencia global de la PPH es de 58,4%.

El consumo de energía eléctrica nominal de la planta fue de 61,1 kW y fue comparado con una curva de carga de producción real que llega a picos de 58,2 kW, de la misma capacidad, lo cual demuestra que los valores nominales se aproximan a una operación real.

Conforme a la Tabla 4 de costos de instalación, se puede verificar que el principal responsable por la mayor inversión financiera en una PPH es el costo de los electrolizadores importados. Por ese motivo, es necesario el desarrollo de un parque industrial capaz de producir estos equipos y de esta manera reducir drásticamente el costo por medio de la nacionalización.

Otro aspecto relevante debido a los procesos de patentes y secretos industriales es la ausencia de manuales con mayor detalle del funcionamiento y caracterización de los equipos usados en una planta. De este modo, este trabajo buscó contribuir al desarrollo del conocimiento proponiendo un método para el dimensionamiento de unidades productoras de hidrógeno.

REFERÊNCIAS

CARVAJAL-OSORIO, H.; BABATIVA, H. J.; ALONSO, J. A. Estudio de producción de hidrogeno con hidroelectricidad para una economía de hidrogeno en Colombia. **Ingeniería y Competitividad**, Cali, Colômbia, v. 11, n. 2, p. 31–40, 2010.

FPTI – FUNDAÇÃO DO PARQUE TECNOLÓGICO DE ITAIPU. **Projeto hidrogênio**. Foz do Iguaçu, 2014. Disponível em: <http://www.pti.org.br/projeto-hidrogênio>. Acesso em: 15 jun. 2016.

GAMBETTA, F. **Análise técnica e econômica de retificadores de corrente para produção de hidrogênio eletrólito**: estudo de caso aproveitando a EVT da UHE Itaipu. 2010. 85 f. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2010.

GODOY, G. A. R. **Aproveitamento de energia vertida turbinável da UHE Itaipu para uso em ônibus a hidrogênio**: estudo de caso em Foz do Iguaçu. 2008. 105 f. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC.

JANNUZZI, G. D. M. **Além de grandes hidrelétricas**: políticas para fontes renováveis de energia elétrica no Brasil. Sumário para Tomadores de Decisão. Brasília, DF: WWF, 2012. 34 p.

MORAES, N. P. **Estudo de implantação de célula a combustível em sistemas híbridos para produção de energia elétrica**. 2011. 108 f. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2011.

NITIDOR, H. **Installation use and maintenance manual**: pressurized water electrolyzer. [s.l: s.n.], 2013.

PARTHASARATHY, P.; NARAYANAN, K. S. Hydrogen production from steam gasification of biomass – influence of process parameters on hydrogen yield – a review. **Renewable Energy**. Oxford: Elsevier, v. 66, p. 580–593, 2014.

PARTNERSHIP, F. A. F. **Hydrogen production – overview of technology options**. [s.l.: s.n.], 2009. 78 p.

SECAS, H. H. **Estudio, diseño y construcción de un generador de hidrogeno por electrólisis**. 2012. 98 p. (Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Técnica Naval em Propulsão y Servicios del Buque). Universidade de Cádiz, Cádiz, Espanha, 2012.

SOUZA, M. **Tecnologia do hidrogênio**. Rio de Janeiro: Synergia, 2009. 132 p.

SYSTEMAIR. **AQL/AQH 20-75-enfriadores de agua y bomba de calor condensadas con aire**. Estocolmo, Suécia: Systemair, 2016. 40 p.

VENDT, E. H. **Electrochemical hydrogen technologies**. Burlington, MA: Elsevier/Academic Press, 2008. 195 p.

ZENG, K.; ZHANG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *In: The University of Western Australia*. Perth, Austrália, 2010.

SOBRE OS ORGANIZADORES

Claudia Leites Luchese

Possui Graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2010). Atua na área de Fenômenos de Transporte e Operações Unitárias. Concluiu em 2013 o Mestrado em Engenharia Química na UFRGS, desenvolvendo uma pesquisa relacionada com a avaliação cinética e modelagem do processo de desidratação osmótica e a utilização de ultrassom como pré-tratamento para maximizar a taxa de perda de água de *physalis*. Fez Doutorado (2018) no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ) pela UFRGS em regime de cotutela com a Universidade do País Vasco/*Euskal Herriko Unibertsitatea* (UPV/EHU) na Espanha. Realizou pesquisas de doutorado e pós-doutorado no PPGEQ relacionadas com a produção, o desenvolvimento e a caracterização de embalagens ativas e inteligentes à base de diferentes fontes de amido e resíduos do processamento de alimentos, a fim de avaliar sua influência na capacidade de formação de filmes, assim como suas propriedades físico-químicas, térmicas, mecânicas e estruturais buscando diferentes aplicações industriais. Realizou pesquisas de pós-doutorado na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) relacionadas com o desenvolvimento de embalagens ativas e inteligentes à base de resíduos do processamento de tubérculos roxos: sustentabilidade no contexto da economia circular. Atualmente é professora do Magistério Superior no Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território (ILATIT) pertencente à Universidade Federal da Integração Latino Americana, UNILA. Suas principais características comportamentais são relacionadas com organização e planejamento, comunicação e escrita de forma clara e eficaz, espírito colaborativo, ética profissional, honestidade e integridade.

João Manoel Lenz

Bacharel (2013) e Mestre (2015) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria, sendo bolsista de pesquisa em modelagem e integração de renováveis. Em 2019, recebeu o grau de Doutor em Engenharia Elétrica, na linha de Eletrônica de Potência, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFSM. É membro do Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC), realiza pesquisa com ênfase em energia fotovoltaica e integração de recursos energéticos distribuídos, confiabilidade em eletrônica de potência, e projeto otimizado de conversores estáticos. É membro ativo das sociedades *IEEE Industrial Applications* e *IEEE Power and Energy*, onde já ocupou os cargos de tesoureiro do Ramo Estudantil IEEE/UFSM e Presidente do Capítulo IAS SB IEEE/UFSM. De 2018 a 2019 foi pesquisador visitante no *Center for Reliable Power Electronics*, na *Aalborg University*, Dinamarca. De 2020 a 2023 foi professor e pesquisador na UNI-JUÍ. Atualmente é Professor Adjunto na Universidade Federal da Integração Latino-Americana, UNILA e é Professor Colaborador do PPG Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade (PPGIES) da mesma instituição, e realiza pós-doutorado junto ao Laboratório de Eficiência Energética e Ambiental (LABEFEA), na Universidade Federal da Bahia.

POTÊNCIA TRANSFORMADORA E SUSTENTABILIDADE

na Engenharia de Energia

O curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, UNILA foi instituído pela Portaria UNILA nº 11/2010 e obteve nota 4 na mais recente avaliação do MEC, realizada em 2017. O ingresso ocorre anualmente por meio do SiSU, com seleção baseada no desempenho dos candidatos no ENEM. Até o momento, 84 bacharéis em Engenharia de Energia foram formados pela UNILA e atuam em diferentes países e áreas profissionais, incluindo a indústria, o desenvolvimento de projetos em energia solar, eólica, biogás e hidrogênio, bem como a operação, análise e comissionamento de sistemas e usinas no setor elétrico (geração, transmissão e distribuição). Esta obra, inspirada no Edital Semillas, tem como objetivo evidenciar a natureza multidisciplinar da formação do engenheiro de energia, reunindo Trabalhos de Conclusão de Curso em celebração aos 10 anos do curso.

Apoio:

