



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA DE MATERIAIS

**ADAPTAÇÃO DE CONTROLADORES EM UM ROTOFIADOR PARA O AJUSTE
DE PARÂMETROS NA PRODUÇÃO DE FIBRAS**

NATHIELLE LOPES HARKA

Foz do Iguaçu
2021



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO
(ILATIT)**

ENGENHARIA DE MATERIAIS

**ADAPTAÇÃO DE CONTROLADORES EM UM ROTOFIADOR PARA O AJUSTE DE
PARÂMETROS NA PRODUÇÃO DE FIBRAS**

NATHIELLE LOPES HARKA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Renato Siqueira

Foz do Iguaçu
2021

NATHIELLE LOPES HARKA

**ADAPTAÇÃO DE CONTROLADORES EM UM ROTOFIADOR PARA O AJUSTE DE
PARÂMETROS NA PRODUÇÃO DE FIBRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Renato Siqueira
UNILA

Prof. Dr. José Ferreira da Silva Júnior
UNILA

Prof. Dr. Júlio César dos Santos
UFSJ

Foz do Iguaçu, 8 de dezembro de 2021.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS

Nome completo do autor(a): _____

Curso: _____

Tipo de Documento	
(.....) graduação	(.....) artigo
(.....) especialização	(.....) trabalho de conclusão de curso
(.....) mestrado	(.....) monografia
(.....) doutorado	(.....) dissertação
	(.....) tese
	(.....) CD/DVD – obras audiovisuais
	(.....) _____

Título do trabalho acadêmico: _____

Nome do orientador(a): _____

Data da Defesa: ____/____/____

Licença não-exclusiva de Distribuição

O referido autor(a):

a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, ____ de _____ de _____.

Assinatura do Responsável

Dedico este trabalho aos meus pais, Licia e Atilio, aos meus irmãos Allan e Alex e aos meus amigos próximos por me apoiarem nesta jornada. Obrigado por tudo!

HARKA, Nathielle Lopes. **Adaptação de controladores em um rotofiador para o ajuste de parâmetros na produção de fibras**. 2021. 49 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.

RESUMO

A rotofiação é um método utilizado para obtenção de fibras de diferentes tipos de materiais, possibilitando suas aplicações em segmentos como a de filtração, isolamento térmico e acústico e para a engenharia de tecidos. Além disso, a técnica oferece inúmeras vantagens em relação a outros métodos de produção de fibras, como por exemplo, uma maior taxa de produção, fácil implementação, não requer campos elétricos de alta tensão e ainda permite o controle da morfologia de fibras ajustando-se algumas variáveis do processo. Com base nessas observações, este trabalho teve como objetivo arquitetar um rotofiador possuindo parâmetros ajustáveis a partir de um equipamento básico empregado na produção de algodão doce. Esse tipo de equipamento é portátil, possui baixo custo e é de fácil operação. Para isso, foi modificado a sua estrutura e parte elétrica, sendo adaptado com sucesso controladores de temperatura e velocidade de rotação. Com um baixo orçamento, foi possível desenvolver um rotofiador funcional possuindo parâmetros ajustáveis e potencial para processar diferentes materiais. Em um teste preliminar com sacarose granulada, realizado apenas para verificação de funcionamento do equipamento e atestar a sua capacidade de produzir fibras, foi observado que tanto a temperatura como a velocidade de rotação exercem uma grande influência no processo. Quando esses parâmetros não estão alinhados, além de ocorrer perda de material por ejeção as fibras podem não se formar adequadamente, apresentando muitos grumos. Com o rotofiador finalizado e em pleno funcionamento, agora é possível prosseguir com os estudos para um maior entendimento da influência desses parâmetros na formação de fibras a partir de testes sistemáticos com diferentes materiais.

Palavras-chave: Rotofiador. Fibra. Temperatura. Velocidade de rotação.

HARKA, Nathielle Lopes. ***Controllers adaptation in a rotor spinning machine to adjust parameters in fiber production.*** 2021. 49 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021.

ABSTRACT

Rotor spinning is a technique used to obtain fibers from different materials, which can be applied in various sectors, such as filtration, thermal and acoustic insulation, and for tissue engineering. In addition, this technique offers numerous advantages over some other fiber production methods, including a higher production rate, easy implementation, no need for high voltage electrical fields, and allows the control of fiber morphology by adjusting some process parameters. Based on these observations, this study aimed to design improvements for a handy rotor spinning machine, adapting controllers to adjust some parameters in a basic equipment used to produce cotton candy. This type of equipment is portable, has low cost, and is easy to operate. Modifications were made in its structure and electrical circuit, being successfully adapted temperature and rotation speed controllers. With a low budget, it was possible to obtain a functional rotor spinning machine having adjustable parameters and potential to process different types of materials. In a preliminary test with granulated sucrose, carried out only to test the machine' operation and guarantee to its ability to produce fibers, it was observed that both temperature and rotation speed exert a significant influence on fiber formation. When these parameters are not correctly adjusted, in addition to material loss due to early ejection, the fibers do not form properly, presenting many beds. With the rotor spinning machine finished and in full operation, it is now possible to proceed with studies for a better understanding of the influence of these parameters on fiber formation from systematic tests with different materials.

Key words: *Rotor spinning machine. Fiber. Temperature. Rotation speed.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática das etapas envolvidas no processo de preparação de membranas por imersão em solução.....	16
Figura 2 - Representação esquemática do sistema utilizado para produção de fibras pela técnica de fiação por sopro em solução.....	17
Figura 3 - Representação esquemática da produção de fibras pela técnica de eletrofiação: a) aparato disposto horizontalmente; e b): verticalmente.....	18
Figura 4 - Modelos de cabeça giratória: a) em forma de seringa; e b) cilindro.....	20
Figura 5 - Representação esquemática de um sistema utilizado para a produção de fibras pela técnica de rotofiação: a) cabeça giratória cilíndrica; e b) visão ampliada do mecanismo de formação das fibras, sendo i) iniciação do jato; ii) extensão do jato; e iii) evaporação do solvente.....	21
Figura 6 - Variação na morfologia de fibras produzidas pela técnica de eletrofiação de acordo com a viscosidade do polímero utilizado: a-d) representação esquemática; e e-h) imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do poli(óxido de etileno) (PEO).....	23
Figura 7 - Representação esquemática da produção de fibras pela técnica de eletrofiação utilizando uma solução polimérica e um material fundido.....	26
Figura 8 - Potenciômetro utilizado para o controle de temperatura e velocidade de rotação.....	29
Figura 9 - Termômetro digital e termopar tipo K utilizado para o monitoramento da temperatura.....	29
Figura 10 - Tacômetro digital e sensor instalados no equipamento para monitoramento da velocidade de rotação.....	30
Figura 11 - Botões de pressão instalados no equipamento de rotofiação: a) liga/desliga; e b) interrupção de rotação do reservatório.....	31
Figura 12 - Rotofiador após inserção dos controladores de temperatura e velocidade de rotação.....	32
Figura 13 - Abertura de janelas no painel frontal para a inserção dos visores do termômetro e tacômetro.....	33

Figura 14 - Modificações feitas no painel lateral e traseiro do equipamento original: a) inserção dos botões de pressão de liga/desliga e de interrupção de rotação do reservatório; e b) reposicionamento dos cabos elétricos e fusível de segurança.....	34
Figura 15 - Diagrama para ligação do botão de pressão de liga/desliga com luz indicadora de funcionamento.....	35
Figura 16 - Representação esquemática para ligação do tacômetro.....	36
Figura 17 - Disposição dos novos componentes instalados no rotofiador para controle de temperatura e velocidade de rotação do reservatório.....	37
Figura 18 - Diagrama elétrico do rotofiador.....	38
Figura 19 - Posicionamento dos sensores de rotação e temperatura: a) fixação; e b) acabamento.....	39
Figura 20 - Rotofiador para obtenção de materiais na forma de fibras com controladores de temperatura e velocidade de rotação.....	40
Figura 21 - Material obtido após teste preliminar utilizando sacarose.....	41
Figura 22 - Fibras de sacarose obtidas com o teste preliminar do rotofiador.....	42
Figura 23 - Viscosidade em função da temperatura para diferentes concentrações de PCL.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características técnicas do equipamento utilizado como base para o engendramento do rotofiador com parâmetros ajustáveis.....	28
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
UFSJ	Universidade Federal de São João del-Rei
PCL	Poli(ϵ -caprolactona)
PVC	Poli(cloreto de vinila)
PA	Poliamida
PLA	Poli(ácido láctico)
PLLA	Poli(L- ácido láctico)
V	Volt
kV	Kilovolt
Hz	Hertz
W	Watts
CV	Cavalo-vapor
VAC	Tensão alternada
A	Ampère
RPM	Rotação por minuto

Sumário

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVO.....	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DE FIBRAS.....	15
3.1.1 Inversão de fases.....	15
3.1.2 Fiação por sopro em solução.....	16
3.1.3 Eletrofiação	17
3.1.4 Rotofiação.....	19
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1 MODIFICAÇÕES NO EQUIPAMENTO PARA ROTOFIAÇÃO	28
4.2 TESTE PRELIMINAR	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1 MODIFICAÇÕES REALIZADAS	32
5.2 DISPOSIÇÃO DO SENSORES	38
5.3 TESTE PRELIMINAR	41
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Para a produção de materiais no formato de fibras, técnicas como a inversão de fases, fiação por sopro usando soluções, eletrofiação e a rotofiação podem ser empregadas. Atualmente, a técnica de eletrofiação tem sido muito utilizada para produção de fibras e nanofibras poliméricas, porém tem alto custo e a taxa de produção de fibras em escala industrial é limitada (ZHANG; LU, 2014).

A técnica de rotofiação ou fiação centrífuga pode superar essas limitações, tendo baixo custo e alta taxa de produção quando comparada a eletrofiação. Dessa forma, a rotofiação se torna uma ótima alternativa a técnica de eletrofiação, pois não depende de um campo elétrico para a produção das fibras, sendo uma técnica mais simples e não necessitando de aparatos especiais, embora as características das fibras produzidas por ambos os métodos possam apresentar aspectos diferentes (ZHANG; LU, 2014).

O princípio de produção de fibras por rotofiação tem como base a ação de uma força aparente (força inercial centrífuga) que se manifesta em corpos sob rotação. Nesse processo, um reservatório acoplado em um rotor gira sobre seu eixo, ejetando uma solução ou um material fundido por orifícios localizados em seu centro. À medida que o líquido é ejetado, o solvente da solução evapora (ou o fundido se solidifica) formando fibras com diferentes espessuras e morfologias. As fibras produzidas podem ter diâmetro variando na faixa de centenas de nanômetros a dezenas de micrômetros (BUZGO et al., 2016; MACHADO-PAULA *et al.*, 2020).

Para garantir as características desejadas das fibras, é preciso ter controle de alguns parâmetros, tais como o diâmetro do orifício de saída da solução ou fundido, velocidade de rotação e a temperatura de operação. Segundo Yang e Yeum (2017), fibras bem alinhadas e com morfologia controlada são de grande interesse para uso na engenharia de tecidos. Logo, controlar alguns desses parâmetros se torna uma tarefa muito importante no sentido de se buscar o máximo desempenho do material produzido em sua aplicação de destino. Nesse sentido, as fibras rotofiadas se tornam muito versáteis pois podem ser produzidas apresentando alta área de superfície, dependendo do seu diâmetro, porosidade e constituição. Além disso, apesar dos polímeros serem os materiais mais utilizados na produção de fibras, fibras rotofiadas de materiais cerâmicos como hematita (Fe_2O_3) ou titanato de bário (BaTiO_3) também podem ser fabricadas (STOJANOVSKA *et al.*, 2016). Isso torna as fibras rotofiadas promissoras para muitas aplicações, tais como no isolamento térmico e acústico, biomateriais, equipamentos eletrônicos e filtração.

Assim, diante das potencialidades oferecidas pela técnica de rotofiação, principalmente em relação a fácil implementação e possibilidade de se processar diferentes tipos de materiais para as mais diversas aplicações, neste trabalho foi feita a adaptação e o ajuste dos parâmetros de temperatura e velocidade de rotação em um equipamento para produção de fibras. Com o controle desses parâmetros, abrimos um leque de possibilidades para estudos futuros, tanto no sentido de se testar a fabricação de diferentes materiais na forma de fibras, como também no controle de suas propriedades (morfologia e diâmetro das fibras) visando o seu direcionamento para aplicações mais específicas.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho teve como objetivo principal aprimorar um equipamento para rotofiação, possibilitando o controle de parâmetros que são fundamentais durante o processo de produção de fibras a partir de diferentes tipos de materiais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i) Adequar uma máquina básica de produção de produtos alimentícios (algodão doce) para a rotofiação de diferentes materiais;
- ii) Adaptar um termômetro digital e um termopar para o controle de temperatura durante o processo de rotofiação;
- iii) Adaptar um tacômetro digital e um sensor para o controle de velocidade de rotação do motor durante o processo de rotofiação;
- iv) Realizar um teste preliminar utilizando sacarose para se verificar o funcionamento do equipamento após todas as modificações feitas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DE FIBRAS

Os materiais na forma de fibras têm ampla aplicação, incluindo desde aquelas voltadas para a área de vestimentas, como aquelas voltadas para a área médica, como a engenharia de tecidos, que visa o auxílio no crescimento celular e regeneração de tecidos vivos (NAGARAJAN; GAYATHRI, 2016). Para a produção desses materiais podem ser utilizados variados métodos, tais como a inversão de fases, fiação por sopro em solução, eletrofiação e a fiação centrífuga ou rotofiação. Segue abaixo uma breve descrição desses métodos, com destaque para a rotofiação que é o alvo deste estudo.

3.1.1 Inversão de fases

A técnica de inversão de fases é muito usada na produção de membranas, permitindo a obtenção de estruturas compostas por fibras nas escalas micro e nanométrica (Stojanovska *et al.*, 2016). Por meio dessa técnica, um sistema polimérico passa de um estado fluido para um não fluido (comportamento mecânico de sólido) de forma controlada. Uma solução polimérica é induzida a um estado de supersaturação pela adição de um não-solvente ou então pela mudança de temperatura, provocando uma instabilidade na solução e promovendo a separação da fase polimérica e da não polimérica (FERREIRA, 2018). O processo pode ocorrer de várias maneiras, tais como por precipitação térmica, em que a solução polimérica é resfriada controladamente provocando a precipitação do polímero; precipitação por evaporação de solvente, que consiste na evaporação do solvente da solução em uma atmosfera inerte, sobrando a fase polimérica; precipitação por imersão, no qual uma solução polimérica é mergulhada em um banho de não-solvente causando a precipitação polimérica (PUCCA, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2017).

A Figura 1 ilustra o esquema para a preparação de membranas planas pelo método de precipitação por imersão em banho de não-solvente (água), em que a solução polimérica é vertida em uma placa de vidro e levado para o banho. O não-solvente se difunde na solução polimérica enquanto o solvente da solução se difunde para o banho, promovendo a precipitação da fase rica em polímero (FERREIRA, 2018).

Figura 1 - Representação esquemática das etapas envolvidas no processo de preparação de membranas por imersão em solução.



Fonte: Adaptado, MEDEIROS, 2016

Resumidamente, por esse método acontece primeiro a dissolução do polímero em um solvente, seguida da desestabilização da solução, que pode ser provocada por alterações na pressão ou temperatura, ocasionando a separação das fases. Posteriormente é feita a remoção do solvente e secagem (STOJANOVSKA *et al.*, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2017). As membranas produzidas por esse método podem ser utilizadas em diferentes aplicações, como por exemplo tecidos de órgãos artificiais ou mesmo para sistemas inorgânicos para aplicação em células fotovoltaicas (STOJANOVSKA *et al.*, 2016).

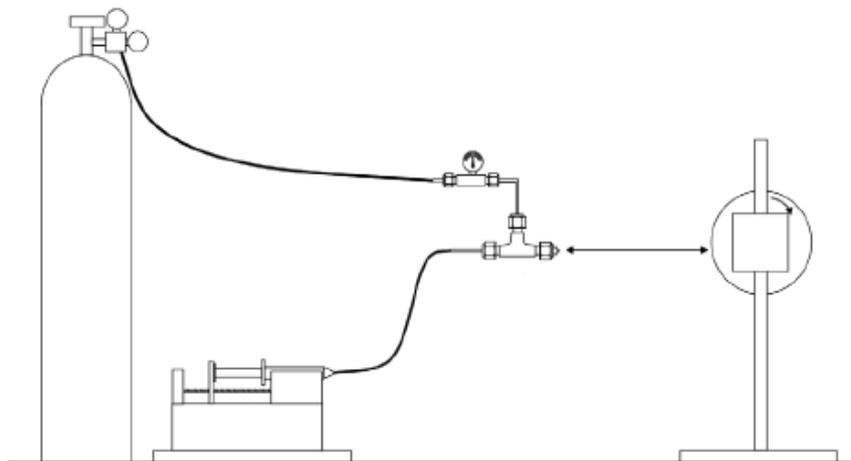
3.1.2 Fiação por sopro em solução

A fiação por sopro em solução (*solution blow spinning*) é um processo que consiste em bombear uma solução polimérica através de um orifício em uma corrente de gás pressurizado. Quando a tensão superficial gerada pela solução polimérica é superada pelas forças aerodinâmicas provenientes do gás pressurizado, fluxos dessa solução são lançados a um coletor. Durante o processo, o solvente é removido por evaporação e as fibras são formadas (MEDEIROS *et al.*, 2009). A força motriz da fiação por sopro é gerada pelo gás pressurizado. As vantagens deste método incluem o baixo custo e alta taxa de produtividade quando comparado a eletrofiação. Além disso, as fibras produzidas por esse método podem possuir diâmetro médio comparável a daquelas produzidas pela técnica de eletrofiação (ZADOROSNY, 2013; SILVA *et al.*, 2015).

Como mencionado, nesse método uma solução polimérica é bombeada por um bocal onde passa uma alta pressão de corrente de gás, lançando a solução em direção

ao coletor. Para isso, se utiliza gás pressurizado (nitrogênio, argônio ou ar), um regulador de pressão que controla a saída de gás, uma bomba com seringa para controle da taxa de injeção da solução polimérica através de bicos ejetores e um coletor rotacional, como ilustra a Figura 2. O gás pressurizado forma uma região de baixa pressão ao redor do bico, dando forma as fibras. Durante o percurso da solução até o coletor, o solvente evapora formando fibras que são posteriormente depositadas no coletor em rotação (ZADOROSNY, 2013).

Figura 2 - Representação esquemática do sistema utilizado para produção de fibras pela técnica de fiação por sopro em solução.



Fonte: Adaptado, SILVA *et al.*, 2015

Estudando o efeito das condições experimentais na obtenção de fibras de poli(cloreto de vinila) (PVC) utilizando a técnica de fiação por sopro em solução, Silva *et al.* (2015) observou que a concentração de solvente teve um grande efeito no diâmetro médio das fibras. Com a sua diminuição, o diâmetro médio das fibras aumentou. Além disso, alta viscosidade tende a produzir fibras com um diâmetro médio maior.

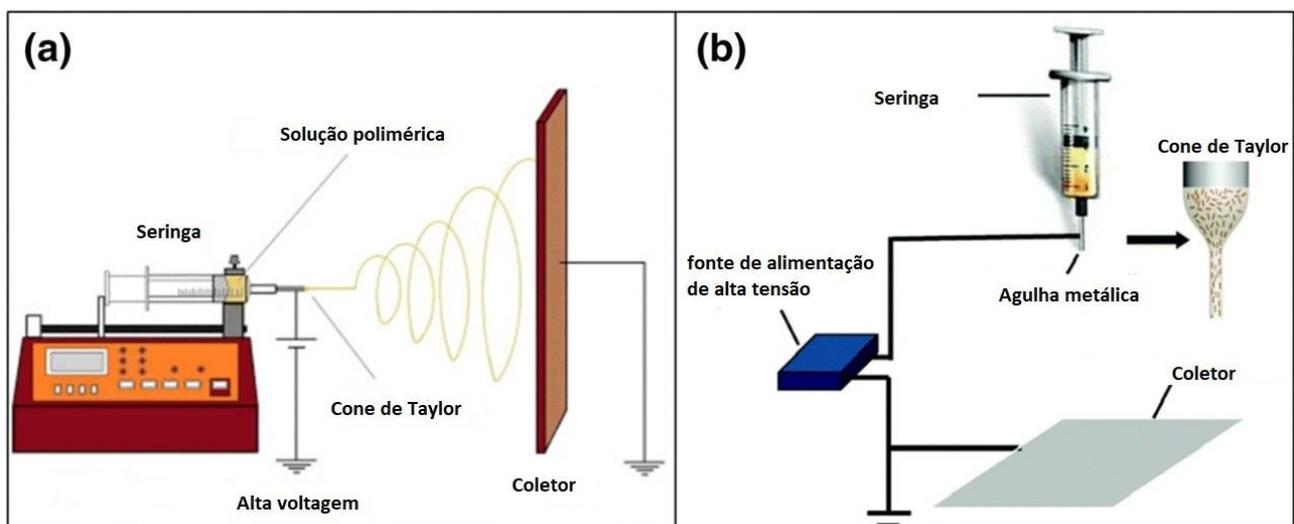
3.1.3 Eletrofiação

Na eletrofiação, uma solução polimérica (ou um polímero com fluidez adequada) é ejetado em uma câmara por meio de agulhas para a produção das fibras (ROGALSKI *et al.*, 2018; BACHS-HERRERA, Anna *et al.* 2021). Nessa técnica, é usado um campo elétrico para criar uma diferença de potencial entre o coletor e o material ejetado. À medida que a voltagem aumenta, a força eletrostática na ponta da agulha gera um acúmulo de cargas na superfície do fluido por migração eletroforética, produzindo uma deformação

na gota quando a sua tensão superficial é superada. Isso causa a formação de um jato que recebe o nome de cone de *Taylor*. Enquanto o jato faz o seu trajeto até o coletor, o solvente vai sendo evaporado ou o material perde fluidez (pela variação de temperatura), formando assim as fibras (MACHADO-PAULA *et al.*, 2020). De acordo com Rihova *et al.* (2020), o princípio deste método é baseado na aplicação de um campo eletrostático com o uso de fontes com baixa corrente e altas voltagens (~5 a 50 kV), gerando assim o acúmulo de cargas induzidas na superfície de soluções ou de meios condutores com fluidez suficiente para a fiação. Quando a diferença de potencial é suficientemente alta para desestabilizar a energia superficial do material, o cone de *Taylor* é então formado e o processo de fiação se inicia. As fibras formadas vão sendo conduzidas ao eletrodo de coleta, que é carregado negativamente. Na Figura 3 é ilustrado o processo de obtenção de fibras pela técnica de eletrofiação, em que o aparato utilizado é mostrado com duas configurações diferentes.

Como as voltagens envolvidas no processo de eletrofiação são altas, é comum o uso de equipamentos acoplados com fontes de custo relativamente alto. Também é importante ter em mente os cuidados operacionais envolvidos, uma vez que trabalhar com equipamentos em uma faixa de voltagem tão alta como a mencionada pode oferecer certos riscos (AZERÊDO, 2020). Por outro lado, embora seja difícil a produção de grandes quantidades de material em períodos curtos de tempo, essa técnica tem sido amplamente utilizada por permitir a obtenção de fibras em escala nanométrica, com diferentes morfologias, fácil funcionalização e elevadas propriedades mecânicas (ISLAM *et al.* 2019).

Figura 3 - Representação esquemática da produção de fibras pela técnica de eletrofiação: a) aparato disposto horizontalmente e b) verticalmente.



Fonte: Adaptado, ISLAM *et al.* 2019

Vale mencionar que todas as técnicas citadas acima (inversão de fases, fiação por sopro em solução e eletrofiação) são capazes de produzir fibras com dimensões variando da escala micro a nanométrica. No entanto, esses métodos apresentam algumas desvantagens no que diz respeito a facilidade de implementação (incluindo custo) e taxa de produção. O método de inversão de fases tem baixa produtividade e envolve várias etapas, sendo mais direcionado para a preparação de membranas. Para a fiação por sopro em solução é necessário o uso de gás pressurizado e montagem de um aparato experimental mais elaborado. Já para a técnica de eletrofiação, é necessária uma fonte de alta voltagem para geração de um campo elétrico juntamente com uma solução ou sistema fundido que seja condutor para a produção das fibras. Dito isso, a técnica de produção de fibras por rotofiação se mostra como um processo alternativo capaz de contornar alguns desses problemas (ZHANG; LU, 2014). Além disso, é um método que atende os nossos propósitos de pesquisa atual e futuros, pois possui fácil implementação, é versátil e os equipamentos necessários podem ser de baixo custo, como será discutido nas próximas seções.

3.1.4 Rotofiação

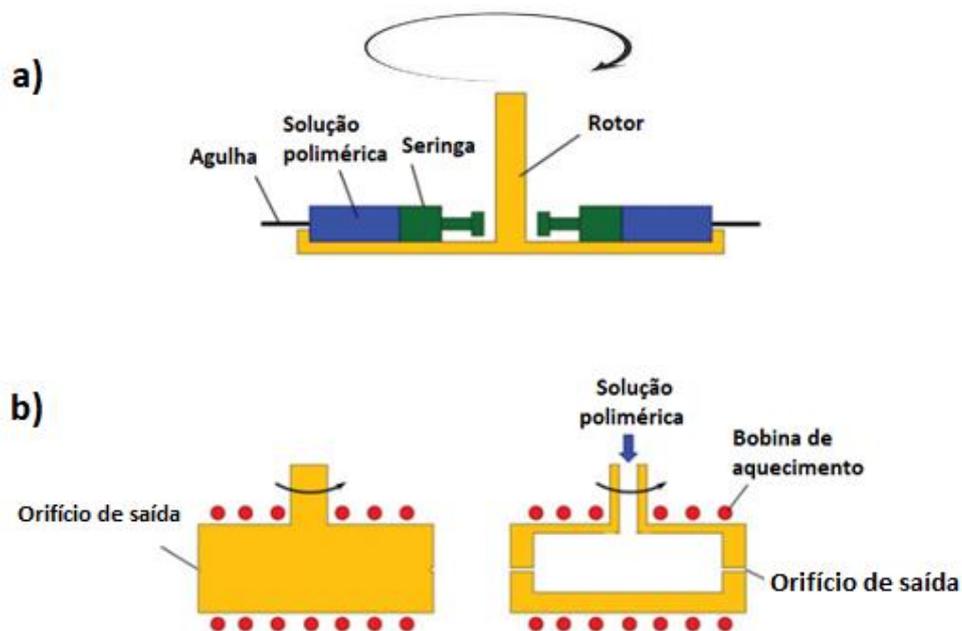
A rotofiação é um método muito utilizado na produção de fibras de vidro em escala industrial para aplicações em isolamento térmico e filtração (ZHANG; LU, 2014). Na síntese das fibras, o material fundido é reservado em um recipiente de metal com milhares de orifícios a uma temperatura entre 900 e 1100 °C. A cabeça giratória ou reservatório, que guarda o material fundido, entra em movimento de rotação variando de 2000 a mais de 3000 rpm. A força inercial centrífuga criada pela alta velocidade de rotação faz com que o material fundido flua através dos pequenos orifícios da cabeça giratória formando as fibras. O material lançado ao ar (ou outra atmosfera) em alta velocidade esfria e são coletados para posterior processamento ou uso.

É importante ressaltar que além de produzir fibras de vidros, a rotofiação também pode ser utilizada para a produção de fibras poliméricas (ZHANG; LU, 2014; CHEN *et al.*, 2019). As variáveis do processo poderão mudar dependendo do tipo de material a ser processado. A temperatura de processamento, a velocidade de rotação, a viscosidade do material a ser processado e o diâmetro da cabeça giratória são algumas dessas variáveis. Lembrando que essas variáveis também podem influenciar na morfologia e propriedades das fibras obtidas (CHEN *et al.*, 2019). Por exemplo, segundo LU *et al.* (2013), durante a

rotação, a força inercial centrífuga aumenta a fluidez no ponto onde o alongamento da cadeia polimérica ocorre. Portanto, quanto maior for a força inercial centrífuga aplicada ao sistema, maior será a extensão e o afinamento dos fluidos lançados a partir do centro de rotação (cabeça giratória), resultando em fibras com menores diâmetros. A força inercial centrífuga pode ser aumentada pelo aumento da velocidade de rotação.

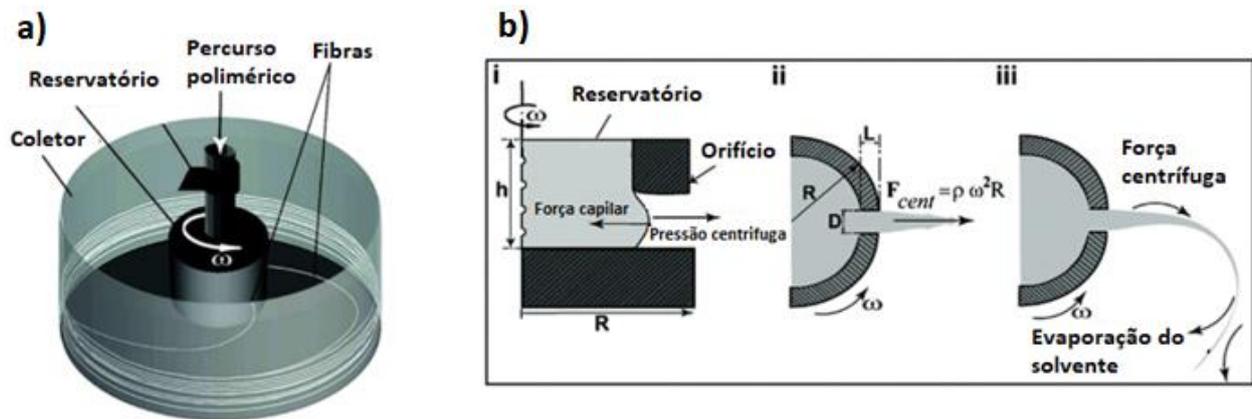
Zhang e Lu (2014) mencionam que os principais componentes de um rotofiador são a cabeça giratória e o sistema de coleta das fibras. Na Figura 4a é mostrado um modelo de cabeça giratória, onde duas seringas idênticas com a mesma quantidade de fluido são conectadas a um rotor. Nele são inseridos dois jatos de líquido que saem das agulhas. O ideal desse modelo é equilibrar constantemente os pesos das duas seringas contendo o fluido durante todo o processo (ZHANG; LU, 2014). Já na Figura 4b é mostrado outro modelo de cabeça giratória, agora em forma de cilindro e sem bico ejetor, mas com orifícios em lados opostos. Nesse caso, tanto o diâmetro como o comprimento dos orifícios são importantes para o controle das características das fibras. A partir deste modelo, é possível gerar nanofibras diretamente de uma solução polimérica ou então de um polímero com baixa viscosidade. Nesse último caso, bobinas de aquecimento devem ser instaladas para que o material atinja uma fluidez adequada. Vários orifícios podem ser introduzidos para aumentar a taxa de produção das fibras (ZHANG; LU, 2014).

Figura 4 - Modelos de cabeça giratória: a) em forma de seringa; e b) cilindro.



A forma da cabeça giratória que tem sido mais utilizada é a cilíndrica. A Figura 5a mostra um projeto típico de cabeça giratória em forma de cilindro, composto por um reservatório para conter o material. Essa cabeça giratória é conectada a um motor que é responsável pela movimentação do sistema. A força inercial centrífuga é produzida pela rotação e acelera um fluxo de material para fora, enquanto o alongamento da cadeia polimérica e a evaporação do solvente (ou resfriamento do fundido) ocorrem simultaneamente (CHEN et al., 2019). Na Figura 5b é ilustrado o processo de formação de fibras pela técnica de rotofiação.

Figura 5 - Representação esquemática de um sistema utilizado para a produção de fibras pela técnica de rotofiação: a) cabeça giratória cilíndrica; e b) visão ampliada do mecanismo de formação das fibras, sendo i) iniciação do jato; ii) extensão do jato; e iii) evaporação do solvente.



Fonte: Adaptado, CHEN *et al.*, 2019

No processo de rotofiação, um dos desafios encontrados é evitar a ruptura do jato polimérico e a formação de gotículas durante o processo. Assim, evitando-se deformidades na estrutura da fibra e manutenção de suas características ao longo de todo o filamento (CHEN et al., 2019). Na etapa i) mostrada na Figura 5b, há uma disputa entre as forças inerciais centrífuga e capilar. Durante o curso da rotação, a força inercial centrífuga empurra a solução ou fluido polimérico em direção às superfícies internas da câmara, mas em ii), quando a velocidade de rotação atinge um valor crítico, a força inercial centrífuga supera a tensão superficial do fluido e jatos do material são formados. A partir disso iii), as fibras vão sendo formadas ao mesmo tempo em que o solvente evapora ou a fluidez do material diminui com a diminuição da temperatura (STOJANOVSKA *et al.*, 2016).

Em relação ao sistema de coleta das fibras, quando o fluido é ejetado para fora da cabeça giratória, as fibras são coletadas na superfície da parede interna do coletor. O diâmetro do coletor é um parâmetro importante para o controle da morfologia das

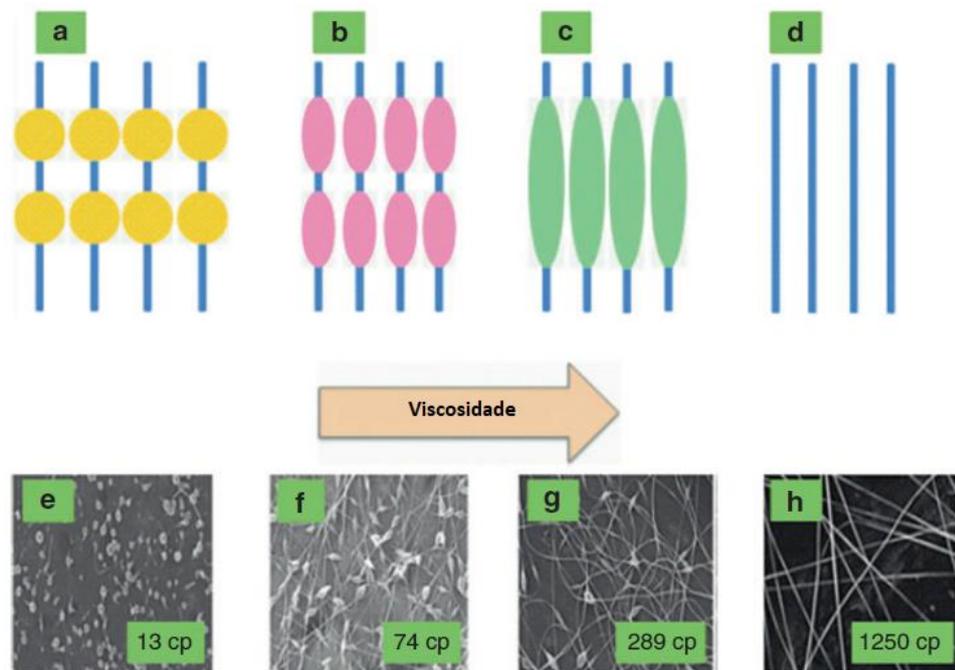
fibras obtidas. Uma curta distância entre o orifício e o coletor, pode fazer com que gotículas se depositem no coletor, indicando que o tempo de evaporação do solvente (no caso do uso de soluções) não foi suficiente e que fibras não se formarão adequadamente. Quando um jato constante (esguicho) é formado, ele tenderá a ser fino e a evaporação do solvente ocorrerá mais facilmente (CHEN *et al.*, 2019; STOJANOVSKA *et al.*, 2016). Além disso, se o interesse for uma produção contínua de material, um substrato móvel, como uma esteira, poderá ser utilizado. Conforme as fibras recém-produzidas são depositadas no substrato móvel, elas serão simultaneamente transportadas e armazenadas (CHEN *et al.*, 2019).

3.1.5.1 Parâmetros de controle na rotofiação

De acordo com CHEN *et al.* (2019) e Zahmatkeshan *et al.* (2018), a morfologia de fibras obtidas por rotofiação pode variar de acordo com as propriedades do fluido, como a viscosidade, tensão superficial, peso molecular e concentração de polímero na solução. Algumas condições operacionais também exercem influência, tais como a velocidade de rotação, diâmetro da cabeça giratória, orifícios (quantidade e dimensão) de ejeção do fluido e sua distância para o coletor.

Quando a viscosidade é alta, a força inercial centrífuga pode não ser forte o suficiente para favorecer a iniciação do jato, portanto, o material não pode ser lançado para fora do reservatório. Por outro lado, quando a viscosidade é baixa, o jato se rompe e grânulos são formados ao invés de fibras (STOJANOVSKA *et al.*, 2016). Similarmente, na eletrofiação, quando a viscosidade do sistema (solução ou material fundido) utilizado é baixa, também não há geração de fibras contínuas devido à falta de emaranhamento das cadeias. No caso, também podendo ser observado apenas a formação de grumos como ilustrado na Figura 6 (ZAHMATKESHAN *et al.*, 2018). Com o aumento da viscosidade do sistema (até atingir uma fluidez adequada), os grumos vão se alongando até assumir o aspecto de uma fibra, possuindo uma certa continuidade no diâmetro. Considerando somente o problema de viscosidade, para um polímero, por exemplo, ela poderá ser controlada pela estrutura e massa molecular do polímero a ser utilizado, bem como com a temperatura de processamento adotada. No caso de se utilizar uma solução polimérica como material de partida, o controle da viscosidade poderá ser realizado ajustando-se a relação entre a concentração de polímero e solvente na hora de se preparar a solução (ZHANG; LU, 2014).

Figura 6 - Variação na morfologia de fibras produzidas pela técnica de eletrofiação de acordo com a viscosidade do polímero utilizado: a-d) representação esquemática; e e-h) imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura do poli(óxido de etileno) (PEO).



Fonte: Adaptado, ZAHMATKESHAN *et al.*, 2018

Rogalski *et al.* (2019) investigaram as limitações reológicas para obtenção de fibras de poliamida (PA) e polietileno (PE) por rotofiação. Eles verificaram que para esses sistemas a viscosidade precisa estar entre aproximadamente 1 e 10 Pa.s para a formação de fibras, pois quando a viscosidade é inferior ocorre pouco emaranhamento das cadeias poliméricas e o sistema apresenta muita fluidez. Por outro lado, quando a viscosidade é superior, ocorre o bloqueio dos orifícios da cabeça giratória e não há ejeção dos polímeros. Outro ponto importante é que associado a essa faixa de viscosidade, se faz necessário uma velocidade de rotação entre 5000 e 10000 rpm para que as fibras sejam formadas.

Em se tratando de sistemas poliméricos, a massa molecular também pode influenciar no processamento de fibras por rotofiação. A massa molecular tem um impacto significativo em suas propriedades reológicas, pois está relacionada ao emaranhamento das cadeias poliméricas, que por sua vez influencia na viscosidade e tensão superficial do material. Por exemplo, sistemas poliméricos com baixa massa molecular tendem a formar grânulos ao invés de fibras. Já alta massa molecular tende a gerar fibras com um diâmetro médio maior (ZAHMATKESHAN *et al.*, 2018). No caso da tensão superficial, considerando a técnica de eletrofiação, ela apresenta interferência na formação de grânulos (ou gotículas).

Isso ocorre porque a tensão superficial tende a impedir a formação do cone de *Taylor*, assim restringindo a área da superfície do fluido na ponta da agulha. Na rotofiação, a força inercial centrífuga precisa superar a tensão superficial do fluido para que ocorra a sua saída pelos orifícios da cabeça giratória e, conseqüente, a formação das fibras. Dessa forma, é de se esperar que a viscosidade exerça maior influência que a tensão superficial em se tratando da técnica de rotofiação. Vale mencionar que a tensão superficial pode ser modificada com a adição de tensoativos, no intuito de reduzir a tensão superficial do sistema selecionado (ZHANG; LU, 2014; CHEN *et al.*, 2019).

Fibras maiores e mais uniformes podem ser formadas com a modulação da viscosidade, seja com a variação de temperatura ou concentração do polímero na solução (ZAHMATKESHAN *et al.*, 2018), como mencionado anteriormente. No caso da rotofiação do poliácido láctico (PLA) solubilizado em clorofórmio, uma concentração da ordem de 8% em massa proporciona uma condição com um emaranhamento de cadeias suficiente para criar uma solução viscoelástica capaz de gerar fibras sem a presença de grânulos. A concentração crítica pode indicar quando uma solução de polímero provavelmente produzirá uma fibra de boa qualidade, mas a velocidade de rotação também deve ser suficiente para superar a tensão superficial do sistema e induzir a formação de fibras sem defeitos (ROGALSKI *et al.*, 2017). A velocidade de rotação é o fator principal que determina a força inercial centrífuga durante o processo de fiação. A força inercial centrífuga (F) exercida no líquido pode ser descrita por:

$$F = m\omega^2 D/2 \quad (1)$$

sendo m a massa do fluido, ω a velocidade de rotação e D o diâmetro da cabeça giratória (ou reservatório). A velocidade de rotação deve atingir um valor crítico para que a força inercial centrífuga possa superar as tensões superficiais e então o fluido ser ejetado (CHEN *et al.*, 2019). Esse fenômeno de ejeção do fluido também possui uma certa correlação com os orifícios presentes no reservatório, uma vez que eles podem ser tratados como capilares. Além disso, sua quantidade pode variar e eles podem ter forma e tamanho diferentes.

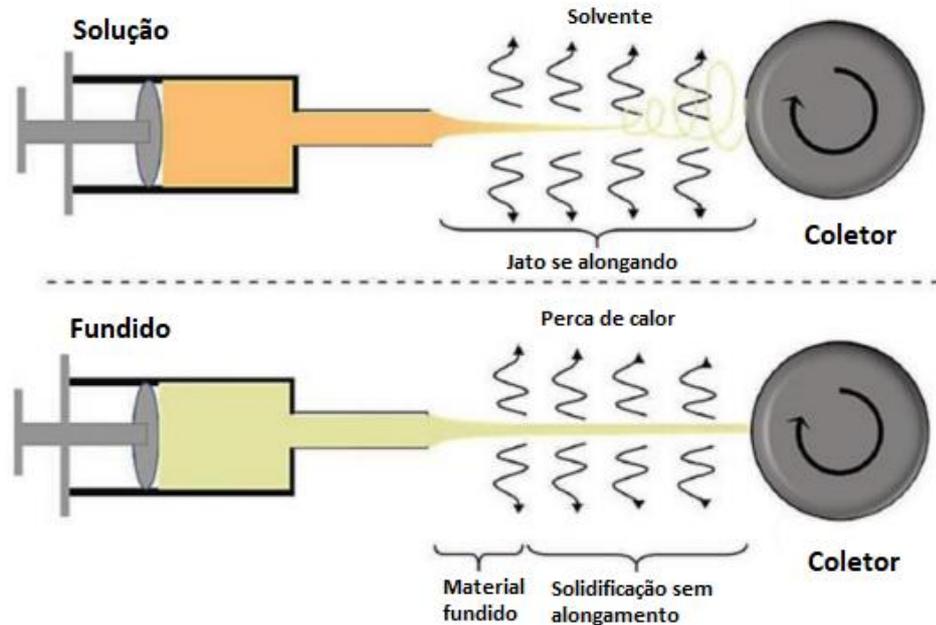
Segundo ZHANG e LU (2014), a velocidade de rotação para a produção de nanofibras poliméricas varia de 3000 a 12000 rpm. É importante mencionar que, conforme o fluido ejetado percorre o caminho até o coletor, sua velocidade diminui gradualmente. Dessa forma, quando a velocidade do sistema é aumentada, a velocidade do fluido ejetado também sofre um incremento até uma certa distância do coletor. Logo, a força inercial centrífuga e a força de atrito do ar aplicadas no fluido irão aumentar à medida que a velocidade de rotação do

sistema aumenta, levando a um maior alongamento do fluido ejetado e à redução do diâmetro das fibras formadas. Contudo, se a velocidade de rotação exceder um valor crítico, as nanofibras se tornarão mais espessas pois o tempo percorrido do fluido ejetado até o coletor será menor, não permitindo o seu alongamento. Por isso é importante levar em consideração um conjunto de fatores antes de se definir as variáveis para o processamento de um material.

De acordo com a Equação (1), a força inercial centrífuga aumenta com o aumento do diâmetro da cabeça giratória. Assim, quanto maior for o valor de D , mais fácil será a ejeção do fluido e mais finas serão as fibras geradas considerando uma determinada velocidade. O diâmetro (e forma) dos orifícios na cabeça giratória é outro fator importante para o controle das características das fibras. Orifícios estreitos irão restringir o fluxo de massa do reservatório para o coletor, resultando em fibras mais finas. E como mencionado anteriormente, a distância entre esses orifícios e o coletor pode influenciar tanto na taxa de evaporação do solvente empregado no preparo da solução como na redução de fluidez do material em função de seu resfriamento com a redução de temperatura durante o trajeto. Logo, quanto maior for essa distância, maior será o caminho percorrido pelo fluido ejetado, favorecendo a redução de sua temperatura ou evaporação do solvente – e isso contribui para o alongamento e consequente formação de fibras com diâmetros menores. No caso do uso de soluções, quando a taxa de evaporação do solvente utilizado é baixa e ele não é eliminado completamente, as fibras são vistas como uma película fina na superfície do coletor (CHEN *et al.*, 2019; STOJANOVSKA *et al.*, 2016).

Os materiais de partida para o processo de rotofiação podem ser soluções ou mesmo materiais fundidos ou que apresentem fluidez adequada em uma determinada temperatura. Poucos sistemas e variáveis de processo são relatados na literatura para a rotofiação partindo-se de materiais fundidos. Já para a eletrofiação, verificamos que a condição do material de partida exerce uma certa influência nas características das fibras formadas. Conforme discutido por BACHS-HERRERA *et al.* (2021), no processo de eletrofiação de uma solução, a formação da fibra é fortemente influenciada pela taxa de evaporação do solvente, podendo ser formadas fibras ultrafinas. Na eletrofiação de um fundido, a formação das fibras tem forte influência da taxa de transferência de calor do material a ser usado. Esse processo de transferência de calor tende a gerar fibras com diâmetros maiores (micrométricas) do que aquelas obtidas com o uso de soluções, que normalmente são nanométricas. Tal fenômeno é ilustrado na Figura 7, no qual é mostrado de forma comparativa o processo de eletrofiação de uma solução polimérica e de um material fundido.

Figura 7 - Representação esquemática da produção de fibras pela técnica de eletrofiação utilizando uma solução polimérica e um material fundido.



Fonte: Adaptado, Bachs-Herrera *et al.*, 2021

Comparando as técnicas de rotofiação e eletrofiação, é possível destacar que a rotofiação é de mais fácil implementação, pois tem como base o uso de uma força inercial centrífuga para a produção das fibras, não necessitando de sistemas condutores e nem de um campo elétrico como na eletrofiação. Estudando diferentes concentrações de Poli(ϵ -caprolactona) (PCL) para a produção de fibras utilizando essas técnicas, Machado-Paula *et al.* (2020) observaram que as fibras obtidas por rotofiação tiveram maior rugosidade, independente da concentração testada. Em relação a estrutura dos materiais, o método de processamento empregado exerceu pouca influência em suas propriedades. Vida *et al.* (2018) comparou as técnicas de rotofiação e eletrofiação para a produção de fibras de poli(L- ácido láctico) (PLLA) e PCL (50% m/m). Para isso, uma solução de concentração igual a 6% em massa foi preparada utilizando-se uma mistura de clorofórmio e acetona como solvente. As fibras resultantes do processo de eletrofiação apresentaram diâmetros entre aproximadamente 0,4 – 0,6 μm , enquanto aquelas obtidas por rotofiação exibiram diâmetros entre 5,0 – 8,0 μm . Essa diferença pode ser explicada pelo princípio de funcionamento de cada um dos métodos, no qual os parâmetros comuns envolvidos, como a viscosidade e a quantidade de solvente na solução, influenciaram na formação das fibras de forma diferente. Um outro aspecto que vale ser ressaltado é que a rotofiação possibilita uma maior taxa de produção. De acordo com Rogalski *et al.* (2018), a taxa de produção de fibras é de cerca de 60 g/h utilizando a

rotofiação contra 0,11 g/h para a eletrofiação (em uma escala laboratorial, para cada orifício). Segundo o autor, o processo de rotofiação tem como desvantagem o fato de que o reservatório cria uma turbulência quando está em rotação, levando a uma grande variação no diâmetro das fibras produzidas.

Considerando as principais diferenças entre as técnicas de eletrofiação e rotofiação (e de alguns parâmetros que influenciam no processamento), o estudo realizado por BACHS-HERRERA *et al.* (2021) e os mencionados acima são ótimas referências para se ter uma ideia e refletir sobre o que esperar para fibras obtidas por rotofiação considerando-se materiais de partida em diferentes condições (fundidos ou soluções).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MODIFICAÇÕES NO EQUIPAMENTO PARA ROTOFIAÇÃO

Para se ter disponível um rotofiador com parâmetros de ajuste, foi utilizado de base um equipamento comercial semiautomático empregado na produção de produtos alimentícios (algodão doce). Esse tipo de equipamento é compacto e de fácil transporte, podendo ser operado com segurança por apenas uma pessoa após um treinamento básico. Além disso, possui baixo custo e grande potencial para a geração de fibras de diferentes tipos de materiais. Na Tabela 1 constam as suas principais características técnicas.

Tabela 1 - Características técnicas do equipamento utilizado como base para o engendramento do rotofiador com parâmetros ajustáveis.

Marca/modelo	Inovamaq/AD-50
Capacidade de produção	**~240 unidades/h
Tensão	127/220 V
Frequência	60 HZ
Potência	1400 W
*Dimensões aproximadas da base	260 X 200 X 310 mm
Massa total aproximada	~10 kg

* largura X altura X profundidade

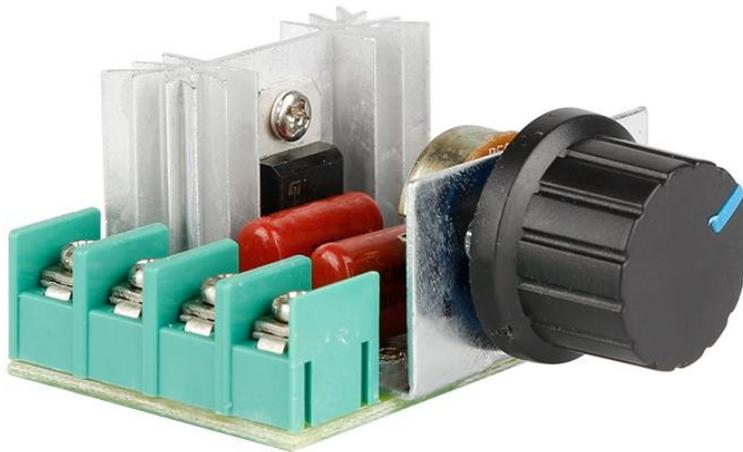
** Número de algodão doce, com aproximadamente 35 g cada unidade

Fonte: <https://bityli.com/NA64UR>

Uma máquina destinada a preparação de algodão doce portátil é composta basicamente de um coletor e um núcleo de aquecimento rotativo (reservatório) fixado a um motor. Pode-se citar algumas características do motor do equipamento utilizado como base, como uma potência de 1/4 CV, frequência de 60 Hz, tensão 127/220 V (bivolt) e rotação até aproximadamente 3500 rpm, bem como a sua fonte de aquecimento, constituída por uma resistência de níquel cromo NiCr-80/20 operando em uma temperatura máxima de ~200 °C. Para o controle desses parâmetros, que são variáveis extremamente importantes na modulação das propriedades de fibras obtidas por rotofiação, foi necessário o uso de dois potenciômetros com dimensões aproximadas de 5,0 X 4,5 X 3,0 mm e massa de ~40 g cada um deles. Esses potenciômetros, ilustrados na Figura 8, operam com uma tensão de alimentação de 110/250 VAC e uma tensão de saída variando de 0 a 250 VAC (tensão de saída ≤ tensão de entrada), potência máxima de 2000 W e corrente de 15 A. Para o controle de temperatura, foi usado

um termômetro digital (led azul) com tensão de alimentação de 12 V acoplado a um termopar tipo K, possibilitando monitorar uma faixa de temperatura entre - 30 e 800 °C ($\pm 0,5$), (ver Figura 9). Sua dimensão corresponde a $\sim 48 \times 30 \times 23$ mm, sendo a janela do visor de 35 X 18 mm. Esse sensor foi escolhido pois a resistência do equipamento, utilizada como fonte de aquecimento, pode ser substituída, permitindo-se trabalhar com temperaturas que são bem superiores a 200 °C.

Figura 8 - Potenciômetro utilizado para o controle de temperatura e velocidade de rotação.



Fonte: <https://bityli.com/9HrGdc>

Figura 9 - Termômetro digital e termopar tipo K utilizado para o monitoramento da temperatura.



Fonte: <https://bityli.com/fU7U3u>

Para o monitoramento da velocidade de rotação, foi utilizado um tacômetro digital (led azul) com tensão de entrada de 12 V acoplado a um sensor cilíndrico de 12 mm e capacidade de medida de aproximadamente 10 a 10000 rpm (± 3), operando em uma distância de até 10 mm do magneto instalado como ponto de referência. Suas dimensões são de ~ 80 X 40 X 25 mm, sendo o visor de 70 X 30 mm. O tacômetro digital e o seu sensor instalados no equipamento são ilustrados na Figura 10.

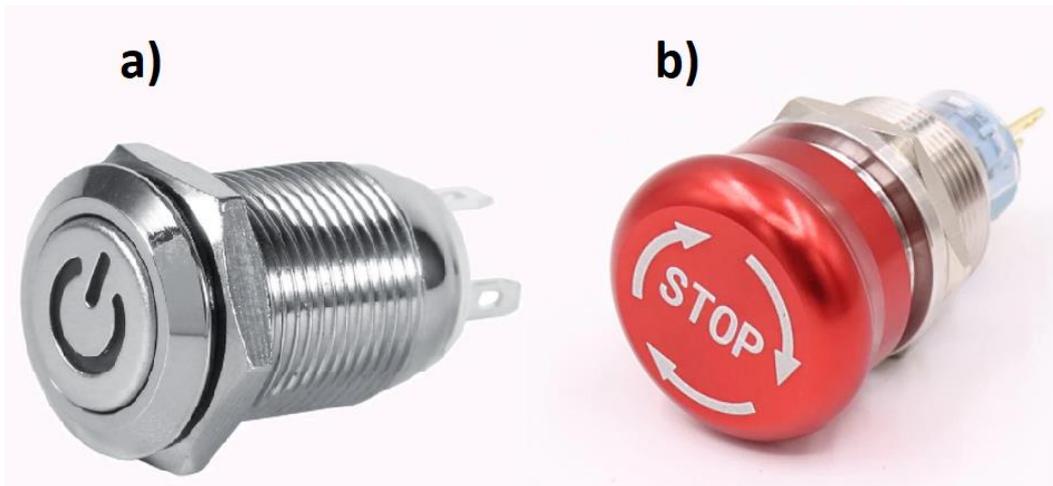
Figura 10 - Tacômetro digital e sensor instalados no equipamento para monitoramento da velocidade de rotação.



Fonte: Adaptado, <https://bityli.com/pl5fTC>

Tanto o controlador de temperatura como o de velocidade de rotação foram ligados a uma fonte padrão de 12 V / 5 A, adaptada no equipamento. Finalizando as alterações, também foi instalado um botão de pressão de metal com luz indicadora de funcionamento (led azul) e um outro sem led, na cor vermelho, para parar o movimento da cabeça giratória e encerrar o processo de fiação. Ambos os componentes são ilustrados na Figura 11.

Figura 11 – Botões de pressão instalados no equipamento de rotofiação: a) liga/desliga; e b) interrupção de rotação do reservatório.



Fonte: Adaptado, <https://bityli.com/rfyNEO>

4.2 TESTE PRELIMINAR

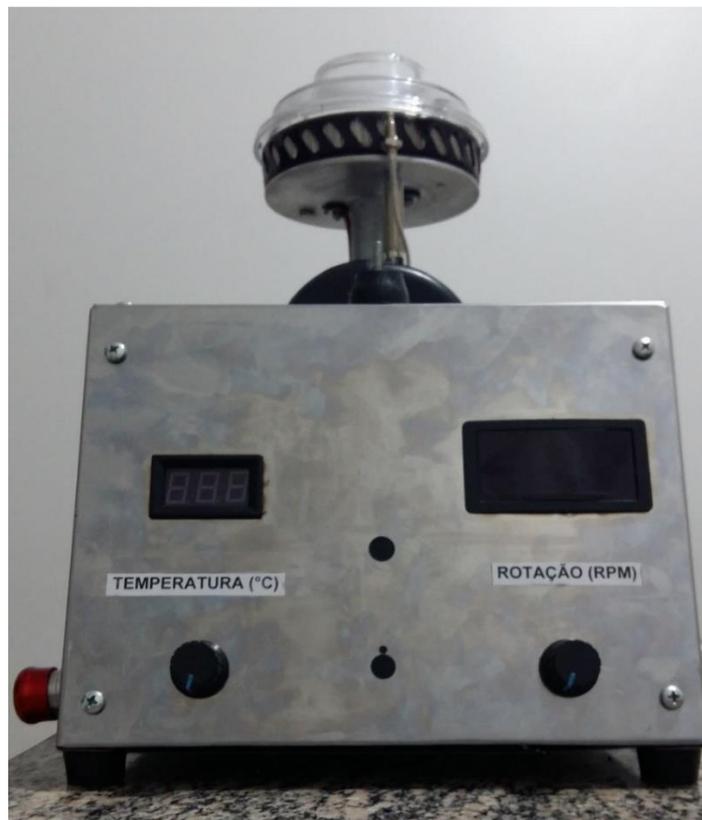
A fim de verificar o funcionamento do equipamento após as modificações feitas, um teste preliminar foi realizado utilizando-se sacarose comercial (açúcar de mesa). Por possuir baixo ponto de fusão ($\sim 185\text{ }^{\circ}\text{C}$), o material granulado foi usado como recebido e adicionado no reservatório para fusão e fiação. Os parâmetros de temperatura e rotação foram fixados ao máximo alcançado pelo equipamento (aproximadamente $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 3500 rpm). A dimensão dos orifícios presentes na cabeça giratória para ejeção do material fundido é de 17 mm de comprimento e 7 mm de largura, e a distância desses orifícios para o coletor é de $\sim 180\text{ mm}$. Vale ressaltar que, por se tratar de um teste preliminar, neste momento o intuito foi conseguir chegar a um rotofiadador possuindo parâmetros de operação ajustáveis e com potencial para se trabalhar com diferentes tipos de materiais (incluindo materiais de partida fundidos e soluções) a longo prazo. O estudo sistemático da influência desses parâmetros nas características de fibras rotofiadas será realizado em trabalhos futuros, devendo ser testado esse e outros tipos de materiais. Dessa forma, permitindo-se explorar a versatilidade e potencialidades oferecidas pela técnica, além de nos guiar para possíveis novos ajustes do equipamento que se fizerem necessários com o aprendizado que for sendo adquirido.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 MODIFICAÇÕES REALIZADAS

Na Figura 12 é mostrado uma imagem da parte frontal do rotofiadador após as modificações realizadas. Para a inserção dos controladores de temperatura e velocidade de rotação, inicialmente foi necessário abrir duas janelas no painel frontal de aço inox, utilizando-se uma micro retífica com eixo flexível Dremel 3000 e discos de corte de carbeto de silício para se acomodar os visores do termômetro e do tacômetro, como ilustrado em na Figura 13.

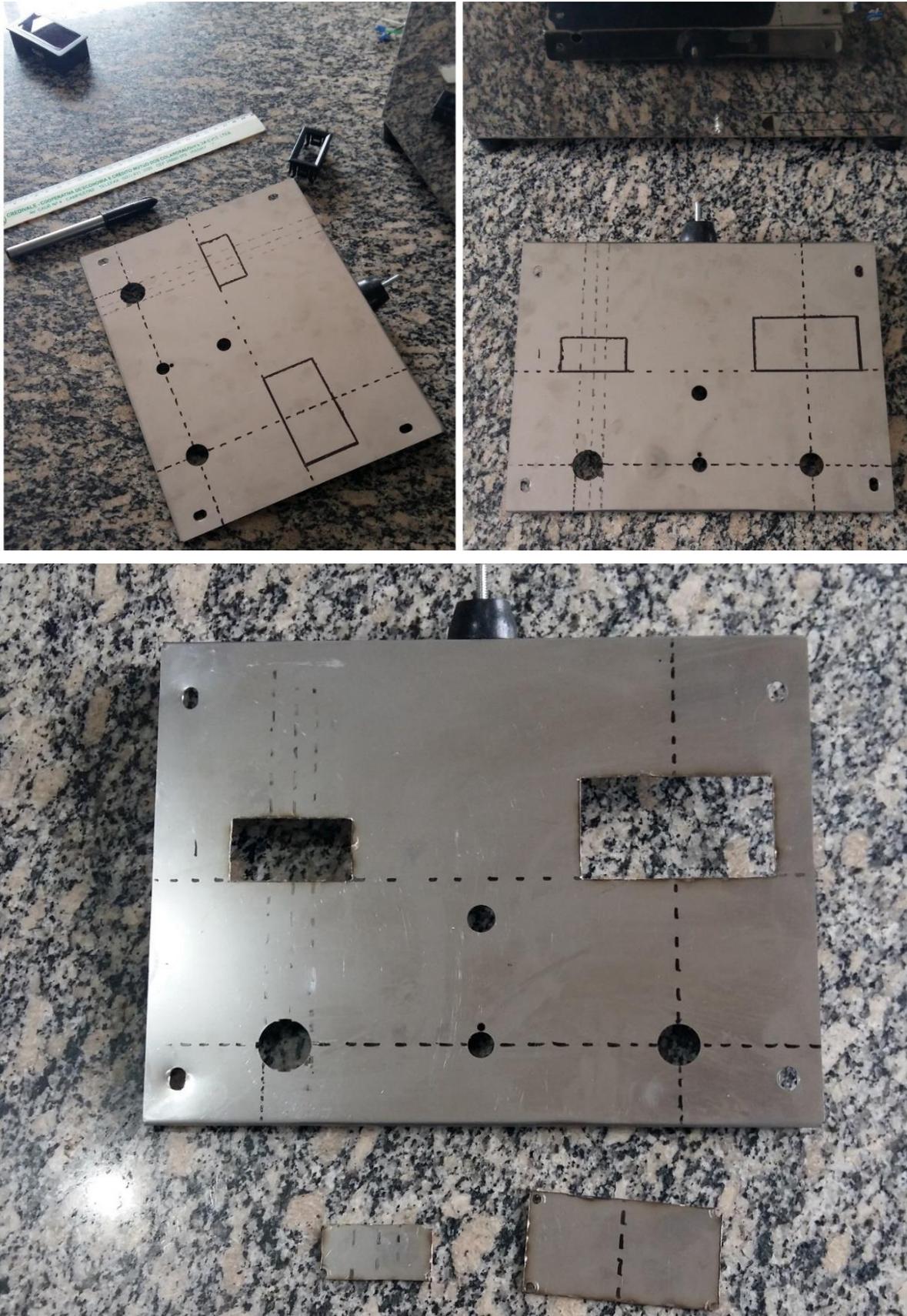
Figura 12 - Rotofiadador pós inserção dos controladores de temperatura e velocidade de rotação.



Fonte: Autora

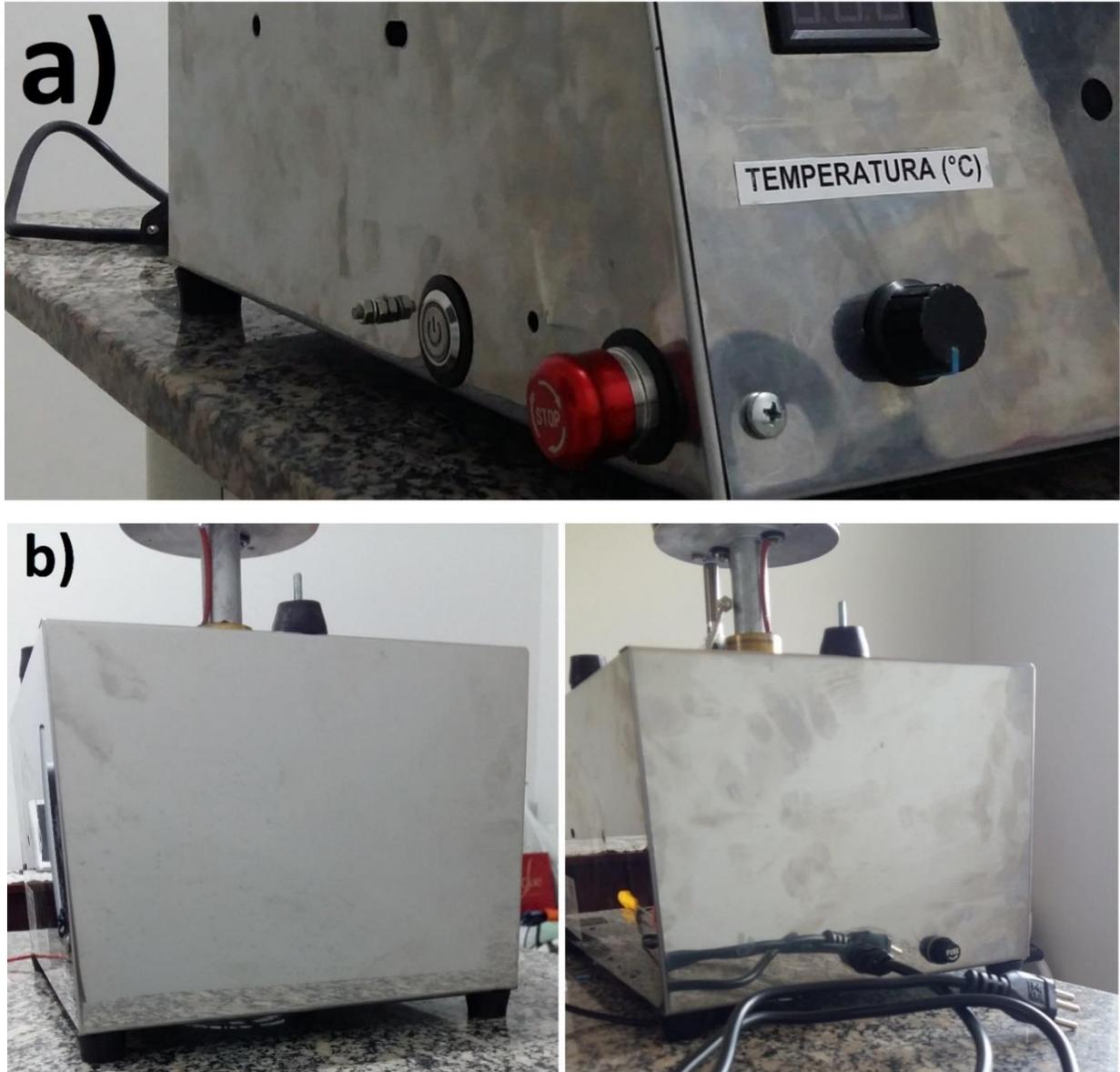
Além dos cortes no painel central, modificações no painel lateral e traseiro também foram necessárias para se acomodar os botões de pressão de liga/desliga e de interrupção de rotação do reservatório, bem como para o reposicionamento de cabos elétricos e fusível de segurança. As imagens antes e após essas alterações são mostradas nas Figuras 13 e 14, respectivamente.

Figura 13 - Abertura de janelas no painel frontal para a inserção dos visores do termômetro e tacômetro.



Fonte: Autora

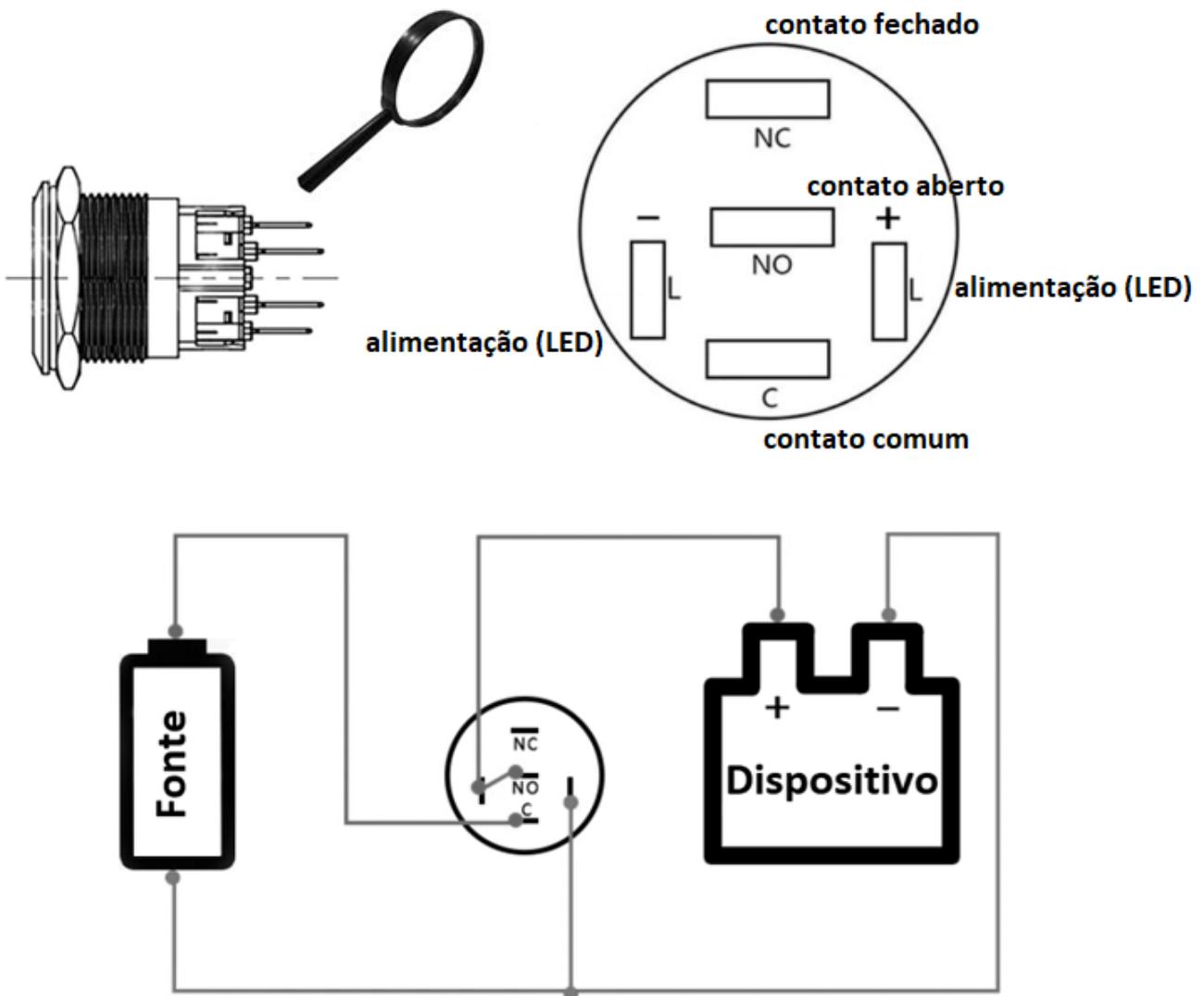
Figura 14 - Modificações feitas no painel lateral e traseiro do equipamento original: a) inserção dos botões de pressão de liga/desliga e de interrupção de rotação do reservatório; e b) reposicionamento dos cabos elétricos e fusível de segurança.



Fonte: Autora

Após as modificações externas na estrutura do equipamento, foi necessário refazer a parte elétrica visando o funcionamento adequado dos novos componentes instalados. Para instalação do botão de pressão de liga/desliga, seguimos o diagrama demonstrado na Figura 15, no qual a luz indicadora de funcionamento acende somente quando o botão é pressionado. Já a ligação do botão de interrupção do movimento de rotação do reservatório foi direta, uma vez que ele não possui nenhuma luz de indicação, contendo apenas dois terminais (fase e neutro).

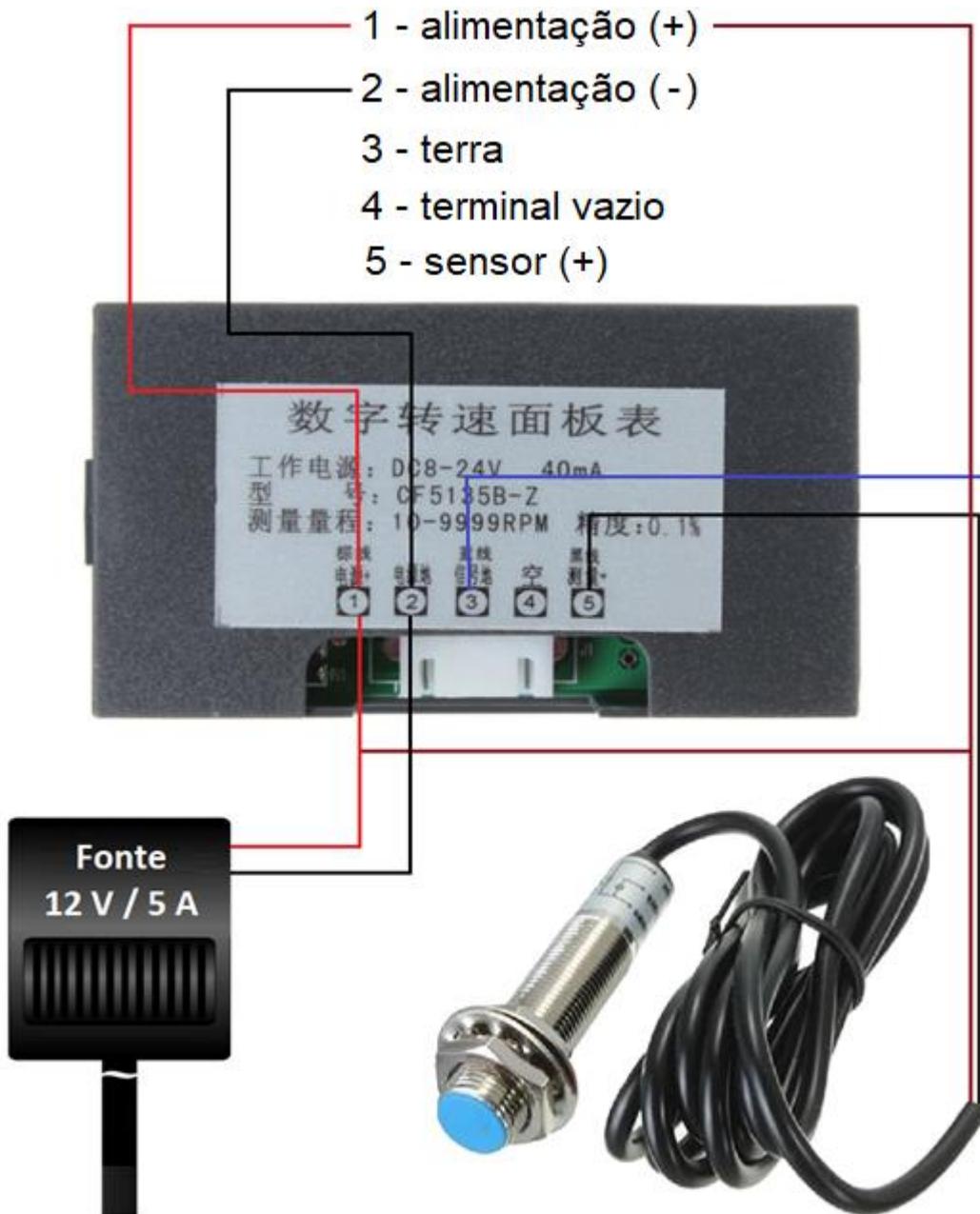
Figura 15 - Diagrama para ligação do botão de pressão de liga/desliga com luz indicadora de funcionamento.



Fonte: Adaptado, <https://bitly.com/rfyNEO>

Uma vez que tanto o controlador de temperatura como o de velocidade de rotação operam com tensão de 12 V, ambos foram ligados a uma fonte de 12 V / 5 A, que por sua vez, foi acoplada ao equipamento. Na Figura 16 é mostrado um esquema para a conexão do controlador de velocidade de rotação, dispositivo que exigiu um pouco mais de atenção pela relativa complexidade de ligação. Já a ligação do controlador de temperatura se deu de forma bem mais simples, por possuir apenas dois terminais de alimentação (um positivo e um negativo) e um conector específico para o termopar. Assim, os terminais foram ligados diretamente a fonte de alimentação e o termopar conectado ao sistema, permitindo o funcionamento do dispositivo em sua plenitude.

Figura 16 - Representação esquemática para ligação do tacômetro.



Fonte: Adaptado, <https://bityli.com/pi5fTC>

Na Figura 17 é mostrado a parte interna do equipamento, sendo destacado a disposição dos potenciômetros, termômetro e tacômetro digitais, fonte de 12 V / 5 A, bem como a forma como as conexões elétricas foram feitas e dispostas. Ainda, para auxiliar no entendimento dessas conexões, consta na Figura 18 um diagrama elétrico geral, servindo de referência para futuras intervenções, ajustes e/ou possíveis melhorias do equipamento que se fizerem necessárias a partir do seu uso no dia a dia.

Figura 17 - Disposição dos novos componentes instalados no rotofiadador para controle da temperatura e velocidade de rotação do reservatório.

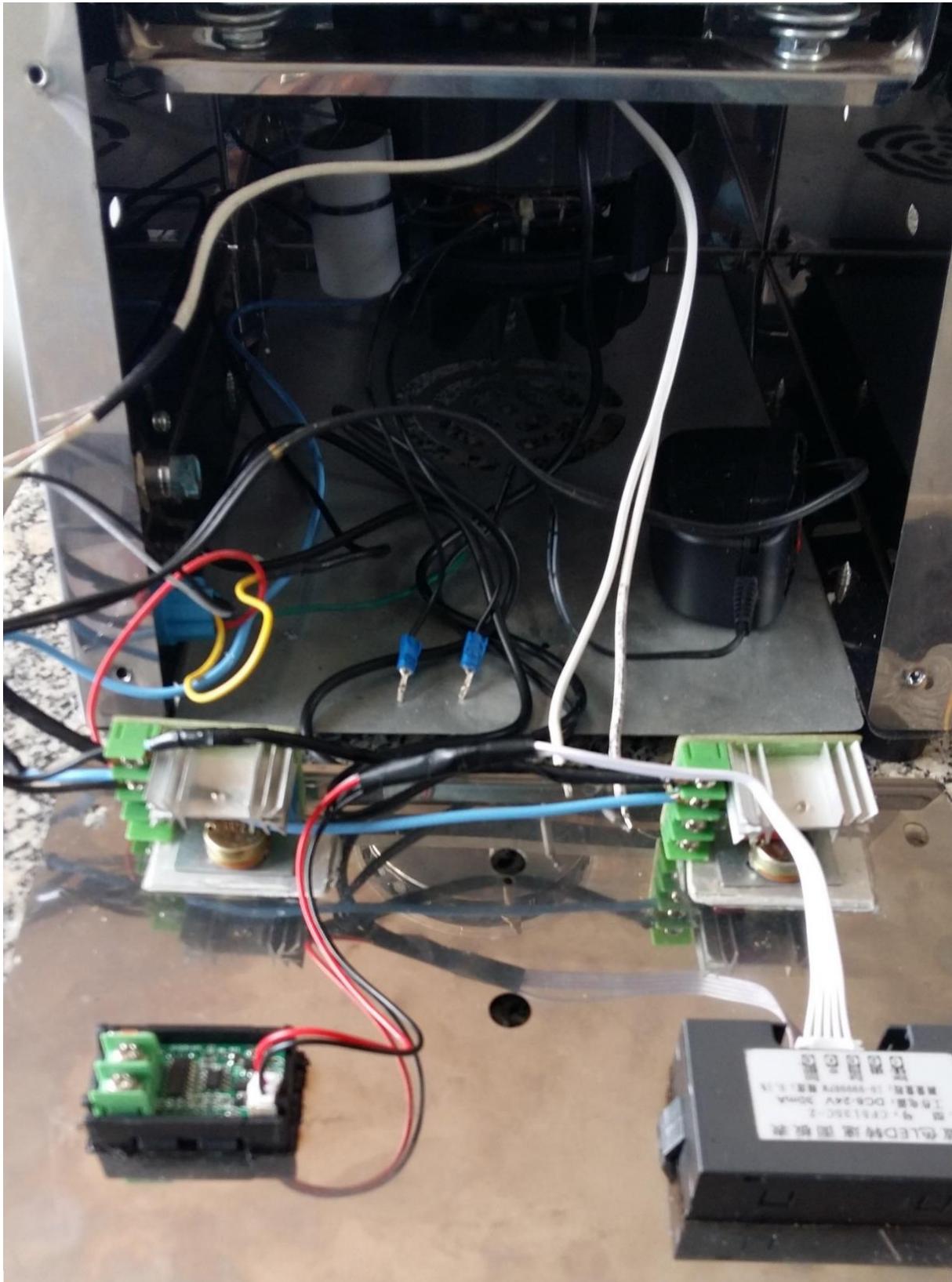
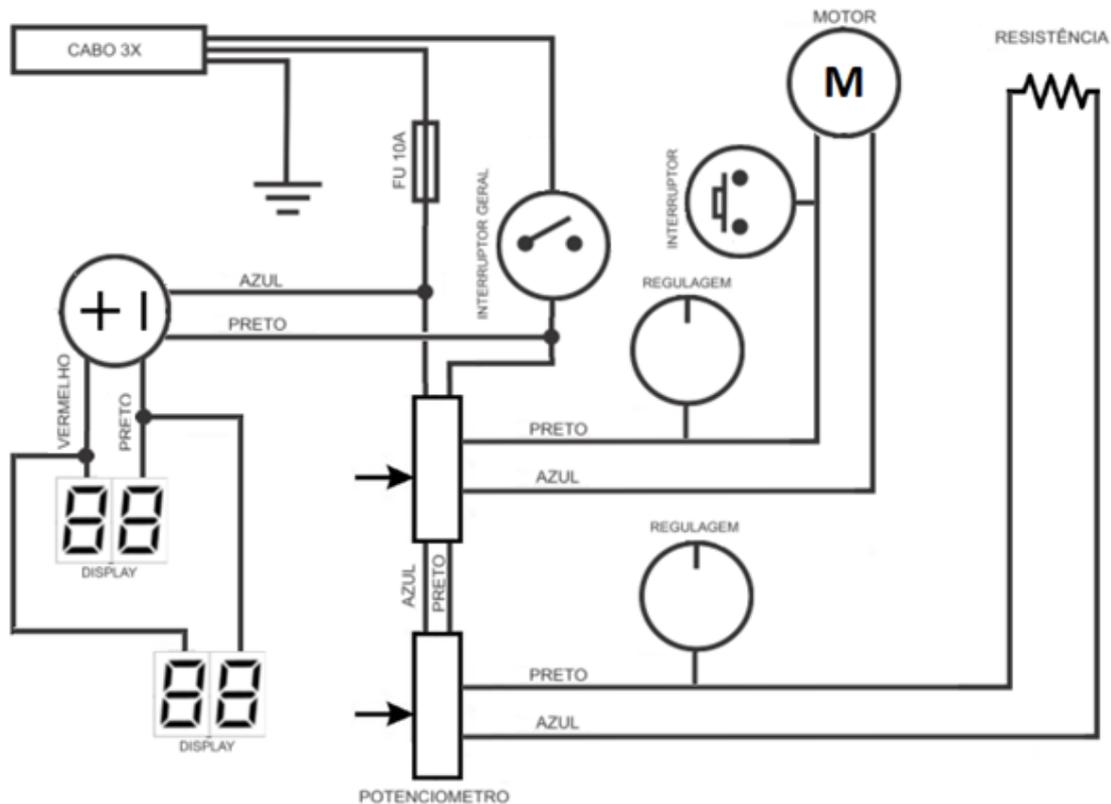


Figura 18 - Diagrama elétrico do rotafiador.

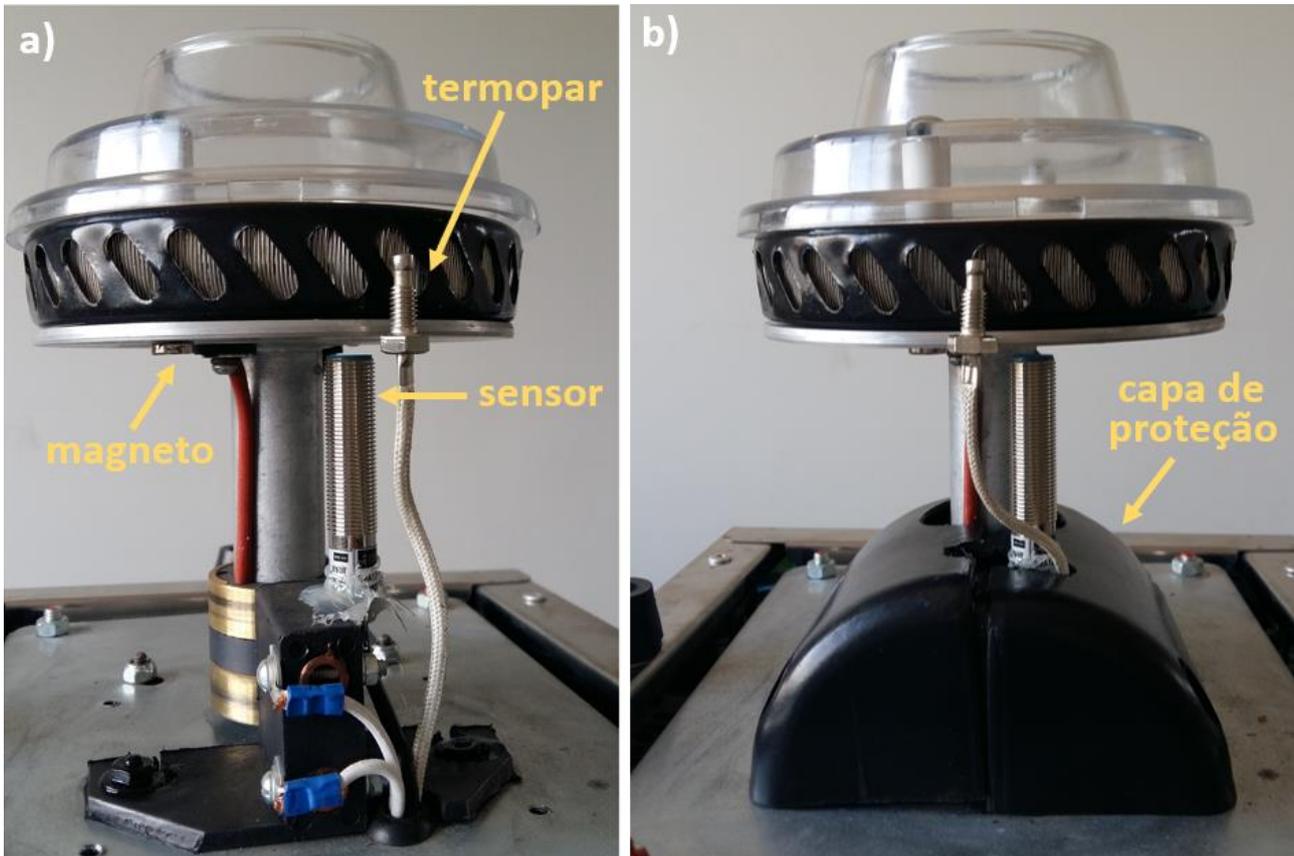


Fonte: Adaptado, <https://bityli.com/NA64UR>

5.2 DISPOSIÇÃO DO SENSORES

Ao se fazer a instalação dos novos componentes na máquina, foi preciso definir os locais de fixação dos sensores. O sensor de rotação foi posicionado próximo a parte inferior externa do reservatório, por ser um lugar de fácil implementação, como mostra a Figura 19. Como o diâmetro do reservatório é de aproximadamente 125 mm, tanto a fixação do sensor como a do magneto de referência pôde ser feita sem maiores dificuldades. O sensor foi fixado com o uso de um parafuso e cola quente para acabamento. Já o magneto foi fixado por meio de atração magnética a um parafuso metálico interno, uma vez que a base do reservatório é de alumínio. Com essa configuração, a distância estabelecida entre o sensor e o magneto foi de aproximadamente 2,5 mm, ficando dentro das especificações recomendadas pelo fabricante (≤ 10 mm). O termopar foi posicionado próximo ao sensor de rotação, como pode ser observado na Figura 19. Ele foi ajustado o mais próximo possível da lateral do reservatório, local onde se encontra a fonte de calor (resistência).

Figura 19 - Posicionamento dos sensores de rotação e temperatura: a) fixação; e b) acabamento.



Fonte: Autora

Para finalizar essa seção, na Figura 20 é mostrado o equipamento finalizado e pronto para a realização de testes. Na Figura 20 também é demonstrado o coletor, cujo diâmetro interno é de aproximadamente 1480 mm, sendo sua distância para os orifícios do reservatório de 180 mm. Neste momento, é importante mencionar que havia sido estipulado um valor máximo de R\$ 3000,00 para se alcançar um rotofiador funcional, apresentando controladores para o ajuste de alguns parâmetros durante o processo (no caso temperatura e velocidade de rotação). O projeto pôde ser concluído com sucesso, uma vez que o orçamento inicial planejado não foi ultrapassado – mesmo tendo sido necessário incluir nos custos, além dos componentes eletrônicos, a aquisição de insumos para soldagem e ferramentas, como por exemplo uma broca escalonada de 4-20 mm, discos de corte e a micro retífica.

Todo o trabalho foi custeado com recursos próprios do Prof. Orientador (R.L. Siqueira) do projeto.

Figura 20 - Rotofiador para obtenção de materiais na forma de fibras com controladores de temperatura e velocidade de rotação.

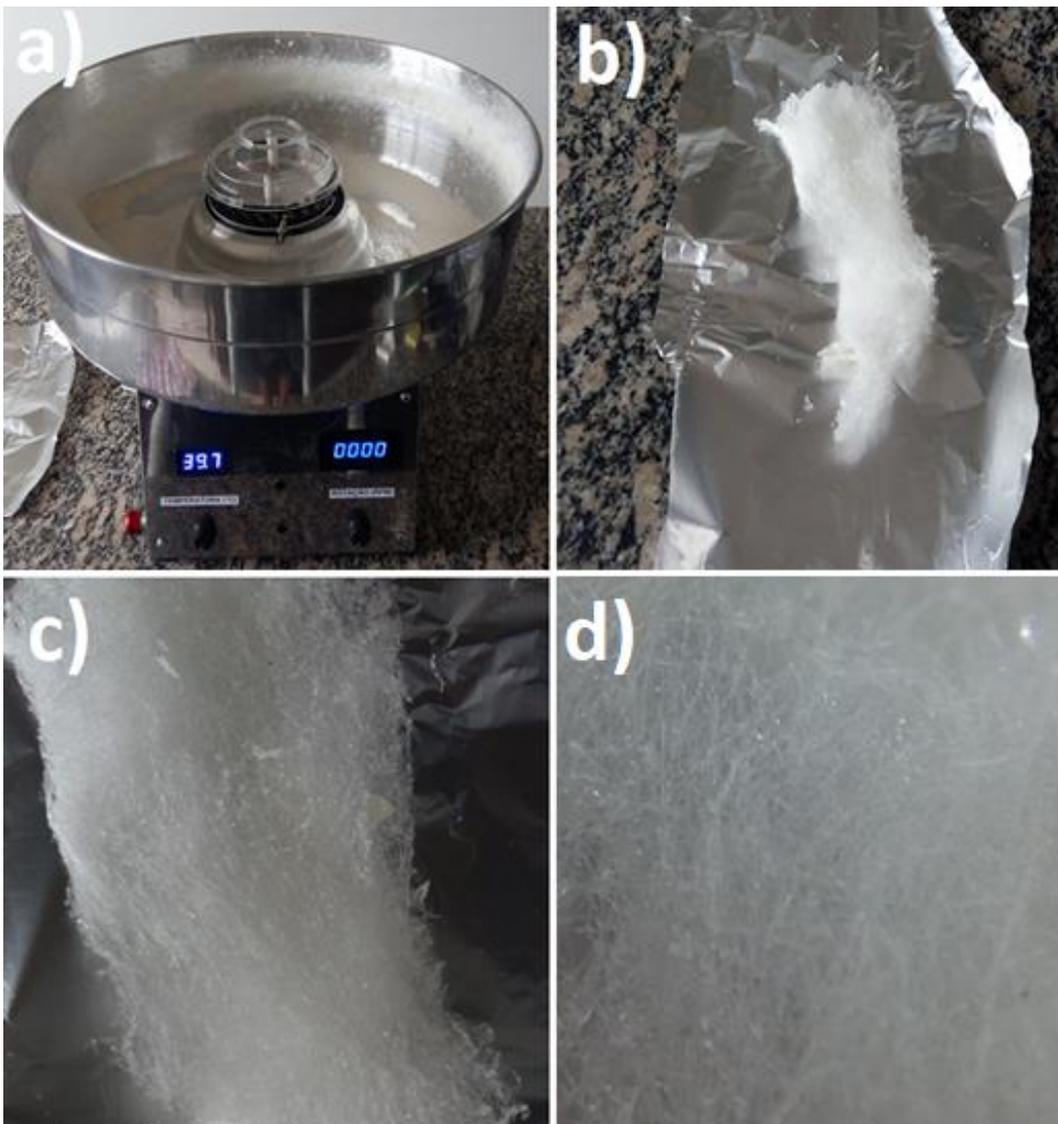


Fonte: Autora

5.3 TESTE PRELIMINAR

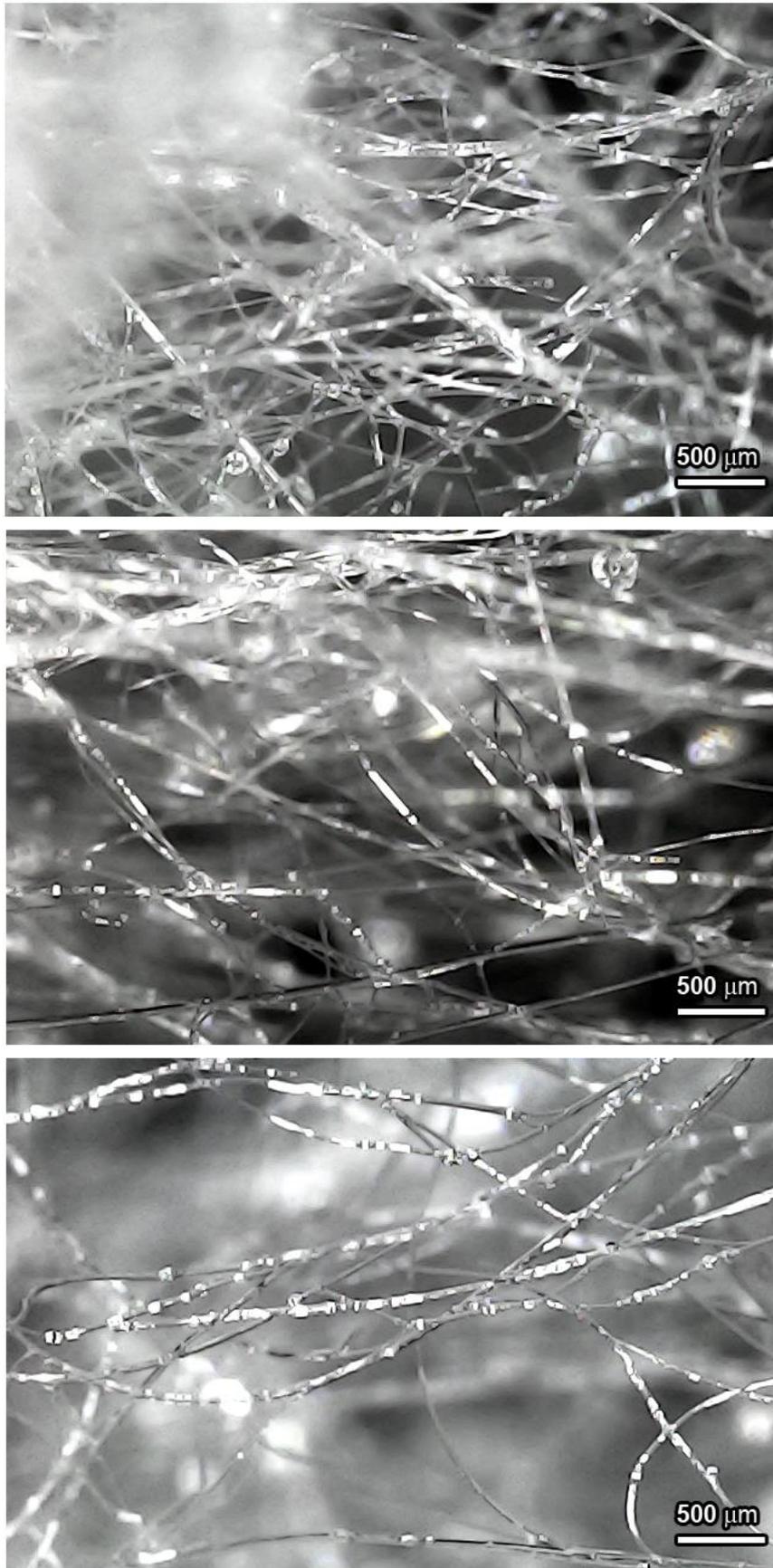
Na Figura 21 é mostrado o resultado do teste preliminar conduzido com o uso de sacarose. Pôde ser constatado que de fato é possível a obtenção de fibras e que o rotofiador foi capaz de cumprir com sua finalidade, entretanto algumas ponderações são necessárias. Primeiramente que o volume do reservatório se mostrou muito grande, sendo preciso a utilização de muito material para se gerar fibras com aspecto de algodão, como aquelas que são mostradas na Figura 21 e de forma ampliada na Figura 22. Além disso, houve muito desperdício de material até que o processo de fiação se iniciasse, indicando que a temperatura inicial do processo e a velocidade de rotação precisam ser controladas imediatamente após a adição do material no reservatório.

Figura 21 - Materiais obtidos após teste preliminar com o rotofiador.



Fonte: Autora

Figura 22 - Fibras de sacarose obtidas com o teste preliminar do rotofiadador.

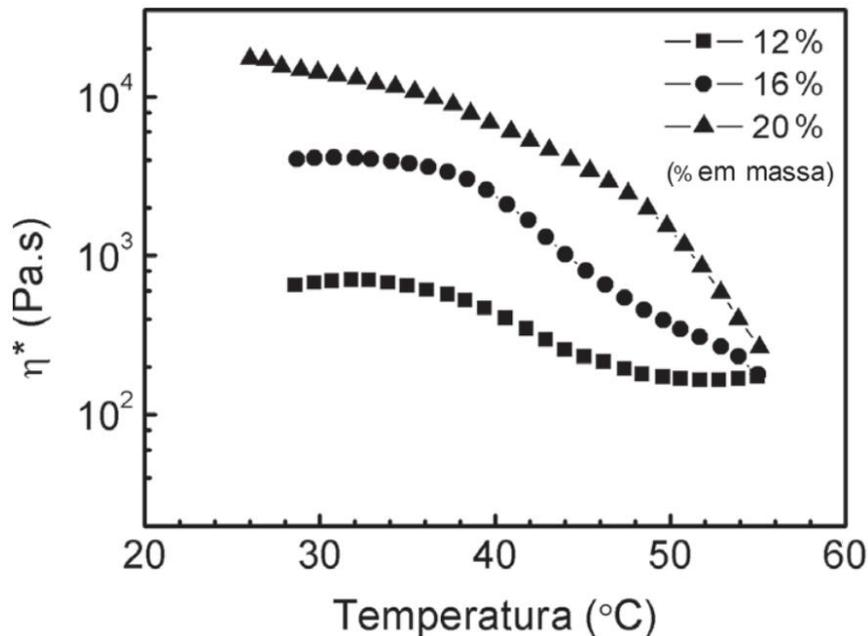


Fonte: Autora

Esses dois pontos (volume do reservatório e desperdício de material até o início do processo de fiação) limitaram testes preliminares com outros materiais, como o PCL e PLA que havia disponível, devido à pouca quantidade disponível (considerando-se o uso diretamente como paletes). Como mencionado previamente, a temperatura e velocidade de rotação precisam ser controladas desde o início do processo para que o material ainda na forma particulada não seja ejetado do reservatório. A temperatura é um parâmetro crucial quando o interesse é o uso de materiais de partida que sejam sólidos ou de baixa viscosidade. Foi possível observar que é preciso atingir uma temperatura adequada para geração de um sistema fluido no reservatório ao mesmo tempo que o reservatório tenha uma rotação suficiente para gerar as fibras. Caso contrário, haverá muita ejeção de material (ainda particulado) para o coletor até que o material alcance essa mínima fluidez necessária. De acordo com Xu *et al.* (2014), a temperatura de fiação também possibilita a modulação do diâmetro das fibras. Em se tratando de polímeros, vale mencionar que a temperatura não pode ser muito elevada, pois pode iniciar a degradação do material. Por outro lado, se a temperatura for muito baixa, a formação do jato se torna difícil e o diâmetro das fibras tendem a aumentar ou acontecer o que foi observado neste estudo: ejeção do material ainda particulado do reservatório.

Outro ponto importante é que a temperatura apresenta uma relação com a viscosidade do sistema usado para a preparação de fibras (STOJANOVSKA *et al.*, 2016). Por isso é importante saber as características do material a ser utilizado, tais como a temperatura de fusão (T_m) e de transição vítrea (T_g). Por exemplo, o PCL, muito utilizado na eletrofiação e rotofiação, apresenta uma temperatura de transição vítrea de $-60\text{ }^\circ\text{C}$ e um ponto de fusão entre $55\text{-}60\text{ }^\circ\text{C}$, permitindo fácil conformabilidade a baixas temperaturas. Polímeros fundidos são tipicamente mais viscosos que suas respectivas soluções preparadas com a utilização de solventes (MCKEEN *et al.*, 2012). Mas a viscosidade de soluções também sofre grande influência da temperatura. Ramazani *et al.* (2014) produziram fibras a partir de uma solução de PCL com o solvente ácido acético glacial pela técnica de eletrofiação, e relataram que a viscosidade (η^*) diminuiu com o aumento da temperatura da solução e do tempo residente, como mostra a Figura 23. Para uma concentração de polímero igual a 20% em massa, a dependência de η^* com a temperatura foi mais forte do que para as outras concentrações. Ou seja, além da influência da temperatura na viscosidade da solução, há também uma correlação com a concentração da solução em questão, como mencionado anteriormente. A temperatura facilita o alongamento do jato polimérico formado, proporcionando uma resposta elástica adequada da solução. Logo, em geral, quanto maior a temperatura de processamento, menor será a viscosidade e diâmetros menores serão alcançados para as fibras.

Figura 23 - Viscosidade em função da temperatura para diferentes concentrações de PCL.



Fonte: Adaptado, RAMAZANI *et al.*, 2014

Para finalizar, duas observações importantes. A primeira é que durante o teste preliminar, foi notado que o magneto se desprendia do reservatório quando o sistema atingia uma rotação próxima a 2000 rpm, impossibilitando a medição da velocidade de rotação da cabeça giratória. Uma solução foi a fixação do magneto com o uso de uma cola plástica universal, resolvendo o problema de forma satisfatória neste primeiro momento. A outra questão é em relação ao sensor de temperatura. Pôde ser observado que, para o controle de temperatura de forma mais eficiente, o termopar precisará ser posicionado dentro do reservatório. Dessa forma, permitindo a medição da variação de temperatura do material durante todo o processo de forma mais direta. Como a intenção é dar início ao estudo de preparação de fibras partindo-se de diferentes materiais o mais brevemente possível, esse e outros ajustes já estão em andamento, além de terem sido feitas algumas sugestões para trabalhos futuros como pode ser verificado na seção 7.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto para aquisição e adequação de um rotofiador apresentando baixo custo e potencial para o processamento de diferentes materiais na forma de fibras pôde ser realizado com sucesso. Foi utilizado como base um equipamento semiautomático compacto, empregado na produção de algodão doce, sendo toda a sua estrutura e parte elétrica modificada para a instalação de sensores e controladores de temperatura e velocidade de rotação do motor – que é o responsável pela movimentação do reservatório. Com a incorporação dos controladores, torna-se possível estudar variáveis do processo de rotofiação que são muito influenciados pela temperatura e velocidade de rotação do reservatório, permitindo testes para se modular as propriedades de fibras para diferentes aplicações.

No teste preliminar realizado com sacarose granulada como material de partida, fixando os parâmetros de velocidade de rotação (~3500 rpm) e temperatura (~200 °C) no máximo, foi possível observar o bom funcionamento do equipamento e formação de fibras com diâmetro em torno de 30 μm . Não foi possível a realização de testes com materiais diferentes, tais como os polímeros PCL e PLA para a produção de fibras com aspecto de algodão, devido ao fato de o volume do reservatório ser muito grande e da indisponibilidade de material suficiente para o processamento (considerando esses materiais também na forma granulada). Como cada material apresenta condições de processamento diferente e talvez únicas para a obtenção de fibras por rotofiação, tanto o desenvolvimento de um reservatório menor como o de orifícios na cabeça giratória com tamanhos e morfologias variadas estão em análise, para possibilitar o uso de pouco material e restringir o fluxo viscoso, diminuindo o desperdício de material que foi observado no teste com a sacarose. Além disso, a combinação de um reservatório com tamanho adequado e uma configuração favorável de orifícios para ejeção do material no coletor também irá auxiliar em estudos futuros envolvendo o uso de soluções.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma vez que o objetivo principal deste trabalho foi chegar a um rotofiador funcional contendo parâmetros de ajuste, para as próximas etapas cabe a realização de um estudo sistemático para a fabricação e avaliação da influência da temperatura e velocidade de rotação nas propriedades de fibras de diferentes materiais, seja partindo-se de soluções ou sistemas fundidos, materiais poliméricos ou cerâmicos. Tendo também em mente a pretensão de se fazer ajustes e aprimoramentos do rotofiador em função do aprendizado adquirido com a sua utilização. Por exemplo, com base nas observações já feitas neste estudo, pode-se mencionar o desenvolvimento de um reservatório para acomodação de um volume menor de material, além de se testar orifícios com diferentes configurações para ejeção do material durante o processo.

REFERÊNCIAS

- ZHANG, X.; LU, Y. Centrifugal spinning: an alternative approach to fabricate nanofibers at high speed and low cost. **Polymer Reviews**, [S.L.], v. 54, n. 4, p. 677-701, 30 Aug. 2014.
- BUZGO, M. *et al.* Emulsion centrifugal spinning for production of 3D drug releasing nanofibres with core/shell structure. **Royal Society of Chemistry**, [S.L.], v. 7, n.3, p. 1215-1228, 04 Jan. 2017.
- CHEN, C. *et al.* Centrifugal spinning – high rate production of nanofibers. In: Ding, Bin *et al.*, **Electrospinning: Nanofabrication and Applications**. 1st ed. New York: Elsevier Inc., 2019. p. 321-338.
- LU, Y. *et al.* Parameter study and characterization for polyacrylonitrile nanofibers fabricated via centrifugal spinning process. **European Polymer Journal**, [S.L.], v. 49, n. 12, p. 3834-3845, 25 Set. 2013.
- STOJANOVSKA, E. *et al.* A review on non-electro nanofibre spinning techniques. **RSC Advances**, [S.L.], v. 6, n. 87, p. 83783-83801, 17 Aug. 2016.
- Nagarajan, L.; Gayathri, N. Production of nanofibres using rotary jet spinning method for tissue engineering. **International Journal of Science and Research (IJSR)**, [S.L.], v. 5, n. 3, p. 858-864, 15 Mar. 2016.
- MACHADO-PAULA, M. M. *et al.* A comparison between electrospinning and rotary-jet spinning to produce PCL fibers with low bacteria colonization. **Materials Science and Engineering: C**, [S.L.], v.111, n. 1, p. 1-9, 16 Mar. 2020.
- ROGALSKI, J. J. *et al.* A study of rheological limitations in rotary jet spinning of polymer nanofibers through modeling and experimentation. **Journal of Applied Polymer Science**, [S.L.], v.137, n. 33, p. 1-10, 05 Set. 2020.
- YANG, S. B.; YEUM, J. H. Morphological comparison of aligned poly(vinyl alcohol) nanofibers fabricated by modified electrospinning and centrifugal jet spinning techniques. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, [S.L.], v. 17, n. 12, p. 9056-9062, 1 Dez. 2017.

RIHOVA, M. *et al.* Water-born 3D nanofiber mats using cost-effective centrifugal spinning: comparison with electrospinning process. **Journal of Applied Polymer Science**, [S.L.], v. 138, n. 5, p. 1-14, 21 Set. 2020.

FERREIRA, E. P. **Produção de membranas cerâmicas do tipo fibra oca utilizando pentóxido de nióbio**. 2018. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

OLIVEIRA, S. S. L. *et al.* Estudo morfológico das membranas de carbeto de silício de fibra oca antes e após sinterização a elevada temperatura. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 164-170, Maio 2017.

PUCCA, P. T. P. **Produção e caracterização de membranas de microfiltração e ultrafiltração pelo método de inversão de fases, utilizando polisulfona como matéria-prima**. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MEDEIROS, E. S. *et al.* Solution blow spinning: a new method to produce micro- and nanofibers from polymer solutions. **Journal of Applied Polymer Science**, [S.L.], v. 113, n. 4, p. 2322-2330, 15 Aug. 2009.

ZADOROSNY, L. **Produção e caracterização de micro e nanofibras de poli (fluoreto de vinilideno) – PVDF obtidos pela técnica de fiação por sopro em solução**. 2013. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência dos Materiais, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

SILVA, T. H. *et al.* Obtenção de micro e nanofibras de PVC pela técnica de fiação por sopro em solução. **Polímeros**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 229-235, Abril 2015.

MEDEIROS, V. N. **Desenvolvimento de membranas de poliétersulfona por inversão de fases**. 2016. 111 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

ROGALSKI, J. *et al.* PA6 nanofibre production: a comparison between rotary jet spinning and electrospinning. **Fibers**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 1-13, 5 Jun. 2018.

VIDA, T. A. *et al.* Fibrous PCL/PLLA scaffolds obtained by rotary jet spinning and electrospinning. **Materials Research**, [S.L.], v. 20, n. 2, p. 910-916, 15 Mar. 2018.

ZAHMATKESHAN, M. *et al.* Structural multifunctional nanofibers and their emerging applications. In: BARHOUM, A. *et al.* **Handbook of Nanofibers**. 1st ed. New York: Springer, 2019. p. 693-732.

BACHS-HERRERA, A. *et al.* Melt electrospinning of polymers: blends, nanocomposites, additives and applications. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 1-39, 18 Feb. 2021.

ROGALSKI, James J. *et al.* Rotary jet spinning review – a potential high yield future for polymer nanofibers. **Nanocomposites**, [S.L.], v. 3, n. 4, p. 97-121, 2 Out. 2017.

MCKEEN, L. W. Environmentally friendly polymers. In: MCKEEN, L. W. **Permeability properties of plastics and elastomers**. 4th ed. New York: Elsevier Inc., 2017. p. 305-323.

RAMAZANI, S. *et al.* Investigating the influence of temperature on electrospinning of polycaprolactone solutions. **e-Polymers**, [S.L.], v. 14, n. 5, p. 323-333, 19 Aug. 2014.

AZERÊDO, M. S. **Obtenção de mantas de poli (ácido láctico) por fiação por sopro em solução e sua caracterização para uso em sistemas de microfiltração**. 2020. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

ISLAM, M. S. *et al.* A review on fabrication of nanofibers via electrospinning and their applications. **Sn Applied Sciences**, [S.L.], v. 1, n. 1248, p. 1-16, 16 Set. 2019.

XU, H. *et al.* A comparative study of jet formation in nozzle- and nozzle-less centrifugal spinning systems. **Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics**, [S.L.], v. 52, n. 23, p. 1547-1559, 30 Set. 2014.