



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

PAULO SÉRGIO A. DE ARAÚJO FILHO

PROJETO, MONTAGEM E TESTES DE FONTE *COCKCROFT - WALTON*
PARA *ELECTROSPINNING*

BELÉM

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará

Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A474 Alves de Araújo Filho, Paulo Sérgio.
PROJETO, MONTAGEM E TESTES DE FONTE
COCKCROFT - WALTON PARA ELECTROSPINNING /
Paulo
Sérgio Alves de Araújo Filho. — 2022.
53 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Carmen Gilda Barroso Tavares
Dias
Coorientador(a): Prof. Dr. Petrônio Vieira Júnior
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do
Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Industrial, Belém, 2022.

1. Eletrofição. 2. Campo Elétrico. 3. Fiar. 4. Polímero.
I. Título.

CDD 620.11299

PAULO SÉRGIO ALVES DE ARAÚJO FILHO

**PROJETO, MONTAGEM E TESTES DE FONTE *COCKCROFT - WALTON*
PARA *ELECTROSPINNING***

Dissertação de mestrado apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Industrial.

Orientadora: Prf^a. Dr^a. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias

Co-Orientador: Prof. Dr. Petrônio Vieira Júnior

BELÉM

2022

PAULO SÉRGIO ALVES DE ARAÚJO FILHO

**PROJETO, MONTAGEM E TESTES DE FONTE *COCKCROFT - WALTON*
PARA *ELECTROSPINNING***

Dissertação de mestrado apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Industrial.

DATA DA AVALIAÇÃO: ____/____/____

CONCEITO: _____

BANCA EXAMINADORA

Prf^a. Dr^a. Carmen Gilda Barroso Tavares Dias
(Orientadora – PPGEI/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Jose Maria do Vale Quaresma
(Membro – PPGEI/ITEC/UFPA)

Prf^a. Dr^a. Cecilia Amelia de Carvalho Zavaglia
(Membro –PPGEM/Unicamp)

À minha mãe.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Carmen Gilda pela orientação de altíssima qualidade, por estar disponível em qualquer horário e por encorajar a fazer o melhor possível, não apenas cobrando, mas sendo parte da solução e da realização do projeto.

À minha namorada Alice Oliveira por acreditar em mim o tempo inteiro.

À minha avó por rezar, torcer muito e acreditar em mim.

À minha mãe Marilene Freitas e meu irmão David Araújo por me ajudarem em diversos momentos ao longo do curso com suporte financeiro e emocional.

Ao tio Wellington (toti) por disponibilizar a oficina para que eu pudesse fabricar o transformador de ferrite.

Ao Jair por me ajudar em diversos momentos no mestrado, disponibilizando um espaço em sua casa para que as experiências fossem realizadas, ajudou a comprar o SG3525, osciloscópios e equipamentos. Por discutir artigos, dar ideias e soluções em diversos momentos do projeto, montagem e testes do dispositivo.

RESUMO

O electrospinnig é uma forma de fiar utilizando um campo elétrico, o fio formado tem diâmetro nanométrico e é utilizado em biomateriais, fármacos, em eletrônica, na área de semicondutores e geração de energia. Durante a eletrofiação a solução sai de um recipiente de partida e alcança um anteparo através da força do campo elétrico. O método se adequa de acordo com a finalidade do experimento. Para cada objetivo há uma variedade de polímeros, solventes, este último definindo as faixas de operação para: intensidade de campo, tensão e distância operacional. Foi projetada e montada uma fonte utilizando o multiplicador Cockcroft. Para a concepção do circuito, foi realizado projeto e simulações. Para validação, foi realizada a eletrofiação utilizando a fonte.

Palavras-chave: Eletrofiação; Campo Elétrico; Fiar; Polímero.

ABSTRACT

Electrospinning is a way of spinning using an electric field, the wire formed has a nanometric diameter and is used in biomaterials, pharmaceuticals, electronics, in the area of semiconductors and energy generation. During electrospinning, the solution leaves a starter vessel and reaches a screen through the force of the electric field. The method fits according to the purpose of the experiment. For each objective there are a variety of polymers, solvents, the latter defining the operating ranges for: field strength, voltage and operating distance. A source was designed and assembled using the Cockcroft multiplier. For the design of the circuit, design and simulations were carried out. For validation, electrospinning was performed using the source.

Keywords: Electrospinning; Electric field; Spinning; Polymer.

LISTA DE FIGURAS

Fig. 01 - Ilustração Eletrospinnig.....	17
Fig. 02 - Etapas de Eletrospinnig para Biomateriais.....	20
Fig. 03 - Distância percorrida pelo fio submetido ao campo.....	23
Fig. 04- Dados obtidos a partir do artigo [Joy 2020] mostrando a faixa de operação do experimento para uma solução policaprolactona trifluoretanol.....	24
Fig. 05 mostra as tensões utilizada por diversos autores.....	25
Fig. 06 Curva de tendencia utilizando o método de mínimos quadrados disponível no software Microsoft Excel (2016) de aproximação por polinômio de segundo grau.....	31
Fig. 07. Em azul e laranja os dados obtidos pela referência [Joy2020] e em amarelo e cinza as parábolas determinadas pelos dados selecionados.....	33
Fig. 08. Relação entre Tensão e distancia, dividindo tensão inicial por distancia inicial, tensão final por distância final.....	34
Fig. 09. Gráfico obtido pela simulação no software Protheus 9.1.....	35
Fig. 10 – Gráfico de vpp ripple em termos absolutos (a) e relativos (b).....	35
Fig. 11 - Gráfico de vpp estritamente da faixa de frequência de interesse (c).....	37
Fig. 12 – Circuito com micro controlador SG3525/LM358.....	37
Fig. 13 – Esquemático SG3525/LM358.....	38
Fig. 14 – Esquemático do circuito de baixa tensão.....	39
Fig. 15. Esquema do transformador indicando onde ficam as tensões de entrada e saída.....	41
Fig. 16 – Ilustração de circuito Cockcroft – Walton montada a partir do simulador EveryCircuit.....	41
Fig. 17 – Forma de onda da porta do SG3525.....	43
Fig. 18 Forma de onda da porta do SG3525 com horizonte de tempo ampliado.....	44
Fig. 19 Forma de onda das portas do SG3525 mostrando forma de onda e alternância.....	44
Fig. 20 – Organização dos capacitores no circuito CW.....	45
Fig. 21 – Circuito eletrônico em baixa tensão.....	46

Fig. 22 Confeção Transformador de Ferrite.....	46
Fig. 23 Bobina do transformador de ferrite.....	47
Fig. 24 – Material fiado com escala em 500um (a), 200um(b) e 100um (c).....	48
Fig. 25 – Cone de Taylor.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – A informação mostra os três pontos escolhidos para determinar cada parábola.....32

LISTA DE SIGLAS

CW.....Cockcroft – Walton

PLLA.....poli(ácido L-láctico)

HA.....hidroxiapatita

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	15
OBJETIVO.....	16
01 - CAPITULO 01 – ELECTROSPINNIG.....	17
1.1 - Definição.....	17
1.2 – Aplicações.....	18
1.3 - Taxa de produção e velocidade da Eletrofiação.....	19
1.4 - Eletrofiação de Biomateriais.....	20
1.4.1 - Produção de um Novo Material.....	21
1.4.2 - Teste in vitro.....	21
1.4.3 – Teste in vivo.....	21
1.5 – Parametrização de Eletrofiação.....	22
1.5.1 - Parâmetro de Distância.....	23
1.5.2 - Relação entre distância e Tensão.....	24
1.5.3 - Parâmetros de Tensão para Diâmetro.....	25
1.5.4 – Potenciais intermediários	25
1.6 – Diâmetro controlado por formas alternativas.....	26
1.7 – Modificações na Característica Física e Mecânica.....	27
1.8 -Influência de Umidade.....	27
1.9 – A Diferença Entre Sentido Vertical e Horizontal na Eletrofiação.....	28
1.10 – Eletrofiação Sob Influência de um Campo Magnético.....	28
1.11 - Parâmetro de Fonte – Tensão e Ripple.....	28
1.12 - Obtenção de Alta Tensão em Método Cockcroft-Walton (CW).....	29
1.13 - Fator Ripple em Alta Tensão no Método CW.....	30
1.14 – Cone de Taylor.....	30

2 - CAPITULO 02 - CÁLCULO E SIMULAÇÃO.....	31
2.1 - Cálculo de Parametrização	31
2.1.1 - Distancia Operacional por Mínimos Quadrados.....	31
2.1.2 - Distância Operacional pela Equação da Parábola.....	31
2.2 - Relação entre Tensão e Distância.....	33
2.3 – Nível de Tensão.....	34
2.4 – Ripple Simulado.....	35
2.5 – Projeto de Fonte.....	36
2.5.1 – Micro controlador SG3525.....	37
2.5.2 - Conversor Push-Pull.....	39
2.5.2.1- Circuito com Mosfets	39
2.5.2.2 - Transformador com Núcleo de Ferrite.....	39
2.5.3 – Circuito Multiplicador Tensão em CW.....	41
2.5.4 – Ajuste de Tensão em conversor CC/CC.....	42
3 - CAPITULO 03 – MONTAGEM E TESTES.....	43
3.1 – Modulo de Controle.....	43
3.2 – Teste com Capacitores.....	44
3.3 - Organização Física.....	45
3.4 – Montagem do Transformador com Núcleo em Ferrite.....	46
3.5 –Experimento de Eletrofição.....	47
4 – CONCLUSÕES.....	50
5 - TRABALHOS FUTUROS.....	51

INTRODUÇÃO

O *electrospinnig* é uma forma de fiar, conhecido também como a eletrofiação. A forma tradicional de fazer o fio de diâmetro nanométrico é utilizando um recipiente e um anteparo submetidos à um campo elétrico gerado a partir de uma diferença de potencial entre estes objetos [1 – Fang2020].

O método pode então ser alterado conforme a necessidade. É possível, por exemplo, modificar o campo elétrico utilizando elementos com tensões intermediárias [2 – Kuwahata2020], também pode-se utilizar a relação entre a altura do cone e o diâmetro da fibra para um fim específico [3 – he2020]. Em eletrônica é possível formar uma nanofibra de óxido metálico [4 - Chuanyu Fu 2020].

Contudo, sabe-se que os custos relacionados a aquisição de uma fonte são relativamente elevados, a sendo necessário ainda acrescentar taxa de importação e frete. Portanto, com este fim, será projetada e montada uma fonte no modelo Cockcroft – Walton (CW). Além disso, utilizado uma variedade de polímeros e solventes afim de compreender em quais situações este tipo de fonte se adequa melhor.

OBJETIVO

Objetivo Geral:

- Montagem de uma fonte de tensão para utilizar na fiação via processo elétrico – *Eletrospinning*.

Objetivos Específicos:

- Verificação das características de tensão das fontes para método Electrospinning.
- Simulação de circuito *Cockcroft – Walton*.
- Realizar ensaios e testes.

CAPITULO 01 – ELECTROSPINNIG

O conhecimento atual reunido e resumido neste capítulo como forma de situar a pesquisa em seu momento, seu tempo.

1.1 - Definição

O electrospinnig é uma forma de fiar, utilizando um campo elétrico. A método consiste em fazer um fio de diâmetro nanométrico utilizando um recipiente de partida e um anteparo, estes submetidos à um campo elétrico gerado a partir de uma diferença de potencial [1 – Fang2020].

Dentro do recipiente de partida, é colocada uma solução polimérica, de modo que a solução sai por conta da força do campo elétrico a qual está submetida.

Ao sair do recipiente, a solução forma um pequeno cone, denominado cone de Taylor e, a partir dele, se forma um fio, sendo atraído pelo anteparo através do campo elétrico formado pela diferença de potencial. Na forma de fio, o solvente evapora e resta o polímero orientado molecularmente no sentido do campo elétrico, que se acumula no anteparo na forma de uma membrana. Portanto, o processo de electrospinning envolve o conhecimento da eletrostática, da reologia e das propriedades das soluções poliméricas tais como a taxa de evaporação do solvente, a tensão superficial e a condutividade da solução. [56 – Oliveira 2011]

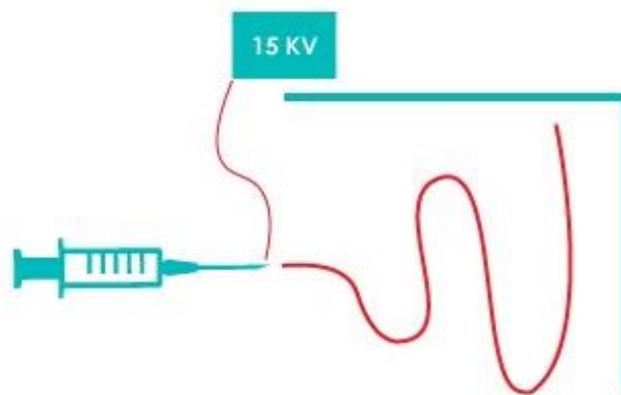


Fig. 01 - Ilustração Eletrospinnig. - Imagem: Autor

1.2 - Aplicações

A eletrofiação é uma alternativa para a produção de tecido tecnológicos e inteligentes, com propriedades específicas, das mais variadas [52 – Venturelli 2017]. O método tem diversas aplicações, como: materiais compósitos, geração de energia, fármacos, sensores, pintura e a criação de novos materiais.

Dentre as possibilidades pode-se: formar compósitos de grafeno e acetato de lítio modificado, com o objetivo de ter excelentes propriedades eletroquímicas para utilizar como separador de baterias avançadas [5 - Jiang 2020]; ainda em materiais compósitos, é possível fazer materiais mais resistentes e com melhor resistência a fratura e com Baixa emissividade de infravermelho, bom isolamento térmico e boas características mecânicas, que são promissoras para revestimento de veículos furtivos [50 – Fang 2021]; produção de células fotovoltaicas com nanofibra modificadas para aumentar a eficiência da produção de energia [7 – Nien 2020]; podem ser utilizadas duas seringas com duas soluções diferentes, uma de polímero e outra de fármaco, com o objetivo de colocar o fármaco em membrana polimérica, onde a finalidade é ter a liberação do fármaco por tempo prolongada. Onde, conforme a intenção, a fibra pode ser mais ou menos espessa para que o fármaco saia menos ou mais rapidamente. [1 – Fang2020]; fabricar um óxido de índio não tóxico com aplicação em transistores, de modo que as propriedades físico-químicas do material formado podem ser modificadas com alta confiabilidade alterando a parametrização do tratamento térmico [6 – Yanan Ding 2020]; produção de sensores flexíveis com aplicação na detecção de respiração humana [8 – Dinh 2020]. além disso, é possível produzir uma membrana dupla hidrofóbica/hidrofílica para utilização em pinturas a quente no ramo têxtil. [35 – Shirazi 2020]. Outro uso possível é a produção de nano fibras de carbono, embora haja bastante estudo, o conhecimento precisa ser consolidado com mais pesquisa. [38 – Inagaki 2012].

Para alterar os resultados obtidos é possível modificar a forma de fiar em si, ou também modificar a solução polimérica que é colocada no recipiente. É possível, por exemplo, utilizar duas seringas para aumentar o grau de liberdade e criar multicamadas no anteparo [1 – Fang2020]. modificar o campo elétrico utilizando elementos com tensões intermediárias para modificar o campo elétrico e assim concentrar o spray de fio em uma determinada área [2 – Kuwahata2020]. É possível trocar a seringa por um recipiente em forma de disco, onde a solução forma um cogumelo, onde na borda tem uma quantidade razoável de cones de Taylor. [40 – Xiong 2021]. Outra modificação também é utilizar uma agulha tripla para obter uma nanofibra com 3 camadas coaxiais, é possível ainda colocar um material que pode se dissolver na camada mais interna e obter uma nanofibra oca [33

– Zhao 2021]. Em eletrônica, é possível formar uma nanofibra de óxido metálico com ajuda de resina epóxi e formar a solda In_2O_3 NFNs [4 - Chuanyu Fu 2020];

Portanto, nota-se uma enorme abrangência do processo de eletrofição, podendo ser útil nas mais variadas áreas.

1.5 Taxa de produção e velocidade da Eletrofição

De qualquer dificuldade relacionada a questão prática sobre a eletrofição, a maior é, com certeza, a baixa velocidade de produção de material, tão maior, que a segunda, seja ela qual for, se torna quase irrelevante. Portanto há esforços notáveis no sentido de aumentar a produtividade.

Dentre as tentativas pode-se elencar várias formas de modificar significativamente o método de eletrofição, afim de melhorar o método. Por exemplo, o um dos métodos mais produtivos verificado nesta pesquisa é utilizar um cordão de bolinhas metálicas que giram e estão constantemente sendo humedecidas com a solução polimérica, onde cada uma delas conta com seu próprio cone de Taylor, as bolinhas é onde o alto potencial da fonte é conectado e o experimento foi realizado em uma faixa de 10kV até 30kV. O aparato apresentado por [27 – Liu2014] utiliza 300ml/h de solução, uma taxa consideravelmente maior que o usual, que é em torno de 0,5 ml/h como [19 - Arrieta2020], 0,8 ml/h em [18 - Alijohani2021], 0,2 ml [20 - Baykara2021] ou ainda 2,0 ml/h como [23 – Joy2021]. Contudo, este novo método ainda que promissor, com alta produtividade e eliminando a possibilidade de entupimento da agulha, ainda carece de melhorias quanto a controlabilidade, uniformidade da fibra, diâmetro e outros parâmetros de qualidade.

Uma outra forma de aumentar a produção é utilizar um disco em alta tensão que pode ou não estar girando, onde vários cones de Taylor se formam na borda do disco. A alta produtividade deste método pode chegar a demandar 300ml/h, mas varia de acordo com o diâmetro do disco, um disco maior, de 110mm é possível ter cones de Taylor o suficiente para demandar 300ml/h de solução, já um disco menor, de 42mm, utiliza em torno de 120ml/h [28 - Molnar2016]. Contudo, o formato do disco requer uma tensão maior, em torno de 25kV para ter o gradiente de tensão suficiente para formar o cone de Taylor em sua borda, este método também requer uma ventilação constante para retirar o solvente evaporado [28 - Molnar2016]. Este método permite uma boa morfologia e diâmetro semelhantes ao que tem eletrofiado da forma clássica [28 - Molnar2016].

Uma variação da mesma forma, consiste em colocar uma quantidade de solução em cima do disco de modo que exista uma curvatura no fluido próximo a borda do disco, garantida pela tensão

superficial do fluído. Desta forma, ao utilizar a forma sem agulha de fiar, através de um cogumelo, que é formado pela solução, consegue-se uma alta produtividade, de 13,7g/h, garantindo-se alta qualidade de fibra ao utilizar o método. A curvatura na superfície da solução garante a concentração de carga necessária para a formação do cone de Taylor. [40 - Xiong2021]

Outra forma de aumentar a produtividade é utilizar várias agulhas em paralelo. Essa nova configuração permite trabalhar com polímeros de alta viscosidade. No artigo em questão foi utilizado poli álcool vinílico e óxido de zinco na formação da fibra e a velocidade de produção foi de 1,78 g/h. [31 - Prabu2020].

Por último, há também a possibilidade de substituir a agulha por um cilindro e utilizar a lateral dele para a saída da solução polimérica. Onde é necessário um fluxo de ar contrário ao sentido da fiação para garantir que a umidade seja controlada e que o solvente na forma de vapor seja retirado da região da fiação [39 - Waqas2021].

1.4 Eletrofiação de Biomateriais

Sabe-se que um polímero, ao passar pelo processo de eletrofiação, geralmente passa a ter maior biocompatibilidade. Portanto, há uma ampla pesquisa envolvendo electrospinning e biomateriais. O grupo de estudos a qual pertença estuda electrospinnig aplicado a biomateriais. As principais etapas estão descritas na Fig. 02.

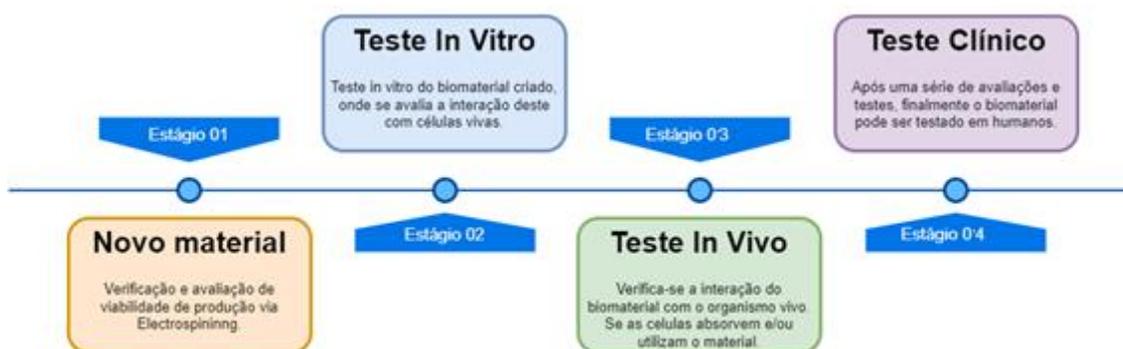


Fig. 02 - Etapas de Eletrospinnig para Biomateriais. - Imagem: Autor

1.4.1 - Produção de um Novo Material

Dentro da área de biomateriais, normalmente, uma das características desejáveis é a forma com que as células aderem ao material, além de testes mecânicos e microscópicos. Por exemplo, Usa-se poli(ácido lático-co-ácido glicólico) para modificar/melhorar propriedades do

Colágeno para as células aderirem melhor a fibra [11–Kwon2017]. Além disso, normalmente há uma porosidade mínima desejável dentro de determinadas aplicações que se tem o mesmo objetivo, caso a porosidade não seja suficiente, pode-se propor estudos futuros onde se realiza a modificação [30–Pouponneau2020]. A adequação pode ser na mudança do material fiado, no nosso grupo de trabalho a eletrofiação com poliuretano é interessante para gerar mantas com porosidade suficiente para a adesão e proliferação celular [44 - Gabriel 2017]. sendo, portanto, um material interessante para a engenharia de tecidos [45 – Cardoso 2011].

Ainda em aplicações biomédicas, se faz a eletrofiação já adicionando elementos com características interessantes como nanopartículas de prata. Onde, neste caso, o objetivo é aproveitar sua capacidade de prevenir infecções e coloca-la dentro de curativos para feridas ficando esta, bem distribuída no material eletrofiado [18– Alijohani 2021]

Também se faz um material com propriedades físicas interessantes. Por exemplo, [19 – Arrieta 2020], que fez um policaprolactona eletrofiado com celulose microcristalina e poli(3-hidroxiбутирато), com aumento de produção da fibra de forma ecológica. As membranas produzidas podem ter aplicações em curativos, filtros, embalagens dentre outras coisas. Além de que as propriedades físicas, como estabilidade térmica, alta flexibilidade e boa resposta mecânica abrem possibilidades para aplicações de produtos industriais eletrofiados e ecológicos.

Outro exemplo são membranas fibrosas de nanocompósitos poli(ácido L-láctico) (PLLA)/ nanocompósitos de hidroxiapatita (HA), promissoras para engenharia de tecidos e mais estudos sobre sua citotoxicidade e crescimento celular são necessários a ser conduzido pelo nosso grupo. O a análise Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier mostra que HA está presente na fibra de PLLA. Portanto, este é um material que deve ir para o teste in vitro, onde cultiva-se células no tecido e verifica a adesão e interação das células com o mesmo [46 – Geraldine 2012].

1.4.2 - Teste in vitro

Testes utilizando células se faz após o material novo ou modificado ser testado de outras formas, onde geralmente os pesquisadores indicam a necessidade do mesmo. O teste in vitro pode servir para comparar diferentes tipos de materiais para a mesma finalidade. Como em [49 – kwak 2017] que compara gelatina de mamíferos com gelatina de peixe. Onde a gelatina de peixe não precisou de controle de temperatura como as gelatinas de mamíferos. O teste de viabilidade celular revelou que a estrutura das fibras feitas de gelatina de peixe nanofibroso feito por eletrofiação, apresentou boa adesão celular e uma boa taxa de proliferação em comparação com a forma de filme de

gelatina de peixe. Além disso, essas estruturas de gelatina de peixe nanofibrosa têm boa citocompatibilidade, semelhante às fontes de gelatina de mamíferos [49 – kwak 2017]. Portanto, estes casos corroboram para mostrar que o método de eletrofiação permite um aspecto poroso no material formado, por outro lado a etapa de testes in vivo permite testar diferentes materiais e verificar melhorias quanto citocompatibilidade e simplicidade do processo.

1.4.3 - Teste in vivo

Esta etapa se faz após verificar-se em laboratório que muito provavelmente o material não terá reações alérgicas, rejeições ou qualquer adversidade do tipo. Um exemplo é quando já se aplica o material diretamente em um animal vivo, sendo um exemplo [42 – Yang 2020] que faz Redes de polímeros impressas em 3D funcionaram com boa aderência para as células com os testes em vivo utilizando roedores de laboratório. Além de não perder a sua forma e manter suas propriedades físicas. Outro exemplo e em [29 – Polat 2020] que faz a fabricação de materiais para liberação prolongada de fármacos no tratamento de ceratite. Esta é um tipo de infecção aguda de córnea, onde os tratamentos e medicamentos atuais não são suficientemente eficazes. O método que permite uma liberação prolongada do fármaco, necessita de menos aplicações clínicas e reduza taxa de rejeição por parte do paciente. Já o teste clínico, se faz já com o paciente, após todas as etapas anteriores, garantindo uma alta confiabilidade para os resultados.

1.5 – Parametrização de Eletrofiação

Com o objetivo de compreender a parametrização do experimento, verifica-se diversos parâmetros e a correlação entre eles. Sendo esses parâmetros a distância percorrida pelo fio e a tensão a qual este fio está submetido influenciando na fibra formada, sobretudo em seu diâmetro.

1.5.1 - Parâmetro de Distância

A distância entre a agulha e o anteparo está em função da tensão e da solução a ser utilizada. Diferentes soluções apresentam diferentes faixas de tensão e distancia possíveis para que seja formado o cone de Taylor e, conseqüentemente, ocorra a fiação de forma desejada. Por exemplo com uma solução de policaprolactona em trifluoretanol pode precisar de uma tensão de 4kV até 13kV conforme é variada a distância [9 – Joy2020]. Por outro lado, ao trocar o fluido para etanol

ou metanol, passa a ser necessária uma tensão compreendida aproximadamente entre 2,5kV e 3,0kV para que seja devidamente formado o cone de Taylor [10 - Kim2020]. Cabe ressaltar que para uma relação entre a distância e tensão, modificadas porem que se compensem, que teoricamente teria o mesmo comportamento prático, por ter gradiente de tensão semelhante, na prática o cone de Taylor ainda apresenta diferenças nestas condições [9 – Joy2020]. Além disso, uma modificação no gradiente de tensão pode alterar a corrente, e esta última é correlata com as partículas de maior velocidade dentro do cone de Taylor [10 - Kim2020]. Portanto, possível trabalhar de 2 a 50cm conforme mostra a Fig. 03.

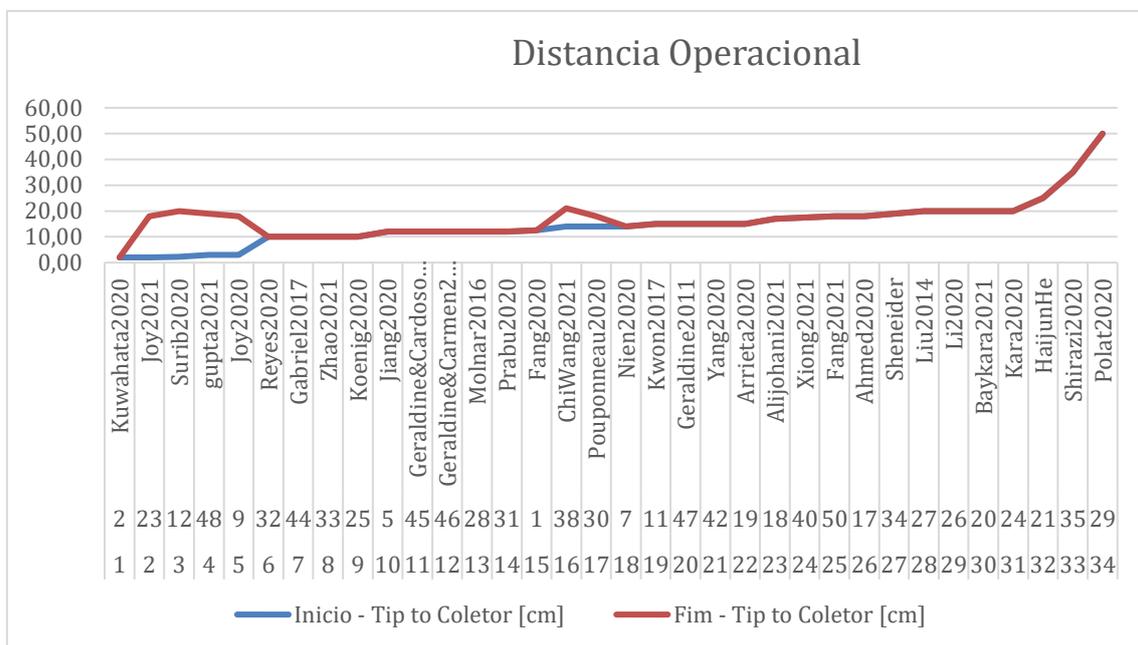


Fig. 03: Distância percorrida pelo fio submetido ao campo. - Imagem: Autor

1.5.2 - Relação entre distância e Tensão

A obtenção da distância ocorre após a escolha da solução polimérica. Pois esta determina uma faixa de possibilidades dentro de um gráfico *Distância x Tensão*, onde para cada distância determinada existe um intervalo de tensão possível e vice versa. Conforme mostra a Fig. 04. formada pelos dados obtidos a partir de uma solução de policaprolactona em trifluoretanol a 11% (v/v) [9 - Joy2020].

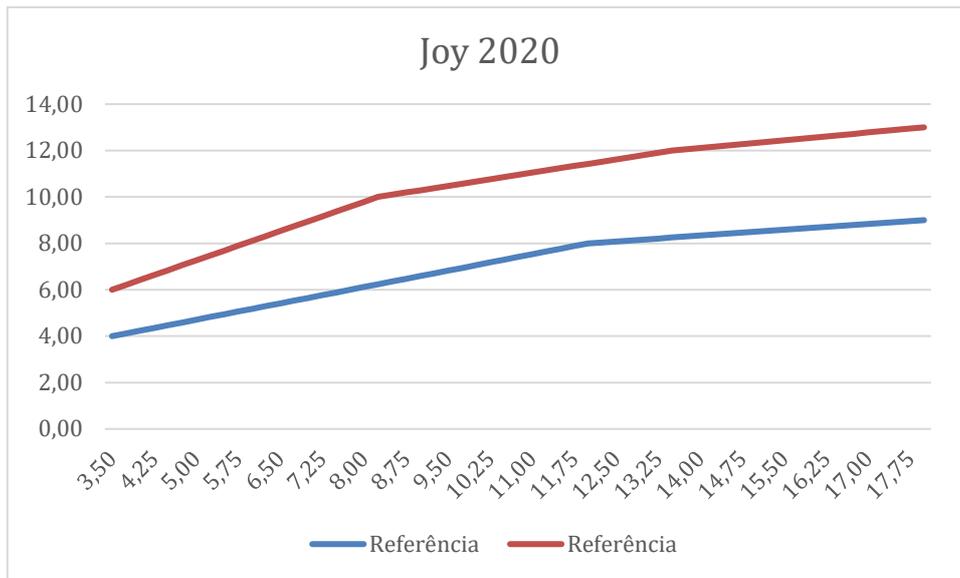
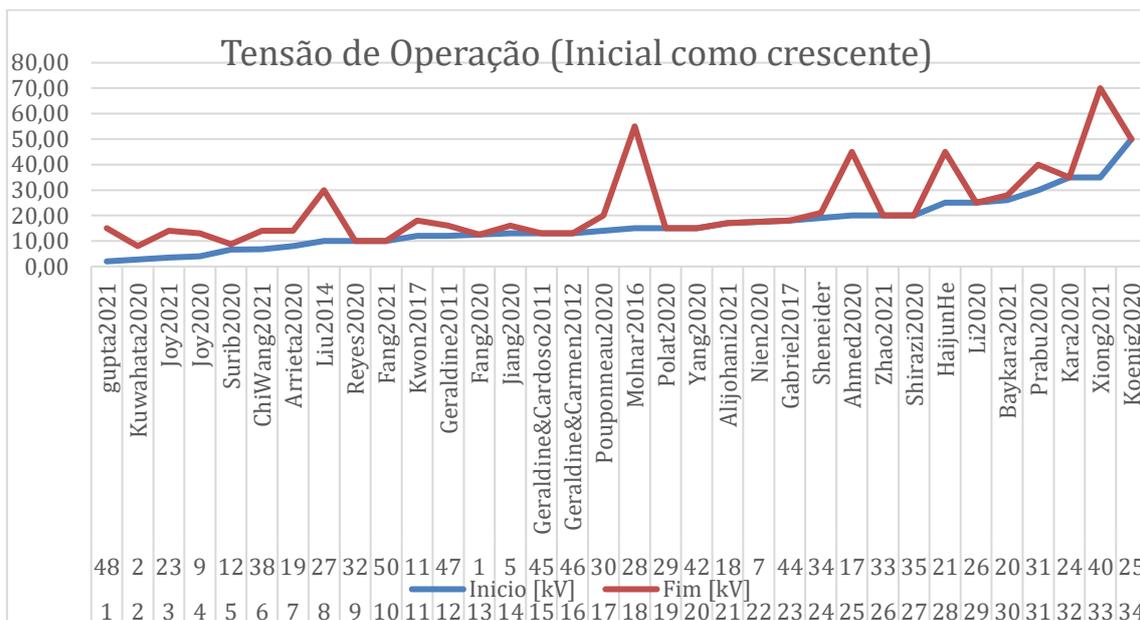


Fig. 04- Dados obtidos a partir do artigo [Joy 2020] mostrando a faixa de operação do experimento para uma solução policaprolactona trifluoretanol. - Imagem: Autor

Desta forma nota-se que uma fonte de tensão que alcance algum valor entre 4 e 13 kV de forma estável, porém uma faixa mais estreita de tensão é determinada ao se fixar uma distância específica. Portanto essa faixa mais estreita é onde possível realizar o experimento com a solução policaprolactona em trifluoretanol para aquela distância escolhida. Normalmente há uma faixa de operação, contudo geralmente o resultado do material fiado é sensível a tensão escolhida [20 - Baykara2021]. A fig. 05 mostra as tensões utilizada por diversos autores.



1.5.3 - Parâmetros de Tensão para Diâmetro

A quantidade de solução que sai da seringa é configurada através de uma bomba que empurra o êmbolo. O fluxo ideal varia de acordo com a solução utilizada e o resultado desejado, sendo ordem de grandeza da vazão de ml/h [11 – Kwon2017]. Uma forma de obter determinado diâmetro é, para uma mesma solução, manter a distância e alterar apenas a intensidade do campo elétrico, nestas condições, ao aumentar o campo elétrico, diminui-se o diâmetro da fibra [11 – Kwon2017]. Por outro lado, quanto maior a vazão, maior deve ser a tensão, em volts, necessária para romper a tensão superficial, contudo, ao produzir material mais rapidamente, há uma mudança na morfologia observada que pode ser indesejada [12 - Surib2020]. Contudo, não se pode aumentar indeterminadamente o fluxo, por conta de a solução não evaporar com fluxo demasiadamente alto. Portanto, para uma dada solução e distância do anteparo é determinada um fluxo máximo que normalmente é obtido de forma empírica [9 - Joy2020]. Já o limite mínimo não é explorado por conta da baixa velocidade de formação da manta de fibra, reduzir demais este fluxo tornaria o experimento desnecessariamente demorado. Para este trabalho, serão utilizadas as soluções que forem possíveis dadas as limitações de tensão da fonte construída.

1.5.4 – Potenciais intermediários

É possível colocar potenciais intermediários como forma de alterar as linhas de campo elétrico alterando também o resultado do experimento. Por exemplo, colocando anéis com determinados níveis de tensão, pode-se reduzir o nível de chicoteamento da região de instabilidade e concentrar o material em uma região menor. Onde o nível de tensão do anel precisa ser baixo o suficiente para que a fibra passe por dentro dele, e alto o suficiente para que a fibra não seja atraída por ele [48 – Gupta 2021].

1.6 – Diâmetro controlado por formas alternativas

O diâmetro pode ser alterado por algum parâmetro do método ou por acréscimo de algum aditivo na solução polimérica. Por exemplo, quando se utiliza uma metodologia que não a padrão, por exemplo sem agulhas, outros fatores podem influenciar no diâmetro da fibra, no caso de substituir a agulha por um cilindro maciço, onde no topo desse cilindro é depositada a solução na superfície em forma de disco, é observado que o diâmetro do cilindro altera o diâmetro da fibra formada, bem como a qualidade da mesma [17 - Ahmed2020]. Outra possibilidade também é

quando se utiliza o efeito Weissenberg para fiar com uma haste rotativa dentro de um recipiente com a solução, nesse contexto quanto maior a relação entre o ângulo de transição e o ângulo do vértice da haste, mais fina é a fibra, por outro lado, quanto maior a distância entre a ponta do cone de Taylor e a ponta da haste, mais larga é a fibra [21 - HaijunHe2020]. Há uma relação também entre a altura do cone e o diâmetro da fibra, conforme indica [3 - he2020] portanto, algo macroscópico, que é o cone, pode indicar características microscópicas.

Em relação a redução do diâmetro da fibra utilizando aditivos. É possível utilizar de corantes de base biológica como condutores, no sentido de aumentar a condutividade elétrica da solução e facilitar o processo de eletrofiação. Sendo estes corantes de base biológica alizarina, hematoxilina e quercetina como condutores aditivos no processo de fusão-eletrofiação e produziram fibras na faixa de micrômetros. Todos corantes e combinações de corante/plastificante contribuíram para a desejável redução do diâmetro da fibra. A melhor eficiência foi com adição de 2% (g/g) onde para cada corante houve uma redução de 60% a 70% no diâmetro da fibra. [25 - Koenig 2020], além disso, adicionar materiais condutores pode deixar as fibras mais uniformes, ao eletrofiar PVOH/Ag, é mais fácil obter nanofibras mais uniformes em alta concentração de Ag, em torno de 20% a 30% em massa [53 - Costa 2011]. Outra forma de fazê-lo é adicionando sal ou íons transitórios, Quanto maior a quantidade de sal, maior é a velocidade do fluido no cone de Taylor [36 - Li2020]. Além disso, em simulação computacional das moléculas no cone de Talylor, verificou-se que íons não afetaram significativamente a natureza do processo, mas facilitaram a transporte de cadeias poliméricas para o jato e melhorou a evaporação do solvente [22 - Jirsák2020]. Outra forma de alterar o diâmetro da fibra é alterar o sistema de solventes. Variando a solução e concentração de solventes o diâmetro da fibra é alterado [47 - Geraldine 2011]. Além disso, é possível controlar o diâmetro da fibra ao controlar as concentrações de cada componente da solução [60 - Gönen 2014].

Além disso, um aumento na concentração polimérica pode aumentar o diâmetro da fibra. Com o aumento da quantidade de polímero por solvente a solução pode se tornar menos condutiva. Desta forma observa-se um menor chicoteamento na zona de instabilidade e também um aumento no diâmetro da fibra como em [26 - Li2020]. Ainda se pode afirmar que é possível controlar o diâmetro médio da fibra controlando a umidade, onde umidade menor geraria fibras mais espesas e conforme aumenta a umidade, passa a ser obtidas fibras mais finas [59 - Pelipenko 2013] Portanto, há diversas formas de controlar o diâmetro da fibra e a forma mais adequada deve ser escolhida cuidadosamente de acordo com o objetivo.

1.7 – Modificações na Característica Física e Mecânica

Para a obtenção das características físicas desejadas é possível fazê-lo de duas formas, alterando a solução, ou alterando o processo. Como os já citados, [5 - Jiang 2020] que forma compósitos de grafeno para utilização em baterias avançadas; ainda dentre os já citados [50 – Fang 2021], que mostra que é possível fazer materiais mais resistentes e com melhor resistência a fratura e com Baixa emissividade de infravermelho, veículos furtivos. Além desses, pode-se citar [34 – Shneider 2021] onde desenvolveu-se um método para trabalhar as fibras epóxi individualmente. O material teve um expressivo ganho em características mecânicas, sendo cerca de 80% maiores em resistência e rigidez em comparação com epóxi a granel e impressionante 900% em plástico máximo alongamento e 1200% em tenacidade efetiva. Onde a melhora se deve provavelmente a orientação molecular do material epóxi no sentido do campo. Já no sentido de alterar o processo, tem-se [33 – Zhao2021] que preparou nanofibras ocas a partir de três soluções poliméricas diferentes, formando um material mais flexível e resiliente no anteparo. A miscibilidade e a ligação de hidrogênio intermolecular entre os três componentes são indispensáveis para a formação de hélices com fibras ocas. Com base no mecanismo de formação de fibras. Com os polímeros TPU/CA/PEO para a formação de nanofibras ocas. A diferença de flexibilidade entre os polímeros é o que gera o comportamento helicoidal observado. A formação oca e helicoidal é essencial para alcançar as características de resiliência e fofa da fibra. Portanto, embora seja mais comum modificar a solução polimérica com o objetivo de alterar as propriedades físicas do material eletrofiado, também é eficaz modificar o processo de eletrofiação para a finalidade de alteração nas características mecânicas do material.

1.8 -Influência de Umidade

A umidade pode ser determinante para o funcionamento do experimento. Quanto maior a umidade, mais difícil fica a evaporação do solvente, onde, em determinado nível pode tornar o experimento inviável. A umidade, além de modificar o jato ejetado, ela também pode distorcer e até romper o cone de Taylor. Tornando o processo de eletrofiação instável e incontrolável. No caso de utilização etanol por exemplo, a razão da instabilidade é condensação de água no polímero dissolvido, que se deve ao rápido resfriamento do cone de Taylor à medida que o álcool evapora. Além disso, a condensação da água libera calor latente que acelera a evaporação do álcool. Assim o solvente se deteriora rapidamente e o polímero encontra o anteparo com um aspecto de gel. A instabilidade do cone conforme a umidade aumenta também significa que a formação de fibras não poderá ser assegurada [32 – Reyes 2020]. Além disso, a incidência de luz ultravioletas nas

amostras podem alterar a característica hidrofílica do material alterando seu comportamento frente a umidade [57 - Zhang 2019]. Outro detalhe é que ao fiar poli-vinil-álcool, embora seja possível fiar a 60% de umidade relativa, as fibras vão estar fundidas no anteparo, outro ponto é que para uma diferente umidade relativa gera um diferente diâmetro médio [58 - Vrieze 2008] conforme mencionado no tópico sobre controle de diâmetro; ainda se pode afirmar que é possível controlar o diâmetro médio da fibra controlando a umidade, onde umidade menor geraria fibras mais espesas e conforme aumenta a umidade, passa a ser obtidas fibras mais finas [59 – Pelipenko 2013] conforme mencionado no tópico sobre controle de diâmetro. Portanto, o controle no nível de umidade, preferencialmente baixo, é necessário para que haja formação de fibras e que estas tenham qualidade.

1.9 – A Diferença Entre Sentido Vertical e Horizontal na Eletrofiação

A depender da solução, pode haver maior ou menor diferença. Normalmente a maior diferença observada é em relação a porosidade do material formado, que, por conta da gravidade, pode-se ter um maior achatamento na vertical. Contudo, diferentes materiais reagem de formas diferentes, não sendo possível determinar a melhor forma sem antes fazer o experimento das duas formas [43 – Suresh 2020].

1.10 – Eletrofiação Sob Influência de um Campo Magnético

A eletrofiação com campo magnético pode interferir na qualidade da fibra, diminuição do chicoteamento e orientar a fibra no sentido do campo magnético. Por exemplo em a presença do campo magnético permite que a fibra com nanopartículas de Fe_3O_4 embutidas apresente diâmetros consistentes e com qualidade [37 - Wang 2018]. A abordagem magnética se mostra ser uma forma muito eficaz e econômica de controlar a instabilidade [41- Xu2019]. Este artigo também mostra que a validade do campo eletromagnético pode controlar a precisão na colocação via eletrofiação [41- Xu 2019]. As principais conclusões incluem: As partículas carregadas apontam para os pólos N e S na posição do momento magnético e desviam e giram em uma direção; A região de localização de fiação das nanofibras foi significativamente alterada.[41- Xu 2019]. O campo magnético pode influenciar o jato carregado a uma distância apropriada, assim o

jato eletromagnético inicial. O campo altera e orienta o ponto de fiação no processo de fiação sob uma área em um sistema [41- Xu 2019].

1.11 - Parâmetro de Fonte – Tensão e Ripple

Os parâmetros alvo da fonte de tensão tem como referência, para nível de tensão, os artigos [1-12]. Porém estes, não especificam o Ripple tolerável para o experimento. Sendo assim, esta informação foi obtida dados do fabricante Nanolab Instruments Sdn Bhd. Segundo o manual do kit model BS-35V-20-ESW do onde o nível de tensão da fonte é de 0 a 30kV e o Ripple é definido como menor que 0,1%, significa, portanto, que a instabilidade no nível de tensão é de 0,1% em relação a tensão nominal. Contudo, conforme os artigos citados, a tensão necessária varia de acordo com a solução. Por exemplo ao trabalhar com etanol ou metanol é necessária uma tensão entre 2,5 e 3,0 kV [10 - Kim2020], já para trabalhar com policaprolactona trifluoretanol, pode-se utilizar de 4 a 13 kV [9 – Joy2020] e para trabalhar com polilactídeo-co-glicolídeo em água a 25% é possível trabalhar de 12 a 18 kV [11 – Kwon 2017]. Contudo, o artigo [9 - Joy2020] demonstra que, para uma dada distância e solução, é determinada uma faixa de tensão. Portanto é possível inferir, que conseqüentemente, para uma dada tensão e solução, é possível calcular uma distância onde aquela solução pode trabalhar, desde que dentro da faixa operacional. Sendo assim, é determinada uma tensão alvo de 13,6 kV e um Ripple máximo de 0,1%.

1.12 - Obtenção de Alta Tensão em Método Cockcroft-Walton (CW)

A obtenção de alta tensão por meio de um multiplicador CW pode atender às especificações necessárias para a eletrofiação pois é comum que seja alcançado níveis de tensão muito superiores ao utilizado na eletrofiação. Enquanto que, para a eletrofiação normalmente se utiliza tensão a partir de 2,5kV [10 - Kim2020], 18kV [11 – Kwon 2017] ou até 30kV [54 -Cunha 2016] a utilização do método cw permite a obtenção do nível de tensão próximo à faixa de eletrofiação, por exemplo [13 – Park2019] obteve 2,25kV, cabe ressaltar que quanto mais estágios, maior é a queda de tensão por estágio [13 – Park2019]. Além disso, é comum obter níveis consideravelmente maiores de tensão. Como [14 – Ma2016] que obteve 250kV, [15 - Zhao2020] com 300kV ou ainda [16 – He2011] com 1,2 MV. Portanto, é factível alcançar um nível de tensão operacional para eletrofiação através do método CW.

1.13- Fator Ripple em Alta Tensão no Método CW

Além do nível de tensão, também se faz necessário um Ripple cujo valor não afete a qualidade da fibra obtida. Tendo como referência o kit model BS-35V-20-ESW que tem Ripple abaixo de 0,1% nota-se que se o nível de tensão for muito alto, o Ripple pode se tornar muito significativo. Por exemplo [15 – He2011] obteve 1,2 MV porém com Ripple em 9,4%, muito acima do desejável para a aplicação de eletrofiliação. Por outro lado, com menos tensão, a estabilidade já aumenta, [16 – Ma2016] que obteve 250kV e Ripple em 0,64%, que é pouco acima da referência de 0,1%, portanto é possível que com este nível de Ripple a fibra obtida tenha qualidade satisfatória.

1.14 – Cone de Taylor

O cone de Taylor é formado pela solução na ponta da agulha. A sua forma depende de vários parâmetros como tensão superficial da solução, condutividade da solução e gradiente de tensão do campo elétrico. Quanto maior a queda de tensão por centímetro, mais curto é o cone e menor é o seu ângulo [23 – Joy 2021]. Há uma relação também entre a altura do cone e o diâmetro da fibra, conforme indica [3 – He 2020]. portanto, algo macroscópico, que é o cone, pode indicar características microscópicas.

As Equações que descrevem o cone de Taylor [51 – Gañán 2013]

$$E_s \sim E_n^{cone} \sim \left(\frac{\sigma}{L\epsilon_0}\right)^{1/2}$$
$$I \sim K d^2 E_s \sim \frac{Q}{d} \epsilon_0 E_n$$

CAPITULO 02 - CÁLCULO E SIMULAÇÃO

Neste capítulo são abordados métodos matemáticos e simulações geradores de parâmetros que norteiam a parametrização do experimento e a montagem da fonte.

2.1 - Cálculo de Parametrização

Busca-se entender como as grandezas de parametrização se relacionam com o experimento. De modo que seja determinado quais os intervalos possíveis, ou seja, para quais valores destes parâmetros o experimento é viável.

2.1.1 - Distancia Operacional por Mínimos Quadrados

Conforme já mostrado neste trabalho, há uma relação entre distância e tensão para o experimento de fiação. Portanto, para melhorar a compreensão em relação a estas variáveis, foi realizado o cálculo da função matemática que delimita os limites máximo e mínimo para uma dada solução.

A partir dos dados oferecidos por Joy et all [2020] é possível utilizar o software Microsoft Excel (2016) para verificar entre diversas funções como: exponencial, logarítmica, linear e polinômio de grau N, qual mais se aproxima dos dados empíricos através do método de mínimos quadrados. Sendo a forma mais adequada verificada a função polinomial de segundo grau, cuja curva de tendencia é mostrada na Fig. 06.

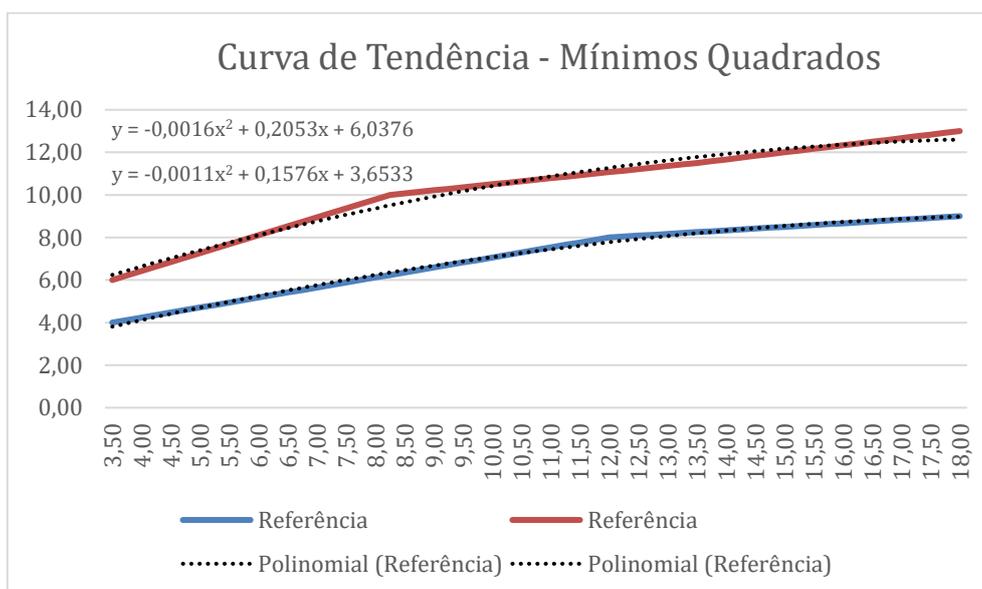


Fig. 06 Curva de tendencia utilizando o método de mínimos quadrados disponível no software Microsoft Excel (2016) de aproximação por polinômio de segundo grau. - Imagem: Autor

Cabe ressaltar que o método leva em consideração todos dados disponibilizados de modo que exista a menor distância possível entre a curva obtida e os dados obtidos, sendo que a curva resultante mantenha a característica polinomial de grau 2. Além disso, outras curvas foram testadas, como logarítmica, linear, contudo, a polinomial de grau 2 é a que mais se aproxima dos dados obtidos.

As equações obtidas através do método de mínimos quadrados através do software Microsoft Excel (2016) são:

$$V_1 = -0,0016x^2 + 0,2053x + 6,0376$$

$$V_2 = -0,0011x^2 + 0,1576x + 3,6533$$

As equações ajudam a compreender a natureza do experimento, permitem extrapolar os limites do intervalo utilizado e há uma expectativa de que outras soluções tenham comportamento

semelhante. Por outro lado, para correlacionar a equação com outras características como viscosidade e concentração, são necessários que se obtenha tabelas semelhantes a de Joy et al [2020] porém para várias outras soluções até que se possa inferir uma correlação entre tais parâmetros.

2.1.2 - Distância Operacional pela Equação da Parábola

Além disso, foi realizada também uma aproximação utilizando um segundo método. Na figura X2 foi utilizado três pontos escolhidos arbitrariamente como mais relevantes que aparecem na tabela X, deste modo, três pontos determinam uma parábola, sendo esta, o resultado obtido e mostrado na Fig X2 em amarelo e cinza.

Curva	Ponto 01	Ponto 02	Ponto 03
Parábola 01	3,50 - 5,95	8,25 - 9,93	18,00 - 13,16
Parábola 02	3,50 - 3,84	12,00 - 8,12	18,00 - 8,92

Tabela 01 – A informação mostra os três pontos escolhidos para determinar cada parábola.

As equações das parábolas se referem ao limite máximo V_1 e mínimo V_2 de tensão. Portanto, dada uma distância D do anteparo, conseqüentemente a tensão precisa estar contida no intervalo:

$$V_2 < V_x < V_1$$

Onde, para a solução de policaprolactona temos:

$$V_1 = -0,2556x^2 + 0,9x + 1$$

$$V_2 = -0,035x^2 + 1,25x + 2$$

Onde V_1 e V_2 estão descritos em [kV], D em [cm].

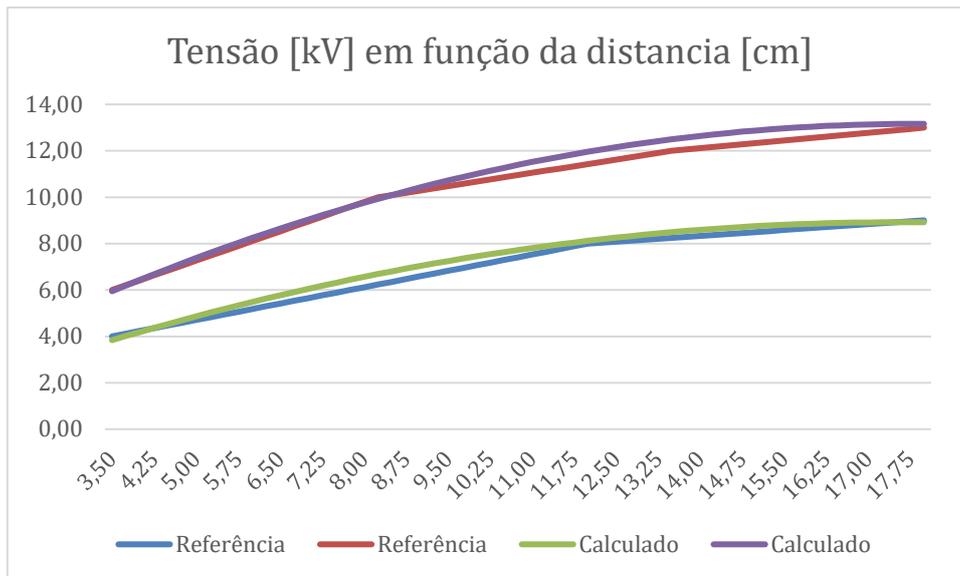


Fig. 07. Em azul e laranja os dados obtidos pela referência [Joy2020] e em amarelo e cinza as parábolas determinadas pelos dados selecionados. - Imagem: Autor

Na Fig. 07. estão sobrepostos os dados do artigo referência e as parábolas calculadas através dos três pontos anteriormente escolhidos. Nota-se uma razoável aproximação entre os dados da referência e as parábolas calculadas, permitindo, portanto, utilizar as equações para determinar o intervalo de tensão necessário para a referida solução e uma dada distância dentro do intervalo observado e uma pequena extrapolação dos limites trabalhados. Contudo, a pequena variação compreendida entre os dados empíricos e calculados através da equação são suficientemente pequenos dado que o limite não é um ponto específico e sim uma região onde o experimento gradualmente perde qualidade.

2.2 - Relação entre Tensão e Distância

Uma forma de interpretar e compreender o experimento é fazer a relação entre a tensão e distância utilizada. Portanto na tabela abaixo verifica-se que a maior parte das referências tem uma preferência por estar entre 1kV/cm e 2kV/cm.

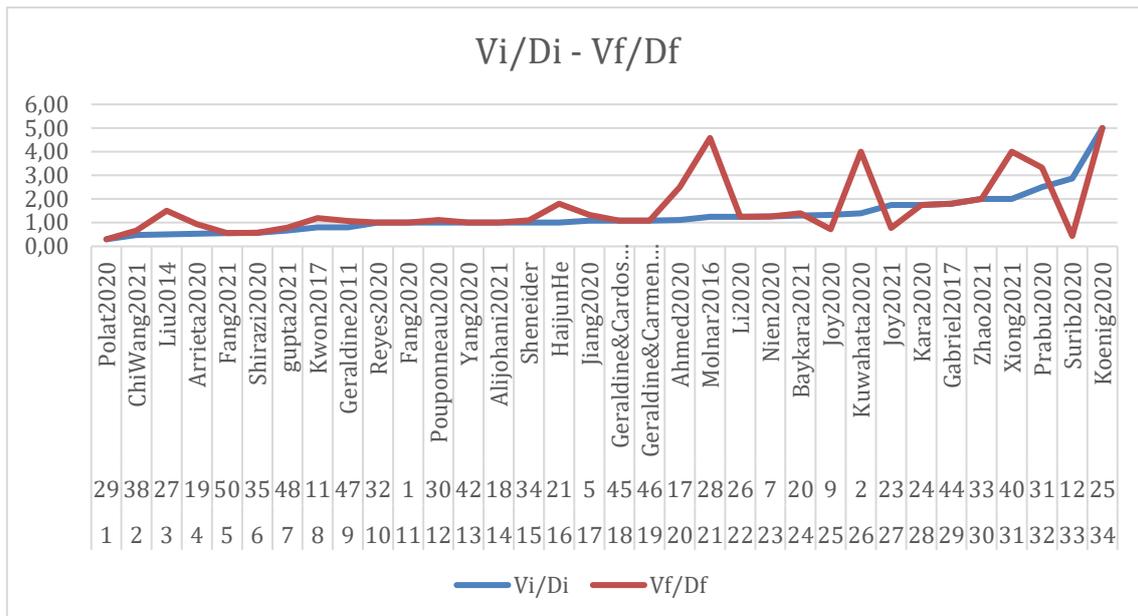


Fig. 08. Relação entre Tensão e distancia, dividindo tensão inicial por distancia inicial, tensão final por distância final. - Imagem: Autor

2.3 – Nível de Tensão

Segundo os artigos [13 - Park2019], [14 - Ma2016], [15 - Zhao2020] e [16 - He2011] é possível alcançar, com um circuito CW, um nível de tensão da ordem de 10^6V . Contudo, para o experimento é necessário apenas uma tensão da ordem de 10^3V , o que se mostra, portanto, factível.

Com o objetivo de alcançar 6,7 kV de tensão. Utiliza-se então um circuito CW partindo de uma tensão de 200v, são necessários 34 estágios. Cujas formula (1) da tensão de saída é descrita como uma proporcionalidade da tensão de entrada e o número de estágios.

$$V_{out} = N \times V_{in}$$

Onde V_{out} , V_{in} e N são respectivamente tensão de saída, tensão de entrada e número de estágios. Contudo, a simulação em 50Hz não ultrapassa 20% do valor desejável na tensão de saída. A tensão de entrada é uma onda quadrada sem componente CC. O parâmetro limitante é a baixa impedância capacitiva comparando-se com a resistência interna do capacitor. Contudo, já sendo utilizado na simulação o capacitor de capacidade de tensão em 450v de capacitância em 4,7uF que é o melhor possível dentro das opções comercialmente disponíveis. Portanto, a solução é

aumentar a frequência do circuito, de modo que as 22 novas simulações geram o gráfico de tensão em função da frequência, mostrado na Fig. 09.

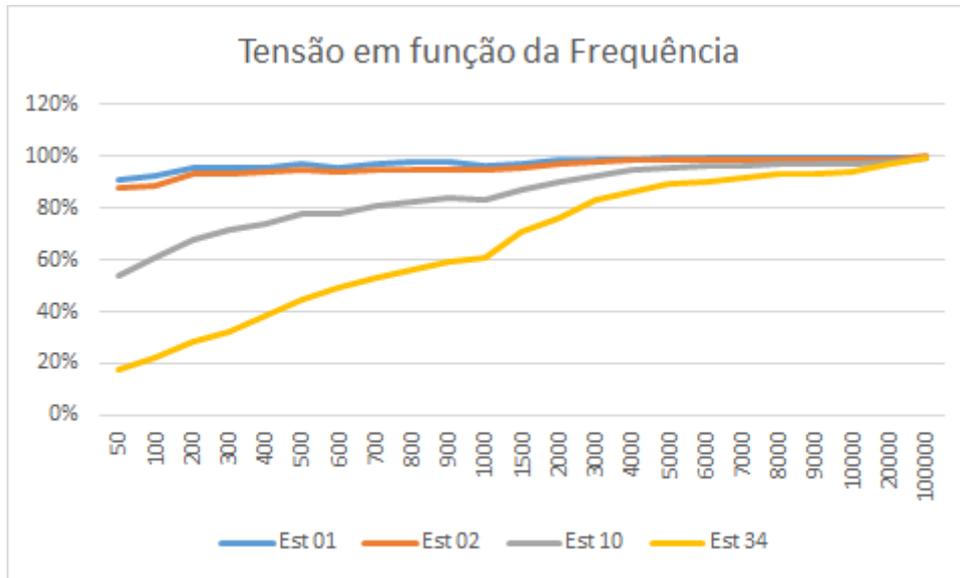


Fig. 09. Gráfico obtido pela simulação no software Protheus 9.1. - Imagem: Autor

O gráfico da Fig. 09 demonstra que, quanto maior o número de estágios no multiplicador CW maior precisa ser a frequência para que seja alcançada a tensão desejada.

2.4 – Ripple Simulado

A tensão de Ripple é um parâmetro de qualidade de energia. Para um dispositivo electrospinning o parâmetro levado em consideração é o mesmo utilizado pelo fabricante de fontes para este fim [kit model BS-35V-20-ESW] de 0,1% no máximo de tensão de Ripple.

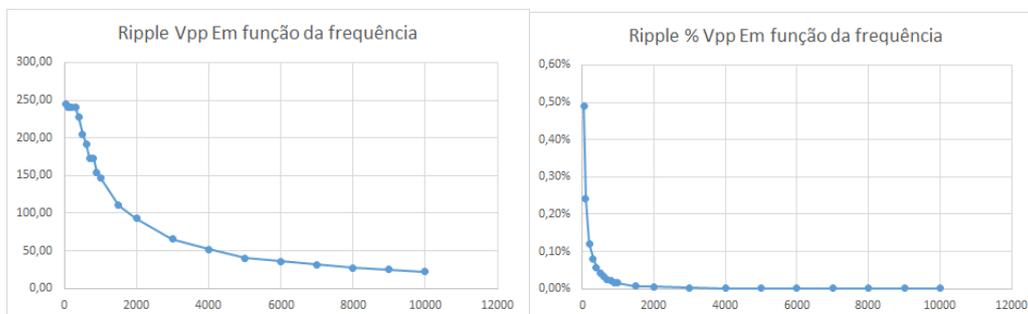


Fig. 10 – Gráfico de vpp ripple em termos absolutos (a) e relativos (b). - Imagem: Autor

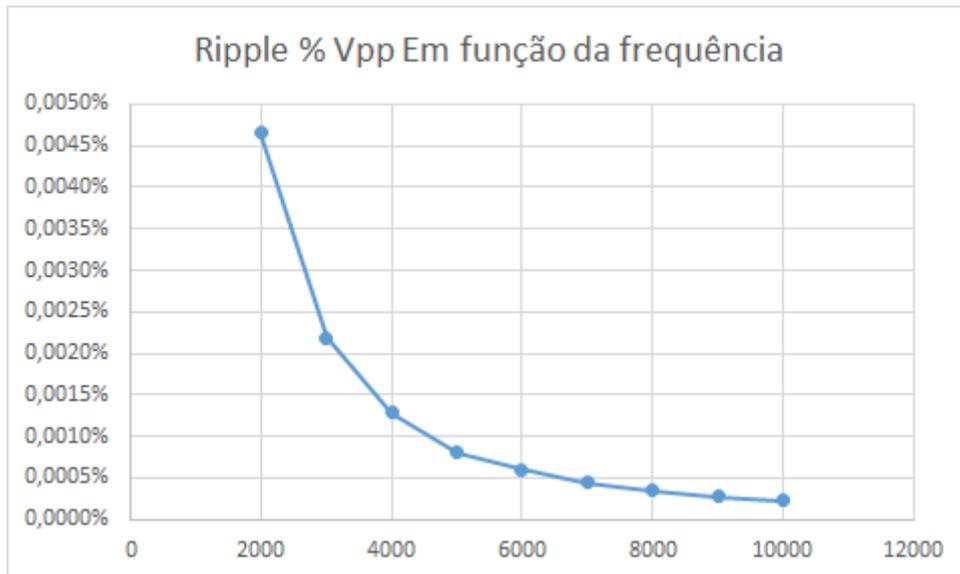


Fig. 11 - Gráfico de vpp estritamente da faixa de frequência de interesse (c). - Imagem: Autor

Os gráficos apresentados mostram que, quanto maior a tensão menor o Ripple, que diminui em termos de tensão Vpp absoluto, diminuindo mais ainda em termos relativos, onde a partir de 2kHz já se mostra abaixo de 0,005%. Muito abaixo do mínimo necessário. Contudo a faixa de frequência de maior interesse, entre 20kHz e 100kHz não aparece no gráfico por conta do limite computacional da máquina disponível para a simulação.

2.5 – Projeto de Fonte

A partir das especificações de frequência necessária para o funcionamento do CW faz se necessário um projeto de circuito que atenda esta necessidade. Sendo assim selecionado o circuito integrado (CI) SG3525 que tem a capacidade de frequência demandada, sendo adicionado também mosfets e um conversor CC/CC para que seja possível entregar um nível de tensão que excede o limite do CI SG3525. Além disso, também há um transformador com núcleo de ferrite com derivação central, sendo assim, possível utilizar o semi-ciclo negativo, o núcleo de ferrite permite trabalhar em altas frequências. O circuito mencionado tem seu esquema em blocos, Fig. 11, para simplificar o entendimento.

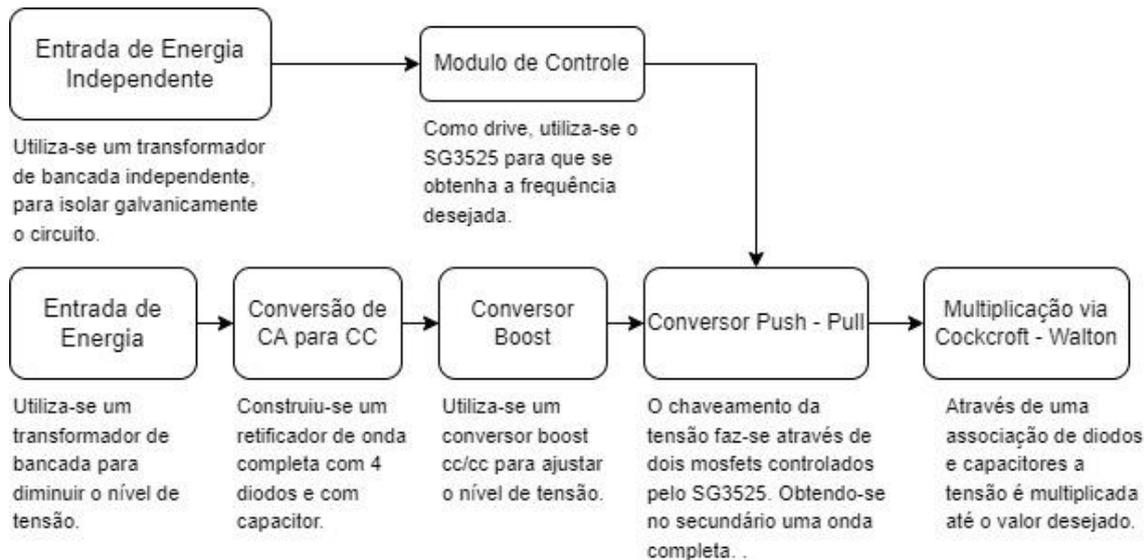


Fig. 11 – Esquema em blocos. - Imagem: Autor

Portanto, é necessário um circuito capaz de entregar uma frequência de 2kHz ou superior para que o Ripple se aproxime das especificações de tensão de saída do kit BS-35V-20-ESW do fabricante Nanolab Instruments Sdn Bhd, tomado como referência.

2.5.1 – Micro controlador SG3525

Portanto, utiliza-se o circuito SG3525/LM358, Fig. XXX, que contém o micro controlador SG3525 responsável por gerar a frequência de chaveamento de até 100kHz e o Amplificador Operacional (opamp) LM358 atua no circuito feedback, que poderá ser utilizado caso necessário.

O esquemático do circuito mencionado, também mostra transistores sendo chaveados pelo SG3525 para que seja entregue nos pinos 2 e 4 a V_{cc} chaveada. Resultando em duas ondas quadradas de ciclos alternados.

As entradas do circuito têm as seguintes funções:

1. Entrada de tensão V_{cc} .
2. Saída 01 de onda quadrada.
3. Terra.
4. Saída 02 de onda quadrada.
5. Opto acoplador entrada positiva.
6. Saída do opto acoplador negativo.
7. Sinal fora pernas curtas.
8. Ajuste de Duty Cycle.

De modo que o ajuste de frequência é feito no potenciômetro presente no circuito. O circuito também inclui uma resistência em série com o potenciômetro que limita uma frequência mínima de 20kHz e o SG3525 tem uma capacidade máxima de 100kHz.

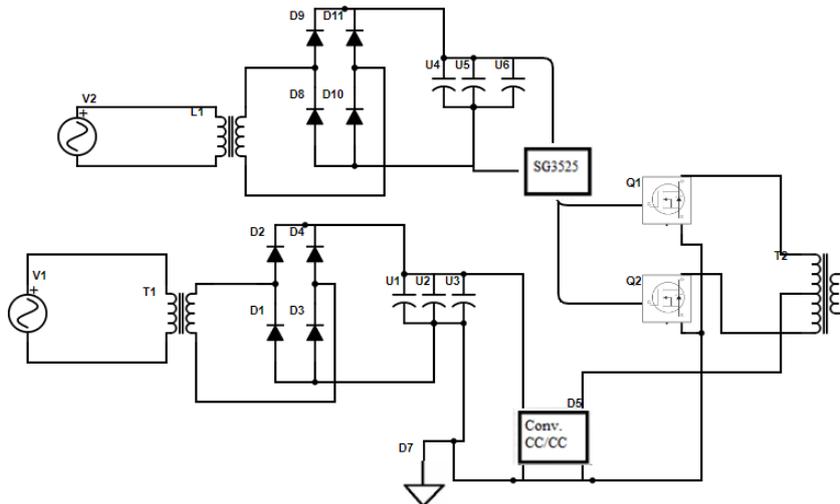


Fig. 12 – Esquemático do circuito de baixa tensão.

Portanto, os mosfets são chaveados pelo SG3525 em no nível de tensão que é entregue pelo conversor CA/CC, que é uma ponte retificadora de onda completa. Contudo os mosfets entregam ao trafo de ferrite a tensão que vem do conversor CC/CC que é ajustável. Desta forma, significa então que o ajuste de tensão de saída da fonte pode ser feito ajustando a tensão de saída no conversor CC/CC.

2.5.2 - Conversor Push-Pull

Para a construção deste conversor, que muda a forma de onda de corrente contínua para corrente alternada depende da escolha de mosfets, Q1 e Q2, além disso, também envolve o projeto do transformador T2, todos presentes no esquemático da Fig. 12.

2.5.2.1 - Circuito com Mosfets

Os mosfets são utilizados para aumentar o nível de tensão de entrada no primário do transformador de ferrite e também, em conjunto com o transformador, entrega a tensão em AC para a entrada do CW.

Como mostra o esquemático do circuito na Fig. 12.

2.5.2.2 – Transformador com Núcleo de Ferrite

A elaboração do projeto do transformador tem como objetivo atender as seguintes demandas do projeto:

1. Funcionar na faixa de frequência de 20kHz – 100kHz.
2. Capacidade de tensão de entrada de 127V primário e saída 254V secundário.
3. Capacidade de potência de 100W.
4. Ter derivação central.

Onde a faixa de frequência é determinada pela faixa de operação do SG3525 de 20kHz até 100kHz, onde a necessidade desta frequência se origina no CW projetado. Além disso, a capacidade de tensão no secundário está relacionada com a capacidade máxima de entrada de tensão para o CW limitada pela capacidade do capacitor utilizado no CW. Outro ponto é a potência especificada, que tem como referência o kit BS-35V-20-ESW já citado anteriormente, cuja potência máxima de operação está em de 30W, onde é importante buscar um sobredimensionamento para o caso de o ponto ótimo estar em tensões mais baixas, o que limitaria a potência para um valor ainda operacional. Por fim, a derivação central que está diretamente ligada ao esquema do circuito para o correto funcionamento.

Desta forma, é possível determinar:

1. A relação de transformação é 1:2 considerando $V_{In\ 1,2} : V_{out}$.
2. O fluxo magnético do material do núcleo (SIM) que é o do ferrite.
3. A dimensão do fio, que é determinada pelo cálculo de potência.
4. As dimensões do núcleo, que é determinada pelo número de espiras e dimensão do fio.
5. A área das espiras, que é determinada pelas dimensões do núcleo escolhido.
6. O número de espiras que depende principalmente da tensão utilizada e da área das espiras.

A metodologia utilizada consiste em partir de valores iniciais usuais para transformadores semelhantes e adaptar os valores dentro da fórmula de modo que fique adaptado para a solução desejada.

$$N = \frac{V_{in} \times 10^8}{4 \times F \times SIM_{m\acute{a}x} \times S}$$

Onde:

1. N é o número de espiras.
2. V_{in} é a tensão a qual a bobina está submetida.
3. S é a área da espira.
4. $SIM_{m\acute{a}x}$ é o fluxo magnético máximo operacional do material do núcleo.
5. F é a frequência mínima operacional do transformador, dado que para frequências maiores o Trafo necessita de menos espiras.

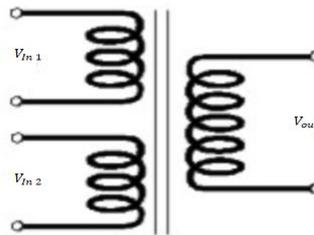


Fig. 13. Esquema do transformador indicando onde ficam as tensões de entrada e saída.

Sendo assim, foi utilizado o valor de $SIM_{m\acute{a}x} = 1500G$ determinado pelo material do núcleo, que é ferrite. A área inicial foi selecionada pelo núcleo de ferrite de fácil acesso no mercado, de modo a testar sua viabilidade de $S = 2,26 \text{ cm}^2$. As tensões foram definidas em $V_{In1} = V_{In2} = 127V$ e $V_{out} = 254V$. A frequência mínima de operação é determinada pelo limite mínimo operacional do SG3525/LM358 de $F = 20kHz$. Resultando em: $N = (53 + 53): 106$.

Restando apenas dimensionar a secção reta do fio, utiliza-se a fórmula:

$$P = V \times I$$

Onde a potência desejada é de 100W, com uma tensão de 127V, tem-se 1,27A, onde, para esta corrente será escolhido o fio de $0,26 \text{ mm}^2$.

2.5.3 – Circuito Multiplicador Tensão em CW

O circuito CW significa uma série de capacitores e diodos arranjados conforme Fig. 14.

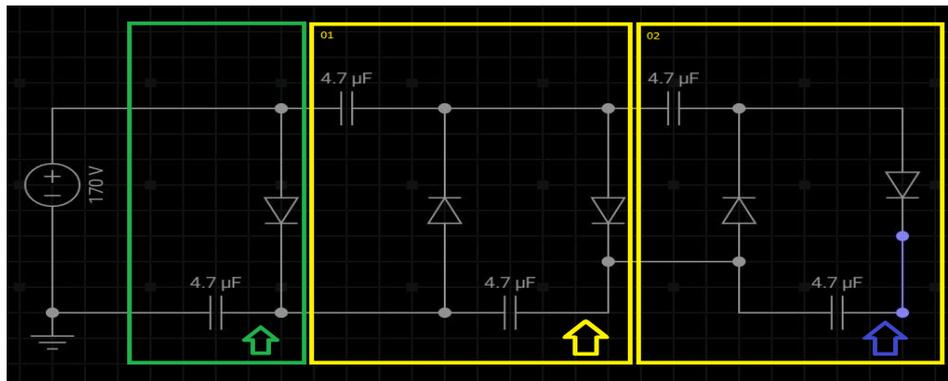


Fig. 14 – Ilustração de circuito Cockcroft – Walton montada a partir do simulador EveryCircuit. - Imagem: Autor

A escolha dos capacitores e diodos adequados ocorre a partir das simulações no Protheus v09 onde nota-se que o capacitor adequado teria tensão de 250v e capacitância de 4,7uF, onde a tensão de operação do capacitor determina o número de estágios e a capacitância permite manter o nível de tensão tempo suficiente para que o multiplicador funcione. Neste caso, o desejável é alta tensão de operação e alta capacitância. Contudo, normalmente, nos capacitores comercialmente disponíveis, quanto maior o nível de tensão nominal do capacitor, menor é sua capacitância. Por outro lado, o diodo comum 1n4007 já tem tensão reversa limite em 1000v e opera até 100kHz sem problemas.

2.5.4 – Ajuste de Tensão em conversor CC/CC

O conversor utilizado é o 600W 12A DC 8V To 16 V Or DC 12V To 60V AdjustableBoost Converter Power Supply Board Step-Up Module. O conversor foi escolhido por sua faixa operacional de tensão de entrada e saída. Pois aceita uma larga faixa de entrada, de 12V a 60V Sendo ajustável uma larga faixa de tensão de saída, de 12V a 80V. O módulo tem a limitação de corrente em 10A sem aparados adicionais de dissipadores de calor. Portanto, a potência máxima só é alcançada quando o módulo opera no nível máximo de tensão, pois, quando abaixo, a potência é limitada pela corrente máxima, contudo, ainda que não opere na potência máxima, por exemplo, em 24V, 10A, fornecendo 240W, é consideravelmente acima do mínimo necessário. Este mínimo tem como referência 30W do kit BS-35V-20-ESW, portanto, as peças são dimensionadas a partir de 100W. Segundo o fabricante do módulo, o Ripple é em torno de 100mV que seria 0,003% para 30V. Além disso, é esperado que operá-lo abaixo de seus limites operacionais minimizem o Ripple.

CAPITULO 03 – MONTAGEM E TESTES

Neste capítulo mostra-se a montagem e desafios associados. Além disso, realiza-se a experiência de eletrofiação demonstrando o funcionamento da fonte.

3.1 – Modulo de Controle

Antes de acoplar o CW, responsável por elevar o nível de tensão, faz-se os testes no circuito em baixa tensão. Utiliza-se o osciloscópio digital Hantek 6022be, que tem 2 canais e frequência de amostragem de 20 Mhz. Portanto, ao colocar o canal 01 na entrada de tensão do SG3525 e o canal 02 em uma de suas saídas obtém-se a Fig. 17, onde nota-se a entrada de tensão de nível estável e a saída em onda quadrada, adequados para o projeto.

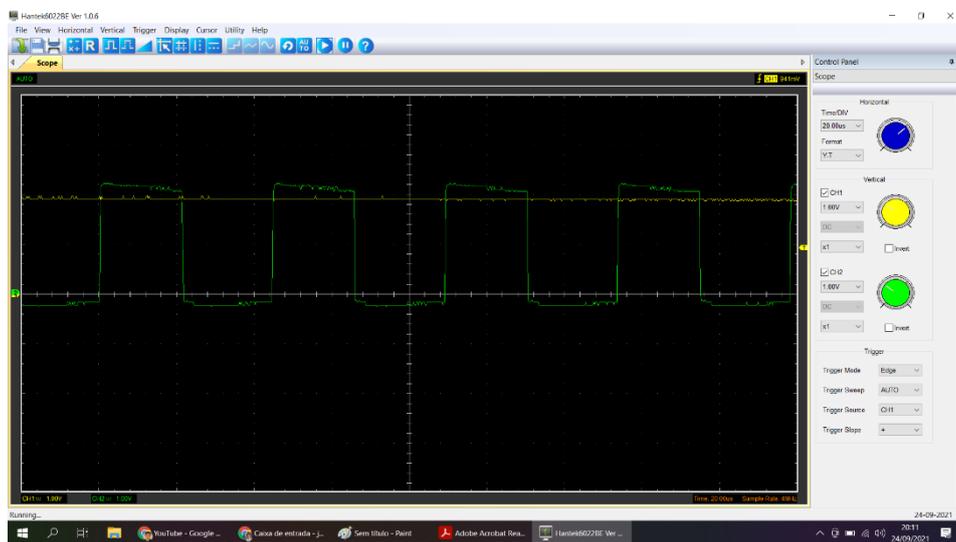


Fig. 15 – Forma de onda da porta do SG3525.

Ainda no mesmo circuito, aumenta-se a janela de tempo que o display mostra. Dessa forma verifica-se uma flutuação no nível de tensão de entrada na Fig. 16. Imagina-se que esta flutuação se deve a característica da rede de distribuição.

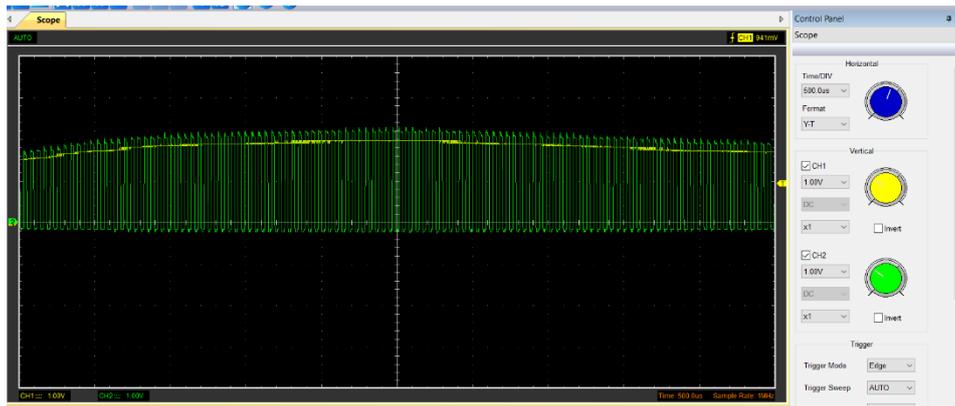


Fig. 16 Forma de onda da porta do SG3525 com horizonte de tempo ampliado.

Outra análise necessária é verificar se as saídas do controlador estão alternadas conforme desejado. Nota-se que a saída está adequada, sem coincidência de ciclo de trabalho, que os níveis de tensão são adequados para acionar os mosfets do conversor push-pull e que as ondas são suficientemente quadradas para a operação.

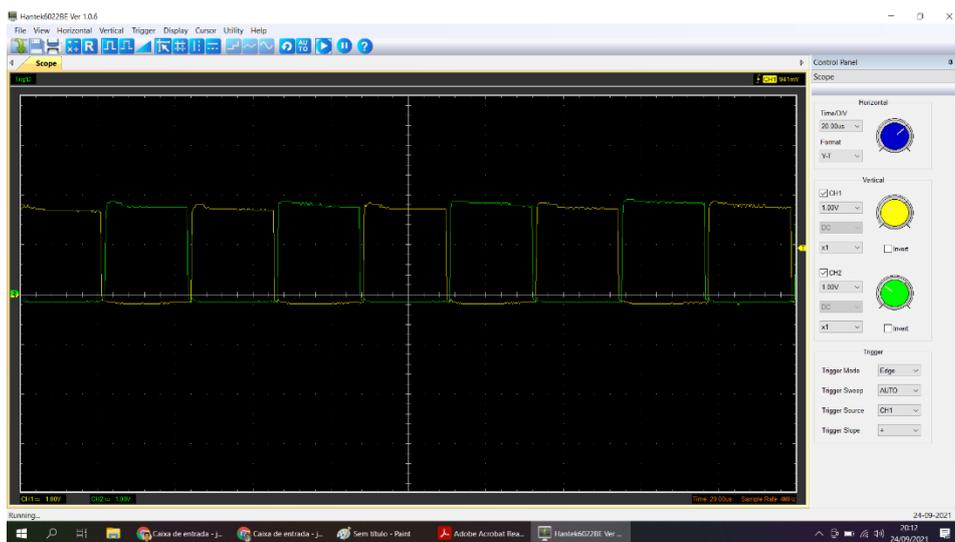


Fig. 17 Forma de onda das portas do SG3525 mostrando forma de onda e alternância.

3.2 – Teste com Capacitores

Quando se verifica dados de resistência interna e capacitância dos capacitores normalmente os fabricantes dão uma faixa esperada em relação a capacitância e pouco se fala da resistência interna. Portanto, a primeira tentativa foi com capacitores cerâmicos, que tem uma tensão de operação maior, então precisaria de menos estágios para alcançar o nível de tensão desejado.

Na montagem foi verificado não é eficaz montar a fonte CW com capacitor de cerâmica pois a relação entre resistência interna e capacitância não é suficiente para manter o nível de tensão utilizando a faixa de frequência desejada. De modo que os capacitores de cerâmica foram substituídos por capacitores eletrolíticos. Estes, embora precise de muito mais capacitores para que se alcance o nível de tensão desejado, ainda assim, apresenta o comportamento necessário para o experimento.

3.3 - Organização Física

Parte do desafio é criar um arranjo onde caiba tantos estágios quanto possível do circuito CW, no menor espaço possível. Sendo próximo o suficiente para ser uma estrutura compacta o suficiente para que suas dimensões não gerem dificuldades adicionais como também o circuito elétrico não rompa a rigidez dielétrica do ar e também haja espaço para os dispositivos. Portanto, a estrutura encontrada para organizar os capacitores estão na Fig. 18 onde os capacitores foram agrupados e colados para que fique na organização desejada. Os capacitores foram alocados em um compartimento separado do circuito eletrônico dentro da mesma caixa.



Fig. 18 – Organização dos capacitores no circuito CW.

O circuito foi alocado dentro de uma caixa onde há dois compartimentos, onde o compartimento superior fica o circuito CW e no compartimento inferior fica o circuito eletrônico que opera em baixa tensão, mostrado na Fig. 19.

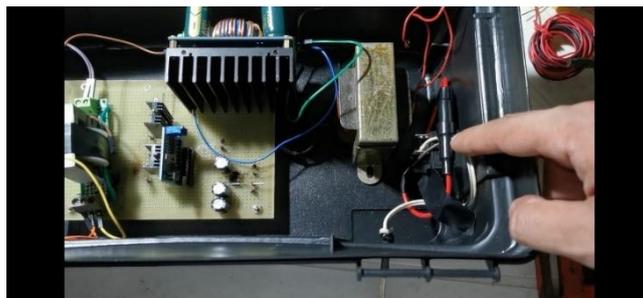


Fig. 19 – Circuito eletrônico em baixa tensão

3.4 – Montagem do Transformador com Núcleo em Ferrite

O transformador de ferrite é interessante para o funcionamento ideal para o circuito uma vez que, neste circuito, ele é parte do conversor push-pull onde a tensão CC passa para CA operando em alta frequência. Ideal para a faixa de operação utilizada no circuito, de 20kHz até 100kHz.

A necessidade de fabricação do transformador de ferrite, ao invés de comprar um modelo comercial, é evidenciada quando, no projeto do circuito, há uma relação de transformação e impedância ideais para uma dada condição de operação e resultados esperados.



Fig. 20 Confeção Transformador de Ferrite.



Fig. 21 Bobina do transformador de ferrite.

3.5 –Experimento de Eletrofiação

A eletrofiação foi realizada na horizontal, a solução utilizada é esmalte para unhas, com composição Álcool Acetil Tributíl Citrato, Acetato de Butila, Acetato de Etila, Álcool Isopropílico. Nitrocelulose, Hectorita Stearalkonium. com tensão de 6,7kV a 3cm de distância entre a agulha e o anteparo durante 30 minutos. Onde a imagem obtida através do MEV mostra que o método utilizado é válido, uma vez que as fibras tem diâmetro de 5nm a 50nm, que é a mesma ordem de grandeza observada em outros experimentos de eletrofiação. Por exemplo, [5 – Jiang 2020] obteve fibras de 3nm e [18 - Alijohani2021] obteve fibras de 7nm a 27nm.

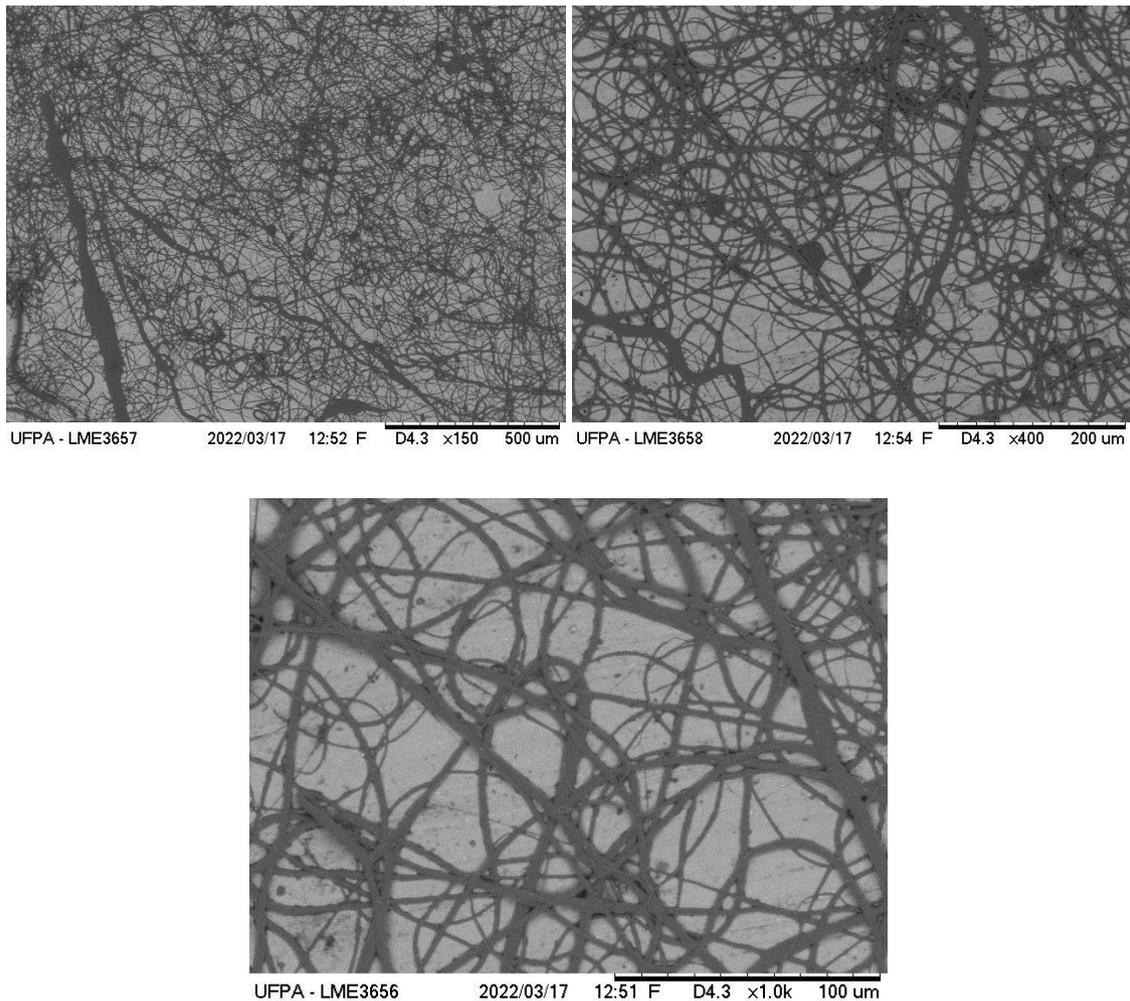


Fig. 22 – Material fiado com escala em 500 μm (a), 200 μm (b) e 100 μm (c).

Percebe-se que a variação de diâmetro da fibra também está dentro do que se observa em outros experimentos. Como [20 – Baykara2021] que varia de 37nm - 127nm e [26 – Li2020] variando de 5nm a 100nm. Já em relação a porosidade do material, seria necessário mais tempo realizando o experimento para que se obtivesse uma quantidade maior de material e observasse algo conclusivo neste sentido. Embora haja uma um bom grau de espalhamento entre as fibras.



Fig. 23 – Cone de Taylor

A distância entre a agulha e o anteparo depende principalmente do nível de tensão que é alcançado durante a montagem, quanto maior o nível de tensão maior será a distância utilizada conforme a referência [9 – Joy2020] e Fig. 07. O cone de Taylor observado bastante alongado se deve a alta tensão de superfície, alta viscosidade e alto gradiente de tensão [10 – Kim 2020].

Realizar projeto, montagem e testes permitiu diminuir os custos em relação comprar a fonte de tensão PS35 - PCL para eletrofiação do fabricante nanolab instruments sdn bhd tem seu valor USD 2.468,00, cotado em 10 de junho de 2022, sendo ainda necessário acrescentar impostos e frete. O valor gasto com a montagem da fonte descrita neste trabalho foi de R\$ 212,10, peças compradas ao longo de 2021, já incluindo frete e impostos dos componentes, um terceiro valor para referência, esse já incluindo custos de aquisição de equipamento, treinamentos, reformas necessárias e outros custos relacionados é o valor de R\$ 287.846,00 onde o equipamento já estaria pronto para uso [55 – Oliveira 2016] . Portanto, o custo para montagem é 60 vezes mais barato. Por outro lado, a fonte PS35 – PCL é mais fácil de ajustar a tensão, limitar a corrente e tem limite máximo de tensão mais elevado.

4–CONCLUSÕES

O custo de montagem foi em torno de 60 vezes mais barato, contudo, a conte comercial é mais fácil de operar.

Faixa de operação de distância e tensão

Encontrar a região pelos métodos de mínimos quadrados, limitar por duas parábolas ou Tensão por distância podem ser utilizados e se mostraram eficazes para entender qual faixa de parametrização o experimento funciona. Sendo um destaque para tensão por distancia onde, para a grande maioria dos autores, este parâmetro esteve entre 1kV/cm e 2kV/cm. Este parâmetro se manteve nesta faixa para diversos tipos de solventes, polímeros e métodos.

Resultados das Simulações

Segundo os testes realizados no software Proteus v9.1 é possível construir uma fonte Cockcroft de modo que possa ser utilizado nos experimentos de electrospinning dada a baixa variação de Ripple. Que se confirmou no experimento prático, dado que as fibras não foram comprometidas por Ripple.

A faixa de operação acima de 20kHz torna viável por ter baixa queda de tensão e baixo fator de ripple, utilizando componentes comuns e acessíveis. Fato que foi observado na prática, a tensão verificada no experimento foi apenas 4% inferior ao resultado da simulação nesta frequência.

A faixa acima de 100kHz o fabricante não garante o tempo de reação da camada de depleção do diodo. Além disso, o SG3525 LM358 opera até o limite de 100kHz.

Resultados do Experimento

O experimento mostra que é viável projetar, construir e montar uma fonte CW para o objetivo de eletrofição. O nível de tensão é suficientemente estável para que não comprometa a qualidade da fibra. Isso é evidenciado pelas imagens da fibra obtidas do MEV do experimento realizado. Portanto a fonte foi validada.

Além disso, verifica-se a possibilidade de modificações e adequações na fonte para incrementar o experimento, que podem ser realizadas posteriormente. Como por exemplo, um aumento de

potência, para que sejam utilizadas várias agulhas simultaneamente, ou ainda, aumento de tensão, para que haja mais possibilidades de resultado.

5 - TRABALHOS FUTUROS

Com os resultados obtidos os próximos passos devem ser:

- Incrementar e melhorar a fonte, torna-la mais potente, segura e mais fácil de operar.
- Eletrofiar soluções produzidas pelo grupo de trabalho a qual estou inserido. Que é a geleia de colágeno de células de peixe e biopartículas de nano prata.

REFERÊNCIAS

- [1] - FANG, K. Y.; ZHAO, Y. C.; FANG, F. Infrared stealth nanofibrous composite with thermal stability and mechanical flexibility. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 855, p. 157418, 2021.
- [2] - KUWAHATA, Yuta; TAKEHARA, Hiroaki; ICHIKI, Takanori. Comprehensive study on electrospray deposition in the single Taylor cone–jet mode by changing the spatial electric potential using a ring-shaped ternary electrode. **AIP Advances**, v. 10, n. 4, p. 045107, 2020.
- [3] - HE, Ji-Huan. On the height of Taylor cone in electrospinning. **Results in Physics**, v. 17, p. 103096, 2020.
- [4] - FU, Chuanyu et al. Self-welding and low-temperature formation of metal oxide nanofiber networks and its application to electronic devices. **IEEE Electron Device Letters**, v. 41, n. 1, p. 62-65, 2019.
- [5] - JIANG, Yong et al. Lithium acetate modified PU/graphene composites as separator for advanced Li-ion batteries. **Micro & Nano Letters**, v. 15, n. 4, p. 213-217, 2020.
- [6] - DING, Yanan et al. Low-temperature fabrication of nontoxic indium oxide nanofibers and their application in field-effect transistors. **IEEE Electron Device Letters**, v. 41, n. 3, p. 413-416, 2020.
- [7] - NIEN, Yu-Hsun et al. Investigation of Dye-Sensitized Solar Cell With Photoanode Modified by TiO₂-ZnO Nanofibers. **IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing**, v. 33, n. 2, p. 295-301, 2020.
- [8] - DINH, Toan et al. Flexible and wearable flow sensor using spinnable carbon nanotube nanofilm for respiration monitoring. In: **2020 IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)**. IEEE, 2020. p. 634-637.
- [9] - JOY, Nikhita et al. Coupling between voltage and tip-to-collector distance in polymer electrospinning: Insights from analysis of regimes, transitions and cone/jet features. **Chemical Engineering Science**, v. 230, p. 116200, 2021.
- [10] - KIM, Jihoon et al. Experimental study on fluid selection for a stable Taylor cone formation via micro-PIV measurement. **Journal of Visualization**, v. 23, n. 3, p. 449-457, 2020.
- [11] - KWON, Gi-Wan et al. Lamination of microfibrinous PLGA fabric by electrospinning a layer of collagen-hydroxyapatite composite nanofibers for bone tissue engineering. **Biomaterials research**, v. 21, n. 1, p. 1-12, 2017.
- [12] - SURIB, Nur Atiqah; MOHD PAAD, Khairunnisa. Electrospray flow rate influenced the sized of functionalized soot nanoparticles. **Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering**, v. 15, n. 3, p. e2417, 2020.
- [13] - PARK, Sanghyeon; YANG, Jun; RIVAS-DAVILA, Juan. A hybridcockcroft–walton/dicksonmultiplier for high voltage generation. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 35, n. 3, p. 2714-2723, 2019.
- [14] - MA, Zhan-Wen et al. 250 kV 6 mAcompact Cockcroft-Walton high-voltage powersupply. **Review of Scientific Instruments**, v. 87, n. 8, p. 085117, 2016.
- [15] - ZHAO, Guangyi et al. 300 kV/6 mAintegrated Cockcroft–Walton high voltage powersupply for a compactneutrongenerator. **Review of Scientific Instruments**, v. 91, n. 7, p. 074704, 2020.

- [16] - HE, Zi-Feng et al. Characteristics of a symmetrical Cockcroft-Walton powersupply of 50 Hz 1.2 MV/50 mA. **Review of Scientific Instruments**, v. 82, n. 5, p. 055116, 2011.
- [17] - AHMED, Adnan et al. High-throughputfree surface electrospinning using solutionreservoirswithdifferentradii and its preparationmechanism study. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 4, p. 9059-9072, 2020.
- [18] - ALJOHANI, Meshari et al. ElectrospunAgNPs-poly lactate nanofibers and their antimicrobialapplications. **Reactive and FunctionalPolymers**, v. 167, p. 104999, 2021.
- [19] - ARRIETA, Marina P. et al. Electrospinning of PCL-based blends: Processingoptimization for their scalableproduction. **Materials**, v. 13, n. 17, p. 3853, 2020.
- [20] - BAYKARA, Tarık; TAYLAN, Gamze. Coaxial electrospinning of PVA/Nigellaseedoil nanofibers: Processing and morphologicalcharacterization. **Materials Science and Engineering: B**, v. 265, p. 115012, 2021.
- [21] - HE, Haijun et al. Self-feeding electrospinning methodbased on the Weissenberg effect. **Polymer**, v. 190, p. 122247, 2020.
- [22] - JIRSÁK, Jan et al. A Molecular-Level Picture of Electrospinning. **Water**, v. 12, n. 9, p. 2577, 2020.
- [23] - JOY, Nikhita et al. Coupling between voltage and tip-to-collector distance in polymer electrospinning: Insights from analysis of regimes, transitions and cone/jet features. **Chemical Engineering Science**, v. 230, p. 116200, 2021.
- [24] - KARA, Yahya; HE, Haijun; MOLNÁR, Kolos. Shear-aided high-throughput electrospinning: a needlelessmethodwithenhanced jet formation. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 137, n. 37, p. 49104, 2020.
- [25] - KOENIG, Kylie et al. BiobasedDyes as ConductiveAdditives to Reduce the Diameter of PolylacticAcidFibersduringMelt Electrospinning. **Materials**, v. 13, n. 5, p. 1055, 2020.
- [26] - LI, Masha et al. Coaxial Electrospinning: Jet Motion, Core–Shell FiberMorphology, and Structure as a Function of Material Parameters. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 59, n. 13, p. 6301-6308, 2020.
- [27] - LIU, S.-L. et al. Needleless electrospinning for largescaleproduction of ultrathin polymer fibres. **Materials Research Innovations**, v. 18, n. sup4, p. S4-833-S4-837, 2014.
- [28] - MOLNAR, Kolos; NAGY, Zsombor K. Corona-electrospinning: Needlelessmethod for high-throughputcontinuous nanofiber production. **European Polymer Journal**, v. 74, p. 279-286, 2016.
- [29] - POLAT, H. Kerem et al. Development of besifloxacinHClloaded nanofibrous ocular inserts for the treatment of bacterialkeratitis: In vitro, ex vivo and in vivo evaluation. **International journal of pharmaceuticals**, v. 585, p. 119552, 2020.
- [30] - POUPONNEAU, Pierre et al. Electrospunbioresorbablemembraneelutingchlorhexidine for dental implants. **Polymers**, v. 12, n. 1, p. 66, 2020.
- [31] - WANG, Qing et al. Electrospunhypromellose-basedhydrophilic composites for rapiddissolution of poorlywater-solubledrug. **CarbohydratePolymers**, v. 174, p. 617-625, 2017.

- [32] - REYES, Catherine G.; LAGERWALL, Jan PF. Disruption of electrospinning due to watercondensation into the Taylor cone. **ACS applied materials & interfaces**, v. 12, n. 23, p. 26566-26576, 2020.
- [33] - ZHAO, Tienan et al. Design of helical groove/hollow nanofibers via tri-fluid electrospinning. **Materials & Design**, v. 205, p. 109705, 2021.
- [34] - SHNEIDER, M. et al. Electrospinning of epoxy fibers. **Polymer**, p. 124307, 2021.
- [35] - SHIRAZI, Mohammad Mahdi A.; BAZGIR, Saeed; MESHKANI, Fereshteh. A dual-layer, nanofibrous styrene-acrylonitrile membrane with hydrophobic/hydrophilic composite structure for treating the hot dyeing effluent by direct contact membrane distillation. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 164, p. 125-146, 2020.
- [36] - SUI, Tan et al. Operando observation of the Taylor cone during electrospinning by multiple synchrotron X-ray techniques. **Materials & Design**, v. 110, p. 933-934, 2016.
- [37] - WANG, Junzhang et al. Enhanced magnetic heating efficiency and thermal conductivity of magnetic nanofluids with Fe₃ZrB amorphous nanoparticles. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 465, p. 480-488, 2018.
- [38] - WANG, Chi et al. Formation of Dissipative Structures in the Straight Segment of Electrospinning Jets. **Macromolecules**, v. 53, n. 18, p. 7876-7886, 2020.
- [39] - WAQAS, Muhammad et al. Design and development of a nozzle-free electrospinning device for the high-throughput production of biomaterial nanofibers. **Medical Engineering & Physics**, v. 92, p. 80-87, 2021.
- [40] - XIONG, Jian et al. Mass production of high-quality nanofibers via constructing pre-Taylor cones with high curvature on needleless electrospinning. **Materials & Design**, v. 197, p. 109247, 2021.
- [41] - XU, Jiabin et al. Controllable generation of nanofibers through a magnetic-field-assisted electrospinning design. **Materials Letters**, v. 247, p. 19-24, 2019.
- [42] - YANG, Zhi et al. A smart scaffold composed of three-dimensional printing and electrospinning techniques and its application in rat abdominal wall defects. **Stem cell research & therapy**, v. 11, n. 1, p. 1-11, 2020.
- [43] - SURESH, Sinduja; BECKER, Alexander; GLASMACHER, Birgit. Impact of apparatus orientation and gravity in electrospinning—A review of empirical evidence. **Polymers**, v. 12, n. 11, p. 2448, 2020.
- [44] - GABRIEL, Laís P. et al. Electrospun polyurethane membranes for Tissue Engineering applications. **Materials Science and Engineering: C**, v. 72, p. 113-117, 2017.
- [45] - CARDOSO, Guinea BC et al. Initial study of electrospinning PCL/PLLA blends. **Advances in Materials Physics and Chemistry**, v. 1, n. 3, p. 94, 2011.
- [46] - RODRIGUEZ, G. N. P. et al. Electrospun Scaffolds Composed of Poly (L-lactic acid) and Hydroxyapatite. In: **Key Engineering Materials**. Trans Tech Publications Ltd, 2012. p. 872-877.
- [47] - Rodríguez Perea, Geraldine Nancy Eletrofição de nanocompósito de poli(L-ácido láctico) com hidroxiapatita para regeneração óssea / Geraldine Nancy Rodríguez Perea. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.
- [48] - GUPTA, Aditi; AYITHAPU, Praharshitha; SINGHAL, Richa. Study of the electric field distribution of various electrospinning geometries and its effect on the resultant nanofibers using finite elements simulation. **Chemical Engineering Science**, v. 235, p. 116463, 2021.

- [49] – SHIRAI, Naoki et al. Atmospheric negative corona discharge observed at tip of Taylor cone using PVA solution. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 39, n. 11, p. 2210-2211, 2011.
- [50] – FANG, K. Y.; ZHAO, Y. C.; FANG, F. Infrared stealth nanofibrous composite with thermal stability and mechanical flexibility. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 855, p. 157418, 2021.
- [51] - Gañán-Calvo, A. M., Rebollo-Muñoz, N., & Montanero, J. M. (2013). The minimum or natural rate of flow and droplet size ejected by Taylor cone-jets: physical symmetries and scaling laws. *New Journal of Physics*, 15(3), 033035.
- [52] - Venturelli, R. B., & Grippa, S. (2017). Eletrofiação: uma alternativa para a produção de não tecidos. *Revista da UNIFEDE*, 1(22), 150-165.
- [53] - Costa, R. G. F. (2011). Preparação e caracterização de nanocompósitos a base de poli (álcool vinílico) carregados com nanopartículas de propriedades bactericidas via eletrofiação.
- [54] - Cunha, J. F. A. P. (2016). HVDC baseado em gerador de Cockcroft-Walton.
- [55] - Oliveira, A. H. P. D., Pisanu, L., Oliveira, H. P. D., & Nascimento, M. L. F. (2016). Análise da viabilidade econômica de uma spin-off de electrospinning no Brasil.
- [56] – Oliveira – L. M. B. (2011). Automação e Controlo de um Sistema de Electrospinning.
- [57] - Zhang, Y., & Wang, S. (2019). Preparation of Smart Poly (SPAA-co-MMA) Film Materials for Regulating Wettability and Humidity by Electrospinning. *Polymer Engineering & Science*, 59(S1), E279-E286.
- [58] - De Vrieze, S., Van Camp, T., Nelvig, A., Hagström, B., Westbroek, P., & De Clerck, K. (2009). The effect of temperature and humidity on electrospinning. *Journal of materials science*, 44(5), 1357-1362.
- [59] - Pelipenko, J., Kristl, J., Janković, B., Baumgartner, S., & Kocbek, P. (2013). The impact of relative humidity during electrospinning on the morphology and mechanical properties of nanofibers. *International journal of pharmaceuticals*, 456(1), 125-134.
- [60] - Gönen, S. Ö., Taygun, M. E., & Küçükbayrak, S. (2015). Effects of Electrospinning Parameters on Gelatin/Poly (ϵ -Caprolactone) Nanofiber Diameter. *Chemical Engineering & Technology*, 38(5), 844-850.