

PRODUÇÃO EM LARGA ESCALA DE FIBRAS POR ELETROFIAÇÃO E OUTROS MÉTODOS ALTERNATIVOS

DOI: 10.22533/at.ed.52823131219

Aline Moreira de Alcântara

Programa de Pós-Graduação em
Agroquímica. Universidade Federal de
Lavras, Lavras - MG

Anderson de Oliveira Lobo

Centro de Tecnologia, Universidade
Federal do Piauí, Teresina - PI

Caio Vinicius Lima Natarelli

Programa de Pós-Graduação em Ciência
e Engenharia de Materiais, Universidade
Federal de São Carlos, São Carlos - SP

José Manoel Marconcini

Laboratório Nacional para Agricultura
(LNNA), Embrapa Instrumentação
Agropecuária, São Carlos - SP

Juliano Elvis Oliveira

Departamento de Engenharia,
Universidade Federal de Lavras, Lavras
- MG

Luiz Henrique Capparelli Mattoso

Laboratório Nacional para Agricultura
(LNNA), Embrapa Instrumentação
Agropecuária, São Carlos - SP

Rafael Melo Cardoso

Laboratório Nacional para Agricultura
(LNNA), Embrapa Instrumentação
Agropecuária, São Carlos - SP

Rafaella Takehara Paschoalin

Instituto de Física de São Carlos (IFSC),
Universidade de São Paulo, São Carlos
- SP

Thiago Domingues Stocco

Instituto Científico e Tecnológico,
Universidade Brasil, São Paulo - SP

19.1 INTRODUÇÃO

O termo nanotecnologia está cada vez mais presente no dicionário da ciência e inovação. Nos últimos anos, diversas áreas do conhecimento têm explorado cada vez mais o uso de nanomateriais, *i.e.*, que possuem dimensões de 1 até 100nm (maiores detalhes no Capítulo 1), os quais podem ser considerados a próxima geração de materiais com propriedades específicas melhoradas.¹ As nanofibras estão entre esses materiais em escala nanométrica com várias propriedades interessantes.² Dentre as propriedades específicas, a alta área superficial ativa, elevada flexibilidade e capacidade de incorporação de partículas atribuem às nanofibras um

potencial elevado para diversas aplicações, incluindo: filtração,³ (bio)sensores,^{4,5} liberação controlada de drogas,^{6,7} curativos para feridas,⁸ engenharia de tecidos,⁹ entre outras. Tal versatilidade e vasta gama de aplicações evidenciam a necessidade de escalabilidade da produção de micro/nanofibras. Dentre as diversas técnicas de produção de fibras, a eletrofiação (do inglês, *electrospinning*) é reconhecida como a mais difundida e eficiente, capaz de produzir fibras poliméricas, cerâmicas, compósitas, etc. (maiores detalhes no Capítulo 2). Além disso, essa técnica é capaz de gerar de forma contínua fibras ultrafinas para diferentes aplicações, conforme apresentado nos capítulos anteriores.

No universo empreendedor, *startups* que utilizam a técnica de eletrofiação como solução tecnológica são cada vez mais presentes no Brasil, com é o caso da empresa *3D Biotechnology Solution*,¹⁰ a qual se propõe a entregar materiais customizados para curativos e engenharia de tecidos. No contexto mundial, já há diversas iniciativas de empresas e *startups* que exploram o uso da eletrofiação, sendo a maioria delas voltada para desenvolvimento de materiais para aplicações em engenharia de tecidos e curativos baseados em sistemas inteligentes para liberação de fármacos.

Em contrapartida ao sucesso na produção de fibras, a técnica de eletrofiação possui uma limitação relacionada à escalabilidade do processo.¹¹ A produtividade de um equipamento de eletrofiação com capilar único (*single-needle*) gira em torno de 0,001 a 1 g h⁻¹,¹² e para um maior rendimento de produção, a simples estratégia de aumento de vazão pode trazer desvantagens em termos da morfologia/estrutura do material formado (maiores detalhes no Capítulo 2). Do ponto de vista industrial, este desafio representa uma oportunidade para que o método seja cada vez mais aplicado em larga escala. Para aumentar a capacidade de produção da técnica, diversas propostas vêm sendo empregadas. Em geral, uma das abordagens mais simples é aumentar o número de cones de Taylor formados durante o processo de eletrofiação.¹³ Para isto, as estratégias adotadas envolvem a modificação do sistema de capilar único, seja pelo aumento do número de capilares ou até mesmo uma abordagem sem capilar, onde sistemas que utilizam força centrífuga se mostram viáveis para a obtenção de fibras.¹¹ Estes sistemas de eletrofiação adaptados podem ser divididos de acordo com o princípio de funcionamento: sistemas com capilares e sistemas livres de capilar.

19.2 ESTRATÉGIAS PARA PRODUÇÃO DE FIBRAS ELETROFIADAS EM LARGA ESCALA

Para a produção de fibras eletrofiadas em larga escala, muitos desafios e obstáculos necessitam ser solucionados. Neste contexto, o desenvolvimento de sistemas capazes de produzir fibras com alto rendimento através da geração de um maior número de cones de Taylor simultaneamente, sem que isso altere as propriedades das mesmas, aparece como uma estratégia promissora, como será discutido a seguir.

19.2.1 Sistemas com capilares

O primeiro exemplo a ser citado é a obtenção de um maior número de cones de Taylor utilizando um sistema com capilar, conforme reportado por Vaseashta.¹⁴ Neste trabalho, o autor reportou a formação de até três cones de Taylor mediante a modificação no coletor, de forma a gerar uma variação do campo elétrico ao longo do coletor, porém em termos práticos o sistema mostrou instabilidade no quesito de entupimento do capilar e não apresentou melhora na produtividade. Zhang e colaboradores¹⁵ reportaram um sistema com capilar único capaz de formar múltiplos cones de Taylor (*multi-jet*). A agulha modificada, mostrada na Figura 19.1, se assemelha a uma esfera em uma ponta de caneta, a partir da qual há a formação de múltiplos jatos estáveis, o que evita problemas de entupimento e facilita a manutenção do equipamento, aumentando a produtividade em até 12 vezes. Visando versatilidade, uma regulação no tamanho da esfera pode ser efetuada para aumentar a formação de jatos dependendo do sistema utilizado.¹⁵

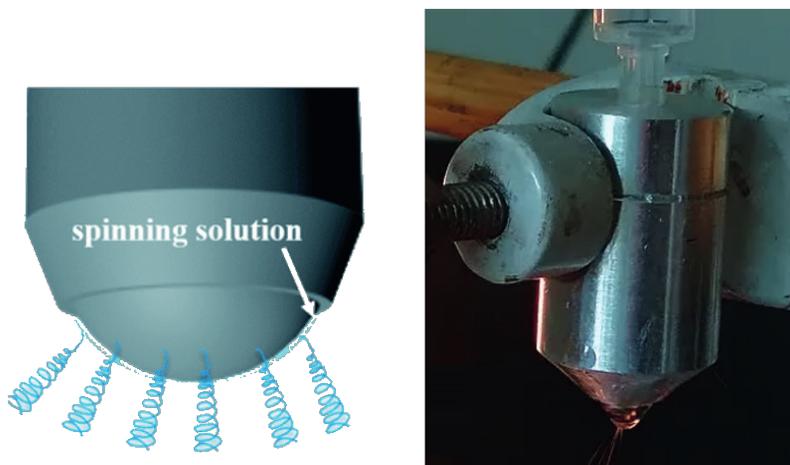


Figura 19.1. Representação do sistema com seringa única com conformação esférica (esquerda), e foto do equipamento capaz de gerar múltiplos jatos durante o processo de fiação (direita). Adaptada da referência ¹⁵ sob os termos da licença Creative Commons 3.0 Unported (CC BY-NC 3.0). Copyright 2018 The Royal Society of Chemistry.

Sistemas de capilares múltiplos (*multi nozzle*) também vêm sendo empregados para aumentar a produtividade do sistema de eletrofiação. Neste tipo de sistema, múltiplos jatos de solução são ejetados das agulhas, que podem estar presentes em diferentes conformações e quantidades.^{16–19} As abordagens descritas na literatura envolvem desde capilares duplos, triplos, quádruplos ou até mais bicos com arranjos que variam entre lineares, cúbicos, hexagonais ou circulares.²⁰ As principais vantagens desses sistemas são, além do aumento de produtividade, o uso de voltagens inferiores, possibilidade de obtenção

de sistemas do tipo *core-shell*, sistemas porosos ou de múltiplos materiais. Porém, algumas desvantagens são observadas como perturbações intra-jatos, baixas vazões necessárias para estabilidade do sistema e dificuldade no controle do entupimento dos bicos.²⁰ Tais desvantagens tem impacto direto na morfologia das fibras, onde perturbações intra-jatos afetam a capacidade de ligação fibra-fibra gerada e distribuição não homogênea no coletor, enquanto a baixa vazão irá refletir diretamente na produtividade das fibras. Já o entupimento dos canais de fiação também serão responsáveis por um material não consistente obtido no final do processo, requerendo sempre intervenções para limpeza e checagem de processo, o que pode comprometer mais ainda a produtividade devido à necessidade de pausas no processo de produção das fibras. O aumento no número de capilares também irá afetar drasticamente o tamanho do equipamento. Além disso, um fator importante a ser considerado é a interação entre os campos elétricos. No sistema linear utilizando 9 capilares proposto por Theron e colaboradores,¹⁶ por exemplo, foi observada distorção nos ângulos de fiação, o que acarretou a inconsistência nas morfologias e reprodutibilidade de formação das fibras. Em um estudo com diferentes conformações, desde lineares, concêntricas e elípticas, Tomaszewski e colaboradores¹⁷ observaram que jatos das extremidades iniciaram o processo de fiação sem que os jatos centrais fossem iniciados, devido à blindagem do campo elétrico nos capilares centrais, e concluíram que a conformação concêntrica representava a melhor estratégia dentre as geometrias estudadas.

Mesmo diante dos diversos desafios para se aumentar a produtividade da técnica de eletrofiação, algumas empresas já obtiveram sucesso no desenvolvimento de equipamentos que apresentam produtividade superior a 200 g h⁻¹.²¹ Exemplos de empresas que vem empregando esta abordagem com sucesso são a Yflow® S.D.²² e a Inovenso Inc.²³ A Yflow® S.D. é capaz de fornecer módulos de capilares múltiplos (10 a 20 capilares) para serem instalados em seus equipamentos de eletrofiação. O equipamento Nanospinner 416 da Inovenso Inc é capaz de comportar até 204 capilares e promete entregar fibras com diâmetro em torno de 50 – 400 nm, atingindo níveis de produtividade de até 5.000 g por dia. Tais equipamentos evidenciam que a escalabilidade da produção de fibras através da estratégia de multiplicar a quantidade de fiadeira (*spinneret*) com múltiplas capilares (*multi-nozzle*) é viável e recorrente, tanto no meio acadêmico como no universo empreendedor/industrial.

19.2.2 Sistemas sem capilar

Alternativamente, sistemas que funcionam na ausência de capilares (*needleless*) também são capazes de trazer soluções no quesito escalabilidade de produção de fibras eletrofiadas. Esta estratégia funciona similarmente à eletrofiação convencional, porém ela permite que o jato carregado seja formado diretamente no líquido sem o uso de uma agulha/capilar. Estes equipamentos podem apresentar sistema de fiadeiras (*spinneret*)

estacionário ou rotacional.²⁴ versatile, and cost-effective method in preparing ultrathin fibers from a wide variety of materials. Electrospun (e-spun) O princípio de formação do jato se dá a partir do fluxo de cargas no polímero, seguida da formação espontânea de múltiplos-jatos quando a voltagem aplicada atinge valores acima do valor crítico.²⁵ Comparado com o sistema de capilares múltiplos, este sistema apresenta vantagens como design simples, robustez contra entupimentos, e alta produtividade.^{24,26–28} Como desvantagem, os sistemas sem capilar requerem voltagem adicional para ultrapassar a tensão superficial do líquido. A evaporação do solvente também é um fenômeno não desejado, uma vez que altera a viscosidade da solução devido a mudanças na concentração da solução. Há também a adsorção indesejada de vapor de água ou até mesmo possibilidade de ignição em casos extremos, pois usualmente há uma superfície líquida livre relativamente grande.²⁹ Adicionalmente, a taxa de fluxo e a emanção uniforme dos jatos não são parâmetros de fácil controle, e por isso necessitam sistemas fechados e bem controlados (humidade relativa e temperatura) para evitar variabilidade nos parâmetros.

Algumas estratégias permitem o melhor controle de alguns desses parâmetros, como por exemplo a utilização de fios de cobre como eletrodos e superfícies condutoras que substituem o capilar na formação dos jatos poliméricos. Neste caso, os jatos se formam através de uma fina camada do polímero líquido que é continuamente depositada em um eletrodo de cobre, como no trabalho reportado por Prahasti e colaboradores.³⁰ A voltagem aplicada determinará a força do campo elétrico, a qual afeta o número de jatos formados ao longo do eletrodo metálico, e uma vez devidamente otimizado para o sistema requerido, este iniciará a formação dos jatos, como mostrado na Figura 19.2, os quais serão então depositados no coletor aterrado. Um exemplo típico de um sistema de fiação na ausência de capilares é o equipamento comercializado pela empresa Elmarco Inc.,³¹ conhecido como *Nanospider*TM. O equipamento promete entregar uma produtividade de 20.000.000 m² por ano de mantas de poliamida 6 (PA6) com fibras de aproximadamente 150 nm de diâmetro, e é desenvolvido para operar 24 horas/dia, 7 dias por semana.

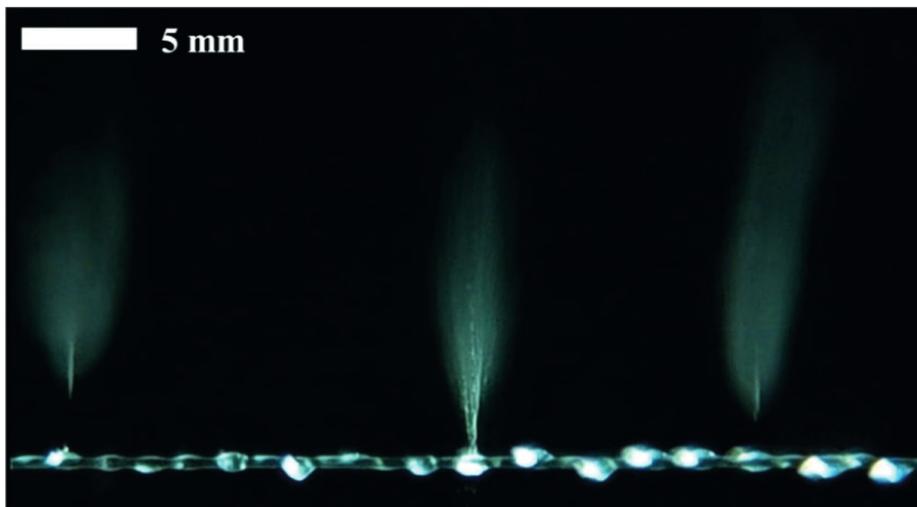


Figure 19.2. Gotas e jatos da solução polimérica na superfície da fiadeira de fio (*wire spinneret*) metálico. Os jatos são formados após a aplicação da diferença de potencial gerando um campo elétrico para sistema de fiação na ausência de seringas. Reimpresa da referência ³⁰ sob os termos da licença Creative Commons 4.0 (CC BY). Copyright 2020 G. Prahasti, *et al.*

19.3 TÉCNICAS ALTERNATIVAS À ELETROFIAÇÃO

O estabelecimento do processo de eletrofiação e das demais técnicas de produção de nanofibras em escala industrial é o resultado tanto de esforços da comunidade acadêmica quanto de empresas interessadas em tecnologias disruptivas. Deve-se notar que os trabalhos da comunidade acadêmica são fundamentais na compreensão dos fenômenos associados aos processos de fiação de nanoestruturas e na descoberta de novas aplicações para esses materiais. Em contrapartida, diversas empresas têm focado seus esforços na construção de maquinários capazes de produzir nanofibras em larga escala.

A necessidade de produção de grandes quantidades de fibras sintéticas e naturais já era uma demanda da sociedade desde a era vitoriana. Nesta época os materiais fibrosos eram empregados na confecção de moveis e estofados. A popularização desses materiais e suas aplicações levou ao desenvolvimento de diversas patentes na indústria têxtil, sendo as primeiras relacionadas a equipamentos para tecelagem em larga escala de fios de seda. Em 1855, George Audemars conseguiu obter pela primeira vez fibras de nitrocelulose através da imersão de agulhas em uma solução polimérica. Sua rápida remoção da solução levou à formação de um fio longo a medida em que o solvente era evaporado.³² Sua descoberta foi a base para os atuais processos industriais de fiação úmida. Em 1889, Hilaire de Chardonnet, um engenheiro francês, apresentou tecnologias baseadas no fluxo de soluções de rayon de viscose em um banho de coagulação.³² Estes processos garantiam a produção de materiais mais homogêneos e com uma produtividade superior aos demais processos

existentes nesta época. Todos esses esforços culminaram para uma produção mundial de não tecidos¹ que movimentou aproximadamente U\$56 bilhões de dólares em 2018, sendo a Ásia a região mais produtora com aproximadamente 46% do *Market Share* e a China, maior produtor asiático, exportando aproximadamente 1 milhão de toneladas. A Associação da Indústria de Tecidos Não Tecidos (INDA) e a Associação Europeia de Não Tecidos e Descartáveis (EDANA) estimam que a produção até 2023 cresça aproximadamente 4,8% por ano.³³ Estes aspectos históricos representam a combinação dos esforços científicos e tecnológicos para a geração de novos produtos de interesse da sociedade. Nesta mesma linha, várias abordagens foram propostas recentemente para aumentar a produtividade da eletrofiação, como apresentado anteriormente, ou mesmo encontrar novas alternativas para produção em larga escala de nanofibras.

Como mencionado, a eletrofiação é uma das técnicas mais bem estabelecidas e utilizadas para a produção de nanofibras. Suas vantagens incluem: versatilidade, visto que materiais orgânicos (tanto moléculas pequenas quanto macromoléculas), inorgânicos e compósitos/híbridos podem ser empregados; baixo custo; simplicidade de manuseio e disponibilidade comercial para aplicações industriais.^{34,35} No entanto, a técnica apresenta algumas desvantagens, como a necessidade de equipamento especializado, alta tensão elétrica, deposição somente em alvos condutores de eletricidade, obtenção de fibras com baixa resistência mecânica, e baixo rendimento. Esses desafios impulsionaram o advento de estratégias inovadoras para a produção de micro/nanofibras nos últimos anos.³⁶ Enquanto a eletrofiação emprega forças eletrostáticas para produção das nanofibras, as técnicas alternativas podem utilizar, por exemplo, forças centrífugas, mecânicas ou empregar um fluxo de gás, contribuindo para a superação das limitações mencionadas.^{18,35} Métodos como fiação por sopro em solução, fiação centrífuga e *draw spinning* são alternativas à eletrofiação. Essas técnicas são derivadas de processos industriais para a produção de fibras com diâmetros maiores que 1 µm e, portanto, podem ser mais facilmente otimizadas para a produção de nanofibras em larga escala industrial.^{37,38}

19.3.1 Fiação por sopro em solução

A fiação por sopro em solução (SBS, do inglês *Solution Blow Spinning*) é um processo que utiliza gás comprimido como força motriz para produção de fibras e foi patenteado em 2010 por Mattoso e colaboradores.³⁹ Com pouco mais de uma década desde o seu desenvolvimento, a técnica de SBS foi desenvolvida a partir da combinação dos conceitos da eletrofiação e da fiação por sopro de fundido (do inglês, *melt blowing*), sendo capaz de contornar as principais desvantagens dessas duas técnicas, sendo elas a baixa produtividade e a limitação na escolha do material polimérico.⁴⁰ A versatilidade e simplicidade do aparato experimental fazem com que a técnica seja uma alternativa

¹ Conforme a norma NBR-13370, não tecido é uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída de véu ou manta de fibras ou filamentos, orientados direcionalmente ou ao acaso.

aos métodos convencionais de fiação e, como seu processo possui semelhanças com outras técnicas de escala industrial, como a fiação por fusão (do inglês, *melt spinning*), a fiação a seco (do inglês, *dry spinning*) e a fiação úmida (do inglês, *wet spinning*), o seu escalonamento se torna factível. A depender do campo de pesquisa, a técnica também tem sido referida como *solution blowing* ou *airbrushing*, já que ambas utilizam o uso do ar comprimido como força motriz.³⁸

O aparato típico do SBS é constituído por uma fonte de gás comprimido, um regulador de pressão, uma bomba de injeção, uma matriz de fiação de bicos concêntricos e um coletor (Fig. 19.3). No processo, a solução polimérica é ejetada a uma taxa constante através do bico concêntrico interno, formando uma gota em sua ponta. Esta gota, por sua vez, é estirada pela corrente de gás pressurizado que passa em alta velocidade através do bico externo. Quando as forças aerodinâmicas, provenientes do gás pressurizado e que atuam sob a gota de solução polimérica, são capazes de fazer que a tensão superficial da gota seja superada, jatos da solução polimérica são lançados em direção ao coletor. Durante o trajeto, o solvente evapora levando à formação de fibras. Algumas vantagens da técnica de SBS são: produtividade aproximadamente 10 vezes maior (0,5 a 1 g h⁻¹ em equipamento com uma agulha) do que a da eletrofiação, não necessidade de aplicação de um campo elétrico, pode ser implementada com materiais de baixo custo, portabilidade, e possibilidade de aplicação *in situ* e em diversas superfícies, incluindo biológicas.^{38,41-43} Por exemplo, grupos que trabalham com métodos de produção industrial conseguiram uma produtividade de cerca de 400 g h⁻¹ com um equipamento de fiação por sopro em solução com cerca de 400 a 600 agulhas.¹⁸ Sendo assim, essa técnica representa uma alternativa viável para a produção de fibras compósitas/híbridas, multi-estruturadas, flexíveis, condutoras, cerâmicas ou metálicas, com propriedades que podem ser ajustadas de acordo com os parâmetros de fiação.³⁶

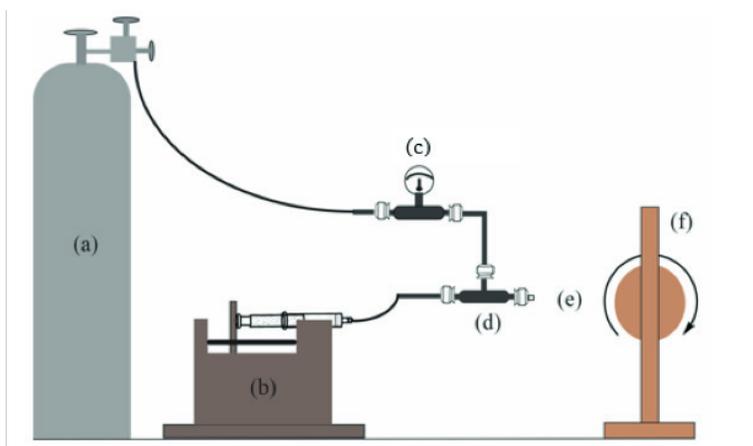


Figura 19.3. Equipamento utilizado na fiação por sopro em solução: (a) fonte de gás comprimido; (b) bomba de injeção da solução polimérica; (c) regulador de pressão; (d) matriz de fiação de bicos concêntricos; (e) distância de trabalho; (f) coletor rotativo.

Assim como na eletrofiação, parâmetros da solução polimérica e do processo influenciam diretamente na morfologia e diâmetro das fibras produzidas.^{38,40,44} Não menos importante, a escolha do solvente também deve ser bem planejada, visto que solventes com baixa volatilidade, como a água, dificultam o processo, fazendo com as fibras produzidas não cheguem ao coletor totalmente secas, resultando na destruição da morfologia fibrilar pelas moléculas poliméricas que se colidem.⁴⁵ Uma alternativa para viabilizar a formação de fibras a partir de soluções aquosas é a utilização de sistemas de aquecimento visando aumentar a temperatura da solução polimérica e do ambiente, através da modificação do sistema original. Outra opção é o uso de distâncias de trabalho muito altas (> 50 cm), entretanto, essa opção não é recomendada, tendo em vista que pode haver perda excessiva das fibras fiadas.⁴⁶

Uma ampla variedade de polímeros, sejam eles naturais ou sintéticos, podem ser utilizados para produção de micro/nanofibras por SBS, cuja escolha é uma etapa importante para obtenção de fibras com propriedades desejadas. A Tabela 19.1 resume os principais polímeros utilizados na fabricação de fibras pelo processo de SBS. Além disso, é possível incorporar outros nanomateriais e funcionalidades durante ou após o processo de fiação, potencializando o uso de novas arquiteturas compósitas/híbridas na fabricação de materiais e dispositivos com propriedades finais otimizadas. A versatilidade das fibras produzidas por SBS faz que os campos de aplicação sejam bem diversos, incluindo nas áreas dos materiais têxteis e inteligentes (para promover controle de umidade, termorregulação, e também atuar como sensores), biomedicina (como sistemas de liberação controlada, como agente antimicrobiano, como *scaffolds* para a engenharia de tecidos) e no meio ambiente (fibras para filtração do ar, adsorventes de poluentes, fotocatalisadores).^{38,40,44,47,48}

Tabela 19.1. Exemplos de polímeros e aplicações de fibras produzidas pelas técnicas de fiação por sopro em solução e *rotary jet spinning*.

Polímero	Fiação por Sopro em Solução	<i>Rotary jet spinning</i>	Finalidade dos estudos
Poliamida 6 (PA6)	47,49,50	Solução polimérica ^{51,52}	Estudo da técnica e aplicações ambientais
Poli(óxido de etileno) (PEO)	53,54	Solução polimérica ⁵⁵	Aplicações biomédicas e estudo da técnica
Gelatina	56	Solução polimérica ⁵⁷	Aplicações biomédicas e estudo da técnica
Quitosana	58	Solução polimérica ⁵⁹	Aplicações biomédicas
Poli(ácido láctico) (PLA)	53,60	Solução polimérica ⁵⁷	Aplicações biomédicas e estudo da técnica
Poli(L-ácido láctico) (PLLA)	61	Solução polimérica ⁶²	Aplicações biomédicas
Poli(fluoreto de vinilideno) (PVDF)	63,64	Solução polimérica ⁶⁵	Estudo da técnica e aplicações biomédicas e elétricas
Politetrafluoretileno (PTFE)	66	Solução polimérica ⁶⁷	Aplicação como anti-incrustante e estudo da técnica
Poli(vinil butiral) (PVB)	44	Solução polimérica ⁶⁸	Estudo da técnica
Poli(etileno glicol) (PEG)	60	Solução polimérica ⁵⁹	Estudo da técnica e aplicações biomédicas
Poliuretano (PU)	61	Solução polimérica ⁵⁹	Estudo da técnica e aplicações biomédicas
Poli(álcool vinílico) (PVA)	69	Solução polimérica ⁷⁰	Bateria e estudo da técnica
Poli(metacrilato de metila) (PMMA)	44,48	Solução polimérica ⁷¹	Bateria, aplicações ambientais e estudo da técnica
Poli(tereftalato de etileno) (PET)	-	Polímero fundido ⁷²	Estudo da técnica
Polipropileno (PP)	-	Polímero fundido ⁷³	Estudo da técnica
Poli(tereftalato de butileno) (PBT)	-	Polímero fundido ⁷⁴	Estudo da técnica
Policaprolactona (PCL)	44,54	Solução polimérica ^{75,76} e polímero fundido ^{75,76}	Aplicações biomédicas e estudo da técnica
Polivinilpirrolidona (PVP)	44,77	Solução polimérica ^{72,78} e polímero fundido ⁷²	Preparação de óxido de índio-estanho e estudo da técnica

Nos últimos anos, diversas modificações têm sido propostas no sistema original de SBS visando solucionar alguns problemas e desvantagens da técnica, como a utilização de solventes com baixa volatilidade, ou para tornar a técnica cada vez mais industrializável. Alguns exemplos de modificações são: utilização de sistemas de bicos múltiplos (aumentar a produtividade e melhorar a distribuição de fibras), sistemas de aquecimento (aumentar

temperatura e facilitar a evaporação do solvente), bicos triaxiais (fibras de duas camadas), miniaturização do sistema (portabilidade), entre outras.^{40,44}

Estratégias também têm sido propostas com a finalidade de proporcionar a obtenção de fibras com menor dispersão de tamanho. Uma dessas aprimorações é o *electro-blown spinning*, que consiste na introdução de um campo eletrostático ao sistema de fiação, fazendo que o jato polimérico que está sendo estirado pelo ar comprimido também seja carregado eletricamente e, assim, atraído pelo coletor. Essa nova técnica possibilita que fibras mais uniformes e bem distribuídas sejam obtidas, de forma que a alta produtividade seja mantida.⁴⁴

Atualmente, o escalonamento da técnica de SBS está em fase inicial, com algumas pequenas empresas desenvolvendo equipamentos prontos para uso em escala laboratorial e industrial. Entretanto, com o aumento substancial ano a ano do número de pesquisas e publicações utilizando a Fiação por Sopro em Solução, a perspectiva para o futuro é a rápida difusão da técnica para a comercialização de produtos à base de fibras poliméricas, o que levaria a maior industrialização da técnica para produção em larga escala.

19.3.2 Rotary Jet Spinning

Embora tenha recebido relativamente pouca atenção em pesquisas científicas, quando comparada a outras técnicas, a tecnologia de *rotary jet spinning*, também conhecida como fiação centrífuga (do inglês, *centrifugal spinning*) ou rotofiação, apresenta potencial para a fabricação de fibras ultrafinas poliméricas em larga escala e com baixo custo associado. Desde que começou a ser mais explorada, a partir da última década, um número crescente de patentes relacionadas ao método tem sido depositado, indicando um interesse contínuo na tecnologia.^{37,79}

O conceito fundamental do *rotary jet spinning* é relativamente simples, e não difere muito do método utilizado pelas máquinas de fazer algodão doce, já conhecido há décadas. Ainda assim, o desenvolvimento de dispositivos que sejam capazes de controlar com mais precisão a morfologia das fibras poliméricas produzidas deve ser levado em consideração.^{37,79} Basicamente, um sistema básico de rotofiação consiste em um reservatório contendo o polímero (fundido ou em solução) que é conectado ao eixo de um motor com velocidade de rotação controlável (normalmente operando em velocidades entre 3.000 e 20.000 rpm), conforme esquematizado na Figura 19.4.

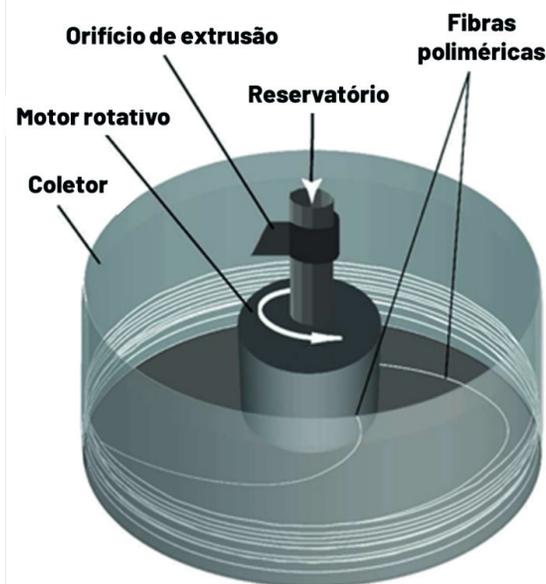


Figura 19.4. Componentes principais de um sistema básico de *rotary jet spinning*. Adaptada com permissão da referência ⁵⁷. Copyright 2010 American Chemical Society.

Em resumo, quando o reservatório gira em torno de seu eixo de simetria a uma velocidade angular maior do que um limite determinado pelo equilíbrio entre as forças capilares e centrífugas, um jato viscoso é lançado a partir de um pequeno orifício. Este jato é impulsionado de dentro para fora ao longo de uma trajetória conforme o solvente evapora, devido à sua grande área de superfície. Portanto, enquanto a fibra polimérica se move, ela é alongada por forças centrífugas. O jato de polímero viaja até chegar às paredes do coletor cilíndrico estático. Por fim, quando o jato polimérico chega no coletor, o solvente residual evapora, as fibras solidificam e o material está pronto para ser coletado.^{57,80,81} A Figura 19.5 ilustra esquematicamente o processo da formação das fibras polimérica pela técnica de *rotary jet spinning*. É importante destacar que a taxa de evaporação do solvente depende de sua volatilidade e, assim como no processo de eletrofiação, é um parâmetro que influencia as propriedades das fibras obtidas (maiores detalhes no Capítulo 2). Por exemplo, se o solvente for extremamente volátil, os jatos se tornam mais espessos, aumentando a velocidade de solidificação e dificultando a extensão do jato e, portanto, levando à formação de fibras de diâmetros maiores.⁵⁷

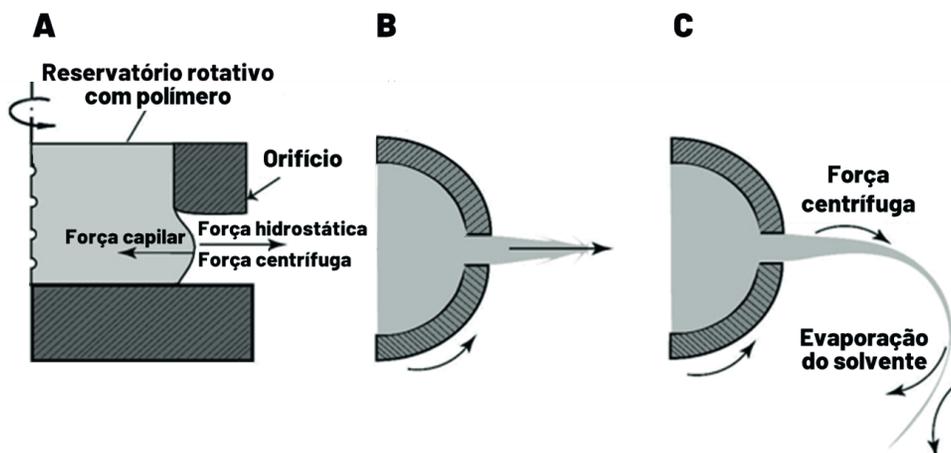


Figura 19.5. Desenho esquemático do mecanismo de formação das fibras poliméricas a partir do sistema de *rotary jet spinning*: (a) indução a jato, (b) alongamento a jato e (c) evaporação de solvente. Adaptada com permissão da referência ⁵⁷. Copyright 2010 American Chemical Society.

A técnica *rotary jet spinning* tem se mostrado muito promissora, principalmente em relação à eficiência energética. Além disso, a técnica não exige altas tensões elétricas ou jatos de ar de alta pressão, o que diminui bastante o custo geral da produção de fibras.³⁷ Ainda, o método tem a vantagem de poder trabalhar em taxas de produção até 100 vezes maiores que outras técnicas conhecidas de produção de micro/nanofibras poliméricas, intensificando a eficiência do processo e, por isso possuindo alta capacidade de aplicação industrial com baixo consumo de energia.^{59,81} O número padrão de orifícios por onde o polímero é extrudado em uma máquina de rotofiação é de pelo menos 2, no entanto, algumas máquinas, dependendo do projeto, possuem número muito superiores, levando à um aumento significativo na velocidade de produção. Os orifícios podem ser posicionados em paralelo para criar um sistema que cobre uma área maior e possibilita a criação de mantas em larga-escala.³⁷

Outro benefício importante da técnica de *rotary jet spinning* é a possibilidade de se trabalhar não apenas com solventes polares, mas sim com uma ampla gama de solventes e concentrações de soluções poliméricas. Adicionalmente, na rotofiação de polímeros fundidos não há necessidade da utilização de solventes, resultando em um produto ecologicamente amigável.^{80,81}

A gama de polímeros que podem ser utilizados pela técnica de *rotary jet spinning* é muito ampla e ainda está começando a ser investigada mais profundamente. Assim como para as outras técnicas de produção de fibras, a escolha do material normalmente é determinada pelas características específicas desejadas para a fibra final e dependente dos objetivos da pesquisa ou das aplicações. A Tabela 19.1 resume os principais polímeros utilizados na fabricação de fibras pelo processo de *rotary jet spinning*. Como pode ser visto, a rotofiação por fusão parece ser mais limitada nas escolhas de materiais, com

apenas alguns poucos materiais investigados, possivelmente devido à maior dificuldade de processamento de fibras por essa técnica.³⁷

Com relação ao diâmetro das fibras poliméricas produzidas pelo método de *rotary jet spinning*, a grande variabilidade encontrada nos estudos é geralmente decorrente das diferentes configurações de processamento (*e.g.*, tamanho do orifício de extrusão, velocidade de rotação e temperatura) e características do material (*e.g.*, massa molar do polímero e viscosidade da solução). Vale mencionar que normalmente a rotofiação é relatada como uma técnica que apresenta menor uniformidade no diâmetro das fibras produzidas quando comparada com outras técnicas, como por exemplo, a eletrofiação. Uma das explicações está relacionada ao fato que se leva um tempo para o processo ser estabilizado, levando à produção de fibras com diâmetros maiores no início do processo.³⁷

A comercialização da tecnologia de *rotary jet spinning* está caminhando a passos largos, com a introdução de máquinas de maior escala industrial, capazes de girar esteiras de fibra contínua de um metro de largura ou mais.³⁷ Impulsionados por necessidades de fibras ultrafinas poliméricas para aplicações biomédicas, dispositivos eletrônicos baseados em fibras como supercapacitores e sensores, baterias e filtros, a técnica de rotofiação tem mostrado uma tendência de aumento no interesse exponencial desde seu início e promete ainda oferecer muitos frutos para o setor tecnológico.^{37,82}

19.3.3 Draw spinning

Como na fiação centrífuga, a técnica *draw spinning* emprega forças mecânicas para a formação de fibras. O equipamento básico consiste em uma agulha para injeção da solução polimérica e uma superfície coletora.¹⁸ Diferente da eletrofiação, essa técnica gera uma única nanofibra. No processo, gotas da solução polimérica são depositadas em uma superfície plana (Fig. 19.6a). A agulha é mergulhada nessa gota e movida em uma baixa velocidade, de aproximadamente 10^{-4} m s^{-1} (Fig. 19.6b), formando uma linha e, por meio da evaporação do solvente, uma única fibra longa se forma (Fig. 19.6c).^{34,83} Apenas materiais viscoelásticos podem ser utilizados nesse método, gerando fibras bem alinhadas, com diâmetros acima de 100 nm e taxa de deposição de 1000 m min^{-1} .⁸⁴

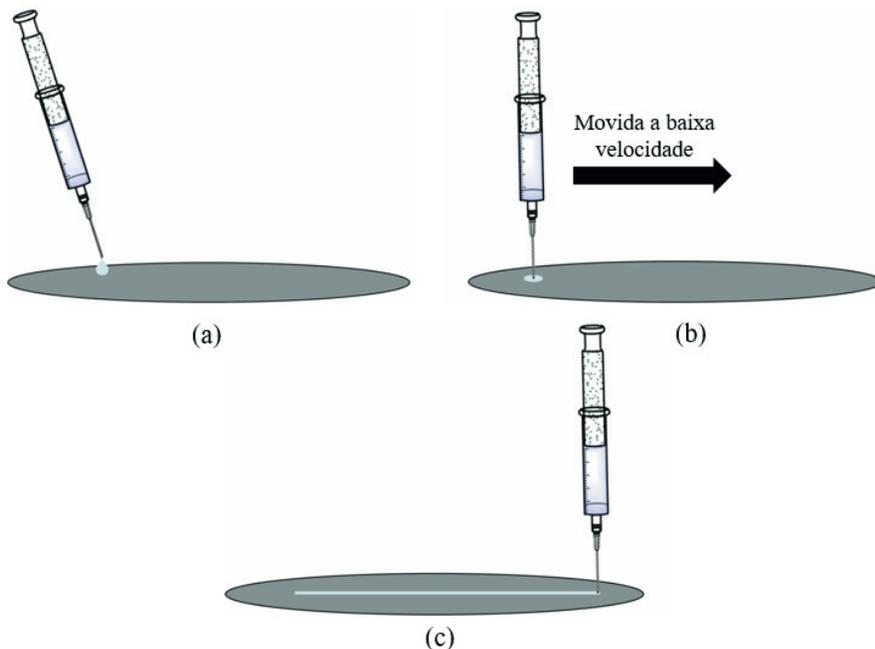


Figura 19.6. Representação do processo de produção de fibras por *draw spinning*. (a) Gotas da solução polimérica são injetadas em uma superfície plana. (b) A agulha é mergulhada na gota e movida a baixa velocidade ao longo de toda a superfície. (c) Durante o trajeto, o solvente evapora e uma única fibra longa se forma.

19.3.4 Bubble Spinning

Similar à fiação por sopro em solução, a técnica *bubble spinning* também utiliza um gás comprimido como força motriz. Nessa técnica, os bicos estão imersos em um recipiente contendo a solução polimérica e um fluxo de gás é injetado diretamente nela, formando bolhas. É na superfície das bolhas que se inicia a formação das fibras e múltiplos jatos poliméricos são ejetados em direção ao coletor (Fig. 19.7). A formação de múltiplos jatos possibilita que a taxa de deposição seja maior ($9 \text{ g h}^{-1} \text{ m}^{-2}$) do que a da de um sistema de eletrofiação com apenas um capilar ($0,0014 \text{ g h}^{-1} \text{ m}^{-2}$).^{34,83}

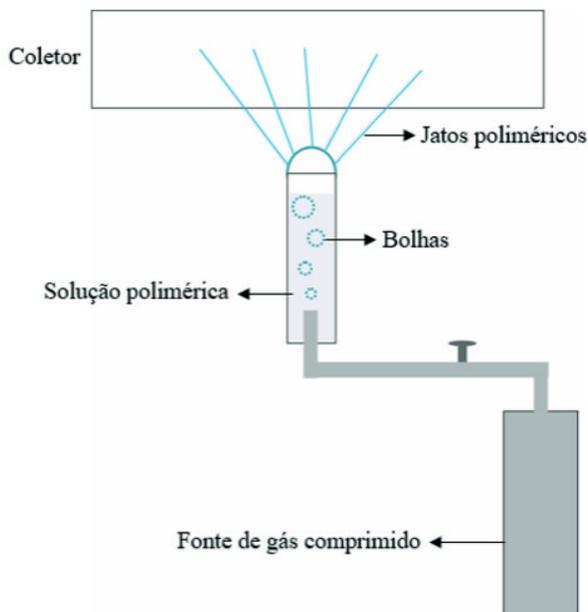


Figura 19.7. A técnica *Bubble Spinning* consiste na injeção de um fluxo de ar comprimido no interior de um recipiente contendo a solução polimérica. O fluxo de gás leva à formação de bolhas na solução. Quando as bolhas atingem a superfície, jatos poliméricos se formam e são expelidos em direção ao coletor, possibilitando a produção das fibras.

Estes são apenas alguns exemplos de métodos de produção de micro/nanofibras. Ainda existe um longo caminho a ser trilhado para que o uso dessas técnicas saia do laboratório para a produção em larga escala e, posteriormente, para aplicação prática. Para superar os desafios enfrentados no processo (equipamento, custo, produtividade, controle das propriedades das fibras, entre outros) é preciso investir no desenvolvimento de novas técnicas e no aperfeiçoamento das que já existem. Só assim novas oportunidades de inovação atingirão o mercado.⁸⁵

19.4 EXEMPLOS DE PRODUTOS COMERCIAIS BASEADOS EM FIBRAS

Nas últimas décadas, a produção de micro/nanofibras tem sido intensamente explorada pela indústria em diversos campos. Produtos contendo fibras estão sendo comercializados para aplicação em várias áreas, em particular na medicina regenerativa, cultura celular, filtração e componentes para materiais de engenharia.

Na Tabela 19.2 são apresentados os principais exemplos de produtos comerciais baseados em fibras. Analisando os dados da tabela, fica evidente que as fibras possuem potencial para servir de base para criação de diferentes materiais, bem como para suprir demandas do mercado por novos produtos mais eficientes, leves e práticos.

Tabela 19.2. Exemplos de produtos comerciais baseados em fibras.

Empresas	Nome comercial	Aplicação
Abalioglu Teknoloji	Hifyber	Filtro de ar
AstraPool®, Fluidra	NanoFiber	Filtro de ar para piscinas
Biotronik	Papyrus	Stent
Coway	Nanotrap	Filtro de água
DiPole Materials	BioPaper™ Technology	Produtos para cultura celular
Donaldson	Ultra-web® electrospun nanofiber, Fineweb™	Filtração de ar
Electrospinning Company	12, 96-well plate with random nanofibers	Produtos para cultura celular
eSpin Technologies	Exceed™	Filtro de ar para casa
HRV	Seta™	Filtro de ar
IQ Commercial	Return Focus Pod	Material para divisória de escritório
Kilwell e RevolutionFibres Ltd.	Kilwell NZ Xantu	Componente de vara de pescar
Koken	Ferena	Filtro
Liquidity Corporation	Naked filter	Filtro de água doméstico
Mann-hummel	Micrograde NF filter	Filtro de ar
Medprin	ReDura™ dural patch	Produtos biomédico
M-TEchX	Magic fibers (solution blow spinning)	Fibras absorventes de óleo e filtro de ar
Nanofiber Solutions	NanoECM, NanoAligned, NanoHep cell culture plates, Nanofiber Plates, Dishes, Chamber Slides and Plate inserts with random and aligned nanofibers	Produtos para cultura celular
Nask	Smart Mask	Máscara facial
Nicast	AVflo™	Produtos biomédico
Ortho ReBirth	Rebossis	Produto biomédico
Pardam e Pardem	NnF MBRANE®	Filtro de ar e água
Pardam Nanotechnology	NnF CERAM®	Filtro de ar
Papyrus, Coronary Balloon-Expandable Stent Systems	BIOTRONIK	Stent
Polyelements	6-well plate and 12-well plate with random and aligned nanofibers	Produtos para cultura celular
PolyRemedy	HealSmart™	Curativo
RevolutionFibres	actiVLayr, XantuLayr, Phonix, Nanodream, Nanofibre Pillow Lining	Máscara facial, Material para reforço, Barreira de som
Sigma-Aldrich	Cell culture dish, chamber slides and multiwall plate inserts with random and aligned nanofibers	Produtos para cultura celular
ske Advanced Therapies	Silk Fibroin tubular scaffold, flat sheet scaffold, disc	Produtos para cultura celular

SNS Nanofiber Technology LLC	Nanosan®	Filtros, produtos médicos, militares e cosméticos
SPUR Nanotechnologies	NnF MBRANE®, SpurTex FM,	Filtro de líquidos
Sorbent	Petryanov's filtering cloth	Filtro de ar
United Air Specialists a Clarcor company	ProTura® Nanofiber	Filtro de ar
Zeus	Bioweb™, Filtriq™	Filtro de ar
3D Biotek	Cell culture inserts	Produtos para cultura celular

Como pode ser visto na Tabela 19.2, filtração e separação de ar e líquido são as aplicações mais estabelecidas para as micro/nanofibras (maiores detalhes nos Capítulos 9 e 10). O pequeno diâmetro das fibras (especialmente no caso de nanofibras) e o tamanho dos poros resultam em uma alta eficiência de filtração, permitindo a remoção de partículas menores do que os materiais empregados em filtração convencionais. A funcionalização das nanofibras permite ainda a remoção seletiva de compostos alvo.

Em produtos de engenharia, as membranas e revestimentos feitos de nanofibras podem proporcionar um desempenho excepcional de barreira contra a água, enquanto a porosidade permite altos níveis de troca de gases. A capacidade de incorporar compostos antimicrobianos ou outra funcionalização também tem atraído o interesse para aplicações em roupas de proteção e no setor militar/de defesa.

Na área da biomedicina, as nanofibras demonstram ter grande potencial como *scaffolds* para a engenharia de tecidos e em recobrimento de implantes, onde a estrutura fibrosa (aleatória ou alinhada) é capaz de mimetizar tecidos nativos e influenciar o comportamento natural das células (maiores detalhes no Capítulo 7). A alta área superficial e a porosidade também as tornam excelentes candidatas para aplicações de tratamento de feridas, proporcionando sustentação eficaz para as células, desempenho hemostático, barreira à infecção, enquanto permitem a passagem de fluidos e gases para manter as condições ideais para a cicatrização das feridas (maiores detalhes no Capítulo 8).

19.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

As nanofibras têm atraído um tremendo interesse tecnológico e o escalonamento de seus processos produtivos está avançando rapidamente para garantir a inserção de novos produtos no mercado. Esses produtos apresentam como vantagens características inovadoras como alta porosidade e interconectividade de poros, flexibilidade, elevada área superficial e a capacidade de incorporar diversas substâncias como fármacos e semicondutores em sua estrutura. Em relação à produtividade, a eletrofiação ainda exhibe algumas restrições quanto ao limite máximo de produção. Para garantir a transição do método de eletrofiação para a produção em escala industrial, aspectos como configuração do capilar, propriedades reológicas da solução, solvente, intensidade e distribuição do

campo elétrico, vazão e geometria do coletor precisam ser avaliados de forma a garantir o processamento em grande volume, garantindo a precisão e reprodutibilidade em todas as etapas de fabricação, além da segurança operacional. Dessa forma, outras abordagens para resolver esses problemas estão sendo propostas com foco no aumento da produtividade e facilidade de escalonamento. Como exemplo, pode-se citar o uso de arranjos com múltiplos capilares na eletrofiação ou o emprego de forças aerodinâmicas em substituição ao campo eletromagnético no caso da técnica de fiação por sopro em solução. No entanto, ainda existem desafios quanto a redução ou recuperação dos solventes empregados durante a produção das fibras e ao controle de qualidade da morfologia e propriedades dos materiais gerados em escala industrial. Ainda existe muito espaço para o desenvolvimento de novos processos produtivos de nanofibras que sejam inovadores, de alto rendimento, fácil operação, baixo custo e com menor geração de poluentes. Os esforços tanto da comunidade acadêmica quanto do setor industrial apontam para o advento de tecnologias avançadas para este campo, no que diz respeito à implementação prática em aplicações industriais.

REFERÊNCIAS

1. Sanfelice, R. C.; Pavinatto, A.; Corrêa, D. S. In *Nanotecnologia Aplicada a Polímeros*; Sanfelice, R. C.; Pavinatto, A.; Corrêa, D. S., Eds.; Editora Blucher, 2022; pp. 27–48.
2. Martins, A.; Reis, R. L.; Neves, N. M. ;*Int. Mater. Rev.* **2008**, *53*, 257.
3. Tijing, L. D.; Choi, J. S.; Lee, S.; Kim, S. H.; Shon, H. K. ;*J. Memb. Sci.* **2014**, *453*, 435.
4. Horne, J.; McLoughlin, L.; Bridgers, B.; Wujcik, E. K. ;*Sensors and Actuators Reports* **2020**, *2*, 100005.
5. Mercante, L. A.; Scagion, V. P.; Migliorini, F. L.; Mattoso, L. H. C.; Correa, D. S. ;*TrAC - Trends Anal. Chem.* **2017**, *91*, 91.
6. Cleeton, C.; Keirouz, A.; Chen, X.; Radacsi, N. ;*ACS Biomater. Sci. Eng.* **2019**, *5*, 4183.
7. Chen, S.; Li, R.; Li, X.; Xie, J. ;*Adv. Drug Deliv. Rev.* **2018**, *132*, 188.
8. Chantre, C. O.; Gonzalez, G. M.; Ahn, S.; Cera, L.; Campbell, P. H.; Hoerstrup, S. P.; Parker, K. K. ;*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2019**, *11*, 45498.
9. Huang, R.; Chen, X.; Dong, Y.; Zhang, X.; Wei, Y.; Yang, Z.; Li, W.; Guo, Y.; Liu, J.; Yang, Z.; Wang, H.; Jin, L. ;*ACS Appl. Bio Mater.* **2020**, *3*, 2125.
10. 3D Biotechnology Solution <http://www.3dbiotechnologiessolutions.com/en/home-english/>.
11. Valipouri, A. ;*J. Text. Polym.* **2017**, *5*, 8.
12. Thoppey, N. M.; Bochinski, J. R.; Clarke, L. I.; Gorga, R. E. ;*Nanotechnology* **2011**, *22*, 345301.

13. Vass, P.; Szabó, E.; Domokos, A.; Hirsch, E.; Galata, D.; Farkas, B.; Démuth, B.; Andersen, S. K.; Vigh, T.; Verreck, G.; Marosi, G.; Nagy, Z. K. ;*Wiley Interdiscip. Rev. Nanomedicine Nanobiotechnology* **2020**, *12*, 1.
14. Vaseashta, A. ;*Appl. Phys. Lett.* **2007**, *90*, 093115.
15. Zhang, Y.; Cheng, Z.; Han, Z.; Zhao, S.; Zhao, X.; Kang, L. ;*RSC Adv.* **2018**, *8*, 6069.
16. Theron, S. A.; Yarin, A. L.; Zussman, E.; Kroll, E. ;*Polymer (Guildf).* **2005**, *46*, 2889.
17. Tomaszewski, W.; Szadkowski, M. ;*Fibres Text. East. Eur.* **2005**, *13*, 22.
18. Huang, Y.; Song, J.; Yang, C.; Long, Y.; Wu, H. ;*Mater. Today* **2019**, *28*, 98.
19. Yang, Y.; Jia, Z.; Li, Q.; Hou, L.; Liu, J.; Wang, L.; Guan, Z.; Zahn, M. ;*IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **2010**, *17*, 1592.
20. SalehHudin, H. S.; Mohamad, E. N.; Mahadi, W. N. L.; Muhammad Afifi, A. ;*Mater. Manuf. Process.* **2018**, *33*, 479.
21. dos Santos, D. M.; Correa, D. S.; Medeiros, E. S.; Oliveira, J. E.; Mattoso, L. H. C. ;*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, *12*, 45673.
22. Yflow® S.D. <http://www.yflow.com> (accessed Dec 1, 2022).
23. Inovenso Inc. <https://www.inovenso.com> (accessed Dec 1, 2022).
24. Yu, M.; Dong, R. H.; Yan, X.; Yu, G. F.; You, M. H.; Ning, X.; Long, Y. Z. ;*Macromol. Mater. Eng.* **2017**, *302*, 1.
25. Nayak, R.; Padhye, R.; Kyrtziz, I. L.; Truong, Y. B.; Arnold, L. ;*Text. Res. J.* **2012**, *82*, 129.
26. Hwang, M.; Karenson, M. O.; Elabd, Y. A. ;*ACS Appl. Polym. Mater.* **2019**, *1*, 2731.
27. Wei, L.; Sun, R.; Liu, C.; Xiong, J.; Qin, X. ;*Mater. Des.* **2019**, *179*, 107885.
28. Wei, L.; Wu, S.; Shi, W.; Aldrich, A. L.; Kielian, T.; Carlson, M. A.; Sun, R.; Qin, X.; Duan, B. ;*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2019**, *11*, 28740.
29. Xue, J.; Wu, T.; Dai, Y.; Xia, Y. ;*Chem. Rev.* **2019**, *119*, 5298.
30. Prahasti, G.; Zulfi, A.; Munir, M. M. ;*Nano Express* **2020**, *1*, 010046.
31. Elmarco Inc. <https://www.elmarco.com> (accessed Dec 1, 2022).
32. Ghosal, K.; Agatemor, C.; Tucker, N.; Kny, E.; Thomas, S. In *Electrospinning: From Basic Research to Commercialization*; Kny, E.; Ghosal, K.; Thomas, S., Eds.; The Royal Society of Chemistry, 2018; pp. 1–23.

33. Worldwide Outlook for the Nonwovens Industry (2018–2023) <https://www.metissue.com/articles/worldwide-outlook-for-the-nonwovens-industry--2018-2023-> (accessed Dec 1, 2022).
34. Barhoum, A.; Pal, K.; Rahier, H.; Uludag, H.; Kim, I. S.; Bechelany, M. ;*Appl. Mater. Today* **2019**, *17*, 1.
35. Song, J.; Kim, M.; Lee, H. ;*Polymers (Basel)*. **2020**, *12*, 1386.
36. Kenry; Lim, C. T. ;*Prog. Polym. Sci.* **2017**, *70*, 1.
37. Rogalski, J. J.; Bastiaansen, C. W. M.; Peijs, T. ;*Nanocomposites* **2017**, *3*, 97.
38. Daristotle, J. L.; Behrens, A. M.; Sandler, A. D.; Kofinas, P. ;*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2016**, *8*, 34951.
39. Medeiros, E. S.; Glenn, G. M.; Klamczynski, A. P.; Orts, W. J.; Mattoso, L. H. C. Solution blow spinning **2010**.
40. Dadol, G. C.; Kilic, A.; Tijing, L. D.; Lim, K. J. A.; Cabatingan, L. K.; Tan, N. P. B.; Stojanovska, E.; Polat, Y. ;*Mater. Today Commun.* **2020**, *25*, 101656.
41. Larsen, G.; Spretz, R.; Velarde-Ortiz, R. ;*Adv. Mater.* **2004**, *16*, 166.
42. Saleem, H.; Trabzon, L.; Kilic, A.; Zaidi, S. J. ;*Desalination* **2020**, *478*, 114178.
43. Silva, T. H.; de Oliveira, J. E.; de Medeiros, E. S. ;*Polimeros* **2015**, *25*, 229.
44. Gao, Y.; Xiang, H.-F.; Wang, X.-X.; Yan, K.; Liu, Q.; Li, X.; Liu, R.-Q.; Yu, M.; Long, Y.-Z. ;*Chem. Eng. J.* **2020**, *387*, 124052.
45. Santos, A. M. C.; Medeiros, E. L. G.; Blaker, J. J.; Medeiros, E. S. ;*Mater. Lett.* **2016**, *176*, 122.
46. da Silva Parize, D. D.; Foschini, M. M.; de Oliveira, J. E.; Klamczynski, A. P.; Glenn, G. M.; Marconcini, J. M.; Mattoso, L. H. C. ;*J. Mater. Sci.* **2016**, *51*, 4627.
47. Alvarenga, A. D.; Andre, S.; Teodoro, K. B. R.; Schneider, R.; Mercante, L. A.; Correa, D. S. ;*Chem. Eng. J.* **2023**, *451*, 138557.
48. Mercante, L. A.; Facure, M. H. M.; Locilento, D. A.; Sanfelice, R. C.; Migliorini, F. L.; Mattoso, L. H. C.; Correa, D. S. ;*New J. Chem.* **2017**, *41*, 9087.
49. Shi, L.; Zhuang, X.; Tao, X.; Cheng, B.; Kang, W. ;*Fibers Polym.* **2013**, *14*, 1485.
50. Alvarenga, A. D.; Correa, D. S. ;*J. Clean. Prod.* **2021**, *285*, 125376.
51. Hammami, M. A.; Krifa, M.; Harzallah, O. ;*J. Text. Inst.* **2014**, *105*, 637.
52. Krifa, M.; Hammami, M. A.; Wu, H. ;*J. Text. Inst.* **2015**, *106*, 284.

53. Oliveira, J. E.; Moraes, E. A.; Marconcini, J. M.; C. Mattoso, L. H.; Glenn, G. M.; Medeiros, E. S. ;*J. Appl. Polym. Sci.* **2013**, *129*, 3672.
54. Oliveira, J. E.; Mattoso, L. H. C.; Orts, W. J.; Medeiros, E. S. ;*Adv. Mater. Sci. Eng.* **2013**, *2013*, 1.
55. Padron, S.; Patlan, R.; Gutierrez, J.; Santos, N.; Eubanks, T.; Lozano, K. ;*J. Appl. Polym. Sci.* **2012**, *125*, 3610.
56. Liu, F.; Avena-Bustillos, R. J.; Bilbao-Sainz, C.; Woods, R.; Chiou, B.-S.; Wood, D.; Williams, T.; Yokoyama, W.; Glenn, G. M.; McHugh, T. H.; Zhong, F. ;*J. Food Sci.* **2017**, *82*, 1402.
57. Badrossamay, M. R.; McIlwee, H. A.; Goss, J. A.; Parker, K. K. ;*Nano Lett.* **2010**, *10*, 2257.
58. Liu, R.; Xu, X.; Zhuang, X.; Cheng, B. ;*Carbohydr. Polym.* **2014**, *101*, 1116.
59. Mîndru, T. B.; Ignat, L.; Mîndru, I. B.; Pinteala, M. ;*Fibers Polym.* **2013**, *14*, 1526.
60. Nepomuceno, N. C.; Barbosa, M. A.; Bonan, R. F.; Oliveira, J. E.; Sampaio, F. C.; Medeiros, E. S. ;*J. Appl. Polym. Sci.* **2018**, *135*, 45782.
61. Tomecka, E.; Wojasinski, M.; Jastrzebska, E.; Chudy, M.; Ciach, T.; Brzozka, Z. ;*Mater. Sci. Eng. C* **2017**, *75*, 305.
62. Ren, L.; Pandit, V.; Elkin, J.; Denman, T.; Cooper, J. A.; Kotha, S. P. ;*Nanoscale* **2013**, *5*, 2337.
63. Elnabawy, E.; Farag, M.; Soliman, A.; Mahmoud, K.; Shehata, N.; Nair, R.; Kandas, I.; Atif, R.; Combrinck, M.; Khaliq, J.; Shyha, I.; Kilic, A.; Hassanin, A. H. ;*J. Appl. Polym. Sci.* **2021**, *138*, 51322.
64. González-Benito, J.; Teno, J.; González-Gaitano, G.; Xu, S.; Chiang, M. Y. ;*Polym. Test.* **2017**, *58*, 21.
65. Vazquez, B.; Vasquez, H.; Lozano, K. ;*Polym. Eng. Sci.* **2012**, *52*, 2260.
66. Shi, Z.; Ju, J.; Liang, Y.; Huang, W.; Kang, W.; Cheng, B. ;*Chem. Lett.* **2017**, *46*, 131.
67. Rane, Y.; Altecór, A.; Bell, N. S.; Lozano, K. ;*J. Eng. Fiber. Fabr.* **2013**, *8*, 155892501300800.
68. Weng, B.; Xu, F.; Garza, G.; Alcoutlabi, M.; Salinas, A.; Lozano, K. ;*Polym. Eng. Sci.* **2015**, *55*, 81.
69. Santos, A. M. C.; Medeiros, E. L. G.; Blaker, J. J.; Medeiros, E. S. ;*Mater. Lett.* **2016**, *176*, 122.
70. Nava, R.; Cremar, L.; Agubra, V.; Sánchez, J.; Alcoutlabi, M.; Lozano, K. ;*ACS Appl. Mater. Interfaces* **2016**, *8*, 29365.
71. Yanilmaz, M.; Zhang, X. ;*Polymers (Basel)*. **2015**, *7*, 629.
72. Chen, H.; Xu, H.; Sun, J.; Liu, C.; Yang, B. ;*Micro Nano Lett.* **2015**, *10*, 81.
73. O'Haire, T.; Rigout, M.; Russell, S.; Carr, C. ;*J. Thermoplast. Compos. Mater.* **2014**, *27*, 205.

74. Shanmuganathan, K.; Fang, Y.; Chou, D. Y.; Sparks, S.; Hibbert, J.; Ellison, C. J. ;*ACS Macro Lett.* **2012**, *1*, 960.
75. Machado-Paula, M. M.; Corat, M. A. F.; Lancellotti, M.; Mi, G.; Marciano, F. R.; Vega, M. L.; Hidalgo, A. A.; Webster, T. J.; Lobo, A. O. ;*Mater. Sci. Eng. C* **2020**, *111*, 110706.
76. Zander, N. E. ;*J. Appl. Polym. Sci.* **2015**, *132*, 41269.
77. Cena, C. R.; Silva, M. J.; Malmonge, L. F.; Malmonge, J. A. ;*J. Polym. Res.* **2018**, *25*, 238.
78. Altecor Aleksey; MAO, Y.; LOZANO, K. ;*Funct. Mater. Lett.* **2012**, *05*, 1250020.
79. Zhang, X.; Lu, Y. ;*Polym. Rev.* **2014**, *54*, 677.
80. Mellado, P.; McIlwee, H. A.; Badrossamay, M. R.; Goss, J. A.; Mahadevan, L.; Kit Parker, K. ;*Appl. Phys. Lett.* **2011**, *99*, 203107.
81. Stocco, T. D.; Bassous, N. J.; Zhao, S.; Granato, A. E. C.; Webster, T. J.; Lobo, A. O. ;*Nanoscale* **2018**, *10*, 12228.
82. Huttunen, M.; Kellomäki, M. ;*J. Tissue Eng. Regen. Med.* **2011**, *5*, e239.
83. Alghoraibi, I.; Alomari, S. In *Handbook of Nanofibers*; Springer International Publishing: Cham, 2018; pp. 1–46.
84. Tokarev, A.; Asheghali, D.; Griffiths, I. M.; Trotsenko, O.; Gruzd, A.; Lin, X.; Stone, H. A.; Minko, S. ;*Adv. Mater.* **2015**, *27*, 6526.
85. Ko, F. K.; Wan, Y. *Introduction to Nanofiber Materials*; Cambridge University Press, 2014.

SOBRE OS AUTORES



ALINE MOREIRA DE ALCÂNTARA: Graduada em Química (2015-2018) pela Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ) e mestre em Agroquímica (2019-2021) pela Universidade Federal de Lavras (UFLA). Pesquisas realizadas nas áreas de Química Orgânica e Bioquímica durante a graduação. Suas principais áreas de atuação são em: Química Orgânica, Bioquímica, Nanotecnologia, polímeros e liberação controlada.

<http://lattes.cnpq.br/8366221048121970>



ANDERSON DE OLIVEIRA LOBO: Professor Titular-Livre do Centro de Tecnologia (Graduação em Engenharia de Materiais) e Coordenador Geral de Infraestrutura de Pesquisa da Universidade Federal do Piauí. Membro afiliado da Academia Brasileira de Ciências. Produtividade em Pesquisa do CNPq nível 1D. Doutor em Ciências pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Pós-doutorado em Bioengenharia na Harvard Medical School e Massachusetts Institute of Technology (Harvard-MIT Health Sciences and Technology). Possui experiência didático-científica na área de Engenharia de Materiais e Biomédica. Atua diretamente no desenvolvimento de biomateriais biomiméticos e bioinspirados aplicados a engenharia tecidual e nanomedicina. Possui mais de 160 artigos indexados em revistas de seletiva política editorial, mais de 2600 citações e índice H=30. Coordenou e coordena diversos projetos como Pesquisador Principal nos principais órgãos de fomento do Brasil, tais como: FINEP, FAPESP, CNPq, CAPES e SERRAPILHEIRA. Revisor de agências de fomentos nacionais e internacionais, tais como Fapesp, CNPq e Japan Society for the Promotion of Science. Sócio fundador da empresa NewHope Soluções em Pesquisa incubada na Ineagro-UFPI. É editor chefe associado de dois periódicos internacionais classificados como A1 na Capes, sendo eles: International Journal of Nanomedicine e Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, sendo ambos um dos principais periódicos na área de Nanomedicina e Nanobiomateriais.

<http://lattes.cnpq.br/8605141883488358>



CAIO VINICIUS LIMA NATARELLI: Engenheiro de materiais formado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ (2017) e mestre em Engenharia de Biomateriais pela Universidade Federal de Lavras – UFLA (2019). Atualmente é aluno de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Tem experiência na área de Ciência e Engenharia de Materiais, com foco em polímeros e biopolímeros.

<http://lattes.cnpq.br/3047763076067521>



JOSÉ MANOEL MARCONCINI: Graduado em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos (1995) com ênfase em Materiais Poliméricos. Realizou trabalho na área de Biomateriais, na avaliação da qualidade de cimentos acrílicos ósseos, em equipe multidisciplinar no IOT-HC-FMUSP e na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), entre 1994 e 1996. Mestrado em Química, área de concentração Físico-Química, pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (2000) no tema de Imobilização de enzimas em derivados de celulose. Doutorado em Química pela Universidade Federal de São Carlos (2005), na área de Blendas de Poliolefinas e PET reciclados. Foi bolsista de desenvolvimento tecnológico Industrial (DTI) do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento- LACTEC, em Curitiba - PR, trabalhando no tema de Desenvolvimento de metodologias de análise de polímeros por infravermelho com reflectância total atenuada (FTIR-ATR) e ressonância magnética nuclear (RMN) (2006). Pesquisador da Embrapa Instrumentação Agropecuária - CNPDIA, atuando na área de Nanotecnologia, com Materiais Compósitos e Novos Materiais. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais, com ênfase em Polímeros, atuando principalmente nos seguintes temas: blendas poliméricas, reciclagem, poliolefinas recicladas, PET reciclado, celulose, enzimas imobilizadas e nanocompósitos de matriz polimérica. De 02 de julho de 2018 a 02 de janeiro de 2022 ocupou o cargo de Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento.
<http://lattes.cnpq.br/5373845785326215>



JULIANO ELVIS OLIVEIRA: Doutor em Ciência e Engenharia de pela Universidade Federal de São Carlos – UFSCar (2011). Atualmente é professor na Universidade Federal de Lavras onde atua em cursos de graduação e pós-graduação em química e engenharia. Tem experiência na área de polímeros biodegradáveis e biopolímeros, nanoestruturas poliméricas e liberação controlada.
<http://lattes.cnpq.br/4990968421738051>



LUIZ HENRIQUE CAPPARELLI MATTOSO: Graduado em Engenharia de Materiais, com mestrado e doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos. Tem especialização na França, e EUA e pós-doutorado em Nanotecnologia no Departamento de Agricultura dos Estados Unidos pelo programa Labex (Laboratório da Embrapa no Exterior). Trabalhou com o Prof. Dr. Alan MacDiarmid, laureado com o Prêmio Nobel de Química de 2000. É pesquisador da Embrapa desde 1994 e já orientou 70 alunos de doutorado e mestrado e teve mais de 30 pós-doutorandos sob sua supervisão. Coordenou vários projetos de pesquisa de âmbito Nacional, em particular a Rede de Pesquisa em Nanotecnologia Aplicada ao Agronegócio. Tem atuado nos seguintes temas: nanotecnologia, polímeros condutores, biopolímeros, bionanocompósitos, sensores, biomateriais, nanofibras, nanocelulose, borracha natural e desenvolvimento de materiais poliméricos de fonte renovável. Foi ganhador de várias premiações dentre as quais se destacam o Prêmio Governador do Estado, Invento Brasileiro do SEDAI e o prêmio SCOPUS/Elsevier/CAPES. Tem participado na organização de vários eventos técnico-científicos e na edição de anais e livros. É membro do Conselho Editorial de revistas técnico-científicas e assessor científico de várias agências de fomento. Foi Diretor da Associação Brasileira de Polímeros, membro do Comitê Assessor do CNPq (CA-MM), e membro dos Comitês Assessor Externo, de Publicações, de Propriedade Intelectual e de vários outros comitês da Embrapa Instrumentação e da comunidade científica. Foi Chefe de P&D da Embrapa Instrumentação em 2 gestões e Chefe Geral de 2010 a 2015. Mantém forte cooperação internacional com os Estados Unidos, França, Alemanha, Portugal e Itália.

<http://lattes.cnpq.br/5839043594908917>



RAFAEL MELO CARDOSO: Doutor em Química Analítica pela Universidade Federal de Uberlândia, com graduação em Química Bacharelado/Licenciatura pelo Instituto de Química na mesma universidade. Atualmente é pós-doutorando pela Embrapa Instrumentação com foco em desenvolvimento de sensores utilizando impressão 3D e técnicas de fiação. Tem experiência no desenvolvimento de plataformas sensoriais eletroquímicas especialmente de fontes carbonáceas e materiais nanoestruturados.

<http://lattes.cnpq.br/2856208929259478>



RAFAELLA TAKEHARA PASCHOALIN: Graduada em Farmácia (2009), iniciação científica em nanotecnologia (2007-2010) na Embrapa Instrumentação, mestrado em biotecnologia (2012) pela Universidade Federal de São Carlos sobre o tema síntese e estudo de nanopartículas magnéticas para aplicações biomédicas. Doutorado em Química (2017) pela Universidade Federal de São Carlos sobre o tema desenvolvimento de nanofibras poliméricas por fiação por sopro em solução visando aplicação em Engenharia de Tecido. Fez estágio de pesquisa durante o doutorado na RWTH Aachen University. Atualmente, é pesquisadora de pós-doutorado no Instituto de Física de São Carlos (IFSC), Universidade de São Paulo (USP). Suas principais áreas de atuação são em: Nanotecnologia, fiação por sopro em solução, eletrofiação, polímeros naturais e sintéticos, engenharia de tecidos e sensores.

<http://lattes.cnpq.br/3170218211847010>



THIAGO DOMINGUES STOCCO: Professor na Universidade de Santo Amaro e doutorando da Faculdade de Ciências Médicas da Universidade Estadual de Campinas. Recebeu seu título de mestre em Engenharia Biomédica em 2016 pela Universidade do Vale do Paraíba, atuando no Laboratório de Nanotecnologia Biomédica, com a fabricação de scaffolds biomiméticos baseados em nanofibras. Atualmente, é *Research trainee* no Brigham and Women's Hospital, Harvard Medical School, onde suas pesquisas se concentram em engenharia de tecidos e medicina regenerativa, principalmente na aplicação de bioimpressão 3D e biomateriais nanoestruturados para o tratamento de lesões do sistema musculoesquelético.

<http://lattes.cnpq.br/6643357205969122>