



APERFEIÇOAMENTO DE UMA UNIDADE EXPERIMENTAL DE LEITO DE JORRO COM PARTICULADO INERTE PARA A PRODUÇÃO DE FERTILIZANTE FOLIAR

ANA CAROLINA R. STOPPE^{1*}, JOSÉ LUIZ VIEIRA NETO¹, KÁSSIA G. SANTOS¹

¹Universidade Federal Do Triângulo Mineiro, Programa de Mestrado Profissional em Inovação
Tecnológica

*e-mail: anacarolina_stoppe@hotmail.com.br

RESUMO - O seguinte trabalho teve como intuito aperfeiçoar uma unidade de leito de jorro para a secagem de fertilizante foliar usando sólidos inertes. O fertilizante adotado possuiu dificuldade de solubilização, com a premissa de que essa técnica de secagem pode aumentar a solubilidade do pó. O inerte escolhido foi o polietileno de baixa densidade PEBD. Os ensaios de secagem da solução foram realizados segundo o planejamento experimental 2³, sendo avaliados os fatores: tempo de alimentação da solução, o tempo de intermitência (sem alimentação) e a altura do atomizador. As respostas geradas durante os testes foram a umidade final do pó, o rendimento e a produtividade. Apesar do rendimento durante a secagem ter sido baixo, 26,6% na melhor configuração, o pó seco resultante apresentou um aumento da solubilidade em 69% comparado com o fertilizante *in natura*. Análises de DRX foram empregadas para analisar a cristalinidade e nível de fase amorfa dos materiais. Análises de CFD foram empregadas para se investigar uma peculiaridade no fluxo das partículas, um defeito na geometria na unidade foi encontrado. Assim, foi possível propor mudanças na unidade experimental em vistas de viabilizar sua aplicação na secagem de fertilizante em pó.

INTRODUÇÃO

Ao passo que as produções no campo aumentam em volume, se eleva também a necessidade de nutrição das plantas, uma vez que os nutrientes do solo essenciais para o desenvolvimento vão se esgotando com o passar do tempo. Se ocorrer a falta de algum nutriente durante o crescimento das plantas, afetará diretamente no potencial de produtividade da lavoura. Desta forma, cada vez mais os fertilizantes precisam ser inseridos nos sistemas de plantação para se alcançar níveis adequados de produtividade com resultados vantajosos para os produtos (REETZ, 2016).

Existem diversas formas de fertilização, entre elas a fertilização foliar. Este tipo é aplicado nas partes aéreas das plantas, sendo que a absorção de nutrientes se torna muito mais rápida e efetiva. As aplicações são

realizadas por pulverizadores, aspersores e aviões agrícolas (ALBERTO, 2017)

Alguns fertilizantes foliares são comercializados na forma de pó, devido à facilidade de transporte e redução de peso da carga. Para serem aplicados nas plantações, precisam ser solubilizados pelo produtor em determinada quantidade de água, chamado de volume de calda, podendo ser aplicados por pulverizadores, aspersores e aviões agrícolas.

A solubilidade de determinados fertilizantes foliares em pó não é tão rentável, pois pode ocorrer o entupimento de bicos e a formação de sólidos do fundo dos tanques de aplicação, gerando perdas. A fim de melhorar a solubilidade dos fertilizantes foliares, alguns processos de transferência de calor e massa podem ser aplicados em sua solução aquosa, para se mudar a estrutura morfológica do sólido final e melhorar o seu rendimento. Uma técnica que está em estudo seria a secagem da solução

com o auxílio de um secador em regime de leito de jorro.

O funcionamento dos leitos de jorro obedece aos fenômenos de transferência de calor e massa ao mesmo tempo, visto que o material no interior do leito entra em contato com o ar de secagem, ocasionando também um movimento cíclico das partículas. Este movimento favorece uma maior mistura, ajudando diminuir as zonas mortas em processos de secagem, o que pode levar a maiores homogeneidades no produto final (FERNANDES, 2005).

Para acompanhar este tipo de interação entre fluido e partícula, se utiliza a aplicação de simulações por fluidodinâmica computacional. Esta técnica é significativa para o domínio dos fenômenos de transferências, além de colaborar com projetos de construção, modificações estruturais e acompanhamento durante estudos de processos operacionais.

A aplicação da ciência de fluidodinâmica computacional em um leito de jorro associada com a ideia de se melhorar a qualidade físico-química de um fertilizante foliar, se apresenta de forma promissora na comunidade acadêmica de pesquisas agrícolas, uma vez que o aumento da solubilidade dos fertilizantes tornará o processo de aplicação mais rentável tanto para o produtor rural como para a comercialização da indústria.

Esse trabalho teve como objetivo principal aprimorar uma unidade experimental para obtenção de um fertilizante foliar em pó, através da atomização da solução de fertilizante e sua secagem em leito de jorro operando com sólidos inertes.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização do sólido inerte

As partículas inertes de interesse deste estudo foram os *pellets* de polietileno de baixa densidade PEBD, material que foi selecionado devido a algumas características que possui. Como o polietileno é um material leve, requer uma menor quantidade energética para ser executar a fluidodinâmica necessária do equipamento, além de possuir uma superfície levemente porosa, que irá facilitar o desprendimento do pó seco que irá recobrir a partícula.

Ângulo de contato do sistema sólido-líquido: Para estimar se uma solução ou pasta irá molhar de forma eficiente a superfície de uma partícula, é preciso de contabilizar o ângulo de contato entre eles. Em estudos realizados por Donida (2004) e Rocha, Donida e Marques (2009) foi averiguado que em secadores de leito de jorro com emprego de inertes, ângulos de contato superiores a 70° não contribuem para o revestimento da partícula. Isto acontece, pois, as forças de adesão da película polimérica na superfície do sólido inerte não são fortes o suficiente, tendendo para a secagem e granulação, sendo o pó fino elutriado pelo processo.

Para se verificar o ângulo de contato da suspensão de fertilizante foliar e a superfície de PEBD, foram tiradas 40 fotos de diferentes gotas da solução 0,02 g/mL (concentração recomendada pelo fabricante para uso na agricultura) sobre uma superfície lisa de PEBD. Em seguida, as fotos tiradas com um aparelho celular foram tratadas online em uma página da internet chamada de Transferidor Online (GINIFABI, 2021). Neste site é possível se adicionar qualquer tipo de fotografia e calcular ângulos sobre as imagens. Na sequência, uma média foi calculada para se encontrar o valor médio dos ângulos.

Unidade experimental

A unidade experimental utilizada neste estudo, ilustrada na Figura 1, necessitava de alguns reparos antes de se iniciar os testes de secagem. Foi realizada a adição dos sensores de pressão para instrumentação, adição de isolamento térmico na tubulação de ar de secagem após passagem pela resistência. Assim como a troca de tubulações espiraladas, da resistência de aquecimento de ar, troca da fiação elétrica, termopares, disjuntores, entre outros.

O processo de secagem ocorria da seguinte forma, com o acionamento do soprador, o ar soprado passava pela placa de orifício através de uma tubulação de ferro fundido. Próximo à placa de orifício existem duas saídas de ar, uma de cada lado da placa e, nesses pontos, se realizava a leitura da queda de pressão da placa através dos transdutores de pressão.

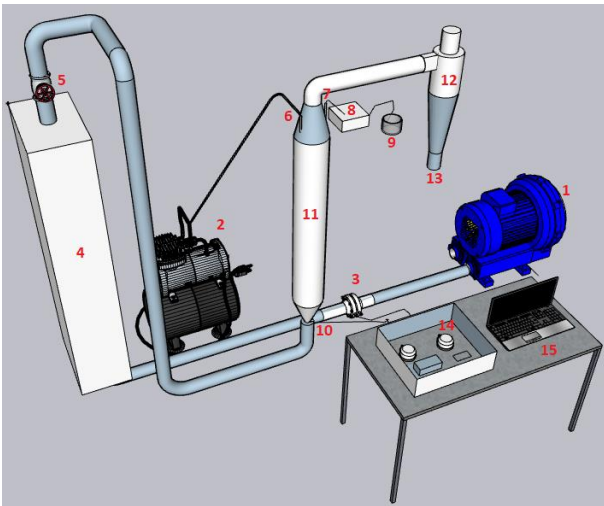


Figura 1: Unidade experimental e seus principais componentes. Legenda: (1) Soprador de ar de secagem; (2) Compressor de ar de atomização; (3) Placa de orifício e medidor de vazão; (4) Sistema de aquecimento por resistência aletada; (5) Válvula gaveta para controle da vazão de ar de secagem; (6) Entrada do ar de atomização; (7) Entrada de alimentação da solução; (8) Bomba Peristáltica; (9) Bécquer com a solução de fertilizante; (10) Medidor de queda de pressão do leito; (11) Leito de jorro; (12) Ciclone; (13) Ponto de coleta do produto (underflow do ciclone); (14) Sistema de aquisição de dados; (15) Computador.

O ar seguia pela tubulação e encontrava o sistema de aquecimento da unidade, uma resistência de 4000 W aletada para ar. O ar aquecido escoava pela tubulação, passando pelo termopar tipo K, o qual transmitia a leitura de temperatura para o controlador (ele age sobre a resistência, para que a temperatura do ar esteja em torno do *set point* pré-estabelecido).

Em seguida o ar aquecido atravessava o orifício de entrada do leito de jorro. Neste ponto estava localizado outro transdutor diferencial de pressão. Dentro do leito cônico-cilíndrico o ar interagiu com as partículas inertes, fazendo a movimentação típica da fluidodinâmica do sistema de leito de jorro. Ao longo do leito existem três pontos de medidas de temperaturas, T_0 , T_1 e T_2 , realizadas por termopares.

Sobre esse sistema a solução de fertilizante era pulverizada pelo bico atomizador de duplo fluido. O bico possuía duas entradas, em uma era conectada a bomba peristáltica, e na outra estava conectada a mangueira do compressor de ar que trabalhava à 1 bar.

O fertilizante secado pelo do leito passa pela tubulação de exaustão e era elutriado para o ciclone, onde ocorria a separação sólido-fluido. No *overflow* do ciclone existia outro

ponto de medição de temperatura por termopar. O produto final era coletado no *underflow* do ciclone.

Experimentos de secagem

Preparo da amostra: Antes de ser realizado o experimento de secagem, era necessário solubilizar o fertilizante foliar da seguinte forma. De início, se pesava em uma balança analítica a quantidade 2 gramas. Então, com o auxílio de uma proveta eram adicionados 100 mL de água destilada um bécquer. O bécquer era levado à um agitador magnético a 1000 rpm, onde era adicionado o fertilizante em pó. A solução era agitada até se tornar homogênea.

Condições operacionais: Os experimentos realizados com a unidade já existente possuíam o intuito de se avaliar a possibilidade de uso atual e futuras adaptações, verificando se as geometrias do leito de jorro eram adequadas ao processo de secagem. Na Figura 2 (a) tem-se um desenho representativo dos principais elementos do sistema de leito de jorro, assim como a discriminação das variáveis do processo.

Para se definir as faixas de operação da unidade experimental foram necessários realizar testes preliminares, como análise da vazão da bomba e pressão do bico atomizador.

A definição da temperatura foi realizada a partir do sensoriamento das temperaturas no leito, captando os valores nos pontos T_0 , T_1 , T_2 e T_3 (descritos na Figura 2 (a)). O ponto de maior interesse foi o centro do leito, T_1 , pois é a região onde existe a maior interação de fluido-partícula do sistema de secagem. Nesta posição, a temperatura inicial devia ser em torno de 100°C. Segundo Alberto (2017), o valor para a secagem desta solução deve ser no mínimo 100°C, devido ao calor necessário para evaporar a água, solvente desta solução. Com a operação nesse nível de temperatura ainda é possível retirar água presente nos compostos cristalinos, modificando a morfologia do produto para amorfo, com a finalidade de aumentar sua solubilidade (SYAMAL, 2008). Porém, como o material inerte utilizado se deforma com o calor, temperaturas acima de 110°C não deviam ser empregadas dentro do leito.

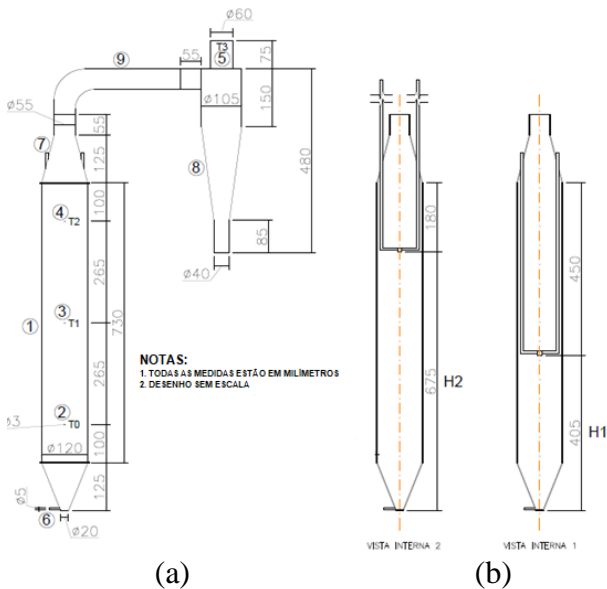


Figura 2: (a) Sistema de secagem. Legenda: (1) Leito de jorro; (2;3;4;5) Termopares tipo K; (6) Medidor de pressão do leito; (7) Alimentação da solução; (8) Ciclone (Lapple); (9) tubo de exaustão do leito para o ciclone; (b) Vista interna do leito de jorro com o atomizador nas duas alturas empregadas durante os testes, H1 e H2.

Entre as diferentes cargas de inertes testadas, foi analisada qual curva característica apresentava uma estabilidade maior para fluidodinâmica do jorro e, então, a massa pertencente à curva mais estável foi a escolhida. A vazão de alimentação de ar também foi eleita a partir da análise da curva característica, sendo que, uma vez registrado o valor de velocidade mínima de jorro, foi definido que o leito operaria em uma intensidade de 1,2 dessa medida.

Testes preliminares mostraram que o leito apresentava uma alta umidade relativa em seu interior quando era operado em alimentação de solução continuamente. Como visto por Dantas (2018) a intermitência na alimentação da solução é uma alternativa para esses casos, pois proporciona uma melhor fluidodinâmica para o sistema, diminuindo a umidade e aglomeração de partículas e, por consequência, melhorando a secagem.

Tendo o auxílio de um aplicativo chamado Interval Timer®, os tempos da intermitência eram registrados e um alarme era acionado a cada ciclo. Assim, com o sistema preparado, a alimentação da solução era iniciada. Logo em seguida, de acordo com o tempo de intermitência definido, era interrompida e depois retomada, sendo que esse ciclo se repetiu até que todo o volume de

solução fosse utilizado. Os registros da instrumentação via Labview eram acompanhados a cada alimentação e intermitência, realizando uma ou duas leituras por etapa, em cada ciclo.

Planejamento experimental: Os ensaios experimentais foram delineados conforme um planejamento fatorial 2^3 , com três fatores e dois níveis cada. O nível mais baixo foi codificado como -1 (10 s de alimentação (t_{al}), 60 s de intermitência (t_{int}) e 0,40 m de altura do atomizador (H_a com a base do leito) e o nível mais alto foi codificado como +1 (30 s de alimentação, 300 s de intermitência e 0,68 m de altura do atomizador com a base do leito). A Tabela 1 traz a matriz desse delineamento experimental completa, que mostra os valores codificados e não codificados de cada fator. O ponto experimental que obteve melhor rendimento foi executado em duplicata e também é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Planejamento experimental para os ensaios realizados. * Ponto de duplicata.

Experimentos	t_{al} [s] (x_1)	t_{int} [s] (x_2)	H_a [m] (x_3)
Teste 1	10 (-1)	60 (-1)	0,40 (-1)
Teste 2	30 (+1)	60 (-1)	0,40 (-1)
Teste 3	10 (-1)	300 (+1)	0,40 (-1)
Teste 4	30 (+1)	300 (+1)	0,40 (-1)
Teste 5	10 (-1)	60 (-1)	0,68 (+1)
Teste 6	30 (+1)	60 (-1)	0,68 (+1)
Teste 7	10 (-1)	300 (+1)	0,68 (+1)
Teste 8	30 (+1)	300 (+1)	0,68 (+1)
Teste 9*	30 (+1)	60 (-1)	0,68 (+1)

Caracterização do fertilizante foliar

Para analisar, por comparação, se houve modificações e melhorias causadas pelo processo de secagem, os testes de caracterização do fertilizante foliar estudado nesta pesquisa foram realizados antes de ser submetido ao secador de leito de jorro, e após a secagem.

Distribuição granulométrica: Inicialmente foi realizada uma análise granulométrica para se avaliar a distribuição do tamanho das partículas presentes no fertilizante. O método empregado foi a análise por peneiramento, com o emprego de 5 peneiras de diferentes tamanhos de abertura: 40, 45, 50, 100 e 270 mesh. A partir dos dados do peneiramento, foi calculado o diâmetro de Sauter (\bar{D}), segundo a Equação 1.

$$\bar{D} = \frac{1}{\sum \frac{\Delta x_i}{D}} \quad (1)$$

em que D é o diâmetro médio entre as peneiras do material retido e passante, e Δx_i é a fração mássica de sólidos retidos na i -ésima peneira.

Tempo de solubilidade: Para o teste de solubilidade deve-se dosar o fertilizante, e, para isso, era pesado 0,5 g de fertilizante na balança analítica. Então, com o auxílio de uma proveta de 25 mL, o volume completo com água destilada era medido e transferido para um béquer de 100 mL, posicionado sob um agitador mecânico. Por fim, adicionava a massa pesada do fertilizante no béquer, cronometrando-se o tempo necessário para a solubilização completa do produto (ALBERTO, 2017).

Análises de DRX: As análises no difratômetro de raios X foram realizadas com o objetivo de se conhecer a natureza da estrutura do material antes e após o processo secagem no leito de jorro. Elas geraram gráficos dos picos de difração em função do ângulo de incidência da radiação no material.

Umidade: Este teste foi empregado para analisar a umidade do produto coletado no final do processo de secagem do leito de jorro, a fim de verificar a qualidade da secagem do produto final.

A determinação da umidade não é regulamentada de forma direcionada para fertilizantes foliares pelo MAPA, assim para o teste de umidade foi realizado o teste em estufa a 105°C, por 1h.

Simulações fluidodinâmicas

Foram realizadas simulações computacionais, utilizando fluidodinâmica computacional (CFD), para avaliar a estabilidade do leito de jorro disponível e propor novas possíveis geometria de leito, adequadas ao processo. Para avaliar a configuração original (CO), e verificar os motivos da instabilidade do leito de jorro, uma malha computacional bidimensional com a mesma geometria do equipamento foi criada, através do *software* Gambit®. A Figura 3 (a) apresenta a malha do leito original, formada por 7400 elementos quadriláteros, em que se observa parte da tubulação que alimenta o leito, acoplado por meio de um flange.

A fim de eliminar a instabilidade do leito de jorro, foi proposta a adição de um novo trecho de tubulação, em forma de tronco de cone, que parte da dimensão da tubulação de alimentação, até a o diâmetro de entrada do leito de jorro. Essa será denominada configuração alternativa (CA). A malha da CA foi composta de cerca de 10851 elementos quadriláteros, como na Figura 3(b).

As simulações da dinâmica das partículas no leito de jorro foram realizadas no programa Fluent®, sendo que foi inserida a malha de discretização, bem como as condições de contorno referentes ao sistema. Foi utilizada abordagem Euler-Euler, de acordo com o TFM - *Two Fluid Model* (Modelo de Dois Fluidos).

O sistema de EDPs, composto pelas equações da continuidade e de transferência de quantidade de movimento para as fases fluida e granular, foi resolvido utilizando o Método de Volumes Finitos. O Algoritmo SIMPLE foi empregado para estabelecer o acoplamento velocidade-pressão. Foram simulados 5s de tempo real, observando uma tolerância de convergência de 1.10^{-3} (SANTOS, 2008).

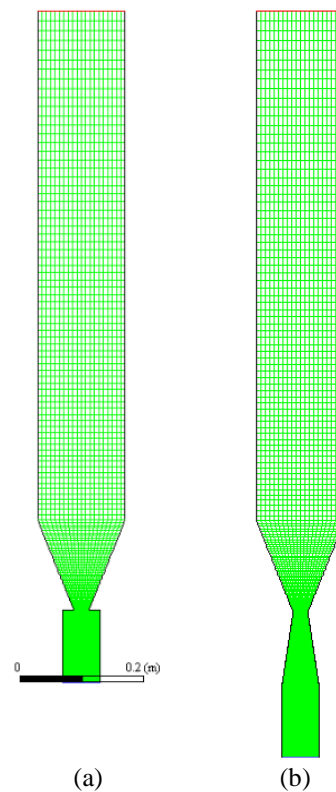


Figura 3: Malha desenhada para as simulações fluidodinâmicas: (a) CO com 7400 elementos; (b) CA com 10851 elementos.

RESULTADOS

Caracterização do sólido inerte

Ângulo de contato: O ângulo de contato da gota de solução com a superfície de PEBD foi calculado através da análise de 40 imagens de gota, a média encontrada foi de 76,22°, podendo ser considerado que o líquido molha a superfície de PEBD pois é menor que 90°. Além disso, sendo maior que 70°C, é considerado propício para a granulação por secagem em leito, como visto por Donida (2004).

Experimentos de secagem

Através dos testes preliminares, algumas variáveis foram definidas como fixas para o processo de secagem. Estas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Variáveis fixas do processo.

Variável Fixa	Valor
Vazão de alimentação da solução	19 mL/min
Pressão do bico atomizador	1 bar
Temperatura do ar de secagem	100° C
Vazão de alimentação de ar	120 m ³ /h
Carga de inertes	1 kg

Os testes de secagem consistiram em oito testes seguindo o planejamento experimental 2³ e uma réplica do experimento que obteve melhor resultado de rendimento. A seguir é apresentada uma análise estatística dos efeitos das três variáveis em todas as respostas obtidas, o nível de significância considerado foi de 10%. Os dados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Matriz das variáveis independentes e das respostas para o rendimento, produtividade e umidade.

Exp.	Fatores			Fração		
	t _{al} [s] (x ₁)	t _r [s] (x ₂)	H _A [m] (x ₃)	η [g/g]	P [g/h]	U [%]
Teste 1	10 (-1)	60 (-1)	0,40 (-1)	0,089	0,293	9,06
Teste 2	30 (+1)	60 (-1)	0,40 (-1)	0,076	0,433	9,77
Teste 3	10 (-1)	300 (+1)	0,40 (-1)	0,029	0,025	8,93
Teste 4	30 (+1)	300 (+1)	0,40 (-1)	0,023	0,038	9,48
Teste 5	10 (-1)	60 (-1)	0,68 (+1)	0,182	0,566	20,56
Teste 6	30 (+1)	60 (-1)	0,68 (+1)	0,252	1,503	21,78
Teste 7	10 (-1)	300 (+1)	0,68 (+1)	0,066	0,048	20,25
Teste 8	30 (+1)	300 (+1)	0,68 (+1)	0,049	0,089	21,44
Teste 9	30 (+1)	60 (-1)	0,68 (+1)	0,266	1,591	20,53

Umidade: Todas as variáveis surtiram efeito na umidade do produto final, como traz a Tabela 4. A interação entre as variáveis X1 e X3 é apresentada na superfície de resposta da Figura 4. A variável x1 (tempo de alimentação

da solução) apresentou efeito com sinal positivo, sendo que quanto maior o seu valor, maior o volume de solução contendo 98% de água, acarretando em uma maior umidade dentro do leito e no produto final.

Tabela 4: Efeitos das variáveis sob a umidade.

	Umidade (R ² =0,999)				
	Efeito	Desvio	p-level	IC95%	
média	15,159	0,023	0,000	15,084	15,233
x1	0,918	0,047	0,000	0,768	1,067
x2	-0,267	0,047	0,011	-0,417	-0,118
x3	11,698	0,047	0,000	11,548	11,847
x1x3	0,288	0,047	0,009	0,138	0,437

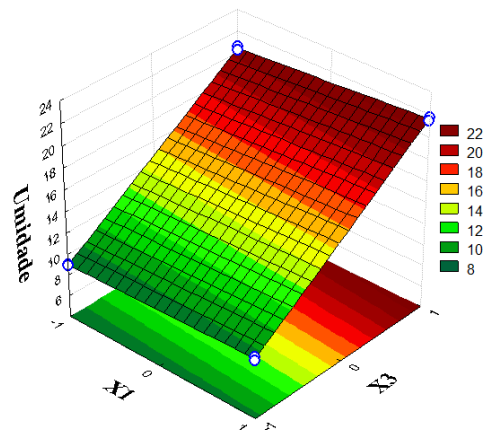


Figura 4: Superfície de resposta do tempo de alimentação e altura do atomizador em função da umidade.

Dantas (2018) observou que para menores vazões de alimentação da solução, uma menor capacidade do secador é empregada, acarretando em uma melhor taxa de secagem. Além disso, ainda segundo o estudo de Dantas (2018), um menor volume de solução dentro do leito não teve grandes interferências na temperatura. Isso implica que para uma mesma temperatura de trabalho, quanto maior a quantidade de solução dentro do leito, maior será a umidade do produto final. Barros e Freire (2019) também observaram que uma menor vazão de alimentação implicou em uma menor umidade no equipamento, indicando que a capacidade máxima de secagem não teria sido atingida. A variável x2 (tempo de intermitência), teve efeito com sinal negativo, pois quanto menor o período de pausa entre as alimentações, menos tempo a solução tem para secar, aumentando a umidade do sistema.

Já a altura do atomizador, x3, foi a variável que mais influenciou na umidade. O efeito foi positivo, apontando que a maior

altura, 0,68m de distância com a base do leito, deixou a atomização distante das partículas inertes, diminuindo a interação entre a solução. Assim, o pó não aderiu na superfície nas partículas por tempo suficiente para realizar a secagem, sendo arrastado para o ciclone com maior umidade.

Rendimento e produtividade: As variáveis que causaram o maior efeito sobre o rendimento foram o tempo de intermitência (x2) seguido da altura do atomizador (x3), como pode ser observado na Tabela 5, e a interação entre ambas na superfície de resposta da Figura 5.

Tabela 5: Efeitos das variáveis sob o rendimento.

Rendimento ($R^2= 0,939$)					
	Efeito	desvio	p-level	IC95%	
média	0,100	0,010	0,000	0,074	0,125
x2	-0,116	0,020	0,002	-0,167	-0,065
x3	0,091	0,020	0,006	0,040	0,142
x2x3	-0,060	0,020	0,030	-0,111	-0,009

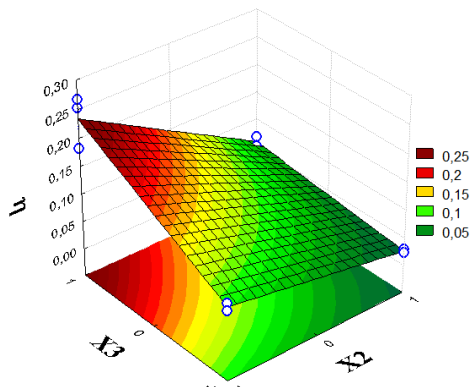


Figura 5: Superfície de resposta do rendimento em função do tempo de intermitência (x2) e altura do atomizador (x3).

Para o rendimento a variável do tempo de intermitência, apresentou um efeito com sinal negativo, indicando que experimentos com longos tempos de pausa entre as alimentações não aumentaram a taxa de secagem. O mesmo comportamento em relação ao tempo de intermitência foi relatado no estudo de Dantas (2018), no qual se observou uma pequena variação entre as taxas de secagem do tempo de alimentação e do período de parada, foi considerado que em virtude das altas taxas de transferência de calor em massa do secador, durante a alimentação uma grande porção da água presente na solução é evaporada, reduzindo as taxas de secagem no tempo de intermitência.

Já a altura do atomizador teve efeito de sinal positivo, isto demonstra que entre as distâncias estudadas, a maior resultou em uma recuperação mais efetiva de produto.

Os valores de rendimento variaram entre 2,3 – 8,9% para o atomizador na maior altura e 4,9 – 26,3% para o atomizador na menor altura, de modo geral, são considerados baixos para a secagem em leito de jorro, segundo Barros e Freire (2019), são satisfatórios valores de recuperação de pó acima de 40%. Baixos níveis de rendimento também foram registrados por Machado et al. (2015) que avaliaram os efeitos das variáveis de operação na secagem da mistura de graviola e leite. O estudo destacou que quando a variável tempo de intermitência ocorre em períodos muito longos, o leito fica mais aquecido e tendendo para a formação de aglomerados. Deste modo, notaram que para tempos de intermitência longos ao invés de contribuir favoravelmente, podem prejudicar o desempenho do secador.

A produtividade é obtida pela razão entre o rendimento e o tempo total do experimento. Esta resposta sofreu efeito significativo de apenas uma variável, como pode ser visto na Tabela 6, o tempo de intermitência. Como o maior valor de η foi encontrado no menor tempo de intermitência, A análise apontou um efeito com sinal negativo da variável, ou seja, em tempos de intermitência muito longos o leito não aumentava a taxa de secagem, reduzindo a produtividade.

Tabela 6: Efeitos das variáveis sob a produtividade.

Produtividade ($R^2= 0,999$)					
	Efeito	desvio	p-level	IC95%	
média	3,87E-04	7,33E-05	3,41E-02	7,11E-05	7,02E-04
x2	-6,73E-04	1,47E-04	4,43E-02	-1,30E-03	-4,24E-05

Mapeamento das perdas de fertilizante durante a secagem: Neste tópico serão apresentadas as frações mássicas de fertilizante aderidas em cada região do sistema de secagem e que, por isso, não foram coletadas no *underflow* do ciclone, contribuindo para a redução do rendimento do processo. Para esse cálculo foi realizado um balanço de massa no equipamento, os valores das frações podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7: Frações mássicas de sólidos perdidos por retenção em diferentes pontos do processo: 1- nas partículas; 2- na parede do leito; 3- na parede do ciclone; 4 – no tubo de exaustão; no filtro localizado no overflow do ciclone; overflow (após o filtro).

Exp	Frações de sólido retido em diferentes posições					
	1	2	3	4	5	6
1	0,435	0,120	0,125	0,075	0,061	0,095
2	0,315	0,160	0,040	0,035	0,065	0,309
3	0,505	0,115	0,080	0,050	0,042	0,179
4	0,505	0,185	0,155	0,055	0,040	0,039
5	0,075	0,315	0,135	0,115	0,044	0,134
6	0,103	0,420	0,060	0,110	0,055	0,001
7	0,090	0,430	0,220	0,080	0,020	0,094
8	0,105	0,440	0,160	0,095	0,040	0,111

A fração mássica do fertilizante encontrado na superfície das partículas inertes teve influência de duas variáveis do processo. A variável de maior atuação foi a altura do atomizador (x3), sendo esse efeito com sinal negativo, assim quanto menor a altura do atomizador com a base do leito, mais próxima a solução é pulverizada sobre as partículas, fazendo que parte do fertilizante ficasse aderido sua superfície. A interação de x2x3 pode ser visualizada pela superfície de resposta da Figura 6.

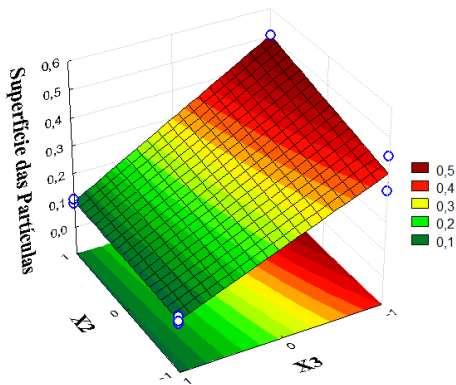


Figura 6: Efeito do tempo de intermitência (x2) e altura do atomizador (x3) sobre a adesão de pó na superfície das partículas inertes.

Na Figura 7 se mostra em diferentes vistas, a fração de fertilizante retido na parede do leito. Pela análise estatística, Tabela 8, verifica-se que o fator que mais influenciou a fração mássica perdida por adesão na parede do leito foi a altura do atomizador, sendo que o efeito com sinal positivo indica que a maior distância entre o atomizador e a base do leito causou um afastamento da solução aspergida com as partículas, diminuindo o contato sólido-líquido e fazendo que parte do fertilizante se depositasse na parede do leito, secando e se aderindo à região.



Figura 7: Imagem em diferentes posições do leito de frações mássicas retidas na parede.

Tabela 8: – Efeito das variáveis de processo na fração mássica de fertilizante perdida na parede do leito.

Efeito	Fração no Leito (R ² =0,974)				
	Desvio	p-level	IC95%		
média	0,273	0,010	0,000	0,248	0,298
x1	0,055	0,020	0,036	0,005	0,106
x2	0,040	0,020	0,098	-0,011	0,090
x3	0,255	0,020	0,000	0,205	0,306

Rosa (2010) observou um comportamento parecido, em que alturas de atomização distantes da região de formação da fonte levam a perda da suspensão, pois o contato com o ar quente seca a solução antes da mesma interagir com as partículas inertes. Isto faz com que a solução seja seca por elutriação e não pelo mecanismo de interesse deste trabalho, o leito de jorro com as partículas inertes.

O tempo de alimentação também surtiu efeito com sinal positivo, pois quando a esse tempo se eleva, um maior volume de solução atomizado se acumula sobre a parede do leito, fazendo com que nem todo o material tenha conseguido ser transferido para a superfície da partícula inerte a tempo, secando e se aderindo na região do leito. Da mesma forma o tempo de intermitência resultou em efeito com sinal positivo, ou seja, quanto maior o tempo de intermitência, mais fertilizante ficou aderido à parede, o que contribui para a redução do rendimento.

Como o ar quente transmite energia térmica para a parede do equipamento, era isolado termicamente na parte externa, quanto maior o tempo de contato do ar com o equipamento maior a temperatura em sua superfície. Uma suposição que pode ser adotada é que a secagem por condução da superfície do leito foi mais efetiva do que pela convecção do ar. Outra suposição é a de que o maior volume de solução no leito talvez signifique que a temperatura usada não foi o suficiente para

secar e o material mais úmido, tendo sido menos arrastado pelo ar.

Machado et. al. (2015) também verificaram que os ensaios com baixos rendimentos, em longos tempos de intermitência, levaram a quantidades significativas de material retido a parede do leito e na superfície do equipamento.

Para a resposta fração mássica de fertilizante perdido no filtro localizado no *overflow* do ciclone, a variável de maior influência foi o tempo de intermitência, como pode ser visto na Tabela 9. A interação de $x_1 \times x_3$ pode ser visualizada pela superfície de resposta da Figura 8.

Tabela 9: Efeitos das variáveis sob a fração mássica de fertilizante retidas no filtro.

Efeito	Fração no Filtro ($R^2=0,977$)				
	Desvio	p-level	IC95%		
média	0,046	0,001	0,000	0,042	0,049
x_1	0,008	0,002	0,038	0,000	0,016
x_2	-0,021	0,002	0,003	-0,028	-0,013
x_3	-0,012	0,002	0,013	-0,013	-0,005
$x_1 \times x_3$	0,007	0,002	0,052	-0,020	0,015

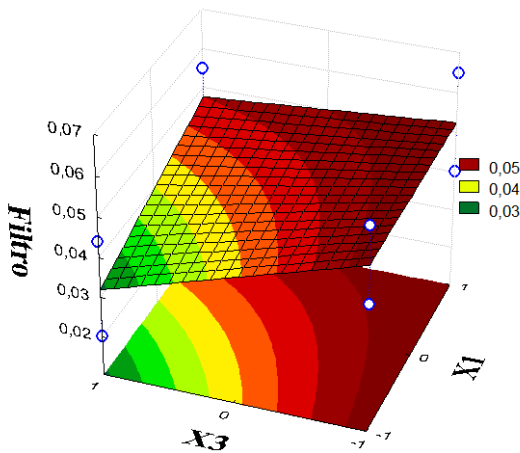


Figura 8: Superfície de resposta dos efeitos sob a fração mássica de fertilizante retida no filtro.

O tempo de intermitência possui efeito com sinal negativo sobre o filtro, indicando que uma maior intermitência forma partículas maiores, não sendo arrastadas para o filtro. A altura do atomizador também possui efeito de sinal negativo, ou seja, com uma maior distância entre o atomizador e a base do leito, existe a formação de partículas maiores e, então, a quantidade de pó retido no filtro é menor.

As frações de fertilizante retidas nas demais regiões não sofreram efeito das variáveis. Para as paredes do ciclone e a

tubulação de exaustão, somente a média surtiu efeito com sinal positivo

Para as frações mássicas calculadas para perdas pelo *overflow* do ciclone essa distribuição se demonstrou aleatória com o valor médio de 12%, indicando que um estudo de remodelação do ciclone da unidade se faz necessário, uma vez que essa perda expressa uma quantidade significativa de pós ultrafinos. Vale ressaltar que as perdas de fertilizantes nessas regiões são importantes na queda do rendimento, elas somente não estão alterando com efeito das modificações das variáveis estudadas.

Caracterização do fertilizante foliar

Distribuição granulométrica: A Figura 9 apresenta as imagens dos dois pós de fertilizante, in natura e após a secagem, com uma ampliação de 1600x

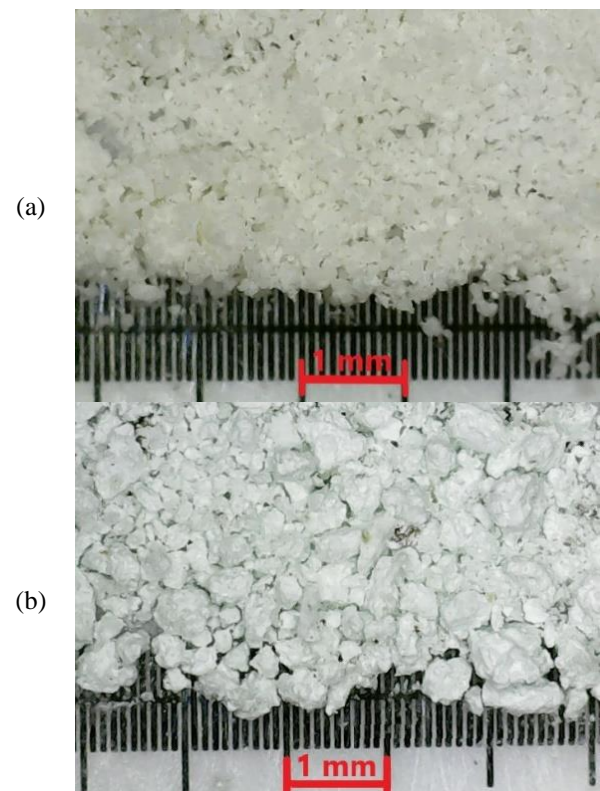


Figura 9: Imagem dos fertilizantes com zoom de 1600x: (a) in natura e (b) após secagem.

É possível se observar o aumento do tamanho das partículas, assim como o seu formato. Pela equação 1 foi possível se calcular o diâmetro de Sauter do fertilizante, o qual aumentou depois da secagem, passando de 0,086 mm *in natura* para 0,093 mm após o processo.

Solubilidade: O teste de solubilidade foi realizado antes e depois do fertilizante passar pelo processo de secagem. O tempo de solubilidade do fertilizante foi medido através da análise da coloração da solução durante sua solubilização em água, sob agitação. A princípio a solução se encontra turva, como pode ser visto na Figura 10(a), com o passar do tempo foi possível notar a formação do vórtice, pois a solução se tornou translúcida, o que permitiu a identificação do tempo de solubilização, na Figura 10(b).

O fertilizante *in natura* apresentou um tempo de solubilização de 61 segundos, sendo que este valor caiu para 19 segundos depois do processo de secagem com leito de jorro e partículas inertes. Essa redução no tempo aponta para uma melhora de 69% na solubilidade do fertilizante foliar.

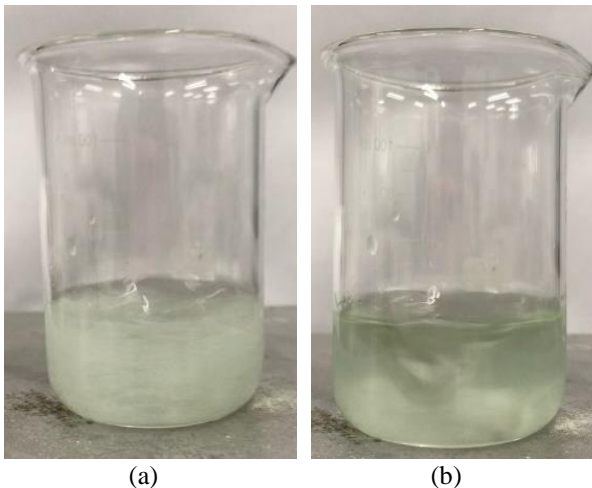


Figura 10: Fertilizante foliar (a) antes e (b) depois de solubilizado.

Alberto (2017) realizou a secagem do mesmo fertilizante *in natura* empregado neste estudo, o método utilizado foi através do equipamento de *spray dryer*. A autora encontrou uma solubilidade do produto após o tratamento de *spray dryer*, entre 11 e 31 segundos, faixa que coincide com a encontrada no produto final do leito de jorro.

Análises de DRX: Segundo Magalhães (2017) a fração cristalina é determinada pela razão da área dos picos e a soma das áreas correspondentes ao espalhamento amorfo e cristalino. A Figura 11 traz a sobreposição da curva do fertilizante após a secagem sobre o fertilizante *in natura*, apontando para menor nível de cristalinidade.

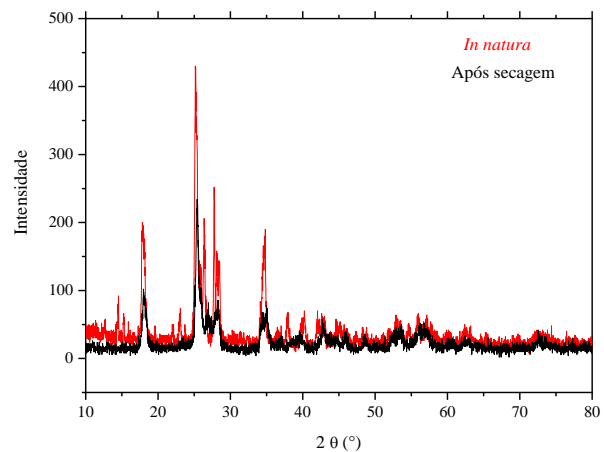


Figura 11: Sobreposição das análises de DRX para os fertilizantes *in natura* e após a secagem.

Esta característica indicou que provavelmente o fertilizante aumentou a porcentagem de material amorfo depois do processo de secagem. Esta modificação pode estar relacionada também com o aumento da solubilidade, visto que materiais amorfos geralmente possuem a propriedade de solvatação muito maior do que materiais cristalinos. Souza (2015) realizou a secagem de uma solução de caju em leito de jorro, a análise de DRX realizada em seu produto final também indicou a formação de um pó com aspecto mais amorfo.

Simulações Fluidodinâmicas

Durante a confecção das curvas características e durante o processo de secagem foi observado que as partículas estavam realizando um movimento tendencioso de jorro para o lado esquerdo do leito, colidindo com a parede. Uma análise fluidodinâmica foi realizada com o intuito de buscar o fator responsável por essa dinâmica. A Figura 12(a) apresenta a simulação realizada com o leito de jorro na CO, que mostra o contorno de fração volumétrica de sólidos. Foi observado que a própria geometria do equipamento faz com que esse movimento ocorra, acredita-se que a curva acentuada da tubulação do ar de entrada ocasiona essa força direcional do ar para o lado esquerdo.

Um estudo realizado por Olazar et al. (1992) destacou que o diâmetro de entrada do ar em leito de jorro é o fator geométrico com maior influência para a fluidodinâmica do equipamento. Eles estudaram diferentes geometrias de entrada que melhorassem o fluxo

de partículas inertes dentro do leito. A entrada de ar era inicialmente maior do que a do orifício de entrada do cone e quando partículas pequenas (menores que 6 mm de diâmetro) eram empregadas, o jato de ar projetava as partículas verticalmente, porém derivando da parede do cone e em movimento de rotação.

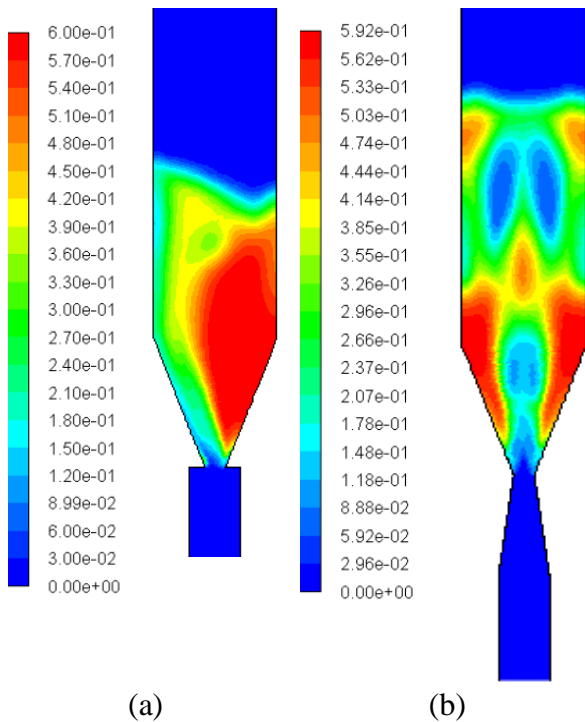


Figura 12: Contornos de fração volumétrica de sólidos para (a) Configuração atual do leito de jorro; (b) Proposta de adição de um tronco de cone para diminuir a turbulência na entrada do leito.

A solução encontrada foi a inserção de um dispositivo de entrada com diâmetro (D_0) menor do que o diâmetro de entrada do cone (D_1), sendo que a relação D_0/D_1 deve ser entre 0,5 e 0,83. Para o comprimento deste dispositivo verificou-se que a estabilidade era satisfatória quando o tamanho era igual ou superior a 5 vezes o diâmetro de entrada do cone (D_1).

Com o intuito de se melhorar o rendimento de recuperação de produto, já que esse fator pode ter influenciado na fração mássica de fertilizante perdida na parede do leito, foi proposta uma mudança na geometria do equipamento, adicionando uma peça na tubulação do ar de entrada do leito de jorro. Desta forma, o fluxo de ar terá uma extensão maior após a curva para se redirecionar ao centro do leito, criando a estabilidade necessária para uma fluidodinâmica padrão, o que pode ser observado na Figura 12(b).

CONCLUSÃO

As principais respostas dos experimentos foram a umidade, o rendimento e a produtividade, a análise estatística mostrou que a umidade sofreu efeito de todas as variáveis, sendo a maior influência a altura do atomizador, seguida da intermitência e depois o tempo de alimentação. A umidade dos produtos finais ficou entre 9 e 20%, o que são valores aceitáveis para a legislação de fertilizantes organominerais.

Os valores de rendimento e produtividade na melhor condição, 26,6% e 1,59 g/h respectivamente, são considerados baixos em comparação com a literatura para secagem em leito de jorro, porém valores ainda menores já foram encontrados em trabalhos sobre secagem de soluções de vegetais. A análise estatística mostrou que o tempo de intermitência influenciou nas duas respostas, seguido da altura do atomizador para o rendimento.

As caracterizações comparativas entre o fertilizante *In Natura* e após o processo de secagem trouxe resultados animadores para o trabalho. A intenção de impor esse processo de secagem sobre o fertilizante teve o objetivo de modificar o seu arranjo estrutural, deixando-o mais amorfo e conseqüentemente aumentando sua solubilidade. Por certo esse fato ocorreu, já que a distribuição granulométrica do fertilizante mudou, tendo um aumento de 7,5% em seu diâmetro médio de Sauter. Pelas análises de DRX podemos observar uma diminuição da cristalinidade do fertilizante, deixando-o mais amorfo e o teste de solubilidade realizado observou um aumento de 69% desta característica no pó após a secagem.

A análise fluidodinâmica computacional realizada conseguiu identificar a causa do movimento tendencioso das partículas para o lado esquerdo da parede do leito. Foi proposta uma modificação na tubulação do ar de entrada para trabalhos futuros, essa mudança redireciona o fluxo do ar para o centro do leito, fazendo com que as partículas trabalhem no movimento tradicional do leito de jorro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (Universal 433958/2018-9), CAPES e ao PMPIT.

REFERÊNCIAS

- ALBERTO, L. (2017), Granulação de fertilizante foliar por spray dryer, na perspectiva de projeção em escala industrial. Dissertação apresentada ao PMPIT UFTM. Uberaba/MG, Brasil. 2017.
- BARROS, J. P. A. A.; FREIRE, J. T. (2019), Análise do balanço de massa e da distribuição das partículas do pó na secagem de pasta em leito de jorro. *Engenharias, Ciência e Tecnologia*. Cap. 1. p. 1-17.
- BORGES, L. P., BÉTTEGA R. (2019) Simulação do comportamento hidrodinâmico de um leito de jorro: comparação entre método dos elementos discretos (dem) e modelo de dois fluidos (TFM). UFSCAR. São Carlos/SP. Brasil.
- CREMASCO, M. A. (2012) Operações Unitárias em sistemas particulados e fluido-mecânicos. Blucher.
- DANTAS, T.N.P. (2018) Influência das propriedades físicas de graviola e aditivos na secagem em leito de jorro com alimentação intermitente. Tese de Doutorado, UFRN, Pós-Graduação em Engenharia Química - PPGEQ. Natal / RN, Brasil. 2018.
- DONIDA, M. W. (2004) Análise das influências das características do sólido e da suspensão no processo de recobrimento em leito de jorro. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2004. Tese (Doutorado).
- FAGERIA, N. K. *et al.* (2009) Foliar fertilization of crop plants. *Journal of plant nutrition*, v. 32, n. 6, p. 1044-1064, 2009.
- FERNANDES, C. (2005) Análise da eficiência energética da secagem de pastas em leito de jorro. Dissertação apresentada a Pós-Graduação em Engenharia Química da Ufscar, São Carlos/SP. Brasil. 2005.
- GINIFAB. Transferidor Online. (2021) Disponível em: https://www.ginifab/feeds/angle_measurement/online_protractor.pt.php. Acesso em: 24 out. 2021
- MACHADO, I. P.; DELMIRO, T. M.; MACHADO, A.K.T.; MEDEIROS, M. F. D. (2015) Secagem em leito de jorro da mistura graviola e leite. Avaliação dos efeitos das variáveis de operação sobre parâmetros de produção, taxa de secagem e eficiência térmica. Congresso Brasileiro De Sistemas Particulados, 15, São Carlos: ENEMP, 2015. p. 1-10.
- MAGALHÃES, B. H. F. (2017) Comparação entre as técnicas difração de raios-x e DSC na obtenção do grau de cristalinidade do PP e do PEAD. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2017.
- OLAZAR, M.; JOSE, M.J. San; AGUAYO, A. T.; ARANDES, J. M.; BILBAO, J. (1992) Stable Operation Conditions for Gas-Solid Contact Regimes in Conical Spouted Beds. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Bilbao, v. 31, n. 7, p. 1784-1792, 4 mar. 1992.
- REETZ, H. F. (2016) Fertilizantes e seu Uso Eficiente. Tradução: Alfredo Scheid Lopes. Paris, França, Maio 2016.
- ROCHA, S. C. S.; DONIDA, M. W.; MARQUES, A. M. M. (2009) Liquid-particle surface properties on spouted bed coating and drying performance. *The Canadian Journal Of Chemical Engineering*, [S.L.], v. 87, n. 5, p. 695-703, 22 set. 2009. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/cjce.20208>.
- ROSA, G. S. (2010) Recobrimento de uréia em leito de jorro para minimizar as perdas de nitrogênio por volatilização. 2010. 108 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Unicamp, Campinas, 2010.
- SANTOS, K. G. (2008) Estudo da fluidodinâmica do leito de jorro por CFD com malhas tridimensionais. 2008. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, UFU, Uberlândia, 2008.
- SYAMAL, A. *Living Science Chemistry – Class 10*. 2 ed. Ratna Sagar. 2008.