

## **SECAGEM DE SEMENTE DE LINHAÇA MARROM (LINUM USITATISSIMUM L.) EM LEITO FLUIDIZADO**

Bruna Carla Santos Silveira (UFSJ) E-mail: brunacarlasantossilveira@gmail.com

Dennis Júnior Lara Faleiro de Rezende (UFSJ) E-mail: dennisjrlara@gmail.com

Gláucia Maria Costa Silva (UFSJ) E-mail: glauciamariacsilva@gmail.com

Júlia Andrade Marques (UFSJ) E-mail: juliamarques@gmail.com

Rebeca Lima Carvalho (UFSJ) E-mail: rebecalimac@gmail.com

Thaís do Carmo Santos Ananias (UFSJ) E-mail: thais.csananias@gmail.com

Marcelo da Silva Batista (UFSJ) E-mail: marcelobatista@hotmail.com

**Resumo:** A secagem é uma etapa primordial na produção de grãos e sua inclusão após a colheita oferece diversas vantagens ao processo produtivo. Esse trabalho tem como objetivo avaliar a secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum* L.) em secador de leito fluidizado. O secador foi construído em laboratório e foram realizados ensaios de fluidização e de secagem com o intuito de encontrar as condições ótimas de operação para o leito fluidizado. No estudo foi utilizado um planejamento de experimentos do tipo delineamento composto central rotacional (DCCR) com duas variáveis e os dados foram analisados com base estatística. A remoção de 12% de umidade da linhaça foi alcançada na temperatura de 50°C e velocidade do ar de 5,1 m/s. Constatou-se que a temperatura influencia linearmente na secagem, sendo a única variável relevante do processo.

**Palavras-chave:** secagem, leito fluidizado, semente, linhaça.

## **LINSEED BROWN SEED DRYING (LINUM USITATISSIMUM L.) IN FLUIDIZED-BED**

**Abstract:** Drying is a primordial step for the grains production and its inclusion after harvest offers several advantages to the production process. This work aims to evaluate the drying of brown linseed (*Linum usitatissimum* L.) in fluidized bed dryer. The dryer was built in the laboratory and fluidization and drying tests were performed in order to find the optimum operating conditions for the fluidized bed. For the studies, a rotational central composite design RCCD-type experiment with two variables was used and the data were analyzed statistically. The removal of 12% of linseed moisture was achieved at a temperature of 50 ° C and air velocity of 5.1 m/s. It was verified that the temperature influence linearly in the drying, being the only relevant variable of process.

**Keywords:** Drying, fluidized bed, seed, linseed.

### **1. INTRODUÇÃO**

A secagem é um processo unitário que ocorre pela simultânea transferência de calor e massa entre o ar e material a ser secado. Por meio dessa operação é possível remover a umidade excessiva contida no interior de um sólido por meio da convecção forçada, utilizando uma corrente de ar aquecido (VALENTE, COSTA & SOUZA, 2012). Os equipamentos mais utilizados para secagem industrial são: secadores de bandeja, flash ou pneumáticos, rotativos com aquecimento direto ou indireto, leito de jorro e leito fluidizado (AMBRÓSIO-UGRI & TARANTO, 2008). Entre eles, a secagem em leito fluidizado vem se destacando devido ao bom contato entre gás-sólido, custos atrativos e altas taxas de recirculação de partículas e transferência de calor e massa (OLIVEIRA, 2012). Os secadores de leito fluidizado são largamente empregados nos processos de combustão e gaseificação de carvão, secagem de sólidos, recobrimento e granulação de sólidos, dentre outros (CREMASCO, 2012). Nesses secadores usa-se na alimentação ar quente na base de uma

coluna cilíndrica onde estão depositadas as sementes. O ar previamente aquecido escoava pela coluna proporcionando a suspensão das sementes, favorecendo o maior contato com a superfície do sólido. O movimento do sólido no leito fluidizado permite obter altas taxas de transferência de calor e massa, que favorecem a secagem no interior da coluna (VALENTE, 2011).

A remoção de parte da água de um produto é importante para evitar contaminação pela proliferação de microrganismos e manter a durabilidade e a qualidade do produto (SILVEIRA et al., 2013; OLIVEIRA, 2014). O setor agrícola apresenta a maior demanda do processo de secagem, visando promover aos grãos maior durabilidade após a colheita (REIS, 2015). No entanto, antes de iniciar o processo de secagem é indispensável à caracterização do sólido e o controle das condições de operação do secador (temperatura e umidade do ar e do material), pois as mesmas influenciam na eficiência da secagem (ALBINI, FREIRE & FREIRE, 2015).

A semente de linhaça marrom (*Linum usitatissimum L.*) apresenta na sua composição compostos bioativos, como o ômega-3, fibras e elevado teor de lipídeos insaturados, que ajudam na prevenção de doenças cardiovasculares (COUTO & WICHMANN, 2011; VALENTE, COSTA & SOUZA, 2012). A demanda pela semente de linhaça é crescente e pesquisas relacionadas à secagem desse alimento em leito fluidizado podem contribuir para melhoria do processo produtivo e armazenamento dos grãos (VIEIRA, 2012). O leito fluidizado pode secar de forma homogênea a linhaça, sem danificar as suas propriedades físicas e químicas, potencializando a durabilidade desde a safra à comercialização (MELO, COSTA & FARIA, 2009).

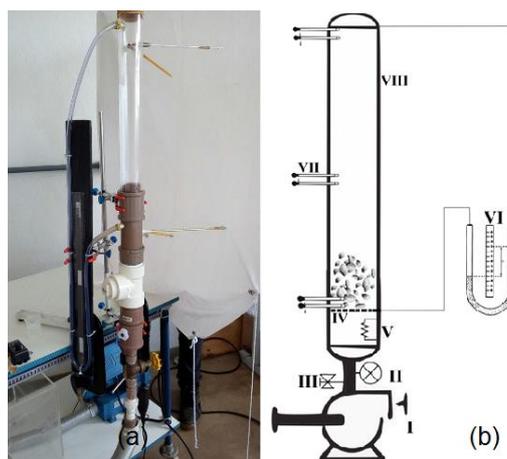
Neste contexto, esse trabalho tem como objetivo construir um secador de leito fluidizado e realizar a secagem de semente de linhaça, utilizando como suporte para coleta de dados o planejamento experimental estatístico (DOE), visando prever as condições ideais para a secagem.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Construção do equipamento

A Figura 1a mostra o secador de leito fluidizado construído com materiais de PVC (policloreto de polivinila) e acrílico. Na tubulação vertical de PVC foi acoplado o leito de acrílico de 45,7 cm de altura e 5,08 cm de diâmetro. O secador foi sustentado por garras e suporte universal. Na base do aparato foi acoplado um compressor (Ibram CR-470) que fornece vazão máxima de 1,08 m<sup>3</sup>/min. A vazão de ar na entrada do equipamento foi controlada por uma válvula globo de ¾ de polegada. Na base do leito foi afixada uma placa perfurada com 137 furos de 1,4 mm de diâmetro para dispersão do ar. A resistência de aquecimento do ar foi instalada no interior da tubulação (distante 31 cm da base) e a temperatura foi controlada por meio de um dimmer (3.000 W e 60 Hz). Acima da resistência (22 cm) foram conectados à tubulação de PVC um termômetro de bulbo seco e outro de bulbo úmido. As entradas do manômetro em U estão a 39,0 cm e outra a 55,5 cm da base do equipamento. Na montagem desse manômetro foi usada mangueira de silicone e uma placa de madeira como suporte. No topo do leito fluidizado foi instalada uma tela de proteção para evitar arremessos de sólido para fora do sistema.

Na Figura 1b pode-se observar a representação das partes do equipamento construído conforme as especificações anteriormente descritas. Nessa figura podem-se observar as seguintes partes: (I) compressor, (II) manômetro, (III) válvula de controle de vazão, (IV) placa perfurada, (V) resistência/aquecedor, (VI) manômetro em U, (VII) termômetro e (VIII) coluna do equipamento.



Fonte: Autor.

**Figura 1.** Secador de leito fluidizado: (a) construído para os estudos e (b) representação das partes do equipamento.

## 2.2 Ensaio de umidificação

As sementes de linhaça marrom foram adquiridas no comércio local e o processo de umidificação tem como objetivo alcançar o teor de umidade próximo à umidade de colheita da linhaça (18% m/m) (VIEIRA, 2012; GONÇALVES, 2011). Utilizando um vaporizador portátil (Cadence Lisser 700 W) uma amostra de semente de linhaça (50 g) foi depositada em peneira de 12 mesh e umidificada durante 17 a 19 min. Simultaneamente, as sementes foram revolvidas com o auxílio de uma espátula para garantir a homogeneidade da umidificação. A umidade da semente foi aferida através de um determinador de umidade (Marte ID50).

## 2.3 Ensaio de fluidização

Nos ensaios de fluidização foi determinada a velocidade de ar para alcançar os pontos de mínima fluidização e de fluidização completa das sementes de linhaça. As sementes foram de linhaça foram inseridas no equipamento até que se alcançasse 10 cm de altura do leito. A velocidade de ar foi medida através de um anemômetro (Instrytherm AD-250), a vazão controlada por uma válvula e a diferença de pressão ( $\Delta P$ ) medida no manômetro em U.

## 2.4 Ensaio de secagem

Com o intuito de definir as condições ótimas operacionais de secagem e avaliar a eficiência do processo, realizou-se um planejamento fatorial de experimentos do tipo delineamento composto central rotacional (DCCR) para duas variáveis. Na Tabela 1 estão dispostos os valores utilizados de velocidade e temperatura. Nos experimentos foram fixados o tempo de secagem (15 min) e a massa de semente de linhaça (58 g).

**Tabela 1.** Dados utilizados no planejamento dos experimentos.

Parâmetros	$-\alpha$	-1	0	1	$\alpha$
Velocidade (m/s)	4,5	5,1	6,5	7,9	8,5
Temperatura (°C)	48	50	55	60	62

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 2 e 3 mostram os resultados dos ensaios de fluidização. A Figura 2 mostra a queda de pressão em função da velocidade de ar quente alimentado. Note que as curvas de queda de pressão no leito com a variação crescente e decrescente da vazão de ar foram próximas. Esses resultados mostram que a queda de pressão está diretamente relacionada com vazão de ar. Note que entre 0-2 m/s a queda de pressão aumenta linearmente e apresenta a maior variação em relação ao aumento da velocidade de ar. Nesse intervalo a passagem de ar é obstruída pelas sementes de linhaça no leito causando aumento de pressão. O aumento da queda de pressão é menor entre 2-4 m/s, quando as sementes começam a fluidizar. Acima de 4 m/s a queda de pressão é praticamente constante com a fluidização completa das sementes de linhaça. Esses dados estão de acordo com as observações de comportamento da altura do leito, com o aumento da velocidade do ar, apresentados na Figura 3. Note que entre 0-2 m/s a altura do leito não foi modificada, ou seja, a velocidade de ar não suficiente para movimentar as sementes. A velocidade mínima de fluidização da semente de linhaça no leito foi de 2 m/s, identificada por intermédio da análise das Figuras 2 e 3. Acima da velocidade mínima de fluidização da semente de linhaça a altura do leito aumenta linearmente com o aumento da velocidade de ar.

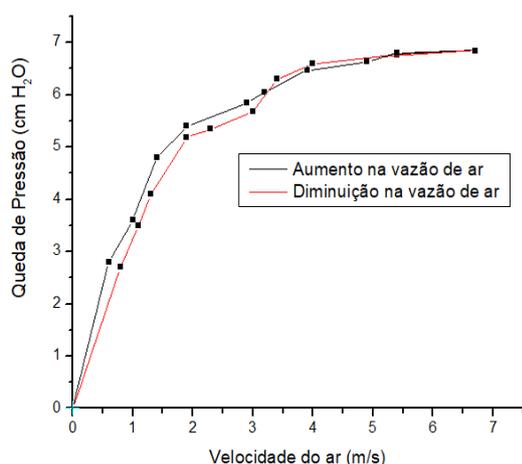


Figura 2. Queda de pressão em função da velocidade de ar.

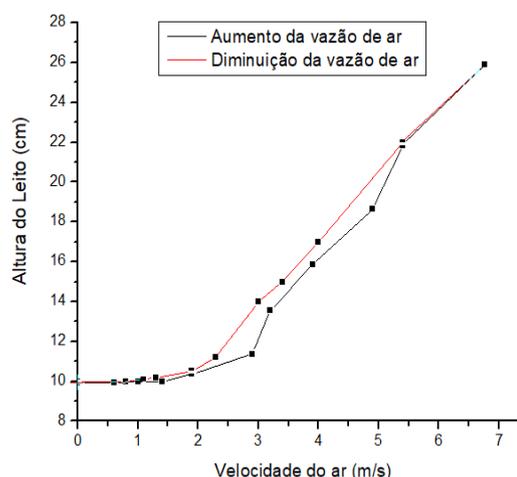


Figura 3. Altura do leito em função da velocidade de ar.

Os percentuais de umidade removida durante os experimentos se encontram dispostos na Tabela 2. Os dados foram analisados estatisticamente e resultaram nos gráficos de Pareto (Figura 4), Contorno (Figura 5) e análise de variância (Tabela 4).

Tabela 2. Correlação entre valores de velocidade e temperatura e o resultado de umidade retirada

Ensaio	Velocidade	Temperatura	Umidade Removida
1	-1	-1	11,83%
2	-1	1	14,05%
3	1	-1	9,24%
4	1	1	13,89%
5	0	-1,41	10,98%
6	0	1,41	13,10%
7	-1,41	0	11,77%
8	1,41	0	10,86%
9	0	0	13,26%
10	0	0	12,97%

A Tabela 3 apresenta as informações do planejamento experimental em função das variáveis dependentes. Nessa tabela pode-se observar que a velocidade apresentou um efeito negativo, ou seja, é uma variável que não apresenta efeitos significativos no estudo. Assim, não é necessário trabalhar com velocidades muito elevadas no processo de secagem. Esse resultado é pertinente, pois a velocidade do gás apresenta um efeito controlador na remoção de umidade superficial do grão. No entanto, a velocidade do ar não apresenta qualquer efeito para partículas com elevada resistência interna à transferência de massa, como é o caso da linhaça (GONÇALVES, 2011). Por outro lado, a temperatura apresenta efeito positivo, o que indica que, para maximizar a remoção de umidade deve-se trabalhar com maiores temperaturas. A difusividade das moléculas de água aumenta quando se eleva a temperatura do ar e, conseqüentemente, aumenta a velocidade de secagem devido à maior energia disponível para evaporar a umidade interna do grão.

**Tabela 3.** Estimativa do efeito das variáveis do sistema.

Fator	Efeito	Desvio Padrão	p
Média	13,115	0,596	0,000
Velocidade (Linear)	-1,009	0,596	0,166
Velocidade (Quadrática)	-1,513	0,789	0,128
Temperatura (Linear)	2,467	0,596	0,014
Temperatura (Quadrática)	0,787	0,789	0,375
Velocidade versus Temperatura	1,215	0,843	0,223

De acordo com a Tabela 3, a média obtida para a variável dependente foi de 13% de remoção de umidade da linhaça, com desvio padrão de 0,596 %. O fator p indica a probabilidade de significância para as variáveis do processo. Analisando esse fator percebe-se que apenas a temperatura é relevante para o processo de secagem da linhaça e, o valor  $\alpha$  menor que 0,05 está associado a 95% de confiança (MELO, COSTA & FARIA, 2009).

A Tabela 4 mostra a análise de variância da velocidade e da temperatura do ar. Pode-se observar que a única variável estatisticamente relevante para o modelo é a temperatura, sendo que sua contribuição para a alteração quantidade de umidade retirada é linear, já que este é o único fator em que o valor-p é menor que 0,05. Além de sua relevância estatística, observa-se que a temperatura possui maior influência no sistema que as demais variáveis, pois o valor de F encontrado para ela é muito superior aos demais valores. O mesmo pode ser observado na Figura 4, em que a temperatura é a única a ultrapassar a linha limite no gráfico de Pareto.

**Tabela 4.** Análise de variância das variáveis do processo.

Fator	SS	df	MS	F	P
Vel. (L)	2,037	1	2,037	2,864	0,1658
Vel. (Q)	2,614	1	2,614	3,676	0,1276
Temp. (L)	12,172	1	12,172	17,115	0,0144
Temp. (Q)	0,708	1	0,708	0,996	0,3746
Vel (L) vs. Temp (L)	1,476	1	1,476	2,075	0,2230
Erro	2,844	4	0,711		
Total SS	21,172	9			

A retirada da velocidade do modelo gerado para a variação de umidade em função das variáveis estudadas resultou em uma diminuição do ajuste do modelo, de 69,8% para 45,5%. Isso significa que esta variável influencia no processo. A variação da velocidade do ar pode não ter sido relevante nos experimentos realizados devido ao tamanho do leito estudado, que possuía dimensões pequenas. Dessa forma, a velocidade foi mantida no modelo utilizado para encontrar as condições operacionais ideais.

Na análise do comportamento cinético observou-se que o teor de umidade das sementes de linhaça diminui continuamente com o tempo de secagem. No entanto, a remoção da umidade é influenciada pela temperatura do ar que alimenta o secador de leito fluidizado. O uso de altas temperaturas reduz o tempo de secagem, por aumentar a taxa de transferência de calor (SANTANA, 2011). Entretanto, o uso de alta temperatura pode contribuir para a formação de altos gradientes de umidade no interior dos grãos, gerando estresse e diminuindo a resistência mecânica dos grãos (VIEIRA, 2012). Além disso, podem surgir restrições à temperatura por razões de degradação, mudança de fase, descoloração, inflamabilidade, entre outros fatores (CAMPOS & VIEIRA, 2015).

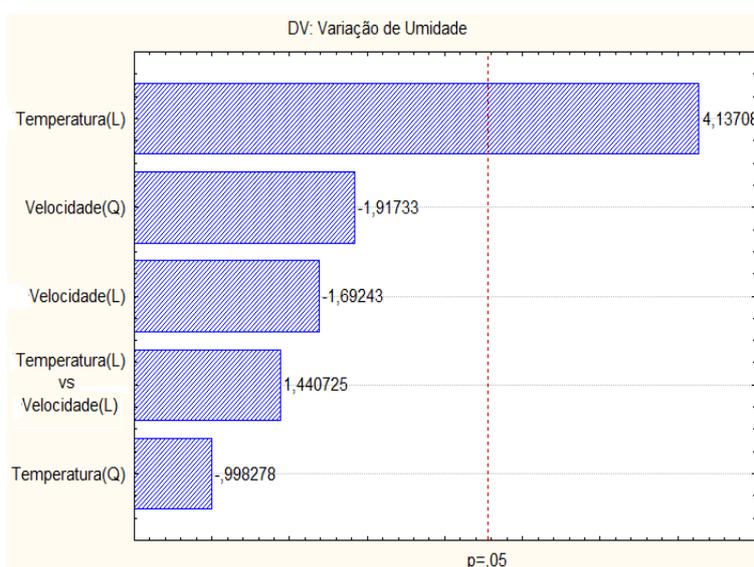
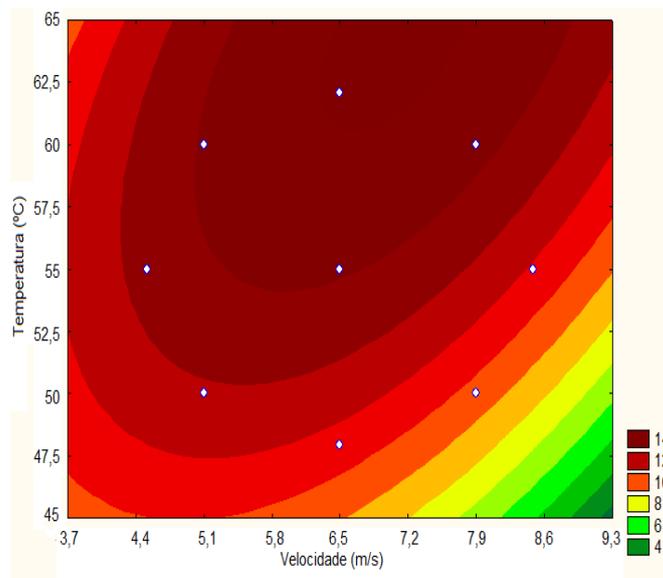


Figura 4. Gráfico de Pareto a partir da análise de variância.

A Figura 5 mostra a remoção de umidade da semente de linhaça com a variação de velocidade do ar e da temperatura. Nota-se que o aumento de velocidade do ar influencia negativamente na remoção de umidade em baixas temperaturas. O que evidencia que a temperatura afeta mais a variação de umidade da semente de linhaça do que a velocidade do ar na alimentação do leito fluidizado. Na colheita dos grãos de linhaça a umidade média é de aproximadamente 18% m/m. Para evitar que os grãos sejam danificados foi considerado ideal os pontos percentuais de remoção de umidade em torno de 12% m/m. De acordo com os resultados obtidos, esse percentual pode ser obtido em temperaturas de 50°C e velocidade variando entre 4,5 a 6,5 m/s.



**Figura 5.** Superfície de contorno para remoção de umidade em função da velocidade de ar e da temperatura.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados da secagem de grãos de linhaça em leito fluidizado mostraram que a velocidade mínima de fluidização foi de 2 m/s. O comportamento cinético mostrou que o teor de umidade das sementes de linhaça diminui continuamente com o tempo de secagem. A temperatura foi a variável mais importante para o processo de secagem da linhaça. O uso de altas temperaturas reduz o tempo de secagem e a remoção de 12% de umidade dos grãos de linhaça em leito fluidizado foi obtida em temperatura de 50°C e velocidade de ar entre 4,5 e 6,5 m/s.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos professores Jorge Aguilar e Lisbeth Melgarde do DEQUI/UFSJ pela realização deste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

**VALENTE, M. C. C.; COSTA, C. M. L.; SOUZA, C. A. G.** *Cinética de secagem em leito fluidizado de sementes de linhaça (Linum Usitatissimum L.)*. Revista de Ciências Exatas, v. 2731, n. 2, 2012.

**AMBRÓSIO-UGRI, M. C. B.; TARANTO, O. P.** *Estudo fluidodinâmico e de secagem de um particulado coesivo em leito fluidizado agitado*. Acta Scientiarum. Technology, v. 26, n. 2, p. 97-102, 2008.

**OLIVEIRA, T. J. P.** *Aspectos fluidodinâmicos de misturas binárias de resíduo de tabaco e areia em leito fluidizado*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

**CREMASCO, M. A.** *Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos*. São Paulo, Blucher, 2012.

**VALENTE, M. C. C.** *Avaliação das condições de secagem no rendimento e na qualidade do óleo de linhaça (*Linum usitatissimum L.*)*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

**SILVEIRA, A. C. P.; PERRONE, I. T.; RODRIGUES JÚNIOR, P. H.; CARVALHO, A. F.** *Secagem por spray: Uma revisão*. Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes, v. 68, n. 391, p. 51-58, 2013.

**OLIVEIRA, V.** *Avaliação energética e econômica da secagem de grãos utilizando secador de coluna com caldeira aquatubular*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, Paraná, 2014.

**REIS, T. G.; PERAZZINI, H.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T.** *Análise Da Secagem De Partículas De Alumina Em Secador De Leito Vibrofluidizado*. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 2, n. 1, p. 373-381, 2015.

**ALBINI, G.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T.** *Caracterização de grãos de cevada em relação a umidade inicial obtida através do processo de reumidificação*. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 2, n. 1, p. 1893-1902, 2015.

**COUTO, A. N.; WICHMANN, F. M. A.** *Efeitos da farinha da linhaça no perfil lipídico e antropométrico de mulheres*. Alim Nutr, v. 22, n. 4, p. 601-608, 2011.

**VIEIRA, G. N. A.** *Caracterização e secagem de grãos de linhaça marrom (*Linum usitatissimum L.*) em leito fixo e fluidizado*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2012.

**MELO, T. L.; COSTA, C. M. L.; FARIA, L. J. G.** *Análise do processo de secagem em leito fluidizado de sementes de linhaça (*linum usitatissimum L.*)*. In: VII Congresso Brasileiro de Engenharia Científica. 2009.

**GONÇALVES, J. F. T.** *Dimensionamento de um secador em leito fluidizado para secagem de cereais*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2011.

**SANTANA, E. B.** *Análise Experimental do Comportamento Fluidodinâmico e da Secagem de Sementes de Linhaça (*Linum Usitatissimum L.*) em Leito de Jorro*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

**CAMPOS, G. Z.; VIEIRA, J. A. G.** *Comportamento Higroscópico da Semente de Linhaça (*Linum usitatissimum L.*)*. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 2, n. 1, p. 1474-1478, 2015.