

## **Análise energética de sementes de soja em processo de secagem intermitente em leito fixo**

Gustavo de Souza Matias, Mestrando (Universidade Estadual de Maringá) [gusmatias@gmail.com](mailto:gusmatias@gmail.com)  
Camila Andressa Bissaro, Mestranda (Universidade Estadual de Maringá) [camilabissaro1@gmail.com](mailto:camilabissaro1@gmail.com)  
Rafael Oliveira Defendi, Dr. (Universidade Tecnológica Federal do Paraná) [rafael.defendi@yahoo.com.br](mailto:rafael.defendi@yahoo.com.br)  
Diogo Francisco Rossoni, Dr. (Universidade Estadual de Maringá) [diogo.rossoni@gmail.com](mailto:diogo.rossoni@gmail.com)  
Luiz Mário de Matos Jorge, Dr. (Universidade Estadual de Maringá) [lmjorge@uem.br](mailto:lmjorge@uem.br)

### **Resumo:**

A secagem de sementes constitui numa operação de extrema importância na cadeia produtiva da soja, pois promove uma redução na umidade da colheita a um nível de umidade segura de armazenamento. Inversamente à operação convencional, a secagem intermitente opera com entradas transientes durante o processo de secagem. Neste contexto, realizaram-se experimentos de secagem em operação convencional e intermitente comparando em termos do consumo energético. Em ambas as operações utilizou-se um secador de leito fixo, em camada delgada e temperatura de ar de secagem de 50°C. Porém a secagem intermitente consistiu-se em modular a temperatura e a vazão de alimentação em um período e amplitude específico, submetendo as sementes à ação do ar aquecido do secador a intervalos regulares de tempo (5,10 e 15 min), intercalados com a retirada das sementes e exposição ao meio ambiente (30°C) sem circulação de ar durante o mesmo tempo, sucessivamente até umidade constante. Concluiu-se que as modulações realizadas nas operações intermitentes, contribuem significativamente para a redução de aproximadamente 46% de energia em relação à secagem convencional. Além disso, este estudo contribui positivamente na busca de métodos que colaboram na redução do consumo energético e na sustentabilidade ambiental durante o processo de secagem.

**Palavras chave:** soja, sementes, secagem intermitente, energia.

## **Energy analysis of soybeans seeds in the intermittent drying process in fixed bed**

### **Abstract**

The drying of seeds constitutes an operation of extreme importance in the soybean production chain, as it promotes a reduction in the humidity of the harvest to a level of safe storage humidity. Conversely, to conventional operation, intermittent drying operates with transient inputs during the drying process. In this context, drying experiments were performed in conventional and intermittent operation comparing in terms of energy consumption. In both operations, a fixed bed drier was used, in thin layer and drying air temperature of 50 °C. However, the intermittent drying consisted in modulating the temperature and the feed rate in a specific period and amplitude, subjecting the seeds to the action of the dryer's heated air at regular intervals (5,10 and 15 min), interspersed with seed withdrawal and exposure to the environment (30 ° C) without air circulation during the same time, successively until constant humidity. It was concluded that the modulations performed in the intermittent operations, contribute significantly to the reduction of approximately 46% of energy in relation to conventional drying. In addition, this study contributes positively to the search for methods that collaborate in the reduction of energy consumption and environmental sustainability during the drying process.

**Key-words:** soybeans, seeds, intermittent drying, energy.

## 1. Introdução

O teor de umidade é o fator dominante que controla a qualidade das sementes de soja armazenadas. Em valores baixos de umidade, as reações enzimáticas e as taxas de respiração, responsável pelo metabolismo das sementes e consequentemente a podridão destes, diminuem (PUZZI, 2000).

O controle do teor de umidade pode ser efetuado a partir da técnica de secagem, que envolve simultaneamente a transferência de calor e massa, tornando-se um processo essencial na cadeia produtiva da soja. Segundo Weber (2005), é intolerável o armazenamento dos grãos sem ocorrer o rebaixamento da umidade original da colheita para um nível de umidade segura.

O conceito clássico de secagem consiste na transferência de um líquido, presente em um corpo sólido, para uma fase gasosa não saturada, conforme Perry e Chilton (1980). Com isso, a secagem de produtos agrícolas consiste na remoção da umidade excessiva contida no interior das sementes através da evaporação, geralmente provocada pela convecção forçada de ar aquecido, de modo a permitir a manutenção de sua qualidade durante o armazenamento por longos períodos de tempo (AFONSO JÚNIOR E CORRÊA, 1999; RESENDE et al., 2008).

Como visto, a secagem trata-se de um fenômeno complexo que envolve simultaneamente a transferência de calor e massa, podendo ainda abranger a transferência de quantidade de movimento. Devido à alta demanda dessas energias, o processo de secagem torna-se caro.

Uma opção para redução dos custos do processo de secagem é a redução do gasto energético do processo, que pode ser alcançada pelo uso da operação intermitente. Contrariamente à operação convencional, a secagem intermitente opera com entradas transientes das condições do ar. Tal secagem é caracterizada pela submissão da semente à ação do ar aquecido na câmara de secagem a intervalos regulares de tempo, intercalados com períodos de exposição ao meio ambiente. Este último período, permite a redistribuição da umidade no interior das sementes reduzindo os gradientes hídrico e térmico (ELIAS, 2002).

Um dos principais objetivos da secagem intermitente é minimizar os gastos energéticos e alcançar e manter a melhor qualidade dos produtos (PUTRANTO et al., 2010). De acordo com Chua et al., (2003), o regime intermitente é favorável para produtos onde o processo de secagem pode ser controlado através dos transportes difusivos interno que cada material a ser seco contém, como é o caso da soja. Quando opera-se com entradas transiente durante o processo de secagem, tal ação pode causar uma potencialização no transporte de massa e de energia no sistema.

Em operação intermitente, as condições do ar podem ser moduladas de várias formas, como em perturbações degraus ou no formato senoidal. Pode-se também modular algumas condições do ar como a temperatura, vazão, pressão e umidade, as quais são propriedades que impactam nas taxas de secagem, na qualidade do material a ser seco e no consumo energético do processo (DEFENDI et al., 2015).

Segundo Luz et al., (2006), a elevação no consumo de energia promove o aumento dos custos operacionais e contribui em prejudicar o meio ambiente, devido ao aumento de perdas de energia, que também colabora para o acréscimo do aquecimento global e consequentemente o efeito estufa.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito que a operação intermitente em leito fixo com modulações na temperatura do ar de secagem e na vazão de alimentação proporcionam no consumo energético no processo de secagem de sementes de soja em relação à secagem convencional, ambas operando na temperatura de ar de secagem de 50°C.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em esquema fatorial. Para a comparação das médias, foi utilizado o teste de Tukey (TUKEY, 1953) ao nível de 5% de significância e a variável resposta de interesse é a energia térmica consumida (kJ) nas operações de secagens, contendo como fator qualitativo o tempo (0,5,10 e 15 min), sendo que o tempo 0 está relacionado com a secagem convencional. A análise estatística dos dados foi realizada utilizando o *Software R* desenvolvido por R Core Team (2016).

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1 Materiais

O secador de leito fixo é composto por um soprador que fornece um fluxo de ar, com vazão ajustada por um “dumper”, através de quatro resistências elétricas acionadas separadamente (uma de 2200 W, duas de 2500 W e uma de 3000 W) e reguladas por um variador de voltagem (VARIAC), uma bandeja retangular de dimensões de 43 por 42 cm e uma mesa de suporte para a bandeja, conforme ilustrado na Figura 1.

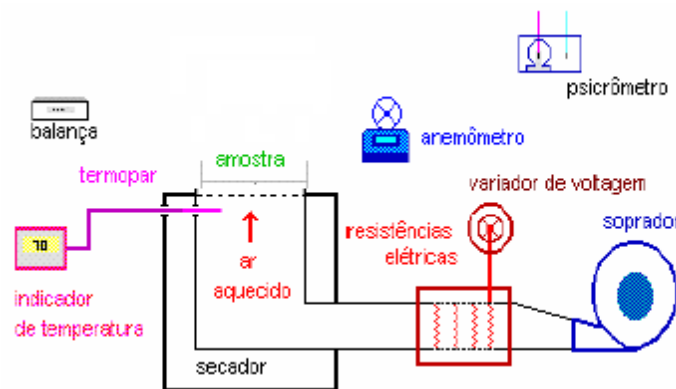


Figura 1-Modelo esquemático do secador de leito fixo

Fonte: Adaptado MOTTA LIMA et al., (2008)

Utilizou-se um papelão com as mesmas dimensões que a bandeja do secador com um furo circular no meio de mesmo raio da peneira circular utilizada, de característica (Tyler 9 – abertura 2 mm) e diâmetro de 20 cm, a qual foi utilizada para colocar as amostras de sementes de soja do cultivar Monsoy 6410, conforme a Figura 2.

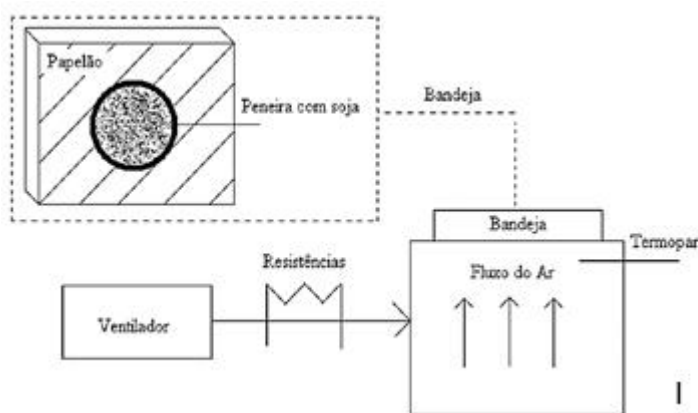


Figura 2-I- Esquema ilustrativo do secador de bandeja de leito fixo

Fonte: DEFENDI et al., (2015)

II- Esquema utilizado para a secagem convencional e intermitente das sementes de soja

Fonte: Elaborado pelos autores

O ar é proveniente do ambiente e segue até a peneira por meio do tubo que liga o ventilador e a mesa que dá suporte à bandeja. As resistências dentro do tubo são usadas para aquecer o ar no processo de secagem, Figura 2-I. As sementes de soja são colocadas dentro da peneira alocada no centro do papelão sobre a bandeja a fim de que o fluxo de ar passe apenas dentro da peneira, conforme a Figura 2 -II.

## **2.2 Procedimento Experimental**

As amostras de sementes de soja transgênica Monsoy 6410 foram utilizadas nas operações convencional e intermitentes, em leito fixo e em camada delgada, em ambas as operações trabalharam-se com umidade inicial de 20% (b.s), velocidade fixa do ar de  $1 \text{ m.s}^{-1}$ , em duplicata e em sequência randômica.

Para a secagem convencional, a amostra foi submetida ao nível de temperatura do ar de secagem de  $50^{\circ}\text{C}$ . Já a operação intermitente consistiu-se em modular propriedades do sistema, como a temperatura do ar e a vazão de alimentação, numa frequência e períodos pré-determinados, utilizando o mesmo nível de temperatura do ar de secagem ( $50^{\circ}\text{C}$ ), intercalados com exposição das sementes ao meio ambiente à  $30^{\circ}\text{C}$  com períodos de 5, 10 e 15 minutos.

Primeiramente, ajustou-se a velocidade e a temperatura do ar do secador a ser trabalhada sobre a peneira. Para determinar as condições ambientais, no caso, temperatura e umidade do ar, foi utilizado um psicrômetro do tipo temperatura de bulbo seco/bulbo úmido.

As sementes de soja Monsoy 6410 foram hidratadas antes de serem submetidas ao processo de secagem, para atingir a condição inicial de umidade de 20% em b.s. Com isso, para a hidratação das sementes de soja foi utilizado um banho termostático a  $30^{\circ}\text{C}$ , utilizando 100 g de sementes com o auxílio de uma peneira Tyler 12. Essas sementes foram mergulhadas no banho durante 1,2,3,4,5, 10,15,20,25,30,40,50,60 min e a cada tempo mencionado eram pesadas. Após obter a cinética de hidratação, foi realizado um ajuste através do modelo matemático de Peleg no *Software R*. O tempo de hidratação obtido foi de aproximadamente 1,07 min para a umidade inicial de 20% em b.s.

Uma parcial de soja hidratada utilizou-se o método do peso seco constante em estufa a  $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  por 24 horas. O restante da soja hidratada cobriu-se a superfície da peneira com uma monocamada de aproximadamente 115g de soja e mediu-se a massa do sistema peneira mais soja. Colocou-se a peneira com soja sobre a bandeja e o papelão, conforme a Figura 2-II e acionou o cronômetro, dando início a secagem da mesma. A massa de soja mais a peneira foi pesada a cada 1 min em balança semi-analítica (precisão: 0,01g), o procedimento foi finalizado quando obteve-se peso constante.

## **2.3 Secagem Intermitente**

Para as secagens intermitentes além de realizar todos os itens anteriores, as sementes foram submetidas à ação do ar aquecido a intervalos regulares de tempo, intercalados com períodos de secagem em temperatura ambiente ( $30^{\circ}\text{C}$ ), sem escoamento de ar.

A Figura 3 representa o esquema de modulação realizado para a temperatura do ar de secagem em operação intermitente, especificamente à operação de temperatura de ar de  $50^{\circ}\text{C}$  no período de 5 minutos, sendo procedido da mesma forma para os demais tempos (10 e 15 min).

Paralelamente a modulação realizada na temperatura do ar de secagem, as secagens intermitentes consistiram-se em modular a vazão de alimentação na mesma amplitude e período, como ilustrado na Figura 4, especificamente no período de 5 minutos.

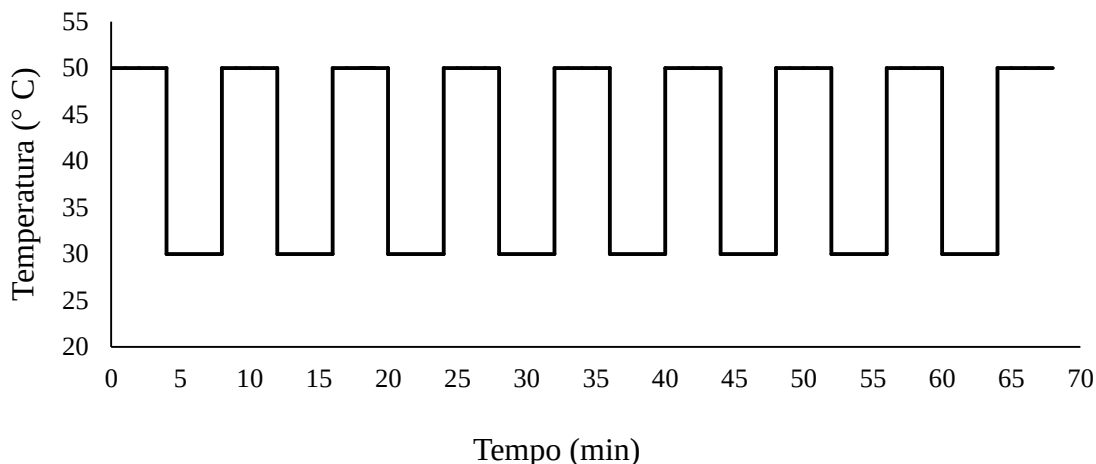


Figura 3- Representação da secagem intermitente a 50°C no período de 5 minutos  
Fonte: Elaborado pelos autores

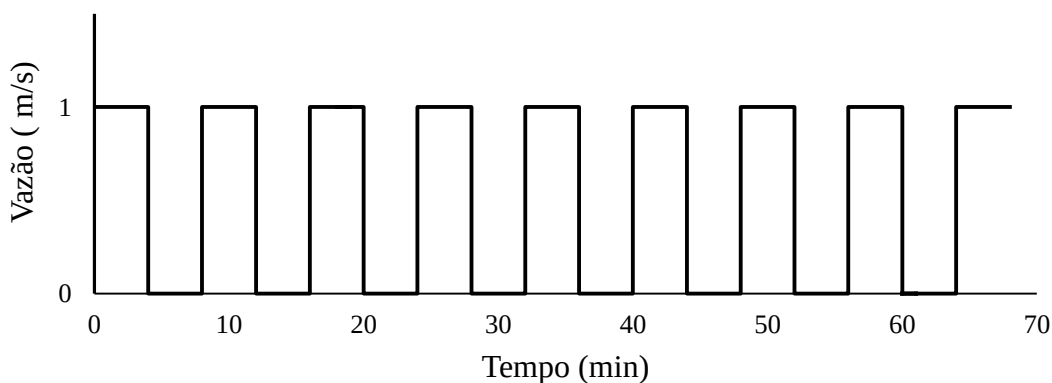


Figura 4- Representação da perturbação na vazão da secagem intermitente no período de 5 minutos  
Fonte: Elaborado pelos autores

Em virtude de intercalar a temperatura do ar de secagem (50 °C) e a vazão de secagem (1m/s) para uma temperatura mais fria (30°C) e sem circulação de ar, conforme as Figuras 3 e 4, obtém-se modulações em formato de degrau.

As operações intermitentes, iniciam-se sempre nas condições fixas do secador com o secador operando em regime permanente em uma dada temperatura e ar escoando a 1 m/s. Posteriormente, as sementes são expostas ao meio ambiente a temperatura de 30°C, sem circulação de ar durante o mesmo período, sucessivamente, conforme as Figuras 3 e 4.

## 2.4 Análise Energética

A análise energética do processo de secagem das sementes de soja, seja em operação convencional ou intermitente, foram calculadas em função do calor necessário para aquecer o ar para então evaporar a quantidade de água contida nas sementes.

Portanto, quando a transformação é à pressão constante, a variação de entalpia ( $\Delta H$ ) é igual ao calor absorvido ou liberado ( $Q$ ) no processo, ou seja:

$$Q = \Delta H \quad (1)$$

A entalpia de vaporização ( $\widehat{\Delta H}$ ) ou calor de vaporização é a quantidade de energia necessária para que um quilograma (kg) de água que se encontra em equilíbrio com o seu próprio vapor, passe completamente para o estado gasoso e é dado por:

$$\widehat{\Delta H} = \int C_{p_{ar}} \cdot (T_{f_{ar}} - T_{i_{ar}}) \quad (2)$$

Em que  $C_{p_{ar}}$  é o calor específico do ar,  $T_{f_{ar}}$  é a temperatura final do ar e  $T_{i_{ar}}$  é a temperatura inicial do ar de secagem. Devido a absorção da energia ser na forma de calor e o processo de secagem ser um processo endotérmico, portanto, o valor da entalpia de vaporização será sempre positivo.

Contudo, o valor de calor absorvido no processo para aquecer o ar, ou seja, a entalpia (H), é dado por:

$$H = \widehat{\Delta H} \cdot \dot{m} \cdot t \quad (3)$$

Onde  $\widehat{\Delta H}$  é dado pela entalpia de vaporização,  $\dot{m}$  é a vazão mássica e o  $t$ , é o tempo de exposição em que a sementes de soja permaneceu no secador de leito fixo durante o processo de secagem.

Com isso, a vazão mássica ou fluxo de massa,  $\dot{m}$ , é a quantidade de massa que escoar através de uma área por unidade de tempo. Esse fluxo de massa pode ser expresso por:

$$\dot{m} = \rho_{ar} \cdot \dot{v} \quad (4)$$

Onde  $\rho_{ar}$  é massa específica do fluido escoando e  $\dot{v}$  é a vazão volumétrica.

De maneira semelhante, vazão volumétrica é o volume de fluido escoando através de uma área por unidade de tempo, ou seja:

$$\dot{v} = v_{ar} \cdot A \quad (5)$$

Onde  $v_{ar}$  é a componente da velocidade normal a secção de área transversal ao escoamento e  $A$  é a secção de área transversal ao escoamento.

Assim, a quantidade de calor necessário para aquecer o ar para então evaporar a quantidade de água contida nas sementes na secagem convencional e nas secagens intermitentes, ambas operando com temperatura de ar de secagem de 50°C, foram obtidos e expressos em kJ.

### 3. Resultados

A análise de variância, a qual visa verificar se existe diferença significativa entre as médias do consumo energético entre a operação convencional e as intermitentes, encontra-se no Apêndice I, de acordo com a análise de variância as médias dos tratamentos são diferentes a 5 % de significância, pois o valor de  $p$  é 0,001021.

A Tabela 1, apresenta os valores obtidos do consumo energético entre a operação convencional e as intermitentes no processo de secagem de sementes de soja. Lembrando, que o tempo 0 apresentado na tabela a seguir, está relacionado com a secagem convencional e os demais tempos (5,10 e 15 min) estão relacionados com as secagens intermitentes.

| CONSUMO ENERGÉTICO (kJ) |           |           |           |           |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Período (min)           |           |           |           |           |
|                         | 0         | 5         | 10        | 15        |
| 50°C                    | 5763,83 a | 3163,74 b | 3137,61 b | 2998,97 b |

Letras minúsculas iguais em linha não se diferem estatisticamente a 5% de significância pelo Teste de Tukey.

Tabela 1- Consumo energético durante a operação de secagem convencional (0 min) em relação as secagens intermitentes (5,10 e 15 min) na temperatura de ar de secagem de 50°C

Observa-se na Tabela 1, que os diferentes intervalos de tempos (5,10 e 15 min) utilizados nas secagens intermitentes não se diferenciaram entre si ao nível de 5% de significância, porém, em relação a secagem tradicional apresentaram diferença significativa.

Nota-se que a secagem convencional foi a que apresentou maior demanda energética para o processo de secagem das sementes de soja, conforme a Tabela 1. Com isso, as modulações na temperatura e na vazão de alimentação em um período e amplitude específico, conforme realizado nas secagens intermitentes foi de extrema importância para a redução do consumo energético durante o processo.

Tal ação é muito satisfatória, pois representa uma economia de aproximadamente 46% de energia em relação à secagem convencional. Outro fato relevante a ser ressaltado, é que, economizar energia elétrica significa contribuir para a sustentabilidade ambiental mundial, além de utilizá-la de forma a obter o máximo benefício com um menor consumo, evitando os desperdícios ou o uso inadequado, sem, no entanto, diminuir a qualidade do processo de secagem.

A análise dos resíduos, foi obtida afim de verificar se as pressuposições exigidas para proceder à análise de variância foram plausíveis. A Figura 5 representa o histograma dos resíduos obtidos, nota-se que apresentam distribuição simétrica, ou seja, os resíduos apresentam distribuição normal.

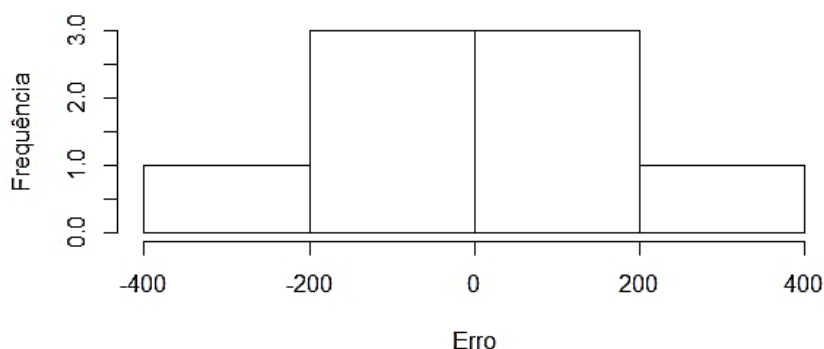


Figura 5- Histograma do resíduo versus frequência  
Fonte: Software R

Além disso, pode-se utilizar também para avaliar a normalidade o gráfico Q-Q Plot, conforme a Figura 6. Esse gráfico é composto pelo eixo da abscissa que apresenta os valores observados

dos resíduos e no eixo das ordenadas estão os valores dos resíduos sob a hipótese de que a distribuição deles é normal. Conforme a Figura 6, observa-se que os pontos estão próximos a reta de referência apresentando uma boa aderência dos dados à distribuição normal.

Os métodos gráficos citados anteriormente possuem a desvantagem de serem subjetivos, pois dependem de interpretação visual. Para um resultado mais objetivo, utilizou-se o teste de Shapiro-Wilk, o qual é considerado um dos mais poderosos e eficientes teste de normalidade. O teste de Shapiro-Wilk foi realizado no *Software R* e obteve-se p-valor de 0,9781, com isso, não rejeitou-se a hipótese da normalidade dos resíduos.

Logo, através da análise de resíduos verificamos que o modelo adotado na análise de variância é adequado.

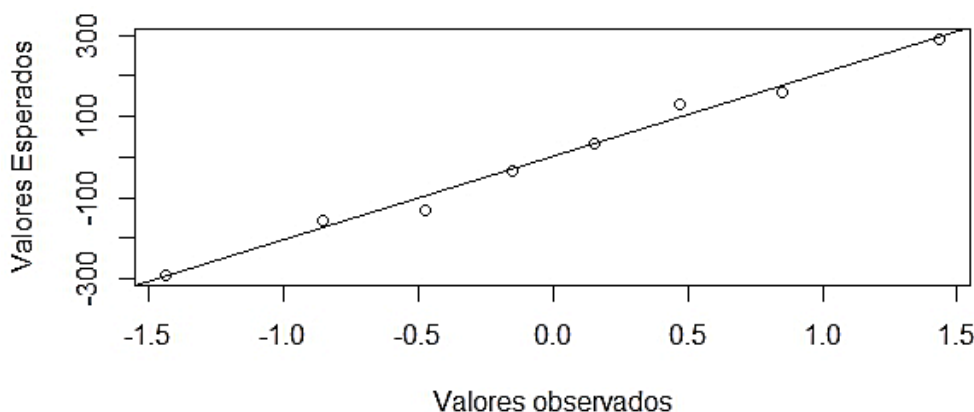


Figura 6- Gráfico Q-Q Normal de resíduos

Fonte: *Software R*

#### 4. Conclusão

As modulações realizadas na temperatura e na vazão de alimentação em um período e amplitude específico nas secagens intermitentes, contribuíram significativamente para a redução de aproximadamente 46% de energia em relação à secagem convencional.

O tempo não é um fator que influencia as operações intermitentes (5, 10 e 15 min), pois não apresentaram diferença significativa entre si ao nível de 5% de significância em relação ao consumo energético das sementes de soja.

Além disso, este estudo contribui positivamente na busca de métodos que colaboram na redução do consumo energético e na sustentabilidade ambiental durante o processo de secagem.

#### 5. Nomenclatura

|                   |                                            |                                       |
|-------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------|
| A                 | Área da peneira                            | m <sup>2</sup>                        |
| b.s               | Base Seca                                  | m <sub>água</sub> /m <sub>ss</sub>    |
| C <sub>p ar</sub> | Calor específico do ar a pressão constante | J.kg <sup>-1</sup> . °C <sup>-1</sup> |
| ΔH                | Entalpia de vaporização                    | kJ.kg <sup>-1</sup>                   |
| m                 | Vazão mássica                              | kg.s <sup>-1</sup>                    |
| ρ <sub>ar</sub>   | Massa específica do ar                     | kg.m <sup>-3</sup>                    |
| Q                 | Calor                                      | kJ                                    |
| T <sub>i ar</sub> | Temperatura inicial do ar de secagem       | °C                                    |
| T <sub>f ar</sub> | Temperatura final do ar de secagem         | °C                                    |
| t                 | Tempo de exposição ao secador              | s                                     |
| v <sub>ar</sub>   | Velocidade de escoamento do ar             | m.s <sup>-1</sup>                     |

$\dot{v}$  Vazão volumétrica  
W Watt

$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$   
 $\text{J}.\text{s}^{-1}$

## Referências

**AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C.** Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Vol. 3, n. 3, p. 349-353, 1999.

**CHUA, K. J.; MUJUMDAR, A. S.; CHOU, S. K.** Intermittent drying of bioproducts—an overview. *Bioresource Technology* Vol. 90, n. 3, p. 285-295, 2003.

**DEFENDI, R. O.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L.M.M.** Modulação Simultânea da Temperatura e da Vazão do ar na Entrada de um Secador em Leito Fixo. *Blucher Chemical Engineering Proceedings* Vol. 2, n. 1, p. 1424-1433, 2015.

**ELIAS, R. N.; BARBOSA, A. L. S., MANCINI, M. C.** Secagem de Grão de Bico em Leito Fixo. *Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra* Vol. 21, n.1, p. 113-119, 2002.

**LUZ, G. R.; GONÇALVES ANDRADE, C. M.; JORGE, L. M.M.; PARAÍSO, P. R.** Análise energética da secagem de farelo de soja em secador rotativo indireto. *Acta Scientiarum. Technology* Vol. 28, n. 2, p. 173-180, 2006.

**PERRY, R. H.; CHILTON, C. H.** *Manual de engenharia química*. 5. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S. A, Cap. 20, p. 3-62, 1980.

**PUTRANTO, A.; XIAO, Z.; CHEN, X.D.; WEBLEY, P.A.** Intermittent drying of mango tissues: implementation of the reaction engineering approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research* Vol.50, n. 2, p. 1089–1098, 2010.

**PUZZI, D.** *Abastecimento e armazenamento de grãos*. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 2000.

**R CORE TEAM.** *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Viena, Áustria, 2016.

**RESENDE, O.; CORRÊA, P., C.; GONELI, A., L., D.; BOTELHO, F., M.; RODRIGUES, S.** Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*phaseolus vulgaris l.*). *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*. Vol.10, n.1, p.17-28, 2008.

**TUKEY, J. W.** *The Problem of Multiple Comparisons*. Mimeograph, Princeton, NJ. Elementary Statistics 4. ed, Vol. 215, 1953.

**WEBER, E. A.** *Excelência em beneficiamento e armazenamento de grãos*. Canoas, RS: Editora Salles, 2005.

**APÊNDICE**

| <b>Análise de Variância</b>                      |            |                      |                       |          |                |
|--------------------------------------------------|------------|----------------------|-----------------------|----------|----------------|
| Variável Resposta: Consumo Energético (kJ)       |            |                      |                       |          |                |
| <b>Fator</b>                                     | <b>G.L</b> | <b>Soma Quadrada</b> | <b>Quadrado Médio</b> | <b>F</b> | <b>p valor</b> |
| Tempo                                            | 3          | 10674530             | 3558177               | 55,576   | 0,001021**     |
| Resíduo                                          | 4          | 256094               | 64023                 |          |                |
| 0 '****' 0,001 '***' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1 |            |                      |                       |          |                |