

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

PAULO VINICIUS SILVA DAI

**IMPACTOS ENERGÉTICO-QUALITATIVOS E SUSTENTÁVEIS EM
DIFERENTES TECNOLOGIAS DE SECAGEM DE GRÃOS DE SOJA**

CHAPADÃO DO SUL – MS

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

PAULO VINICIUS SILVA DAI

**IMPACTOS ENERGÉTICO-QUALITATIVOS E SUSTENTÁVEIS
EM DIFERENTES TECNOLOGIAS DE SECAGEM DE GRÃOS DE
SOJA**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como requisito para obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração: Produção Vegetal.

CHAPADÃO DO SUL – MS

2020



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

DISCENTE: Paulo Vinicius da Silva Dai

ORIENTADOR: Dr. Paulo Carteri Coradi

TÍTULO: Impactos energético-qualitativos e sustentáveis em diferentes tecnologias de secagem de grãos de soja

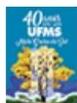
AVALIADORES:

Prof. Dr. Presidente Paulo Carteri Coradi

Profa. Dra. Rita de Cassia Felix Alvarez

Profa. Dra. Ana Paula Leite de Lima

Chapadão do Sul, 13 de agosto de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Carteri Coradi, Usuário Externo**, em 13/08/2020, às 09:17, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Paula Leite de Lima, Professor do Magisterio Superior**, em 13/08/2020, às 09:18, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rita de Cassia Felix Alvarez, Professor do Magisterio Superior**, em 13/08/2020, às 09:19, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2075939** e o código CRC **A23B3409**.

AGRADECIMENTOS

A Deus por suas misericórdias e o sustento de cada dia.

A toda minha família por ser minha base e a minha namorada que me ajudaram e apoiaram ao longo desta caminhada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi pela orientação, companheirismo e ajuda.

A UFMS - PPGA, campus Chapadão do Sul-MS pela oportunidade de fazer o mestrado.

A Jaqueline Krug Schlatter pelo apoio ao trabalho.

A todos os amigos, colegas, professores e parceiros queridos que estiveram envolvidos diretamente e indiretamente e que contribuíram de alguma forma.

EPÍGRAFE

Em tempos incertos e momentos de adversidade...

[...] Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar. [...] (Josué 1:9)

[...] Bem sei que tudo podes, e nenhum dos teus planos pode ser frustrado. [...] (Jó 42:2)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagem Ilustrativa do silo aerador. Fonte: Adaptado de BECKER.....	13
Figura 2. Imagem ilustrativa do secador. Fonte: Adaptado de Revista SEED news, volume XIV, nº 6, 2010.....	14
Figura 3. Curvas de secagem de grãos de soja.....	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Balanço de massa e energia dos sistemas de secagem.....	17
Tabela 2. Condições do ar ambiente e dos grãos de soja submetidos a diferentes tipos de secagem.....	18
Tabela 3. Classificação física de grãos de soja de diferentes lotes após secagem.....	19
Tabela 4. Qualidades físico-químicas de lotes de grãos de soja manejadas em unidade de recebimento, secagem e armazenamento.....	20
Tabela 5. Balanço de massa dos grãos de soja na secagem	22
Tabela 6. Balanço de energia do sistema de secagem.....	22
Tabela 7. Balanço de energia do sistema de secagem.....	22
Tabela 8. Impactos no balanço energético dos sistemas de secagem e qualidade de grãos de soja, em função dos diferentes manejos e tecnologias de pós-colheita em escala de produção de 113 milhões de toneladas por ano – Brasil.....	23

RESUMO

A secagem destaca-se como uma operação fundamental na pós-colheita, para redução dos teores de água nos grãos, almejando a qualidade destes, para promover a secagem há dispêndio considerável de combustível, destacando-se o consumo de biomassas, como as lenhas florestais. O objetivo deste trabalho foi avaliar os diferentes sistemas de secagem, visando à qualidade dos grãos e o rendimento energético do sistema. O experimento foi realizado em uma cooperativa, sendo o delineamento experimental utilizado o inteiramente casualizado (DIC). Para a secagem dos grãos foi utilizado diferentes tratamentos: grãos de soja úmida da lavoura (SUL); grãos de soja seca da lavoura RR (SSLRR); grãos de soja seca da lavoura RR2 (SSLRR2); grãos de soja seca em secador contínuo (SSS1); grãos de soja seca em silo-secador (SSS2); grãos de soja seca em silo-aerador (SSS3). Foi avaliado a qualidade físico-química dos grãos, balanço de massa e energia do sistema de secagem e a estimativa de perdas e rendimento em nível nacional. O tratamento SSS1 reduziu os teores de água de 17% para 11,5%, o SSS2 reduziu de 17% para 13,8% e SSS3 reduziu os teores de 17% para 14,3%. O SSS1 conservou as qualidades físico-químicas dos grãos em teor de proteína, óleo e garantiu maior rendimento energético do sistema. Concluiu-se que o manejo SSS1 reduz os impactos energéticos-ambientais em 80,23%, as perdas com proteína bruta em 94,73% e óleo bruto em 95,08% a nível produtivo nacional, considerando-o mais eficiente.

Palavras-chave: Energia. Pós-Colheita. Pré-Processamento. Qualidade.

ABSTRACT

Drying stands out as a fundamental post-harvest operation, to reduce the water content in the grains, aiming for their quality, to promote drying there is a considerable expenditure of fuel, highlighting the consumption of biomass, such as forest firewood. The objective of this work was to evaluate the different drying systems, aiming at the quality of the grains and the energy efficiency of the system. The experiment was carried out in a cooperative, with a completely randomized design (DIC). For the drying of the grains, different treatments were used: moist soybean grains from the field (SOUTH); RR dry soybeans (SSLRR); dry soybeans from the RR2 crop (SSLRR2); dry soybeans in continuous dryer (SSS1); silo-dried soybeans (SSS2); soya beans dried in silo-aerator (SSS3). The physical-chemical quality of the grains, mass and energy balance of the drying system and the estimate of losses and yield at the national level were evaluated. The SSS1 treatment reduced water content from 17% to 11.5%, SSS2 reduced from 17% to 13.8% and SSS3 reduced the content from 17% to 14.3%. The SSS1 preserved the physicochemical qualities of the grains in terms of protein, oil, and guaranteed greater energy efficiency of the system. It was concluded that the SSS1 management reduces energy-environmental impacts by 80.23%, losses with crude protein by 94.73%, and crude oil by 95.08% at the national production level, considering it more efficient.

Keywords: Energy. Post-Harvest. Pre-Processing. Quality.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	11
MATERIAL E MÉTODOS.....	12
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
CONCLUSÃO.....	24
REFERÊNCIAS.....	24

INTRODUÇÃO

As etapas de pós-colheita têm como finalidade conservar a qualidade dos grãos colhidos até a comercialização, através do manejo adequado dos grãos nas operações de recebimento, pré-limpeza, secagem e armazenamento (ANDERSON; WESTERLUND, 2014; BABU et al., 2018).

A secagem tem por finalidade reduzir os teores de água dos grãos para as condições de armazenamento (REYES et al., 2014; HELVACI; AKKURT, 2014), reduzindo a atividade de água ($a_w < 0,6$) a um nível em que o crescimento microbiano e a taxa de reação são retardados (SCOTT, 1957). Embora a secagem seja uma operação fundamental, o processo térmico não pode ser severo em termos de tempo e temperatura, pois além da remoção da água, a secagem poderá interferir na estrutura físico-química dos grãos, promovendo desestruturações nos tecidos celulares e acelerando o processo físico de deterioração dos grãos, conseqüentemente, poderá aumentar os índices de acidez e redução dos teores de óleo e proteínas (ALENCAR et al., 2009; SAMADI et al., 2013; HARTMANN FILHO et al., 2016; CORADI et al., 2017).

A heterogeneidade dos grãos colhidos no período de colheita ao longo da safra, dificulta a capacidade dos secadores, havendo necessidade de monitoramento e manejo, quanto aos teores de água na massa de grãos, tempo de operação e a temperatura do ar de secagem para a otimização da operação, quanto ao consumo de energia e qualidade dos grãos (BORGES, 2016).

A otimização dos secadores de grãos tem dois principais objetivos que são minimização de custos de energia e maximização da capacidade de secagem. A energia empregada na secagem é proveniente da queima de combustíveis, dentre eles destaca-se a biomassa, oriunda principalmente da madeira de eucalipto, devido ao custo inferior quando comparada com outras opções, como o óleo diesel e o GLP (Gás Liquefeito do Petróleo). Nesse sentido, tem sido recorrente a preocupação com a procedência, manutenção e redução do consumo desse recurso natural renovável como fonte energética. Uma alternativa seria explorar as condições operacionais da secagem, melhorando o controle da temperatura e do fluxo de ar (COSKUN et al., 2009; BOWSER et al., 2011; BOROZE et al., 2014; RABHA et al., 2017).

Os modelos mais utilizados para a secagem de produtos agrícolas têm como base o deslocamento do fluxo de ar aquecido, através da massa do produto (PRAKASH; KUMAR, 2014; SINGH; SETHI, 2018). Alguns trabalhos avaliaram as variações de fluxo de ar e temperatura do ar de secagem, como por exemplo, Srzedinicki e Driscoll (2008) a qual afirmaram que a secagem de grãos a alta temperatura é uma das técnicas para reduzir o tempo

de secagem. Tajaddodi (2012), Ibrahim et al. (2013) e Ibrahim et al. (2014) estudaram o desempenho de secadores e verificaram a variação da direção do fluxo de ar, a qual interfere no consumo de energia no secador, sendo um fator importante para aumentar a capacidade de secagem e a qualidade dos grãos. Brooker et al. (1992); Mulet et al. (1999); Mayor e Sereno (2004); Devahastin e Pitaksuriyarat (2006) avaliaram o consumo de energia no processo de secagem e encontraram resultados médios de eficiência do sistema fornalha/secador de 60%, consumo específico de energia de 1101 kcal kg⁻¹ de água, consumo específico de energia horário de 2.252.174 kcal h⁻¹ e consumo de biomassa de 643 kg h⁻¹.

Considerando as preocupações ambientais e a natureza finita dos combustíveis fósseis, é necessário reduzir ainda mais o consumo de energia no setor de alimentos, que é capaz de dissociar os preços dos alimentos dos preços instáveis e crescentes dos combustíveis fósseis (CHEN et al., 2010). Assim, é desejável usar energia renovável para a secagem de produtos agrícolas e associá-las as tecnologias atuais de secagem bem como analisa-las para obter sistemas eficientes. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar diferentes sistemas de secagem, visando à qualidade dos grãos e o rendimento energético dos sistemas.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho experimental foi realizado em unidade armazenadora de grãos, localizada na unidade de Capão do Valo, interior do município de Rio Pardo, Rio Grande do Sul, Brasil.

A unidade dispõe de um sistema automatizado de acionamento e desligamento do sistema de movimentação dos grãos, via correias transportadoras e elevadores de canecas, e, máquinas de pré-limpeza, sistema de carregamento e descarregamento dos secadores, controle de temperatura do ar de secagem e nível de carregamento do secador, que indica o volume de grãos armazenados nos silos. Os silos quando atingem certa capacidade de carregamento, faz-se o acionamento dos motores dos ventiladores de aeração conforme as condições climáticas medidas por uma estação meteorológica, bem como, as condições dos grãos armazenados monitoradas por sensores termopares (sistema de termometria), para gerenciamento da armazenagem de grãos.

A unidade armazenadora é composta por duas estruturas de armazenagem á granel com capacidade estática de 80.000 toneladas de grãos, a secagem de grãos foi feita a partir da utilização dos equipamentos secador e silos.

A estrutura do armazém 1 caracterizou-se por receber grãos secos e úmidos em um conjunto de moegas com capacidade de 360 toneladas. A movimentação dos grãos das moegas até o elevador de transporte vertical foi realizada via correia transportadora, para o

transporte vertical foi utilizado elevador de caçambas, com acionamento via motor elétrico de 30 CV, para a pré-limpeza foram utilizadas quatro máquinas Reinke. O sistema de armazenagem do Armazém 1 foi composto por dois silos metálicos (Figura 1) com capacidade de 20 mil sacas cada, de fundo plano com altura total de 19,50 m e diâmetro de 13,06 m, dotado de sistemas de aeração com ventiladores, acionado por motores de 15 CV, e três silos metálicos fundo plano com capacidade de 40 mil sacas, com altura total de 21,94 m e diâmetro de 14,70 m, com sistema de aeração por ventiladores com motores de 20 CV.

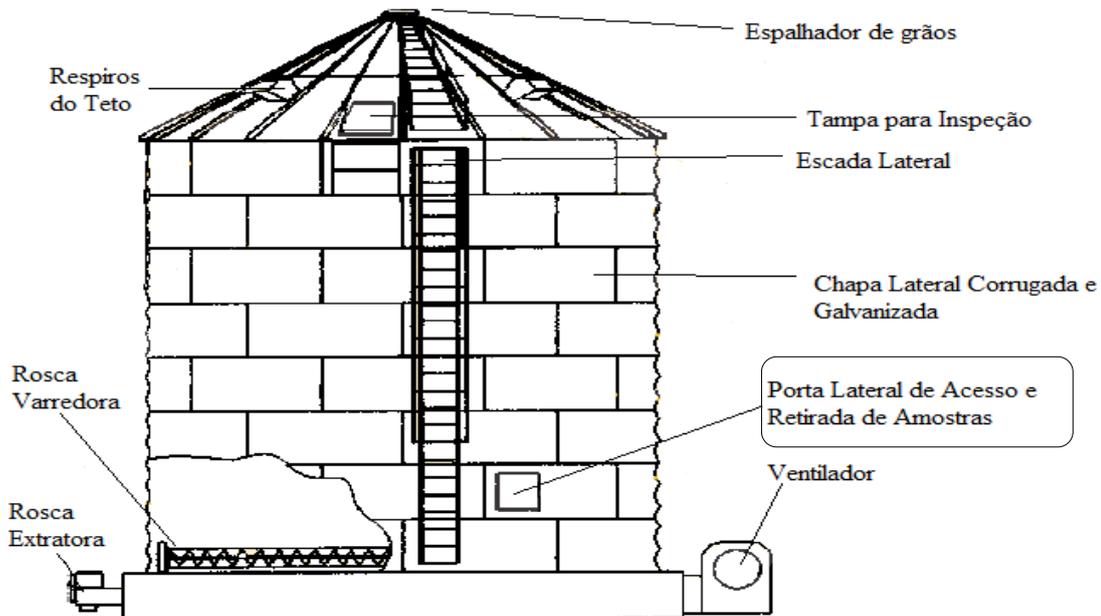


Figura 1. Imagem Ilustrativa do silo com seus componentes. Fonte: Adaptado de Carlos BECKER.

A estrutura do armazém 2 foi destinado para o recebimento do produto seco, composto por uma moega com sistema de descarga simples e uma moega com sistema de descarga utilizando tombador hidráulico. Para pré-limpeza, foi utilizada uma máquina tipo Kepler Weber com capacidade de 240 tonh^{-1} , o sistema de armazenagem foi composto por dois silos metálicos de fundo cônico, com capacidade de 100 mil sacas, de altura total de 25,59 m e diâmetro de 21,83 m, com sistema de aeração utilizando ventilador, acionado por um motor de 40 CV.

O secador (Figura 2) utilizado foi o da marca Condor, com capacidade estática de 57 ton h^{-1} e capacidade dinâmica de 40 ton h^{-1} , o sistema de descarga é do tipo pneumático, com correia transportadora de 16" e 5 metros de comprimento, com capacidade de transporte de 60 tonh^{-1} acionada por motor elétrico de 4 CV. O secador tem acoplado após a fornalha de produção de calor, dois ventiladores axiais, modelo Vane 800 de 15 CV para sucção e movimentação do ar para a câmara de secagem, uma fornalha construída de alvenaria com

revestimento interno de tijolo refratário, cobertura tipo abóboda de tijolo refratário, portas de alimentação, grelhas e suportes em ferro fundido, pilastras, tirantes, cinzeiros e venezianas em aço com consumo médio de lenha $1,40 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

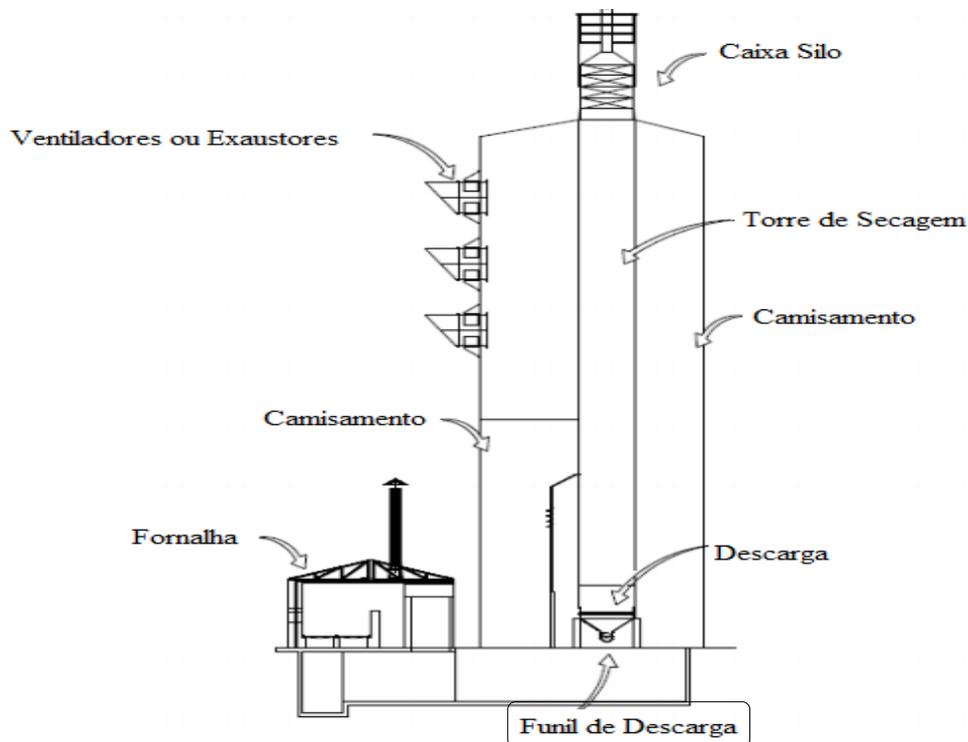


Figura 2. Imagem ilustrativa do secador com seus componentes. Fonte: Adaptado de Revista SEED news, vol XIV, n° 6, 2010.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, sendo os lotes de grãos de soja divididos em grupos: grãos de soja seca advindo da lavoura cultivares RR e RR2, não submetidos a secagem (Tratamentos 1 e 2), grãos de soja úmida da lavoura, para caracterização qualitativa dos grãos antes do processo de secagem (Tratamento 3) e grãos de soja seca após diferentes sistemas ou manejos de secagem (Tratamentos 4, 5 e 6), compondo os seguintes tratamentos experimentais:

- Tratamento 1 - Soja seca da lavoura RR (SSLRR)
- Tratamento 2 - Soja seca da lavoura RR2 (SSLRR2)
- Tratamento 3 - Soja úmida da lavoura (SUL)
- Tratamento 4 - Soja seca em secador contínuo (SSS1)
- Tratamento 5 - Soja seca em silo-secador (SSS2)
- Tratamento 6 - Soja seca em silo-aerador (SSS3)

Os lotes SSLRR e SSLRR2 (tratamentos 1 e 2) chegaram à unidade secos da lavoura com teores de água de 13,8% e 14,3% respectivamente, sem a necessidade de fazer a secagem. O SUL (tratamento 3), no entanto, chegou da lavoura com teor de água inicial de

17%, e, tendo a considerável importância de realizar a secagem. O SSS1, SSS2 e SSS3 (tratamentos 4, 5 e 6), são os lotes de soja seca pelos manejos de secagem feitos na unidade, com teores de água finais de 11,5%, 13,8% e 14,1% respectivamente.

Para a realização dos manejos de secagem foram feitos diferentes usos dos equipamentos (secador e silos) caracterizando em diferentes sistemas ou manejos de secagem: o manejo SSS1 (tratamento 4), a secagem contínua, foi feita utilizando-se somente o secador e depois de finalizada, os grãos foram encaminhados ao silo armazenador; o manejo SSS2 (tratamento 5), a secagem silo-secador, foi feita usando apenas o silo e armazenado no próprio silo; e, o manejo SSS3 (tratamento 6), a secagem silo-aerador, foi inicialmente feita uma pré-secagem no secador e, em seguida, transportado e finalizada no silo, no qual, onde foram armazenados os grãos.

As leituras de temperatura ambiente e umidade relativa do ar foram mensuradas pelo aparelho termo-higrômetro. A velocidade do ar na entrada da fornalha e no ciclone foram medidas com um anemômetro de pás.

A temperatura do ar de secagem foi a 90°C, medida através de sensor termopar instalado no próprio secador e posicionado no espaço de transição da câmara de secagem (mistura entre ar e grãos) e a câmara de resfriamento.

A temperatura da massa de grãos foi medida ao longo da secagem, as amostras foram retiradas para leitura do teor de água do início ao final do processo a cada 15 minutos, sendo coletadas do funil de descarga no caso do secador, e na porta lateral de para acesso para retirada de amostras, silo. Com auxílio de um recipiente adicionou um termômetro as amostra para obtenção da temperatura, do mesmo modo que, em seguida, feito a determinação dos teores de água medidas a partir do medidor de umidade indireta, equipamento que correlaciona à capacitância elétrica com a umidade do produto.

Para o teste de condutividade elétrica, foram utilizadas quatro repetições de cinquenta grãos para cada tratamento, os grãos foram pesados com precisão de duas casas decimais e colocadas em copos plásticos (200 mL), a serem embebidos em 75 mL de água deionizada. Em seguida colocados em um germinador a 25°C, durante 24 horas, decorrido o período, os recipientes foram retirados, suavemente agitados e medidos por um condutivímetro AK51, de acordo com Vieira e Krzyzanowski (1999).

Para determinação do teor de matéria seca (MS) as amostras de grãos de soja, foram previamente moídas a granulometria de um milímetro, e, em seguida colocadas em estufa de secagem a 105°C durante oito horas (AOAC, 1984). Pela diferença de peso inicial e final calculou-se a porcentagem de matéria seca da amostra.

O teor de proteína bruta foi determinado pelo método Kjeldahl (AOAC, 2000), no qual foi determinado o teor de nitrogênio (N) das amostras. Utilizou-se 0,20 g de amostra, colocada em um bloco digestor juntamente com o catalizador e o ácido sulfúrico a uma temperatura de 300°C, após a digestão, foi adicionado 10 mL de água destilada e 5 mL de borato de amônia para a realização da destilação. Após este processo, realizou-se a titulação com ácido clorídrico. O processo foi repetido duas vezes para cada amostra. Para conversão dos valores de N em proteína bruta (PB) foi utilizado o fator de correção de 6,25.

A determinação dos teores de lipídios (extrato etéreo - EE) foi determinada pelo Método Am5-04 da AOCS (2005), com uso de equipamento ANKOM XT15 e sacos de filtro ANKOM XT4. Foi utilizado éter de petróleo como solvente, adotando-se temperatura de 90°C, por um período de 60 minutos de extração. Após o período de extração, colocou-se o copo em estufa até que todo o solvente evaporasse. Depois, ele foi colocado no dessecador, até atingir a temperatura constante para pesagem, o processo foi repetido duas vezes para cada amostra.

A massa específica aparente (ρ_{ap}) foi calculada pela relação entre a massa de grãos (kg) e o volume (m^3), o teor de água determinado por meio de estufa a temperatura $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, tempo de 24 horas com três repetições (MOHSENIN, 1986).

A massa específica unitária (ρ_{un}) foi determinada em função da relação entre a massa específica aparente (kg m^{-3}) e a porosidade (%) (MOHSENIN, 1986).

A porosidade (ξ) foi determinada através do volume de um líquido conhecido, óleo de soja, adicionado em um recipiente contendo a massa granular de grãos, posteriormente calculando a relação entre a ρ_{ap} (kg m^{-3}) e a ρ_{un} (kg m^{-3}), conforme Mohsenin (1986).

Para a determinação de volume de madeira empilhada foi calculada pelo volume em metro estéreo (V_{st}), em que, multiplicou as variáveis largura (L), comprimento (C) e altura da pilha (H), e, portanto multiplicado pelo fator de empilhamento(fe), neste caso o valor do fe médio para eucalipto utilizado foi 1,71 de acordo com Nunes e Soares (2017).

O rendimento energético do sistema (Tabela 1) foi calculado através de equações ajustadas para verificar o balanço de massa e energia no processo de secagem do SSS1, SSS2 e SSS3.

Tabela 1. Balanço de massa e energia dos sistemas de secagem

Número das Equações	Equações	Nomenclatura
1	$P_{ti} = P_t U_i$	Massa de água inicial nos grãos no sistema de secagem.
2	$P_{tf} = P_t U_f$	Massa de água final nos grãos no sistema de secagem.
3	$W_{evap} = W_1 - W_2$	Massa de água evaporada nos grãos no sistema de secagem.
4	$P_f = P_t - W_{evap}$	Massa final de grãos após a secagem.
5	$R_t = \frac{W_{evap}}{P_{ti}}$	Rendimento do sistema de secagem de grãos.
6	$UR = \left(\frac{P_v}{P_{vs}} \right) 100$	Umidade relativa do ar.
7	$P_v = P_{vs} - A P_{atm} (T - T_u)$	Pressão real de vapor.
8	$P_{atm} = 101,3 - \left[\frac{(293 - 0,0065h)}{293} \right]$	Pressão atmosférica.
9	$P_{sat} = 6,1078 \times 10^{\left\{ \frac{7,5T}{237,5T} \right\}}$	Pressão de vapor de saturação.
10	$Q = \left\{ W \left[\left(\frac{100 - U_i}{100} \right) c_m + \left(\frac{U_i}{100} \right) c_{H_2O} \right] (t_s - t_m) + \left[\frac{W(U_i - U_f)}{100 - U_f} \right] r + P \right\}$	Balanço de calor utilizado no sistema de secagem.
11	$V_{mc} = \frac{M_c}{t_o}$	Vazão mássica de combustível consumido durante as operações de secagem.
12	$E_e = \frac{V_{mc}}{Q_{ta}} PCI$	Energia de entrada no secador.
13	$E_s = E_e - Q$	Energia de saída do secador do secador.
14	$R_s = \left(\frac{Q}{E_e} \right) 100$	Rendimento térmico do secador.

P_{ti} - massa de água inicial no produto (kg); P_t - massa total de produto (kg); U_i - umidade final do produto (b.u.) (%). P_{tf} - massa de água final no produto (kg); P_t - massa total de produto (kg); U_f - umidade final do produto (b.u.) (%). W_{evap} - massa de água evaporada (kg); W_1 - massa de água inicial no produto (kg); W_2 - massa de água final no produto (kg). P_f - massa final de produto (kg). R_t - rendimento de secagem (%). UR -umidade relativa do ar (%); P_v - pressão de vapor (kPa); P_{vs} -pressão de vapor de saturação (kPa). P_v - pressão real de vapor (hPa); A - constante psicrométrica (psicômetros aspirados = $6,7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); P_{vs} - pressão de saturação na temperatura de bulbo úmido (hPa); P_{atm} - pressão atmosférica local (hPa); T - temperatura de bulbo seco ($^\circ\text{C}$); T_u - temperatura de bulbo úmido ($^\circ\text{C}$). P_{atm} - pressão atmosférica (kPa); h - altitude (m). P_{sat} - pressão de vapor de saturação (kPa); T - temperatura de bulbo seco do ar ($^\circ\text{C}$). Q - quantidade de calor do sistema de secagem (kcal kg^{-1}); W - peso de entrada do produto a ser secado (kg); U_i - teor de água inicial (b.u.) (%); U_f - teor de água final (b.u.) (%); c_m - calor específico do produto a ser secado (grão~ $0,47 \text{ kcal kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); c_{H_2O} -calor específico da água ($\text{kcal kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); r - calor latente de vaporização da água (~ $568 \text{ kcal kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); t_s -temperatura do ar de secagem ($^\circ\text{C}$); t_m - temperatura da massa de grãos ($^\circ\text{C}$); P - perdas (~ 30%). V_{mc} - vazão mássica de combustível (kg h^{-1}); M_c - massa de combustível, considerando massa específica da lenha eucalipto de 450 kg m^{-3} (kg); t_o - tempo de operação (h). E_e -energia de entrada do secador (kcal kg^{-1}); Q_{ta} - quantidade de produto (kg); PCI - pode calorífico inferior (kcal kg^{-1}). E_s - energia de saída do secador (kcal kg^{-1}). R_s - rendimento térmico do secador (%).

Foram feitas análises de variância e o teste de Tukey a 5% de probabilidade, para as seguintes variáveis: U (%)- Teor de água; MS (%)- Matéria Seca; PB (%)- Proteína Bruta; EE (%)- Estrato Etéreo; ρ_{ap} (kg m⁻³)- Massa Específica Aparente; ρ_{un} (kg m⁻³)- Massa Específica Unitária; ξ (%)- Porosidade e CE ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$)- Condutividade Elétrica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os lotes de soja úmida foram colhidos e submetidos aos diferentes manejos de secagem sob as condições climática-ambientais apresentadas na Tabela 2. Existem dois princípios orientadores, que são: a transferência de calor para fornecer o calor latente necessário de vaporização e o movimento de água ou vapor de água através de um material.

Tabela 2. Condições do ar ambiente e dos grãos de soja submetidos a diferentes tipos de secagem.

Tratamento	Condições do ar ambiente		Condições dos grãos	
	UR (%)	T _{ar ambiente} (°C)	U _i (%)	U _f (%)
SSS1	82,0 ± 3,0	26,1 ± 1,0	17 ± 0,2	11,5 ± 0,1
SSS2	73,0 ± 3,0	21,5 ± 1,0	17 ± 0,2	13,8 ± 0,1
SSS3	63,0 ± 3,0	24,2 ± 1,0	17 ± 0,2	14,1 ± 0,1

SSS1- Soja seca em secador contínuo; SSS2- Soja seca em silo-secador; SSS3- Soja seca em silo-aerador; UR – umidade relativa (%); T_{ar ambiente} – temperatura do ar ambiente (°C); U_i - umidade inicial do produto (b.u.) (%); U_f – umidade final do produto (b.u.) (%).

As diferentes condições climáticas de diferentes regiões influenciam na umidade final do produto a ser armazenado (BARRETO et al, 2013), em regiões de clima subtropicais recomenda-se realizar a operação de secagem em torno de 13% a 14% de umidade final, no entanto, em regiões com clima temperado recomenda-se fazer a operação com umidade final inferior a 13% devido ao fato da higroscopicidade dos grãos em relação ao ambiente.

A qualidade física dos lotes (Tabela 3), obtiveram resultados satisfatórios de enquadramento no Grupo I de classificação, atendendo a norma para a soja destinada ao consumo in natura, de acordo com Brasil (2007) que estabelece o Regulamento Técnico da Soja, definindo seu padrão oficial de classificação, com os Requisitos de Identidade e Qualidade Intrínseca e Extrínseca, a Amostragem e a Marcação ou Rotulagem para soja, provenientes da espécie *Glycine max* (L) Merrill.

Tabela 3. Classificação física de grãos de soja de diferentes lotes após secagem

Tratamento	Impurezas	Fermentados	Ardidos			Quebrados	Imaturos
			(%)				
SUL	0,29	0,76	0,28	2,03	0,69		
SSS1	1,21	0,37	0,37	2,33	0,34		
SSS2	0,25	0,29	0,27	1,22	0,00		
SSS3	0,91	0,20	0,11	3,35	0,11		
SSLRR	0,41	0,29	0,06	3,31	0,23		
SSLRR2	0,20	0,26	0,06	3,39	0,17		

SUL- Soja Úmida da Lavoura; SSLRR- Soja Seca da Lavoura RR; SSLRR2- Soja da Lavoura RR2; SSS1- Soja seca em secador contínuo; SSS2- Soja seca em silo-secador; SSS3- Soja seca em silo-aerador.

No início da secagem houve uma redução do teor dos grãos, influenciada pelas condições de temperatura do ar de secagem (Figura 3).

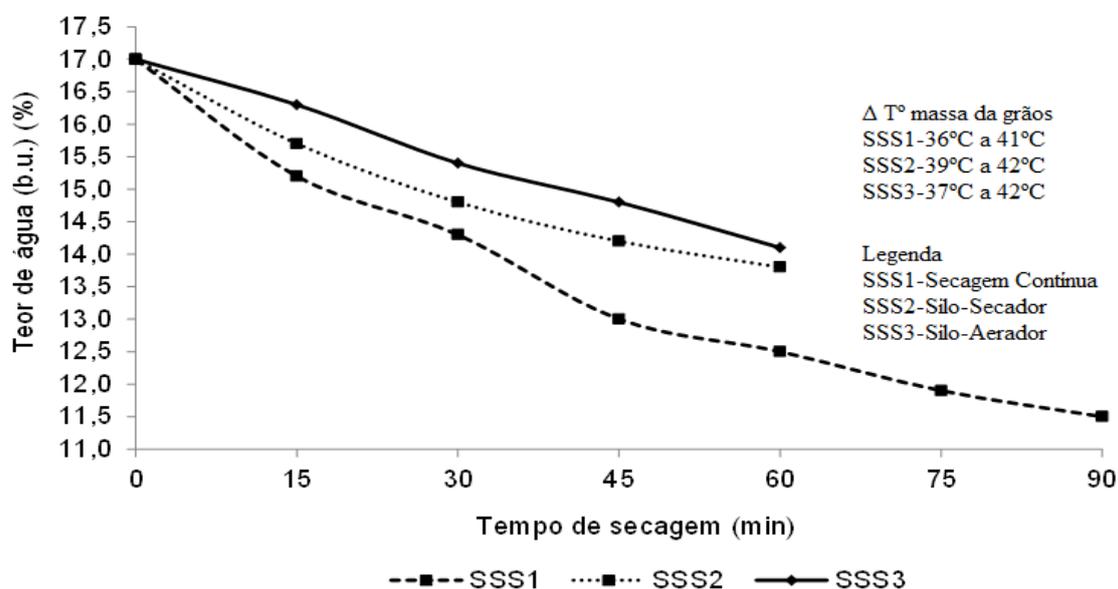


Figura 3. Gráfico curvas de secagem de grãos de soja.

Os lotes de grãos de soja SSS1, SSS2, SSS3 foram submetidos à temperatura do ar de secagem a 90°C, dependendo do sistema de secagem, equipamentos envolvidos, e o uso de energia o processo poderá ter maior ou menor tempo de duração. O SSS1, por se tratar de secagem contínua envolvendo somente o secador, o período de secagem teve duração de 90 minutos para redução do teor de água de 17% para 11,5%, com variação da temperatura da massa de grãos de 36° a 41°C. O SSS2 e SSS3 passaram por um período de secagem de 60 minutos, por se tratarem dos silos envolvidos no processo. No SSS2, o teor de água reduziu de 17% para 13,8%, com variação da temperatura da massa de grãos de 39° a 42°C. Enquanto que o SSS3 houve a redução do teor de água de 17% para 14,1%, com variação da temperatura da massa de grãos de 37° a 42°C.

A temperatura do ar secagem influencia diretamente na variação da temperatura da massa de grãos que, por conseguinte interfere na qualidade final dos grãos, temperaturas muito elevadas causam danos às membranas e estruturas celulares dos grãos fazendo que a qualidade fisiológica seja comprometida. O manejo inadequado dos grãos ou do sistema de secagem acarreta sérios danos ao produto, como descrito por Hartmann Filho et al. (2016) no qual avaliou a qualidade físico-químico de grãos de soja em relação aos teores de óleo após a operação de secagem com teor de água de 23% (b.u.) inicial, os quais foram submetidos a temperaturas de 40°, 50°, 60°, 70° e 80°C, até o teor de água de $12,5 \pm 0,7$ % (b.u.) final, concluíram que o óleo bruto sofre uma perda conforme o incremento na temperatura do ar de secagem.

Durante o processo de secagem a retirada de água do produto pelo processo de secagem ocorre pela diferença da pressão de vapor d'água do grão em relação ao ar, criando-se um gradiente de tensão de vapor do grão para o ar, transferindo a água gradativamente do interior do grão para a periferia, em função de movimentos capilares, difusão de umidade e gradientes de pressão de vapor, assim quanto mais quente o ar, maior quantidade de água ele retém, secando melhor a superfície do grão (YASSEN; AL-KAYIEM, 2016; TASERI et al., 2018).

Analisando a qualidade físico-química dos lotes avaliados (Tabela 4) tanto para os que passaram pelo processo de secagem quanto aqueles que não passaram, obteve-se diferença significativa para o Teor de água (U), Matéria Seca (MS); Proteína Bruta (PB), Extrato Etéreo (EE) e Condutividade Elétrica (CE).

Tabela 4. Qualidades físico-químicas de lotes de grãos de soja manejadas em unidade de recebimento, secagem e armazenamento.

Tratamento	Análises							
	U%	MS%	PB%	EE%	ρ_{un} (kg m ⁻³)	ρ_{ap} (kg m ⁻³)	ζ (%)	CE ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$)
SUL	17,00 c	83,00 a	42,87 d	23,37 c	933,52 a	616,85 a	33,90 a	137,78 b
SSLRR	11,69 a	88,31 c	38,50 a	22,75 b	933,24 a	595,88 a	36,17 a	51,78 a
SSLRR2	11,03 a	88,97 c	38,91 a	20,47 a	931,73 a	627,34 a	32,68 a	49,14 a
SSS1	13,31ab	86,69 b	42,64 d	23,41 c	955,20 a	643,06 a	32,67 a	133,45 b
SSS2	15,85 b	84,15 b	42,02 d	23,52 c	965,20 a	633,45 a	34,42 a	120,67 b
SSS3	16,20 b	83,80 a	39,61 b	23,34 c	971,64 a	650,05 a	33,11 a	51,78 a

SUL- Soja Úmida da Lavoura; SSLRR- Soja Seca da Lavoura RR; SSLRR2- Soja da Lavoura RR2; SSS1- Soja seca em secador contínuo; SSS2- Soja seca em silo-secador; SSS3- Soja seca em silo-aerador; U – teor de água; MS – Matéria Seca; PB – Proteína Bruta; EE – Extrato Etéreo; ρ_{un} - massa específica unitária; ρ_{ap} - massa específica aparente; ζ – porosidade, CE – condutividade elétrica.

Em relação ao teor de água, o tratamento SUL obteve maior teor e se diferenciou aos demais, o SSLRR e SSLRR2 obtiveram menor teor, porém não se diferenciaram do tratamento SSS1 e distinguiram aos demais, no entanto, o SSS1, SSS2 e SSS3 não diferenciaram entre si. Para a matéria seca, o SSLRR e SSLRR2 obteve maior porcentagem

não houve diferença entre si e distinguiram aos demais, o SUL obteve menor porcentagem não se diferenciando do SSS3, e distinguiu aos demais.

Na análise de proteína bruta, o tratamento SUL conservou os teores de proteínas mais elevados, porém não se diferenciou do SSS1 e SSS2, e, distinguiu aos demais, enquanto que o tratamento SSLRR e SSLRR2 obtiveram teores de proteínas inferiores distinguindo dos demais. O maior teor de lipídios foi observado no tratamento SSS2, porém não se diferenciou do SSS1, SSS3 e SUL, enquanto que o SSLRR2 obteve menor teor, e, havendo uma diferença com o SSLRR.

O maior índice condutividade elétrica foi o tratamento SUL, porém não se distinguiu do SSS1 e SSS2, enquanto que o tratamento SSLRR2 obteve menor índice, porém não houve diferença significativa entre o SSLRR e SSS3, estatisticamente.

Analisando os três manejos de secagem, observa-se que embora não tenha havido diferença significativa no teor de água e extrato etéreo, o SSS1 e SSS2 conservaram maiores porcentagens de matéria seca e teores de proteína bruta (Tabela 4). Coradi et al. (2017) afirma que, a operação de secagem de grãos de soja com teor de água acima de 19% e temperatura do ar de secagem por volta de 120°C, contribui para o aumento do índice de acidez e elevadas perdas de qualidade físico-química como as de proteína bruta e teor de óleo, em comparação às secagens com temperaturas inferiores de 75°, 90° e 105°C.

Almeida et al (2013) avaliaram influência do processo de secagem na qualidade fisiológica de sementes de feijão, sob o período de 33,5, 15, 10,5, 7,5 e 4,5 horas e temperatura 35°, 45°, 55°, 65° e 75°C, respectivamente, para que as sementes de feijão atingissem o teor de água de 53% a 14,75% (b.u.). Observaram que a qualidade fisiológica decresce a partir da temperatura de 55°C ao tempo de 10,5 horas, concluíram que temperaturas menores que 55°C sobre maiores períodos de operação de secagem, conserva melhor a qualidade fisiológica das sementes de feijão.

No presente trabalho não houve diferenças das variáveis massa específica aparente, unitária e porosidade, diferentemente de Botelho et al. (2015) que observou redução da massa específica aparente, massa específica unitária dos grãos de soja linearmente, com a elevação da temperatura de secagem. Enquanto que Alencar et al. (2009), verificaram que em condições ambientais de temperatura baixa e umidade relativa alta para o manejo dos teores de água dos grãos armazenados, reduz as perdas de matéria seca e a massa específica aparente dos grãos, no qual é geralmente intensificada sob condições mais quentes e mais secas.

Nas Tabelas 5, 6 e 7 estão os resultados do balanço de massa e energia do sistema de secagem. Verificou-se que, quanto maior a massa de água evaporada no processo de secagem, a menor a massa de produto seco e maior o rendimento de secagem (Tabela 5).

Tabela 5. Balanço de massa dos grãos de soja na secagem

Tratamento	T_s (°C)	P_i (kg)	P_{ii} (kg)	P_{if} (kg)	W_{evap} (kg)	P_f (kg)	R_f (%)
SSS1	90	1	0,1700	0,1140	0,0560	0,9440	29,41
SSS2	90	1	0,1700	0,1380	0,0320	0,9680	18,82
SSS3	90	1	0,1700	0,1410	0,0290	0,9710	17,05

SSS1- Soja seca em secador contínuo; SSS2- Soja seca em silo-secador; SSS3- Soja seca em silo-aerador; T_s - Temperatura do ar de secagem; P_i - massa total de produto; P_{ii} - massa de água inicial no produto; P_{if} - massa de água final do produto; W_{evap} - massa de água evaporada; P_f - massa final de produto; R_f - rendimento de secagem.

Na Tabela 6, observa-se que o SSS1 teve um maior aproveitamento de energia, quantidade de calor do sistema de secagem (Q), com uma maior temperatura na massa de grãos (t_m) e, portanto, resultando em menor teor de água final dos grãos. Estes resultados são favoráveis para um sistema sustentável e eficiente, quando se observa um crescente aumento em uso de fontes de calor baseadas em biomassa renovável, sendo uma opção viável para regiões produtoras de grãos e de altos custos com energia.

Tabela 6. Balanço de energia do sistema de secagem

Trat.	W (kg)	U_i (%)	c_m (kcal kg ⁻¹ °C ⁻¹)	c_{H2O} (kcal kg ⁻¹ °C ⁻¹)	t_s (°C)	t_m (°C)	U_f (%)	r (kcal kg ⁻¹ °C ⁻¹)	P (%)	Q (kcal kg ⁻¹)
SSS1	1	17,0	0,47	1	90	41	11,4	568	30	82,34
SSS2	1	17,0	0,47	1	90	40	13,8	568	30	63,82
SSS3	1	17,0	0,47	1	90	37	14,1	568	30	63,51

Trat.- Tratamento; SSS1- Soja seca em secador contínuo; SSS2- Soja seca em silo-secador; SSS3- Soja seca em silo-aerador; W - peso de entrada do produto a ser secado; U_i - teor de água inicial (b.u.); c_m - calor específico do produto a ser secado (grão ~ 0,47 kcal kg⁻¹ °C⁻¹); c_{H2O} - calor específico da água; t_s - temperatura do ar de secagem; t_m - temperatura da massa de grãos; U_f - teor de água final (b.u.); r - calor latente de vaporização da água (~ 568 kcal kg⁻¹ de água °C⁻¹); P - perdas; Q - quantidade de calor do sistema de secagem (kcal kg⁻¹ de produto).

Entretanto na Tabela 7, o SSS1 consumiu mais lenha (m³) por ter maior tempo de operação no processo de secagem, logo maior energia de entrada, ar quente, e menor energia de saída, ar exausto, resultando em maior rendimento do sistema de secagem. Quanto menores foram os teores de água final dos grãos, maior foi a energia consumida no processo de secagem para uma maior vazão mássica de combustível e maior rendimento energético do secador.

Tabela 7. Balanço de energia do sistema de secagem.

Tratamento	¹ Lenha (m ³)	M_c (kg)	t_o (h)	V_{mc} (kg h ⁻¹)	V_{mc}/Q_{ia} (kg)	PCI (kcal kg ⁻¹)	E_e (kcal)	E_s (kcal kg ⁻¹)	R_s (%)
SSS1	2,5	1125	1,5	750	0,01875	4500	84,38	2,04	97,5
SSS2	1,5	675	1,0	675	0,01687	4500	75,92	12,10	84,0
SSS3	1,5	675	1,0	675	0,01687	4500	75,92	12,41	83,6

SSS1- Soja seca em secador contínuo; SSS2- Soja seca em silo-secador; SSS3- Soja seca em silo-aerador; ¹Total de biomassa utilizada na secagem de 40 toneladas de grãos; M_c - massa de combustível, considerando massa

específica da lenha eucalipto de 450 kg m^{-3} ; t_o – tempo de operação; V_{mc} - vazão mássica de combustível; Q_{ta} - Quantidade de produto; PCI – pode calorífico inferior; E_e - energia de entrada no secador; E_s - energia de saída do secador; R_s - rendimento térmico do secador.

Analisando os resultados obtidos Tabelas 5, 6 e 7 no presente trabalho verificou-se que, há diferenças entre os manejos de secagem para alcançar sistemas mais eficazes, desta forma, o uso adequado dessas diferentes tecnologias permite trabalhar a secagem dos produtos agrícolas em ambiente eficiente e sustentável, considerando o rendimento e o aproveitamento térmico dos secadores, bem como a garantia da qualidade dos produtos agrícolas, reduzindo as perdas físicas e físico-químicas dos grãos Tabelas 3 e 4.

Todavia, o rendimento energético está diretamente ligado ao tipo de material combustível usado para geração de energia calorimétrica, como neste caso a madeira de eucalipto, por suas propriedades de combustão como, teor ligno-celulósica, carbono fixo e concentração na relação de Siringil/Guaiacil. Conforme Brun et al. (2018) quanto maior o teor de carbono fixo, maior o poder calorífico, uma vez que a madeira libera energia por mais tempo durante o processo de combustão. Por conseguinte, atuando na eficiência energética dos secadores e da operação de secagem.

Segundo Lisboa et al. (2018), na tentativa de superar os gargalos dos sistemas tradicionais de secagem, embora o uso de energia sustentável seja uma alternativa para a secagem de produtos agrícolas, a escolha do método de secagem conforme as condições dos lotes de grãos de soja potencializa o sistema pós-colheita para desempenhar um papel significativo na redução de perdas, criando-se um ambiente eficiente sob os aspectos operacionais de produção.

Foram feitas estimativas de perdas e rendimentos de energia, proteína bruta, óleo bruto, e, o consumo de biomassa e energia para produção brasileira média de soja (113 milhões de toneladas ano⁻¹), conforme a Tabela 8.

Tabela 8. Impactos no balanço energético dos sistemas de secagem e qualidade de grãos de soja, em função dos diferentes manejos e tecnologias de pós-colheita em escala de produção de 113 milhões de toneladas por ano – Brasil.

Tratamento	$Q_{ta_{En}}$ (kcal)	Biomassa (kg)	R_s (%)	P_E (%)	R_{PB} (%)	P_{PB} (%)	R_{OB} (%)	P_{OB} (%)
SUL	-	-	-	-	42,87	0,00	23,52	0,00
SSLRR	-	-	-	-	38,50	4,37	22,75	0,77
SSLRR2	-	-	-	-	38,91	3,96	20,47	3,05
SSS1	3.530.120.000.000	784.471.111,11	97,5	2,5	42,64	0,23	23,41	0,15
SSS2	2.053.888.000.000	456.419.555,55	84,0	16,0	42,02	0,85	23,37	0,15
SSS3	1.861.336.000.000	413.630.222,22	83,6	16,4	39,61	3,26	23,34	0,18

SUL- Soja Úmida da Lavoura; SSLRR- Soja Seca da Lavoura RR; SSLRR2- Soja da Lavoura RR2; SSS1- Soja seca em secador contínuo; SSS2- Soja seca em silo-secador; SSS3- Soja seca em silo-aerador; $Q_{ta_{En}}$ – quantidade de energia consumida para 113 milhões de toneladas de grãos; Biomassa- Biomassa consumida; R_s – rendimento térmico; P_E – perda de energia; R_{PB} – rendimento de proteína bruta; P_{PB} – perda de proteína bruta; R_{OB} – rendimento de óleo bruto; P_{OB} – perda de óleo bruto.

Observa-se na tabela 8, as perdas de qualidade nos grãos em função dos diferentes manejos de secagem correspondem a aproximadamente 2.116.963.470 kg de proteína bruta e 810.616.800 litros de óleo bruto, dessa forma, a perda de energia corresponde a cerca de 162.282,50 m³ de lenha, considerando que a produção anual brasileira de soja, utiliza-se aproximadamente 1.743.269,13 m³ de lenha para realizar o processo de secagem dos grãos para as condições de armazenamento. A secagem contínua (SSS1) reduz os impactos energéticos-ambientais em 80,23%, as perdas com proteína bruta em 94,73% e óleo bruto em 95,08%, para um sistema pós-colheita mais sustentável.

Esses percentuais são comprobatórios com a realidade em campo no território nacional, devido a muitos desses produtores rurais não ter acesso a informações técnicas sobre a operação de colheita e pós-colheita, manejo inadequado dentro da unidade armazenadora e, ou muitas vezes não possuir verba para construção de uma unidade em sua propriedade ou acesso ao serviço prestado por ela.

CONCLUSÃO

A soja seca em secador contínuo (SSS1) é o melhor tratamento e manejo, pois conservou as qualidades físico-químicas dos grãos, com menores perdas proteicas e lipídicas, e, garantiu maior rendimento energético (97,5%) do secador e da secagem. A soja seca em silo-secador (SSS2) obteve resultados satisfatórios sendo o segundo melhor comparado ao SSS1, em termos de qualidade, no entanto, não obteve alto rendimento energético (84%). A soja seca em silo-aerador (SSS3) foi menos satisfatória, rendimento energético (83,6%), ao se comparar com os três manejos de secagem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico Tecnológico), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pelo apoio financeiro e disponibilidade para uso dos laboratórios para realização dos experimentos.

Fazendas R.S. pelo apoio ao trabalho.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, E. R. et al. Qualidade dos grãos de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) armazenados em diferentes condições. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 5, p. 606-613, 2009.

ALMEIDA, D. P. et al. Influência da secagem na qualidade fisiológica do feijão adzuki.

Revista Brasileira Ciências Agrárias, Recife, v.8, n.2, p.311-315, 2013.

AMERICAN OIL CHEMISTS SOCIETY (AOCS). **Official Procedure, Approved Procedure Am 5-04, rapi determination of oil/fat utilizing high temperature solvent extraction**, Urbana, IL, 2005.

ANDERSON, J. O; WESTERLUND, L. Improved energy efficiency in sawmill drying system. **Applied Energy**, v. 113, p. 891-901, 2014.

ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMISTS (AOAC). **Official methods of analysis**. 14. ed. Washington D.C., p. 1141, 1984.

ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMISTS (AOAC). **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. 17 ed. Gaithersburg, Maryland, p.4, 2000.

BABU, A. K. et al. Review of leaf drying: mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models. **Renew Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p.536–56, 2018.

BARRETO, A.A. et al. Mathematical modelling of momentum, heat and mass transfer in grains stored in silos. Part i: model development and validation. **Latin American Applied Research**, vol.43, no.4, Bahía Blanca, out., 2013.

BOROZE, T.; et al. Inventory and comparative characteristics of dryers used in the sub-Saharan zone: criteria influencing dryer choice. **Renew Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 1240-1259, 2014.

BORGES, F. B. Descrição da secagem convectiva de grãos de milho através de modelos difusivos. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 147 p. 2016.

BOTELHO, F. M. et al. Influência da temperatura de secagem sobre as propriedades físicas dos grãos de soja. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 212-219, maio/jun., 2015.

BOWSER, T. J. et al. Improvement of efficiency and environmental impact of a low-cost food dehydrator. **Open Food Science Journal**, v. 5, p. 37–41, 2011.

BRASIL. Instrução Normativa nº 11, de 15/05/2007 e Instrução Normativa nº 37, de 27/07/2007. Altera o inciso IV, do art. 2º, do Capítulo I, do Anexo da Instrução Normativa nº 11, de 15 de maio de 2007, **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 30 julho de 2007.

BROOKER, D. B. et al. Drying and storage of grains and oil seeds. New York: AVI, p.450, 1992.

BRUN, E. J. et al. Caracterização energética da madeira de três materiais genéticos de *Eucalyptus sp.* **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 48, n. 1, p. 87-92, jan./marc., 2018.

CORADI, P. C. et al. Yield and acidity indices of sunflower and soybean oils in function of grain drying and storage. **Acta Scientiarum. Agronomy (Online)**, Maringá, v. 39, p. 255-266, 2017.

COSKUN, C. et al. Energy and exergy analyses of an industrial wood chips drying process. **International Journal Low-Carbon Technologies**, v. 4, p. 224-229, 2009.

CHEN, S. T. et al. Modeling the relationship between the oil price and global food prices. **Applied Energy**, v. 87, n. 8, p. 2517-2525, 2010.

DEVAHASTIN, S.; PITAKSURIYARAT, S. Use of latent heat storage to conserve energy during drying and its effect on drying kinetics of a food product. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, n. 14, p. 1705-1713, 2006.

HARTMANN FILHO, C. S. et al. Quality of second season soybean submitted to drying and storage. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 46, n. 3, p. 267-275, Jul./Sep. 2016.

HELVACI, H. U.; AKKURT, G. G. Thermodynamic performance evaluation of a geothermal drying system. In: Dincer, I.; Midilli, A.; Kucuk, H. editors. **Progress in exergy, energy, and the environment**. Cham: Springer International Publishing. p. 331-41, 2014.

IBRAHIM, M.N. et al. Drying performance and overall energy requisite of industrial inclined bed paddy drying in Malaysia. **Journal of Engineering Science and Technology**, 9(3), 2014.

IBRAHIM, M.N. et al. Effect of airflow reversal in fixed-bed drying of rough rice on head rice yield and drying performance. **American Society of Agriculture and Biological Engineering**, 56(4), 2013.

LISBOA, H. M. et al. Modeling of food drying processes in industrial spray dryers. **Food Bioprod Process**, v. 107, p. 49-60, 2018.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 373-386, 2004.

MOHSENIN, N. N. Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach Publishers, p.841, 1986.

MULET, A. et al. Sorption isosteric heat determination by thermal analysis and sorption isotherms. **Journal of Food Science**, v. 64, p. 64-68, 1999.

NUNES, J. S.; SOARES, T. S. Estimativas volumétricas para um povoamento adensado de *Eucalyptus sp.* em regime de curta rotação. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 4, n. 4, p. 77-86, out./dez. 2017.

PRAKASH, O.; KUMAR, A. Environomical analysis and mathematical modelling for

tomato flakes drying in a modified greenhouse dryer under active mode. **International Journal of Food Engineering**, v. 10, p. 669-681, 2014.

RABHA, D. K. et al. Energy and exergy analyses of the solar drying processes of ghost chilli pepper and ginger. **Renew Energy**, v. 105, p. 764-773, 2017.

REYES, A. et al. Tomato dehydration in a hybrid-solar dryer. **Journal Chemical Engineering Process Technologies**; v. 5, n. 4, p.196, 2014.

SAMADI, S. H. et al. Application of combined heat and power for drying agricultural products (apple slices) to save energy. **International Journal of Natural Engineering Sciences**, v. 7, n. 2, p. 86-92. 2013.

SCOTT, W.J. Water relations of food spoilage microorganisms. **Advents Food Research**, v.7, p.83-127, 1957.

SINGH, M.; SETHI, V. P. On the design, modelling and analysis of multi-shelf inclined solar cooker-cum-dryer. **Sol Energy**, v. 162, p. 620-636, 2018.

SRZEDNICKI, G.; DRISCOLL, R.H. Implementation of two stage drying system for grain in Asia. **International Union of Food Science and Technology**, Chapter 7, 2008.

TAJADDODI, K. Fixed-bed drying of rice with airflow reversal for product quality and drying performance. Serdang, Malaysia: Universiti Putra Malaysia, PhD thesis, 2012.

TAŞERI, L. et al. Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer. **Food Chemical**, v. 260, p. 152-159, 2018.

VIEIRA, R. D.; KRZYŻANOWSKI, F. C. Teste de condutividade elétrica. In: KRZYŻANOWSKI, F. C. et al. (Eds). *Vigor de sementes: conceitos e testes*. Londrina: **ABRATES**. cap. 4.p.1-26. 1999.

YASSEN, T. A.; AL-KAYIEM, H. H. Experimental investigation and evaluation of hybrid solar/thermal dryer combined with supplementary recovery dryer. **Sol Energy**, v. 134, p. 284-293, 2016.