

Secagem solar de *Spirulina platensis*

Solar drying of *Spirulina platensis*

DOI:10.34117/bjdv8n2-446

Recebimento dos originais: 07/01/2022

Aceitação para publicação: 28/02/2022

João Paulo Siqueira Silva

Mestre em Engenharia Química

Instituição: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia,
Brasil

Endereço: Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Campus Santa Mônica,
Uberlândia - MG, CEP: 38408-100

E-mail: joaopaulosiqueirasilva@gmail.com

Yanne Novais Kyriakidis

Doutora em Engenharia Química

Instituição: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia,
Brasil

Endereço: Rodovia BR-050, km 78 - Bloco 1DCG, Campus Glória, Uberlândia - MG,
CEP : 38410-337

E-mail: yanne@ufu.br

Luiz Gustavo Martins Vieira

Doutor em Engenharia Química

Instituição: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia,
Brasil

Endereço: Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Campus Santa Mônica,
Uberlândia - MG, CEP: 38408-100

E-mail: luizgustavo@ufu.br

Marcos Antonio de Souza Barrozo

Doutor em Engenharia Química

Instituição: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia,
Brasil

Endereço: Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Campus Santa Mônica,
Uberlândia - MG, CEP :38408-100

E-mail: masbarrozo@ufu.br

RESUMO

O apelo pelo uso de fontes de energia renovável aumenta a cada dia e a energia solar é a principal alternativa por ser abundante, de baixo custo, inesgotável e totalmente limpa. A *Spirulina platensis* apresenta grande interesse comercial devido à busca por uma alimentação saudável e pela sua excelente composição nutricional. Entretanto, trata-se de uma biomassa altamente perecível devido a sua alta umidade. O objetivo do trabalho foi desenvolver um secador solar de exposição indireta capaz de promover a secagem da *Spirulina platensis* variando a vazão volumétrica de ar e a carga mássica alimentada.

O secador composto de um coletor solar, uma câmara de secagem e um exaustor eólico utilizou a radiação solar incidente para aquecer o ar e promover a secagem da biomassa depositada na forma de pellets cilíndricos longos em bandejas perfuradas na câmara de secagem. O secador solar reduziu a umidade da *Spirulina platensis* a patamares aceitáveis, abaixo de 13%, em um tempo de secagem satisfatório com uma eficiência térmica média de 8,77%.

Palavras-chave: energia solar, secagem, microalga.

ABSTRACT

The appeal for the use of renewable energy sources increases every day and solar energy is the main alternative because it is abundant, low cost, inexhaustible, and totally clean. *Spirulina platensis* presents great commercial interest due to the search for a healthy diet and its excellent nutritional composition. However, it is a highly perishable biomass due to its high humidity. The objective of this work was to develop a solar dryer of indirect exposure capable of promoting the drying of *Spirulina platensis* by varying the volumetric flow rate of air and the mass load fed. The dryer composed of a solar collector, a drying chamber, and a wind exhaust fan used the incident solar radiation to heat the air and promote the drying of the biomass deposited in the form of long cylindrical pellets in perforated trays in the drying chamber. The solar dryer reduced the moisture content of *Spirulina platensis* to acceptable levels, below 13%, in a satisfactory drying time with an average thermal efficiency of 8.77%.

Keywords: solar energy, drying, microalgae.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional expressivo das últimas décadas e o consequente desenvolvimento das cidades criaram grandes demandas, principalmente energética e alimentícia. Com isso, os recursos energéticos tornaram-se limitados e oneroso devido ao aumento do preço da energia elétrica e dos combustíveis fósseis. No mesmo sentido, a demanda por mais alimentos fez com que a produção, conservação e armazenamento tornassem-se mais eficientes reduzindo assim as perdas. Em geral, muitas dessas perdas são devido a secagens inadequadas e armazenamento inadequados.

Buscando contribuir com a questão energética, começou-se a investir e estudar fontes renováveis de energia, como é o caso da energia solar que é renovável, limpa, inesgotável e barata, podendo ser reaproveitada tanto na forma fotovoltaica, quanto na forma térmica (Bezerra, 1998). A fotovoltaica seria uma alternativa complementar à energia hidrelétrica e à térmica utilizada para climatização, aquecimento de água, refrigeração e secagem.

Como solução para a demanda de alimentos, muito se investiu em processos para conservação e armazenamento que reduzem as perdas, devido à deterioração e

contaminação. Em geral, esses processos passam por uma etapa de secagem para adequar o teor de umidade presente no alimento a um padrão adequado ao armazenamento (Silva, 2015a).

Para promover a secagem de um determinado produto é necessária uma fonte térmica, que por meio de transferência de calor e massa retira o excesso de umidade do sólido (McCabe *et al.*, 2005).

Na maioria dos casos, a fonte térmica advém de combustíveis fósseis ou energia elétrica, responsáveis por uma parte razoável dos custos de produção e pelo preço final do produto (Dissa *et al.*, 2010).

Conciliando os dois cenários anteriores, é possível relacionar a energia solar com a secagem e a conservação dos alimentos. Neste aspecto, a luz solar poderia aquecer o ar de secagem para reduzir a umidade do produto a um nível adequado, o que minimizaria o custo final do produto quando comparado ao da secagem com fontes térmicas tradicionais (Pinho; Galdino, 2014).

Em paralelo a isso, atualmente, vêm crescendo também os cuidados com o corpo e a busca por uma alimentação mais saudável e com menos aditivos artificiais (Bortolotti, 2012). Em face disso, começaram pesquisas científicas para encontrar possíveis produtos que se enquadrem nesse cenário, como é o caso das microalgas.

A *Spirulina platensis* é uma microalga do grupo das cianobactérias (algas azuis) produzida em meio aquático. Esta alga enquadra-se no perfil de alimento funcional (FDA, 2003), devido ao seu alto teor proteico de alta solubilidade, suas propriedades anti-oxidantes e anti-inflamatórias, e por ser fonte de vitaminas e minerais (Academy of nutrition and Dietetics, 2013).

Por tudo isso, a *Spirulina platensis* possui diversas aplicações nas indústrias alimentícias sob a forma de alimento natural e aditivo proteico.

Devido às suas propriedades anti-oxidantes, anti-inflamatórias, hepatoprotetoras e fluorescentes, tem também potencial para uso na área médica, farmacêutica e cosmética (Soares *et al.*, 2019).

No mercado, a *Spirulina platensis* é encontrada em pó, cápsulas ou *pellets* e seu preço gira em torno de R\$ 500,00/kg. Entretanto, antes de ser comercializada, ela precisa passar por um processo de secagem para adequar a umidade e garantir a sua conservação e o seu tempo de prateleira (*shelf-life*).

O objetivo geral do presente trabalho foi promover a secagem da *Spirulina platensis* utilizando a radiação solar. Entretanto, para atingir o objetivo principal, foi necessário cumprir os seguintes objetivos específicos:

- desenvolver e construir um secador solar de exposição indireta com convecção forçada;
- analisar o efeito de variáveis operacionais e determinar quais delas são significativas na secagem da *Spirulina platensis*.
- secar a microalga a um patamar aceitável de umidade (abaixo de 13%) em apenas um dia, pois se trata de um material altamente perecível;
- determinar a eficiência energética/térmica do coletor solar por meio da relação entre a taxa de energia solar absorvida sob a forma de energia interna pela taxa de energia solar total incidente no coletor solar.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A *Spirulina platensis* utilizada neste trabalho foi adquirida da empresa Brasil Vital, localizada no município de Anápolis (GO).

A microalga foi colhida diretamente nos tanques de cultivo. Após a colheita, o material passou por uma etapa de filtração a vácuo, que retirou todo o excesso de água. Em seguida, a torta de filtração foi acondicionada em pacotes para que o transporte pudesse ser feito em caixas térmicas com gelo até o Laboratório de Separação e Energias Renováveis da FEQUI/UFU.

Chegando ao laboratório (LASER/FEQUI/UFU), a *Spirulina platensis* úmida foi fracionada em porções de 200 g, em sacos plásticos lacrados e cobertos por papel alumínio para evitar contaminações e degradação de componentes pela luz. Imediatamente após, cada porção foi congelada e armazenada em um freezer à temperatura de -18°C , a fim de que pudesse ser utilizada nos testes experimentais de secagem previstos neste trabalho. A umidade inicial da microalga foi de $83,32\% \pm 1,61\%$, segundo metodologia de Medeiros *et al.* (2020) em testes gravimétricos em estufa.

Secador Solar

O secador solar utilizado foi construído neste trabalho e trata-se de um secador solar de exposição indireta com convecção forçada.

O secador era composto basicamente por três partes: um coletor solar plano, uma câmara de secagem e um exaustor eólico, conforme é mostrado na Figura 1.

O coletor solar possuía 2 m de comprimento, 1 m de largura, 0,2 m de altura e uma inclinação de 18° em relação ao solo, equivalente à latitude de Uberlândia (Pinho; Galdino, 2014).

Figura 1: Vista Lateral do Secador Solar de Exposição Indireta: (A) Coletor Solar, (B) Câmara de Secagem e (C) Exaustor Eólico.



Chapas de aço galvanizado 26 e cantoneiras de aço de 1/8" x 1,5 cm foram utilizadas na base e laterais do coletor solar. Já a parte superior do coletor solar foi coberta com um vidro de 0,004 m de espessura.

Com relação ao isolamento térmico, utilizou-se lã de vidro de 0,025 m de espessura na base e isopor de 0,025 m de espessura nas laterais direita e esquerda.

Na face anterior do coletor, que ficava a 0,3 m do chão e sobre rodízios, tinha-se uma abertura por onde o ar entrava para ser aquecido, ao passo que na face posterior havia a câmara de secagem.

A conexão entre o coletor e a câmara de secagem era feita por meio de uma abertura de 0,15 m de altura por 0,5 m de comprimento.

De acordo com o indicado na Figura 2, ainda foram colocadas duas divisórias transversais de madeira com 0,7 m de comprimento e 0,2 m de altura dentro do coletor solar, igualmente espaçadas e alternadas para aumentar o tempo de residência do ar e evitar a formação de canais preferenciais dentro do coletor, durante o escoamento do ar.

Figura 2: Vista Frontal do Coletor Solar com Destaque para as Divisórias.



O coletor solar teve sua base e laterais externas pintadas de preto fosco para facilitar a absorção da radiação solar incidente.

A câmara de secagem foi feita com cantoneiras de aço de 1/8" x 1,5 cm e chapa 26 aço galvanizado em formato cúbico de dupla parede com isolamento de lã de vidro de 0,025 m de espessura entre as paredes, exceto no topo da câmara onde havia uma saída para o acoplamento do exaustor eólico. As dimensões internas da câmara de secagem eram 0,6 m de comprimento, 0,6 m largura e 0,63 m de altura. Na lateral direita tinha-se uma porta para acesso ao interior da câmara, que possuía suporte para três bandejas de 0,56 x 0,58 m e espaçamento entre elas de 0,15 m (Figura 3).

Figura 3: Detalhe da Câmara de Secagem: (A) Bandeja Colocada e (B) Vista Interna da Câmara.



As bandejas possuíam armação feita com metalon quadrado de 0,05 m, revestida com uma tela de aço inox 304 (malha 30 e abertura de 0,55 mm). No topo da câmara de

secagem havia uma abertura circular central com 0,52 m de diâmetro, onde ficava o exaustor eólico, também de aço galvanizado, que auxiliava na retirada do ar quente e saturado após a percolação pelas bandejas. Estruturalmente, a câmara de secagem era sustentada por quatro pés de 0,9 m de altura, com rodízios nas extremidades inferior, para facilitar a locomoção do equipamento para campo aberto. A câmara de secagem foi pintada com tinta preta fosca, exceto na parte interna, onde se colocava o produto a ser seco sob as bandejas.

Com relação ao exaustor eólico, utilizou-se o modelo padrão disponível no mercado com abertura de 0,52 m de diâmetro na base do exaustor e manteve-se a sua cor original.

A instrumentação do secador foi feita utilizando quatro sensores de temperatura tipo PT100, dois sensores de umidade relativa e temperatura RHT DM 150 mm e uma central de aquisição de dados FieldLogger (Figura 4).

Figura 4: Detalhe da Instrumentação para Medida de Temperatura e Umidade: (A) FieldLogger, (B) RHT DM 150 mm e (C) PT100.



Os sensores PT100 foram distribuídos da seguinte forma: o primeiro entre a base da câmara de secagem e o suporte para a primeira bandeja, o segundo entre as bases da primeira e segunda bandejas, o terceiro entre as bases das segunda e terceira bandejas e o quarto foi posicionado na parte externa do secador para medir a temperatura do ar ambiente, antes de entrar no coletor solar. Já os sensores de umidade e temperatura RHT DM 150 mm foram posicionados na entrada da câmara de secagem (conexão entre o coletor solar e a câmara de secagem) e na saída dela (antes do exaustor eólico). Todas as

informações de umidade e temperatura eram medidas de minuto em minuto e armazenadas na central FieldLogger para serem enviadas em forma de planilha, via cabo USB, para um computador. Além disso, o FieldLogger possuía uma tela na qual era possível acompanhar e visualizar os valores medidos e armazenados ao longo de cada teste experimental.

Um termo-higro-anemômetro (VELOCICALC) e um solarímetro (INSTRUTHERM MES-200) foram utilizados para a medida da umidade relativa do ar na entrada do coletor solar e da radiação solar incidente.

Princípio de Funcionamento

O secador solar de exposição indireta funciona de maneira simples. Primeiramente, o material a ser seco era colocado dentro da câmara de secagem, onde não incidia a radiação solar, evitando, assim, a degradação de cor e nutrientes. Em seguida, o ar de secagem insaturado era alimentado no coletor solar por um ventilador com três velocidades distintas no qual era aquecido pela radiação solar incidente.

Ao entrar na câmara de secagem pela parte inferior, o ar quente e insaturado era disposto em contato direto com a *Spirulina platensis* disposta sobre a bandeja, estabelecendo um escoamento cruzado. A exaustão do ar de secagem era feita por um exaustor eólico instalado na parte superior da câmara de secagem.

Rotina Experimental

Os testes experimentais de secagem foram realizados no *campus* Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), sempre entre 10 h e 14 h, período de maior incidência solar.

Neste trabalho as diversas variáveis envolvidas no processo de secagem foram agrupadas em três categorias: variáveis manipuladas, variáveis monitoradas e variáveis respostas.

As variáveis manipuladas foram a vazão volumétrica de ar (Q) e a carga mássica de *Spirulina platensis* (C), cada uma com três níveis (Tabela 1).

Tabela 1: Matriz de Planejamento de Experimentos.

Vazão volumétrica (m ³ /h)	Carga Mássica (kg/m ²)		
	0,3079 (-1,00)	0,4618 (0,00)	0,6158 (+1,00)
136,10 (-1,00)	Q1C1	Q1C2	Q1C3
195,08 (-0,29)	Q2C1	Q2C2	Q2C3
302,81 (+1,00)	Q3C1	Q3C2	Q3C3

As variáveis monitoradas foram a umidade relativa do ar (U_R), o fluxo de radiação solar incidente (G), a atividade de água do produto (a_w), a temperatura do ar ambiente (T_∞), a temperatura na entrada câmara de secagem (T_E), a temperatura na saída da câmara de secagem (T_S).

As variáveis resposta foram o tempo de secagem (t), a umidade final da *Spirulina* seca (M_F) e a cinética de secagem.

Vale ressaltar que, exceto as variáveis manipuladas, todas as outras foram representadas por valores médios do período diário de teste experimental.

Todos os testes experimentais de secagem partiram de uma condição inicial média igual, cujos principais parâmetros estão listados na Tabela 2.

Tabela 2: Condições iniciais para os testes experimentais de secagem.

Parâmetros	Valores
Umidade inicial da <i>Spirulina platensis</i> (M_0)	83,32 % \pm 1,61 %
Umidade relativa do ar (U_R)	16,0 % $\leq U_R \leq$ 36,0 %
Horário de início	10 h
Radiação solar (G)	720 W/m ² $\leq G \leq$ 948 W/m ²
Temperatura ambiente (T_∞)	19°C $\leq T_\infty \leq$ 23°C

Após a definição de quantos testes experimentais de secagem deveriam ser feitos e da condição inicial dos mesmos, foi definida a rotina de montagem e coleta das informações experimentais.

Primeiramente, o secador solar era posicionado de forma que o coletor solar ficava orientado para o norte verdadeiro e, para isso, foi utilizada uma bússola.

O secador operou com uma bandeja perfurada, onde era colocada a carga mássica de *Spirulina platensis* em forma de *pellets* cilíndricos longos (“espaguetes”) e a partir do momento em que o material era colocado no secador iniciava-se o teste de secagem.

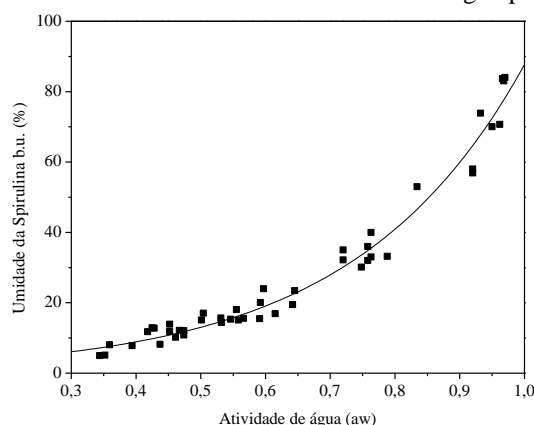
Amostragens do material foram feitas nos tempos de 0, 5, 10, 20, 30 min e daí em diante, de 30 em 30 min, era retirada uma pequena parte de um dos *pellets* que era colocada em um pesa-filtro de 20 mL e pesado. Ao final do teste, todas as amostras eram colocadas em estufa a 105°C por 24 h para a determinação da umidade final do material

(M_F). Após uma hora e meia de teste, além da amostragem para determinação da umidade, retirava-se uma amostra de 30 em 30 min para determinação da atividade de água da *Spirulina platensis*. A medida de atividade de água (a_w) era realizada no equipamento LabSwift.

Com relação ao fluxo de radiação solar incidente (G) e à umidade relativa do ar (U_R), as medidas eram feitas de 15 em 15 min com o Solarímetro e o Termo-Higro-Anemômetro, respectivamente.

O teste experimental de secagem terminava no momento em que a atividade de água (a_w) da *Spirulina platensis* atingia um valor abaixo de 0,6, de preferência, igual a 0,5 (para uma atividade de água de 0,5, a umidade final do sólido é de aproximadamente 13%), conforme a Figura 5. Valor este recomendado para a conservação e estocagem segura do produto.

Figura 5: Relação entre umidade em base úmida e atividade de água para a *Spirulina platensis*.



A *Spirulina platensis*, quando úmida, é muito pegajosa e aderente à superfície em que é depositada. Além disso, essa biomassa geralmente sofre um encolhimento ao longo do processo de secagem, dificultando a sua remoção da bandeja. A remoção da *Spirulina platensis* da bandeja era feita por meio de raspagem utilizando uma espátula inox. A biomassa seca era recolhida sobre um plástico, em seguida, armazenada em um recipiente lacrado e escuro.

Pellets cilíndricos longos: Para a obtenção dos *pellets* era necessário descongelar o material, o qual era retirado do freezer e deixado em local livre de luz e vento por 9 h. O material era retirado à 00:00 h e a obtenção dos *pellets* começava às 9:00 h.

Os *pellets* cilíndricos tinham um diâmetro de aproximadamente 4 mm e tinham comprimento igual ao da bandeja (58 cm). Além disso, eram igualmente distribuídos ao

longo de toda a bandeja para evitar a formação de caminhos preferenciais para o escoamento do ar.

Cinética de Secagem

Para a obtenção da cinética de secagem, representada pela variação de umidade do material em função do tempo de secagem, os valores de umidade do material foram convertidos em adimensional de umidade (MR) de acordo com a Equação 1.

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (1)$$

Além disso, foi necessário encontrar o modelo, dentre os diversos disponíveis na literatura, que melhor descrevesse a cinética de secagem da *Spirulina platensis*. A escolha do melhor modelo, segundo as Equações de 2 a 6, foi feita com base nos maiores coeficientes de determinação (R^2) e nas distribuições de resíduos (preferencialmente os menores possíveis e aleatoriamente distribuídos em torno da média). Por sua vez, a estimação dos parâmetros envolvidos nos modelos foi feita pelo método dos mínimos quadrados mediante o uso do *software* STATISTICA (versão 7.0).

Os modelos escolhidos foram os semi-empíricos que apesar da fundamentação teórica, não refletem a complexidade do processo e se adequam melhor aos dados experimentais (Nogueira, 2016).

Os modelos cinéticos estudados nesse trabalho estão listados abaixo na Tabela 3 e foram os mesmos estudados por Silva (2015b).

Segundo Nogueira (2016), o parâmetro k é a constante de secagem que contabiliza os efeitos externos da secagem, n é um parâmetro empírico que corrige possíveis desvios relacionados à resistência interna a transferência de massa e A é uma constante a ser estimada.

Tabela 3: Modelos Cinéticos de Secagem.

Modelo Cinético	Referência	Equação
$MR = \exp(-k t)$	LEWIS (1921)	2
$MR = \exp(-k t^n)$	PAGE (1949)	3
$MR = \exp(-(k t)^n)$	OVERHULTS <i>et al.</i> (1973)	4
$MR = A \exp(-k t)$	BROOKER <i>et al.</i> (1974)	5
$MR = A \exp(-k t) + \frac{1}{9} \exp(-k t)$	HENDERSON e HENDERSON (1968)	6

Umidade de equilíbrio da *Spirulina platensis*: A umidade de equilíbrio é a umidade presente no material em equilíbrio com o ambiente, ou seja, depende da temperatura e da umidade relativa do ar e é o valor mínimo de umidade que o material pode apresentar em determinadas condições operacionais. Depende da natureza do material e da forma como a água está ligada ao material (Simioni, 2015).

Além disso, a umidade de equilíbrio pode ser determinada experimentalmente e por meio destes podem ser obtidos modelos que descrevem a isoterma de sorção do material. Neste trabalho, a umidade de equilíbrio da *Spirulina platensis* foi calculada utilizando o modelo de GAB cujos parâmetros foram estimados para a *Spirulina* por Oliveira *et al.* (2009), a partir de dados experimentais obtidos pelo método estático.

Primeiramente, utilizou-se a temperatura média do ar, em Kelvin (K), na entrada da câmara de secagem para determinar a pressão de saturação do vapor de água ($P_{\text{sat,vap}}$) através da Equação 7.

$$\ln P_{\text{sat,vap}} = \frac{-5800,22}{T} + 1,39 - 4,86 \cdot 10^{-2} T + 4,18 \cdot 10^{-5} T^2 - 1,44 \cdot 10^{-8} T^3 + 6,55 \ln T \quad (7)$$

Em seguida, com os valores de umidade relativa do ar (U_R) e de pressão de saturação do vapor de água ($P_{\text{sat,vap}}$), determinou-se a umidade absoluta do ar (UA_{amb}) por meio da Equação 8.

$$UA_{\text{amb}} = \frac{0,622 \frac{U_R}{100} P_{\text{sat,vap}}}{P_{\text{atm}} - \frac{U_R}{100} P_{\text{sat,vap}}} \quad (8)$$

Os valores de umidade relativa do ar em base seca podem ser convertidos em atividade de água por meio da Equação 9.

$$a_w = UA_{\text{amb}} \quad (9)$$

Todo esse procedimento para conversão de umidade relativa do ar (U_R) em atividade de água (a_w) foi extraído da dissertação de Simioni (2015).

Por fim, com os valores de atividade de água e o modelo de GAB, mostrado pela Equação 10, calculou-se a Umidade de Equilíbrio (M_{eq}) da *Spirulina platensis* em base seca (Oliveira *et al.*, 2009).

$$M_{eq} = \frac{M_m C_G a_w k}{(1 - a_w)(1 - a_w + C_G a_w)} \quad (10)$$

Os valores dos parâmetros M_m , C_G e k foram consultados no trabalho de Oliveira *et al.* (2009) para as temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C e foi feita uma interpolação para determinar o valor dos parâmetros na temperatura média de entrada da câmara de secagem para cada um dos testes de secagem realizados.

A Umidade de Equilíbrio em base seca (M_{eq}) foi calculada para cada um dos testes de secagem realizados utilizando o modelo de GAB, por se ajustar melhor aos dados e ter uma faixa de abrangência maior (Timmermann *et al.*, 2001).

Eficiência Térmica

Após a construção do secador solar de exposição indireta e a realização dos testes de secagem, foi proposto um parâmetro adimensional η (eficiência térmica do coletor solar) definido como a razão da taxa de energia solar absorvida sob a forma de energia interna pela taxa de energia solar total incidente no coletor solar, conforme sugere a Equação 11. Nela, a densidade (ρ) e o calor específico do ar (c_p) foram estimados na temperatura média entre a entrada e a saída do coletor solar.

$$\eta = \frac{\rho Q c_p \Delta T}{GA} \quad (11)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cinética de Secagem

O primeiro passo para a determinação da cinética de secagem da *Spirulina platensis*, após a realização dos testes experimentais, foi o cálculo da umidade de equilíbrio (M_{eq}). O cálculo foi feito utilizando o modelo GAB, com os parâmetros estimados por Oliveira *et al.* (2009) a partir dos dados de equilíbrio da *Spirulina platensis*.

A umidade de equilíbrio (M_{eq}) apresentou um valor médio de $0,05 \pm 0,01$.

Após a determinação da umidade de equilíbrio (M_{eq}), calculou-se o adimensional de umidade (MR) para cada experimento de secagem. De posse dos valores deste

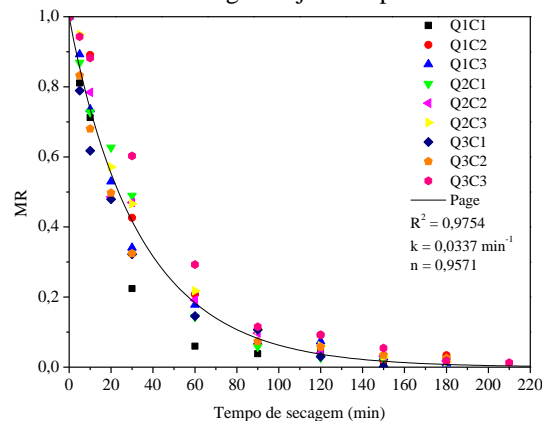
adimensional em função do tempo, determinou-se o modelo cinético de secagem que melhor descrevia o comportamento da *Spirulina platensis* durante a secagem solar.

Para os testes experimentais de secagem, o modelo cinético de Page apresentou coeficientes de determinação (R^2) médio igual a 0,9754, que foi igual ao de Overhults e superior ao de Lewis ($R^2 = 0,9751$), Brooker ($R^2 = 0,9751$) e Henderson & Henderson ($R^2 = 0,9751$).

A escolha do melhor modelo ficou entre os modelos de Page e Overhults, sendo que foi possível constatar que ambos apresentaram as melhores distribuições de resíduos para o ajuste efetuado, com uma distribuição mais aleatória em torno do zero. Logo, o modelo de Page foi o escolhido para descrever a cinética de secagem da *Spirulina platensis* por se tratar de um modelo mais simples do ponto de vista matemático.

A curva de cinética de secagem ajustada para os testes experimentais de secagem realizados é mostrada na Figura 6.

Figura 6: Cinética de Secagem Ajustada pelo Modelo de Page.



Após o ajuste feito pelo modelo cinético de Page e o cálculo dos parâmetros k e n , notou-se que a constante de secagem k para a convecção forçada (considerando a média de todos os experimentos) foi igual a $0,0337 \text{ min}^{-1}$. Concluiu-se com isso que, apesar da redução na temperatura, houve um ganho no arraste do ar responsável por aumentar os coeficientes convectivos de transferência de calor e massa, tornando a secagem mais eficaz. Entretanto vale a pena destacar que as condições afetam a cinética de secagem.

Na Figura 6 foi possível observar uma queda acentuada da umidade nos primeiros 10 min em que a secagem foi controlada pela remoção da grande quantidade de água presente na superfície do material.

A partir de 10 min, a secagem tornou-se mais lenta, variando devido à formação de uma camada externa rígida, que dificultava a difusão da umidade presente no interior

do *pellet*. A difusão interna provavelmente se tornou a etapa controladora na remoção da umidade, explicando o comportamento da parte final da cinética mostrada na Figura 6.

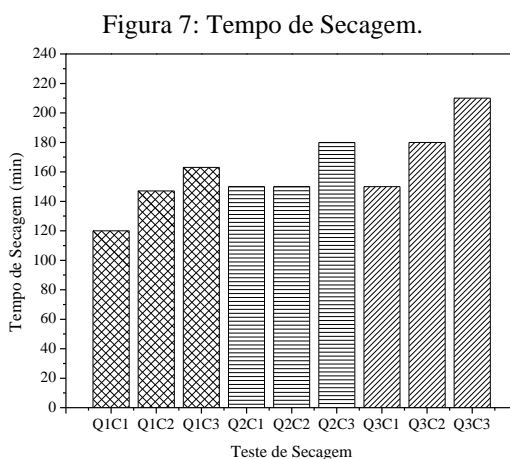
Desempenho do Secador Solar

O desempenho do secador solar foi analisado através da influência da vazão volumétrica de ar, da carga mássica de *Spirulina platensis*, da variação de temperatura do ar de secagem e da eficiência térmica. Os resultados estão expressos na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados Referentes aos Testes Experimentais de Secagem.

Teste	ΔT (°C)	t (min)
Q1C1	21,4	120
Q1C2	20,0	147
Q1C3	20,4	163
Q2C1	15,3	150
Q2C2	17,2	150
Q2C3	16,0	180
Q3C1	14,7	150
Q3C2	13,8	180
Q3C3	12,0	210

Os testes de secagem mostraram um decréscimo médio de umidade do material de 71,98% \pm 2,49%, confirmando a eficácia do processo de secagem solar empregado. A Figura 7 mostra os tempos de secagem referentes aos testes experimentais.



Notou-se um aumento do tempo de secagem proporcional ao aumento da carga mássica de *Spirulina platensis* e ao aumento da vazão volumétrica de ar alimentado. Mantendo-se a vazão volumétrica constante, cada incremento de 50% na carga mássica eleva o tempo de secagem em 14,75%, em média. Fixando-se a carga mássica, o aumento

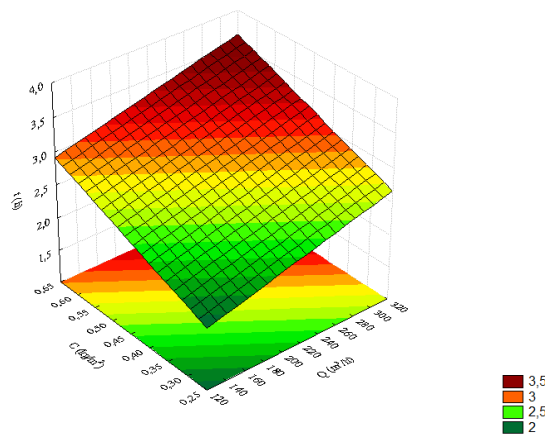
médio no tempo de secagem foi de 12,06% para cada incremento de vazão volumétrica de ar.

A Equação 12 correlacionou o tempo de secagem com a carga mássica e a vazão volumétrica de fluido de secagem por meio de uma regressão múltipla. O coeficiente de correlação determinação (R^2) da regressão foi igual 0,9501 e o efeito observado foi apenas linear para ambas as variáveis. Através dos coeficientes de regressão determinados, notou-se que as influências tanto da carga mássica quanto da vazão volumétrica de ar são da mesma ordem de grandeza. Na Figura 8 foi possível observar o comportamento diretamente proporcional do tempo, em horas, em função da carga mássica e da vazão volumétrica.

$$t = 2,7251 + 0,3050 \left(\frac{Q - 195,08}{83,35} \right) + 0,3782 \left(\frac{C - 0,4618}{0,1539} \right) \quad (12)$$

Dentre os testes realizados sob convecção forçada, o teste Q1C3 mostrou-se uma das mais interessantes porque teve um tempo de secagem relativamente intermediário (163 min) para uma maior carga mássica de *Spirulina platensis* combinada com a menor vazão volumétrica de ar.

Figura 8: Comportamento do tempo de secagem em função da carga mássica de *Spirulina platensis* e da vazão volumétrica de ar de secagem para testes com convecção forçada.



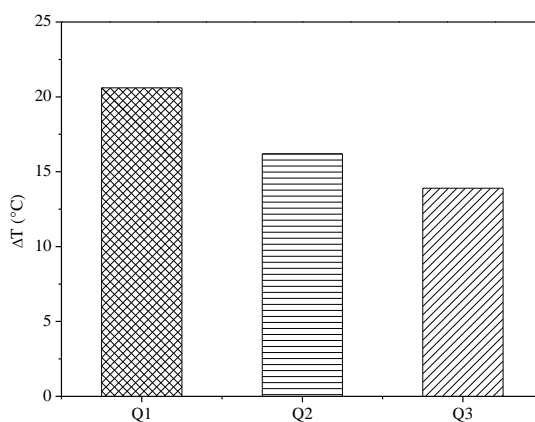
O aumento da vazão volumétrica de ar implicou no aumento do tempo de secagem, pois a quantidade de ar que precisou ser aquecida foi maior e a potência de aquecimento com a luz solar era praticamente constante. Logo, a mesma energia térmica disponível era utilizada para aquecer uma maior quantidade de ar de secagem, fazendo

com que ele entrasse a uma temperatura mais baixa na câmara de secagem. Como a temperatura é uma variável que tem um grande efeito na cinética de secagem, o tempo foi maior, pois a temperatura era mais baixa.

Com relação à carga mássica de *Spirulina platensis* alimentada no secador, a influência dela no tempo de secagem foi bem clara e de acordo com o esperado, ou seja, quanto maior a quantidade de material a ser seco, maior era o tempo de secagem. Para cada incremento de 50% na carga mássica de *Spirulina platensis*, o tempo de secagem foi, em média, 14,75% maior.

Outro fator analisado foi a variação de temperatura do ar que ao longo coletor solar era influenciado apenas pela vazão volumétrica de fluido alimentado (convecção forçada). Na Figura 9 são ilustradas as variações médias de temperatura do ar de secagem no coletor solar para as diferentes condições de vazões volumétricas do ar. Pôde-se constatar que as variações médias de temperatura do fluido de secagem foram inversamente proporcionais às vazões volumétricas empregadas, haja vista a potência solar de aquecimento ter sido praticamente constante ao longo de todos os experimentos.

Figura 9: Variação de Temperatura do Ar de Secagem entre a Entrada e a Saída do Coletor Solar.



O aquecedor solar construído apresentou uma eficiência térmica média de 8,77%. Apesar da baixa conversão da radiação solar incidente em energia interna, este aproveitamento da luz solar sinalizou uma estratégia muito promissora para a secagem da *Spirulina platensis*, haja vista que não houve a necessidade de eletricidade ou queima de combustível para promover o aquecimento do ar de secagem.

4 CONCLUSÃO

Após a realização de todos os testes experimentais e a análise do conjunto de informações experimentais referentes às diversas variáveis envolvidas no processo de secagem solar da *Spirulina platensis*, chegou-se às seguintes conclusões:

- Dentre as condições com convecção forçada, a melhor condição foi a que combinou a mínima vazão volumétrica e máxima carga mássica (Q1C3), com tempo de secagem igual a 163 min.
- O tempo de secagem foi influenciado pela carga mássica e pela vazão volumétrica de ar de forma significativa e com mesma ordem de grandeza, sendo que o aumento da vazão volumétrica e da carga mássica implicou em um aumento no tempo de secagem.
- O aumento da vazão volumétrica implicou no decréscimo da variação de temperatura do ar de secagem no coletor solar e isso se deveu ao fato de que uma maior quantidade de ar foi aquecida com a mesma taxa de radiação incidente.
- O modelo cinético que melhor descreveu a secagem solar da *Spirulina platensis* foi o de Page e através do estudo cinético concluiu-se que a secagem submetida à convecção forçada foi mais eficiente (como esperado) que a submetida à convecção natural. A constante de secagem k foi 43,41% maior para a convecção forçada em relação à convecção natural.
- Além disso, a cinética apresentou duas fases distintas durante a secagem, onde aparentemente a primeira fase foi controlada pela taxa de remoção da umidade superficial e a segunda pela taxa de difusão da umidade do interior dos *pellets* para a superfície.
- O secador solar apresentou um desempenho satisfatório para a secagem da *Spirulina platensis* porque reduziu a umidade da *Spirulina platensis* a patamares inferiores a 13%, com níveis de atividade de água adequados à preservação e ao armazenamento.
- A eficiência térmica média do coletor solar foi de 8,77%.

NOMENCLATURA

A	Área do coletor solar (m^2)
a_w	Atividade de água (-)
C	Carga mássica de <i>Spirulina platensis</i> (kg/m^2)
C_G	Parâmetro do modelo GAB (-)
c_p	Capacidade calorífica do ar ($J/kg\ K$)
G	Radiação solar incidente (W/m^2)
k	Constante de secagem (min^{-1})
M_m	Parâmetro do modelo GAB (-)
M	Umidade do material em base seca (%)
M_{eq}	Umidade de equilíbrio em base seca (%)
M_F	Umidade final do material em base úmida (%)
MR	Adimensional de umidade (-)
M_0	Umidade inicial do material em base seca (%)
$P_{sat,vap}$	Pressão de saturação do vapor de água (Pa)
Q	Vazão volumétrica de ar (m^3/h)
t	Tempo de secagem (min)
U_R	Umidade relativa do ar (%)
$U_{A_{amb}}$	Umidade absoluta do ar (-)
ΔM	Decréscimo de umidade do material (%)
ΔT	Gradiente de temperatura de secagem ($^{\circ}C$)
η	Eficiência térmica do coletor solar (-)
ρ	Densidade do ar (kg/m^3)

REFERÊNCIAS

ACADEMY OF NUTRITION AND DIETETICS (2013). “Position of the Academy of Nutrition and Dietetics: Functional Foods”, Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics; Vol. 113, p.1906-1103.

BEZERRA, A. M. (1998), Aplicações Térmicas da Energia Solar. 3 ed., Editora Universitária – UFPB (Série Tecnologia), João Pessoa, 242p.

BORTOLOTTI, C. T. (2012), Estudo Experimental de Fluidodinâmica de uma Mistura de Resíduo de Acerola e Soja em Leito de Jorro. PPG-EQ/UFU, Uberlândia – MG, 101p. (dissertação de mestrado).

DISSA, A. O.; DESMORIEUX, H.; SAVADOGO, P. W.; SEGDA, B. G.; KOULIDIATI, J. (2010), “Shrinkage, Porosity and Density Behaviour During Convective Drying of *Spirulina*”, Journal of Food Engineering, Vol. 97, p.410-418.

FDA - Food and Drug Administration. Agency Response Letter GRAS Notice No. GRN 000127CFSAN/Office of Food Additive Safety. 2003. Disponível em <http://www.fda.gov/Food/FoodIngredientsPackaging/GenerallyRecognizedasSafeGRAS/GRASListings/ucm153944.htm>

MEDEIROS, A. R. S.; FARIAS NETO, S. R.; FERREIRA, D. D. A.; ROMERO, M. J. A.; GONZAGA, L. M. (2020), Análise granulométrica e DRX para caracterização do rejeito de caulim da região do Seridó da Paraíba visando uma nova rota de beneficiamento. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 6, p. 33575-33588. DOI:10.34117/bjdv6n6-058

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. (2005), Unit Operations of Chemical Engineering. 7ed. McGraw Hill, Singapore, 1140p.

NOGUEIRA, G. D. R. (2016), Estudo de Técnicas Híbridas de Desidratação de Resíduos de Acerola. PPG-EQ/UFU, Uberlândia – MG, 106p. (dissertação de mestrado)

OLIVEIRA, E. G.; ROSA G. S.; MORAES, M. A.; PINTO, L. A. A. (2009), “Moisture Sorption Characteristics of Microalgae *Spirulina platensis*”, Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 26, p. 189-197.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (2014), Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. CEPEL – CRESESB, Rio de Janeiro - RJ, 530p.

SILVA, D. I. S. (2015a), Estudo da Transferência de Calor e Massa na Secagem em Leito Fixo Visando o Aproveitamento de Resíduo de Acerola (*Malpighia emarginata* DC). PPG-EQ/UFU, Uberlândia – MG, 216p. (tese de doutorado).

SILVA, N. C. (2015b), Desidratação de Resíduos do Processamento de Maracujá-Amarelo por Diferentes Metodologias. PPG-EQ/UFU, Uberlândia – MG, 147p. (dissertação de mestrado)

SIMIONI, T. (2015), Estudo Comparativo da Secagem de Microalgas *Scenedesmus acuminatus* em Camada Delgada e Leito de Jorro. PPG-EQ/UFSC, Florianópolis – SC, 156p. (dissertação de mestrado)

SOARES, R. B.; ASSIS, T. I.; DASSOLER, A.; AMARANTE, L. M. (2019), “Levantamento bibliométrico e mapeamento da análise de ciclo de vida para microalgas: uma revisão da literatura”, Brazilian Journal of Development, Vol. 5, p. 32984-32995.

TIMMERMANN, E. O.; CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. (2001), “Water Sorption Isotherms of Foods and Foodstuffs: BET or GAB Parameters?”, Journal of Food Engineering, Vol. 48, p. 19-31.