



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



UTILIZAÇÃO DE ENERGIA SOLAR PARA SECAGEM DE MICROALGAS

João Paulo Siqueira Silva

Uberlândia – MG - Brasil

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



UTILIZAÇÃO DE ENERGIA SOLAR PARA SECAGEM DE MICROALGAS

João Paulo Siqueira Silva

Orientadores: Luiz Gustavo Martins Vieira

Marcos Antônio de Souza Barrozo

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Uberlândia – MG

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S586u Silva, João Paulo Siqueira, 1991-
2017 Utilização de energia solar para secagem de microalgas [recurso eletrônico] / João Paulo Siqueira Silva. - 2017.

Orientador: Luiz Gustavo Martins Vieira.
Coorientador: Marcos Antônio de Souza Barrozo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.6023>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia química. I. Vieira, Luiz Gustavo Martins, 1976-, (Orient.). II. Barrozo, Marcos Antônio de Souza, 1961-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

CDU: 66.0

Rejâne Maria da Silva (Bibliotecária) – CRB6/1925

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 24 DE JULHO DE 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira

Orientador PPGEQ/UFU

Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo

Orientador PPGEQ/UFU

Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde

PPGEQ/UFU

Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva

PPGEA/UFU

Prof. Dr. Thiago Taham

IFTM/Uberlândia

AGRADECIMENTOS

Após esses dois anos de muito aprendizado e trabalho que representaram uma importante fase da minha vida, gostaria de registrar o meu agradecimento a todos que ajudaram e apoiaram a minha caminhada.

Começo agradecendo a Deus, por colocar em meu caminho todas as oportunidades, de acordo com o meu merecimento, e iluminar minhas ideias para sempre tomar as decisões certas e necessárias para o meu crescimento pessoal e profissional.

Em seguida agradeço a meus pais Jamil e Ana Claudia pela educação moral e acadêmica que me proporcionaram e por me incentivarem a buscar os meus sonhos independente das dificuldades encontradas ao longo do caminho, além de não medirem esforços para me manterem na universidade desde os tempos da graduação.

Aos professores orientadores Luiz Gustavo e Marquinhos por todos os ensinamentos e experiências passadas durante esse período em que estivemos juntos e pela amizade que foi construída em paralelo a isso.

Aos meus amigos: Jean, Bruna Nazar, Fernanda Machado, Piola e Bahia pela ajuda, por ouvir minhas lamentações, mostrar alternativas aos problemas, me motivar e comemorar as conquistas, por menores que sejam, junto comigo.

Aos colegas de laboratório Fernanda e Layane pela amizade e agradável convivência diária; Glaucia, Neiton e Priscila pela convivência e pelos ensinamentos compartilhados durante as análises.

Aos meus alunos de iniciação científica: Nathaniel, Yuri e Gabriel pelo ótimo trabalho realizado durante todo período e pela possibilidade de ensinar um pouco do que sei a eles.

À professora Fabiana Xavier da FEQUI – UFU e o professor Fernando do IFTM – Uberlândia pela atenção e auxílio na obtenção da *Spirulina platensis* utilizada em todo o presente trabalho.

À Brasil Vital representada na pessoa de Thierry Conroi que nos abriu as portas de sua empresa, possibilitando a compra da *Spirulina platensis* úmida.

À FEQUI – UFU por disponibilizar toda a estrutura e recursos necessários para o desenvolvimento desse trabalho.

Finalmente, gostaria de agradecer a todos que estiveram comigo nesse período, tornando possível essa importante conquista em minha vida.

Muito obrigado!

“O segredo da vitória, em todos os sentidos da vida, permanece na arte do aprender, imaginar, esperar e fazer mais um pouco.”

André Luiz

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
LISTA DE SÍMBOLOS	iv
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. <i>Spirulina platensis</i>	4
2.2. Energia Solar	7
2.3. Secagem	9
2.3.1. Umidade Relativa do Ar	12
2.3.2. Umidade de Equilíbrio	13
2.3.3. Atividade de Água	13
2.3.4. Isotermas de Sorção	14
2.4. Secadores	14
2.5. Secadores Solares	15
2.5.1. Secador Solar de Exposição Direta	15
2.5.2. Secador Solar de Exposição Indireta	17
2.5.3. Secador Solar Misto e Híbrido	18
2.6. Compostos Bioativos	18
2.6.1. Compostos Fenólicos	19
2.6.2. Ficocianina	21
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. <i>Spirulina platensis</i>	23
3.2. Descrição do Secador Solar	23
3.2.1. Princípio de Funcionamento	27
3.2.2. Configurações Utilizadas no que Tange à Alimentação do Ar de Secagem	27

3.2.3.	Cálculo da Vazão Volumétrica de Ar Alimentada	29
3.3.	Testes Experimentais de Secagem	29
3.3.1.	<i>Pellets</i> Cilíndricos Longos	32
3.3.2.	Critério de Parada do Teste de Secagem	33
3.3.3.	Umidade de Equilíbrio da <i>Spirulina platensis</i>	34
3.3.4.	Adimensional de Umidade (MR)	36
3.4.	Considerações Finais acerca do Secador Solar Construído	37
3.5.	Análise da <i>Spirulina platensis</i> Seca	38
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1.	Cinética de Secagem	40
4.2.	Desempenho do Secador Solar	43
4.3.	Compostos Bioativos da <i>Spirulina platensis</i> Seca	49
4.3.1.	Teor de Fenólicos Totais	49
4.3.2.	Teor de Flavonoides Totais	51
4.3.3.	Teor de Ficocianina	53
5.	CONCLUSÕES	55
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
	APÊNDICE A – Resultados de Medida de Vazão Volumétrica do Ar	58
	APÊNDICE B – Resultados do Cálculo da Umidade de Equilíbrio	61
	APÊNDICE C – Resultados do Adimensional de Secagem	63
	APÊNDICE D – Resultados do Ajuste de Curvas de Cinética de Secagem	65
	APÊNDICE E – Análise de Resíduos dos Modelos Cinéticos de Secagem	66
	APÊNDICE F – Variáveis Monitoradas no Secador Solar	71
	APÊNDICE G – Resultados das Análises de Compostos Bioativos	72
	APÊNDICE H – Regressão Múltipla e Quadro de ANOVA	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curva representativa da cinética de secagem.	11
Figura 2.2 - Secador solar de exposição direta.	16
Figura 2.3 - Secador solar de exposição indireta.	17
Figura 2.4 - Estrutura básica dos fenólicos.	19
Figura 2.5 - Estrutura básica dos flavonoides.	20
Figura 3.1 –Vista lateral do secador solar de exposição indireta: (A) coletor solar, (B) câmara de secagem e (C) exaustor eólico.	24
Figura 3.2 – Vista frontal do coletor solar com destaque para as divisórias.	24
Figura 3.3 - Detalhe da câmara de secagem: (A) bandeja colocada e (B) vista interna da câmara.	25
Figura 3.4 - Solarímetro (A) e Termo-higro-anemômetro (B).	26
Figura 3.5 - Detalhe da instrumentação para medida de temperatura e umidade: (A) FieldLogger, (B) RHT DM 150 mm e (C) PT100.	26
Figura 3.6 - Detalhe das duas configurações do secador solar: (A) convecção natural e (B) forçada.	28
Figura 3.7 - Detalhe do acoplamento do ventilador ao secador: (A) vista frontal, (B) vista lateral e (C) vista superior.	28
Figura 3.8 - Medidor de atividade de água LabSwift-aw.	31
Figura 3.9 - Seringa de 60 mL e bico de 4 mm usada na confecção dos pellets.	32
Figura 3.10 - Pellets cilíndricos longos dispostos sobre a bandeja do secador solar.	33
Figura 3.11 - Gráfico de umidade da <i>Spirulina platensis</i> em função da atividade de água.	34
Figura 4.1 –Cinética de secagem para experimentos com convecção forçada.	42
Figura 4.2 – Cinética de secagem para experimentos com convecção natural.	42
Figura 4.3 -Tempo de secagem para os testes com convecção natural.	44
Figura 4.4 - Tempo de secagem para os testes com convecção forçada.	45
Figura 4.5 -Comportamento do tempo de secagem em função da carga mássica de <i>Spirulina platensis</i> e da vazão volumétrica de ar de secagem para testes com convecção forçada.	46
Figura 4.6 - Variação de temperatura do ar de secagem entre a entrada e saída do coletor solar.	47
Figura 4.7 – Adimensional de secagem (N) para testes com convecção natural.	47
Figura 4.8 – Adimensional de secagem (N) para testes com convecção forçada.	48
Figura 4.9 - Teor de Fenólicos Totais para os testes de secagem com convecção natural.	49

Figura 4.10 - Teor de Fenólicos Totais para os testes de secagem com convecção forçada...	50
Figura 4.11 - Teor de Flavonoides Totais para os testes com convecção natural.	51
Figura 4.12 -Teor de Flavonoides Totais para os testes de secagem com convecção forçada.	52
Figura 4.13 - Teor de Ficocianina para os testes com convecção natural.	53
Figura 4.14 - Teor de ficocianina para os testes de secagem com convecção forçada.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Combinação de fatores para os testes de secagem com convecção natural.	30
Tabela 3.2 - Matriz de Planejamento e nomenclatura empregada para os testes de secagem nas condições de convecção forçada.	30
Tabela 3.3 - Condições iniciais para os testes de experimentais de secagem.....	30
Tabela 3.4 - Modelos cinéticos de secagem.	37
Tabela 4.1 - Valores de umidade de equilíbrio da <i>Spirulina platensis</i> para cada teste de secagem.	41
Tabela 4.2 - Resultados de secagem para os experimentos com convecção natural.	43
Tabela 4.3 - Resultados de secagem para os experimentos com convecção forçada.	44
Tabela 4.4 - Caracterização da <i>Spirulina platensis in natura</i>	49

LISTA DE SÍMBOLOS

a_w	Atividade de água (-)
C	Carga mássica (kg/m^2)
C_B	Parâmetro do modelo BET (-)
C_G	Parâmetro do modelo GAB (-)
G	Radiação solar incidente (W/m^2)
k	Parâmetro do modelo GAB (-)
M	Umidade do material em base seca (%)
M_0	Umidade inicial do material em base seca (%)
M_{eq}	Umidade de equilíbrio em base seca (%)
M_F	Umidade final do material em base úmida (%)
M_I	Umidade inicial do material em base úmida (%)
M_m	Parâmetro do modelo GAB e BET (-)
MR	Adimensional de umidade (-)
N	Adimensional de secagem (-)
P	Pressão (atm)
P_{atm}	Pressão atmosférica (atm)
$P_{sat,vap}$	Pressão de saturação do vapor de água (Pa)
Q	Vazão volumétrica de ar (m^3/h)
R^2	Variância média (-)
T_∞	Temperatura ambiente do ar ($^\circ\text{C}$)
T	Temperatura média do ar (K)

t	Tempo de secagem (min)
T_E	Temperatura na entrada câmara de secagem ($^{\circ}\text{C}$)
TFC	Teor de flavonoides totais (mg rutina / 100 g amostra seca)
TPC	Teor de fenólicos totais (mg ácido gálico / 100 g amostra seca)
T_S	Temperatura na saída da câmara de secagem ($^{\circ}\text{C}$)
$U_{A_{\text{amb}}}$	Umidade absoluta do ar (-)
U_E	Umidade relativa do ar na entrada da câmara de secagem (%)
U_R	Umidade relativa do ar (%)
U_S	Umidade relativa do ar na saída da câmara de secagem (%)
ΔM	Decréscimo de umidade do material (%)
$\Delta \rho$	Variação de densidade do fluido (kg/m^3)
ΔT	Gradiente de temperatura de secagem ($^{\circ}\text{C}$)
λ_m	Comprimento de onda (nm)

RESUMO

O apelo pelo uso de fontes de energia renováveis 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, pela sua excelente composição nutricional e pela alta quantidade de compostos bioativos, como é o caso da ficocianina. 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 em um curto tempo com uma eficiência térmica média de 8,77%. Notou-se uma degradação geral do teor de fenólicos totais, o teor de flavonoides totais sofreu influência da carga mássica, sendo que a melhor condição foi para a carga intermediária e o teor de ficocianina foi influenciado pela vazão volumétrica de ar, onde a melhor condição foi a mínima vazão. Finalmente, a influência das diversas variáveis envolvidas na secagem foram agrupadas em um adimensional de secagem N e a condição que melhor atende a todos os requisitos analisados foi a que combinou a mínima vazão volumétrica de ar e a carga mássica intermediária de *Spirulina platensis*.

Palavras-chave: *Spirulina platensis*; ficocianina; adimensional; secagem; energia solar

ABSTRACT

The appeal for the use of renewable energy sources increases every day and solar energy is a main alternative because it is abundant, low-cost and totally clean. *Spirulina platensis* shows great commercial interest due to the search for a healthy food, its excellent nutritional composition and the high amount of bioactive compounds, as is the case of phycocyanin. However, it is a highly perishable biomass because of its high humidity. The objective of the present work is to develop an indirect exposure solar dryer capable of promoting the drying of *Spirulina platensis* by varying the volumetric flow rate of air and the lowest feed load. The dryer comprised of a solar collector, a drying chamber and a wind extractor utilizes incident solar radiation to heat and promote a biomass industry deposited in the form of long cylindrical *pellets* in perforated trays in the drying chamber. The solar dryer reduced the humidity of *Spirulina platensis* to acceptable levels in a short time with an average of 8.77%. It was observed a general degradation of the total phenolic content, the total flavonoid content was influenced by the mass amount, and the best condition for the intermediate feed mass and the phycocyanin content was influenced by the volumetric flow rate of air, where the best condition was minimum flow rate. Finally, the influences of the various variables involved in drying were grouped into a dimensionless drying N and the condition that best meets all the requirements analyzed for a combination of a minimum volumetric air flow rate and an intermediate feed mass of *Spirulina platensis*.

Key-words: *Spirulina platensis*; phycocyanin; dimensionless; drying; solar energy

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional expressivo das últimas décadas e o conseqüente desenvolvimento das cidades criaram grandes demandas, principalmente energética e alimentícia. Com isso, os recursos energéticos tornaram-se limitados e bastante caros 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 à secagem 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, inesgotável, limpa e barata, podendo ser reaproveitada tanto na forma fotovoltaica, quanto na forma térmica. 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.

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. 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.

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 fluido 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. 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. 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, devido ao

seu alto teor proteico de alta solubilidade, suas propriedades anti-oxidantes e anti-inflamatórias, e por ser fonte de vitaminas e minerais. Além disso, a *Spirulina platensis* é uma biomassa rica em ficocianina, que é um corante natural azul com propriedades fluorescentes. Por tudo isso, a *Spirulina platensis* possui diversas aplicações nas indústrias alimentícias sob a forma de alimento natural e aditivo proteico. Devido à suas propriedades anti-oxidantes, anti-inflamatórias, hepatoprotetoras e fluorescentes, tem também potencial para uso na área médica, farmacêutica e cosmética.

No mercado, a *Spirulina platensis* é encontrada em pó, cápsulas ou pellets e seu preço gira em torno de R\$ 50,00 cada 100 g. 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*).

Isto posto, 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 que pudesse operar com convecção natural ou forçada;
- Analisar o efeito de variáveis operacionais e determinar quais delas são significativas na secagem da *Spirulina platensis*. As variáveis foram divididas em três grupos: manipuladas, monitoradas e resposta. As variáveis manipuladas foram a vazão volumétrica de ar e a carga mássica de *Spirulina platensis*. As variáveis monitoradas foram a umidade relativa do ar, a radiação solar incidente, a temperatura ambiente, a temperatura de secagem (dentro da câmara de secagem) e as umidades do ar na entrada e na saída da câmara de secagem. Por fim, as variáveis resposta foram o tempo de secagem, a umidade final do material, a cinética de secagem e os teores dos compostos bioativos (fenólicos, flavonoides e ficocianina).
- Secar a microalga a um patamar aceitável de umidade (abaixo de 13%) em apenas um dia, pois trata-se de um material altamente perecível;
- Determinar a eficiência energética/térmica do coletor solar por meio da relação entre a radiação solar total incidente e a radiação aproveitada para o aquecimento do ar;

- Analisar a qualidade do material seco a fim de manter as propriedades nutricionais, sensoriais e terapêuticas da *Spirulina platensis*. Para isso foram determinados os teores de fenólicos totais, de flavonoides totais e de ficocianina.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Após a definição dos objetivos deste trabalho foi feita uma pesquisa na literatura para saber sobre os avanços e as particularidades de cada um dos assuntos relacionados pelo mesmo. Os temas abordados foram *Spirulina platensis*, energia solar, secagem, secadores, secadores solares e compostos bioativos.

2.1. *Spirulina platensis*

Microalgas e cianobactérias são amplamente estudadas pela eficiência de converter a luz solar em compostos orgânicos. Vale lembrar que as proteínas presentes nas microalgas são componentes essenciais para as células e para os processos biológicos, pelas funções regulatórias e de controle das condições intra e extra celular. Assim as microalgas podem ser usadas para nutrição humana e animal e uma das mais microalgas mais utilizadas é a *Spirulina platensis*.

A *Spirulina* é uma cianobactéria, também chamada de *Arthrospira platensis* ou alga azul. Esta microalga é composta por células de 3,5 a 10 µm de largura. O filamento tem forma de espiral com diâmetro de 20 a 100 µm, podendo ser linear em cultivos artificiais, e a sua rigidez, segundo DESMORIEUX *et al.* (2010), é devido à parede celular de peptidoglicano (açúcares complexos e proteínas).

Desde a década de 60, a *Spirulina platensis* vem sendo cultivada pelos seus valores nutricionais. Sua produção mundial aumentou de 500 t/a em 1985 para 2500 t/a em 1998 e em seguida para 3000 t/a em 2004 (SHIMAMATSU, 2004) e está concentrada próximo à zona equatorial e tropical. Em 2013, a produção anual mundial de microalgas atingiu 15000 t/a (BRASIL; GARCIA, 2016).

A *Spirulina platensis* possui cerca de 60 a 70 % de proteína, incluindo 12 aminoácidos essenciais, 10 vitaminas, incluindo a vitamina B12 (maior fonte natural do mundo) e um vasto espectro de fitopigmentos. Possui propriedades terapêuticas, pois contém ficocianina que é antioxidante e anti-inflamatório, além de polissacarídeos com efeitos anti-viral e anti-cancerígeno, bem como ácido gama-linoleico (GLA), que é usado na redução do colesterol (OLIVEIRA *et al.*, 2009 a). Essa rica composição nutricional justifica o interesse no seu emprego como uma fonte farmacêutica e nutricional. Esta microalga é considerada um microrganismo GRAS

(*Generally Accepted As Safe*), não apresentando toxicidade, sendo assim permitida como suplemento alimentar pela FDA e utilizada no desenvolvimento de alimentos funcionais (FDA, 2003).

No Brasil, a *Spirulina platensis* faz parte da listagem de ingredientes aprovados pelas Comissões Técnico Científicas de Assessoramento em Alimentos Funcionais e Novos Alimentos (CTCAF) e têm sua comercialização permitida pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) (ANVISA, 2009). A *Spirulina platensis* também é usada no tratamento de anemia e no combate à desnutrição em países em desenvolvimento, como o Chade.

A ficocianina é a maior ficobiliproteína presente na *Spirulina platensis* e é usada em pesquisas biomédicas (fluorescência), alimentos (aditivo e corante natural) e cosméticos (corante).

O Instituto de Medicina da Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos define como alimentos funcionais aqueles potencialmente saudáveis, incluindo alimentos modificados ou ingredientes alimentares, que além de nutrir, proporcionam algum benefício à saúde, agindo como modulador de processos metabólicos, prevenindo doenças degenerativas, melhorando a saúde, e ou retardando o envelhecimento celular precoce (ACADEMY OF NUTRITION AND DIETETICS, 2013).

Conhecer as propriedades funcionais do alimento rico em proteína, como é o caso da *Spirulina platensis*, é importante no desenvolvimento de ingredientes proteicos usados na formulação de alimentos. Outro fator que deve ser determinado é solubilidade da proteína, pois influencia na textura durante a formulação de alimentos e na extração da mesma de fontes naturais. Uma ótima solubilidade aumenta o potencial de aplicação de determinada proteína (OLIVEIRA *et al.*, 2009 a).

Esta microalga também já foi incorporada à dieta dos astronautas da Agência Espacial Europeia, devido aos ricos valores nutricionais, reunidos em um único produto, reduzindo assim o volume de suprimentos levados para o espaço.

A microalga fresca tem elevada umidade não pode ser conservada na temperatura ambiente. Uma alternativa para a conservação da *Spirulina platensis* é secá-la, mas a temperatura do ar de secagem não deve exceder os 60°C, pois acima desta temperatura pode ocorrer a degradação da ficocianina. Os métodos mais comuns de secagem destes materiais são *spray-dryer*, liofilização, secagem convectiva e secagem solar. A etapa de secagem das

microalgas pode representar 30% ou mais do custo total de produção, dependendo da técnica usada (DISSA *et al.*, 2010).

As formas normalmente usadas para condicionar a *Spirulina* para a secagem são por meio de *pellets* cilíndricos ou fina camada. O tempo de secagem, a deformação e a porosidade dependem da forma e do tamanho iniciais (DESMORIEUX *et al.*, 2010).

Do ponto de vista organoléptico, a secagem em camada fina prejudica o sabor e nos *pellets* a porosidade confere crocância ao produto. Já do ponto de vista energético, quanto menor a espessura da camada fina e o diâmetro do *pellet* menor será o tempo de secagem (DESMORIEUX *et al.*, 2010).

DESMORIEUX *et al.*, (2010) observaram o encolhimento da *Spirulina* durante a secagem, e esse encolhimento foi maior na direção perpendicular (espessura da camada fina ou diâmetro do *pellet*) do que na direção paralela (comprimento) do suporte em ambas as formas.

Nas duas últimas décadas, podem ser elencados alguns estudos científicos importantes realizados com a *Spirulina platensis*. Estes serão sumariamente descritos a seguir.

DESMORIEUX e HERNANDEZ (2004) estudaram a secagem convectiva para reduzir custo e mostraram a influência do processo na qualidade do produto (aparência e cores distintas).

DESMORIEUX e DECAEN (2005) estudaram a influência da temperatura e velocidade do ar de secagem na cinética de secagem e determinaram as isotermas de sorção de 25 a 40°C.

MORAES *et al.* (2007) determinaram as isotermas de dessorção a 40, 50 e 60°C. Ajustaram os dados de equilíbrio ao modelo de GAB. Estes autores determinaram também o calor isostérico de dessorção e a entropia diferencial.

OLIVEIRA *et al.* (2009 a) estudaram a secagem em camada fina da *Spirulina platenis*. Foram analisados os efeitos de variáveis como a temperatura do ar e carga mássica. Foram determinados os teores de ficocianina e a solubilidade proteica do material na melhor condição de secagem.

OLIVEIRA *et al.* (2009 b) obtiveram experimentalmente as isotermas de equilíbrio, sendo os dados ajustados aos modelos de BET e GAB, sendo que este último foi o que melhor representou os dados experimentais.

DESMORIEUX *et al.* (2010) estudaram os efeitos do tamanho e da forma da *Spirulina platensis* (“espaguete” e camada fina), no encolhimento e na porosidade durante a secagem convectiva.

DISSA *et al.* (2010) também estudaram o encolhimento, a porosidade e a densidade da *Spirulina platensis* em forma de “espaguete” durante a secagem convectiva.

MELO (2016) estudou a cinética de secagem da *Spirulina platensis* em estufa a diversas temperaturas e a influência da temperatura secagem no tempo de armazenamento da *Spirulina platensis* seca.

2.2. Energia Solar

O sol exerce influência direta ou indireta em todas as outras fontes de energia renováveis ou não, sendo responsável pela evaporação que inicia o ciclo da água, que geram a hidroeletricidade. A radiação solar causa variações de temperatura, conseqüentemente, altera a densidade do ar e favorece a formação dos ventos, utilizados para a geração de energia eólica. Petróleo, carvão e gás natural foram formados por resíduos animais e vegetais que utilizaram a luz solar durante seu ciclo de vida. Biocombustíveis, como o etanol, são provenientes de plantas, como a cana de açúcar, que dependem da luz do sol para realizar a fotossíntese.

Estima-se que a radiação solar anual incidente é 5 a 10 vezes maior que todas as reservas mundiais de combustíveis conhecidas, além de ser limpa, renovável e apresentar ação bactericida devido à radiação ultra-violeta (BEZERRA, 1998).

A energia solar é a fonte mais abundante e disponível em todo o território brasileiro, mas infelizmente é ainda mal aproveitada. Ela pode ser aproveitada como fonte de energia fotovoltaica e térmica.

Além disso, trata-se de um recurso renovável, não polui, tem baixo custo de instalação e manutenção, fácil instalação e operação e torna possível sua instalação em áreas remotas (PORTAL SOLAR, 2016). Porém, há algumas dificuldades como dependência climática (período noturno e dias chuvosos) e dificuldade de armazenamento devido à sua característica difusa.

O índice de radiação solar brasileiro é um dos maiores do mundo e não apresenta grandes variações ao longo do dia, devido à proximidade da linha do Equador. Dentre todas as regiões

do país, o Nordeste é a que apresenta maior eficácia com média entre 5700 e 6100 Wh/m² dia (BRASIL SOLAIR, 2016).

Apesar de todo este potencial, a energia fotovoltaica ainda é muito pouco desenvolvida no Brasil, porém vem apresentando um crescimento expressivo nos últimos anos, devido ao grande aumento no valor da conta de luz. Esse aumento, no período de 2010 a 2015, foi de 112,9% sem considerar o aumento dos impostos, segundo dados provenientes da ANEEL. Algumas medidas governamentais têm contribuído para o incentivo à utilização da energia fotovoltaica, como a resolução nº 482/12 da ANEEL, que permite a utilização dos telhados para a geração da sua própria energia e comunicação com o sistema elétrico nacional.

A energia solar pode ser também utilizada para o aquecimento ou evaporação de fluidos. Seu principal uso é como fonte de aquecimento de água em residências para banho, mas também é possível utilizar essa energia térmica para mover turbinas, na climatização e refrigeração, em dessalinizadores, na síntese de alguns gases e também em secadores solares que demandam temperaturas elevadas (PINHO; GALDINO, 2014).

Essa energia térmica é captada por meio de coletores solares, que podem ser planos ou curvilíneos. Estima-se que em 2012, a área de coleta acumulada em todo o país atingiu 8,49 milhões de m², superando 5,7 GW_{th} (PINHO; GALDINO, 2014). GW_{th} é a unidade de potência usada para caracterização de equipamentos para resfriamento ou aquecimento.

Tem-se ainda que para cada 1 m² de coletor solar utilizado durante um ano, economiza-se 56 m² de área inundada, 251 kg de lenha, 67 m³ de gás natural, 55 kg de GLP, 73 L de gasolina e 66 L de diesel. A energia solar pode ser usada em termoelétricas, onde 1m² de coletor equivale a 223 m³ de gás natural ou 227 L diesel (PORTAL SOLAR, 2016).

O coletor solar tipo placa plana possui um absorvedor pintado de preto fosco com cobertura simples ou dupla e atinge uma temperatura entre 40 e 90°C. Já os concentradores solares trabalham com temperaturas bem mais altas, dependendo da forma e dos materiais utilizados na sua construção (PINHO; GALDINO, 2014).

Outro ponto importante é o conceito de radiação solar ou irradiância solar, definida como a energia radiante proveniente do sol, sob a forma de onda eletromagnética incidente por unidade de superfície. A radiação solar é formada por uma componente direta, que incide diretamente sobre a superfície, e uma difusa, que chega à superfície após sofrer espalhamento na atmosfera terrestre. Tem-se ainda o albedo que é uma parte da radiação solar que atinge a superfície e é refletida pelo ambiente (solo, vegetação, etc.) (PINHO; GALDINO, 2014).

Segundo PINHO e GALDINO (2014), mesmo em um dia ensolarado, cerca de 20% da radiação solar é difusa e em dias totalmente nublados, não se tem radiação direta, ou seja, ela é 100% difusa. Finalmente, segundo BEZERRA (1998), a radiação solar incidente é composta por 3% de ultra-violeta, 42% de visível e 55% de infra-vermelho.

2.3. Secagem

A secagem é necessária para a adequada armazenagem do material através da remoção da maior parte da umidade, para o aumento da resistência a degradação devido a redução da atividade de água, para a redução da taxa de alteração microbiológica e química e para a redução dos custos com embalagem, transporte e distribuição (SILVA, 2015a).

Segundo McCABE *et al.* (2005), secagem é o processo de remoção de uma quantidade de água presente em um material sólido por meio transferência de calor e massa, reduzindo-a a um valor aceitável. Esse valor aceitável é determinado para alimentos por meio do índice de atividade de água.

A transferência de calor e massa ocorre através do contato do ar quente de secagem com o material a ser seco. A transferência de calor a partir do ambiente para evaporar a umidade do sólido e é dependente da temperatura, umidade, fluxo e direção do ar, forma física e pressão. Para evaporar é necessário o aquecimento até a temperatura onde a pressão de vapor de água exceda a pressão parcial de umidade no ar em contato com o material. A remoção pelo ar depende da sua temperatura e umidade relativa (NOGUEIRA, 2016). A transferência de massa ocorre do interior para a superfície e o movimento da umidade se dá por capilaridade, difusão devido ao gradiente de concentração e vapor d'água pelos poros (MUJUMDAR, 2006).

Secagem é a maneira mais antiga de se preservar um alimento e isso vem desde a antiguidade, onde se conservava a carne utilizando sal e exposição ao sol e grãos pela exposição ao sol e ao vento.

Com o desenvolvimento da agricultura e o aumento das populações tornaram-se ainda mais necessários o armazenamento e a conservação da produção, para poder alimentar a todos e suprir os períodos do ano em que não se tinha produção. A secagem de grãos era feita espalhando os mesmos sobre uma superfície preparada chamada de “terreiro” e a remoção de umidade ocorria sob a ação do sol e do vento. Entretanto, o material submetido a secagem a céu aberto é suscetível a contaminações (poeira e detritos) e deterioração, caso molhe por ação das chuvas.

Baseado nas dificuldades da secagem a céu aberto (secagem natural) e no constante crescimento da população, das cidades e da produção, as primeiras pesquisas desenvolveram metodologias de secagem (secagem condutiva ou convectiva), bem como alguns modelos de secadores (secadores de bandeja, rotatórios, de esteira, leiteo fluidizado, spray dryer, liofilização, desidratação osmótica, entre outros). Tem-se ainda a aplicação de vácuo e ondas do espectro eletromagnético, como infravermelho e micro-ondas (SEADER; HENLEY, 2006).

Esses secadores normalmente são movidos por combustíveis fósseis ou eletricidade e isso impacta diretamente nos custos de implantação e operação. Apesar do custo relativamente alto, os secadores reduziram significativamente a perda de alimentos devido à contaminação, deterioração e má conservação, aumentando a oferta de alimentos para a população.

Em paralelo ao crescimento populacional, tem-se o desenvolvimento industrial que a cada dia lança um novo produto no mercado e quase todos os processos produtivos passam por uma etapa de secagem, que se tornou um fator importante no custo de produção.

Os altos custos de secagem devido ao aumento, ocorrido nos últimos anos, do preço dos combustíveis fósseis e eletricidade, bem como pela necessidade de reduzir a utilização de fontes energéticas não renováveis, tem reorientado as pesquisas na área de secagem. Nos últimos anos tem sido estudados equipamentos energeticamente mais eficientes e que utilizem fontes renováveis, como é o caso da energia solar, disponível em todo o território de maneira gratuita e inesgotável.

A secagem solar é um dos tipos de secagem convectiva que utiliza ar quente durante o processo e é descrito da seguinte forma: o material em contato com o ar quente, ocorre a transferência de calor do ar para o produto pela diferença de temperatura entre eles. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor d'água entre o ar e a superfície do produto determina uma transferência de massa para o ar, na forma de vapor d'água.

Parte do calor trocado é utilizado para vaporizar essa água. Já a transferência de massa combina dois processos simultâneos: a transferência da água para superfície do material e a remoção do vapor de água dessa superfície (SILVA, 2015b).

A secagem feita por qualquer um dos métodos disponíveis atualmente é uma operação unitária que precede o envase do produto final e impacta diretamente no custo de produção, especialmente na indústria de alimentos, agrícola, química e farmacêutica, que trabalha com produtos sensíveis à temperatura e ao modo de secagem, pois é necessário manter as características nutricionais, medicinais e sensoriais dos produtos.

As propriedades físicas do material (tamanho e geometria), a disposição do material em relação ao ar (tubos, camadas e bandejas), as propriedades físicas do ar (temperatura, umidade relativa e velocidade) e o tipo de secador utilizado afetam a taxa e o tempo total de secagem.

Além da importância do uso de um equipamento de secagem adequado, alguns cuidados devem ser tomados durante o processo, conforme relatado a seguir. Sabe-se que a umidade a ser removida pode estar na superfície, no interior ou distribuída em todo o sólido e, baseado nisso, a secagem pode ser mais rápida ou mais lenta.

Outro fato interessante é que a retirada da umidade da superfície e das camadas mais externas do produto geram um gradiente de umidade fazendo que a umidade do centro do produto migre para a superfície e seja também retirada. Entretanto, a taxa de secagem depende da velocidade com que a umidade é retirada da superfície e da velocidade com que a umidade interna migra para a superfície, logo, a que for mais lenta governará o tempo de secagem (McCABE *et al.*, 2005).

A taxa de secagem relaciona a variação de umidade do material em relação ao tempo (Figura 2.1) e pode ser dividida em três fases distintas: período de indução ou estabilização, taxa constante (transferência de calor igual a transferência de massa) e taxa decrescente (aumento da temperatura e equilíbrio com o ar) (SILVA, 2015b).

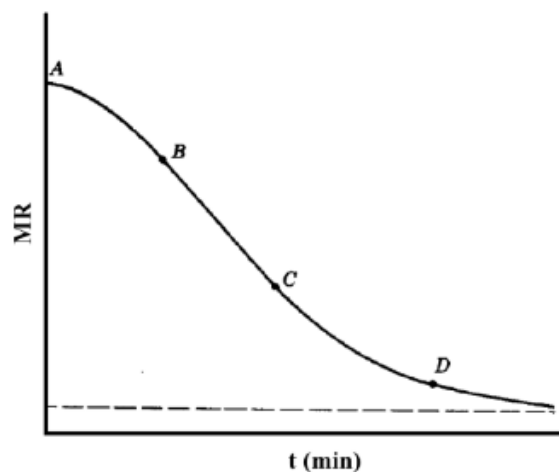


Figura 2.1 - Curva representativa da cinética de secagem.

A primeira fase é muito rápida em relação às demais e pode ser desprezada. A segunda fase remove a água livre, ou seja, a retirada da superfície é respondida pela água interior até a

umidade crítica. A terceira e última fase é controlada pela transferência de massa interna de água e vapor até a superfície secar completamente (IBARZ; BARBOSA-CÁNOVAS, 2002).

A taxa de secagem é a relação entre a variação de umidade do material em função do tempo é também conhecida como cinética de secagem e pode ser ajustada por meios de modelos disponíveis na literatura. Os modelos que descrevem a cinética de secagem de um material podem ser de 3 tipos: empíricos, semi-empíricos e teóricos.

Os modelos empíricos apresentam bom ajuste, modelagem matemática mais simples e abordagem flexível, porém não são confiáveis fora da faixa experimental, aplicações restritas e específicas e não se baseiam em princípios físicos fundamentais (MOREIRA, 2000).

Os modelos semi-empíricos apresentam uma certa fundamentação teórica, descrevem a dependência da secagem com a temperatura, pressão e umidade relativa (condições de contorno) e alguns casos possuem solução analítica, no entanto, não são indicados para materiais mais espessos e algumas considerações teóricas são questionáveis (MOREIRA, 2000).

Os modelos teóricos seguem os princípios teóricos, permitem extrapolações para além da faixa e contabilizam a relação entre as variáveis, porém são matematicamente complexos, exigem elevado esforço computacional e dependem de parâmetros desconhecidos (MOREIRA, 2000).

Apesar da simplicidade da operação de secagem, é preciso tomar alguns cuidados de acordo com a natureza do material a ser seco. Produtos inorgânicos suportam altas temperaturas e grande movimentação dentro do secador, já alimentos, frutas e produtos farmacêuticos devem ser manuseados com cuidado em equipamentos higienizados e submetidos a baixas e moderadas temperaturas de secagem.

Por fim, algumas variáveis de grande importância no processo de secagem estão definidas a seguir.

2.3.1. Umidade Relativa do Ar

A umidade relativa do ar é a relação entre a quantidade de vapor de água observada na atmosfera e aquela observada em condições saturadas à mesma temperatura (FIOREZE, 2003).

2.3.2. Umidade de Equilíbrio

A umidade de equilíbrio é determinada pela umidade que o material pode ter em equilíbrio com a umidade relativa do ar, dependendo da temperatura. Em outras palavras, a umidade de equilíbrio é aquela em que há o equilíbrio entre a pressão de vapor de água no sólido e a pressão parcial do vapor de água do meio ambiente (BARROZO, 1995).

Além disso, representa o limite mínimo de umidade em determinada condição operacional, ou ainda, a mínima umidade final possível do material (NOGUEIRA, 2016).

2.3.3. Atividade de Água

A água aumenta a mobilidade de enzimas, estabilização da estrutura e configuração enzimática, reagente em reações de hidrólise, disponibilidade para atuar como solvente e participar de reações químicas e bioquímicas (SILVA, 2015a). A água total presente no material pode ser dividida em dois tipos: água livre ou combinada.

Segundo SILVA (2014), a água livre (não ligada) está presente nos espaços intergranulares e entre os poros do alimento, conserva suas propriedades físicas e serve como dispersante para substâncias coloidais e como solvente para compostos cristalinos. A água combinada interage diretamente com as moléculas constituintes do alimento, não podendo ser removida ou utilizada em nenhum tipo de reação.

Atividade de água (a_w) é o conteúdo de água livre e pode ser definida como a relação entre a pressão de vapor da água em equilíbrio sobre o alimento e a pressão de vapor da água pura a mesma temperatura (DITCHFIELD, 2000).

A atividade de água é um dos parâmetros mais importantes na conservação de alimentos, tanto no aspecto biológico como nas transformações físicas. Neste sentido, podem ser previstas reações de oxidação lipídica, escurecimento não enzimático, atividade enzimática, desenvolvimento de microrganismos que são diretamente afetadas pela atividade de água e sistemas de embalagem (SILVA, 2014).

O comportamento microbiano frente à atividade de água é extremamente variável, sendo as bactérias mais exigentes, em relação aos fungos e às leveduras. Os substratos com teor de atividade de água inferior a 0,6 estão dificilmente propícios ao crescimento microbiano e, a partir de 0,65, inicia-se a proliferação de microrganismos específicos, sendo que em 0,75, somente algumas bactérias halófitas, leveduras e fungos xerofílicos podem se desenvolver.

2.3.4. Isotermas de Sorção

As isotermas de sorção representam a relação entre a atividade de água e a umidade de equilíbrio em uma determinada temperatura. Essas isotermas podem representar a perda (dessorção) ou o ganho (adsorção) de umidade pelo material em função da umidade relativa do ar ou da atividade de água (OLIVEIRA *et al.*, 2009b).

2.4. Secadores

Secadores são equipamentos desenvolvidos para promover a secagem de determinado produto sem que o mesmo tenha que ficar exposto ao sol e ao vento. Os secadores possuem diversas configurações, podem ser alimentados por combustíveis fósseis, eletricidade, energia solar, radiação e micro-ondas e podem ser alimentados com os mais variados tipos e formas de material.

Dentre os vários tipos de secadores, uma diferença importante está em como os sólidos são dispostos dentro do secador, podendo ser na forma de flocos, grânulos, cristais, *pellets*, pó ou pasta, e outra diferença é na forma que ocorre a transferência de calor. A transferência de calor pode ser por exposição ao ar quente e insaturado ou pelo contato com o calor de um meio externo, geralmente superfícies metálicas. Temos ainda secadores aquecidos por radiação, resistência elétrica ou micro-ondas (SEADER; HENLEY, 2006).

Secadores com exposição direta ao ar quente e insaturado são conhecidos como secadores adiabáticos ou diretos, como: leito fixo, deslizante, fluidizado e de jorro e spray-dryer. Já os secadores que utilizam calor de um meio externo são conhecidos como secadores não-adiabáticos ou indiretos, como: secador de esteira.

Nos secadores adiabáticos ou diretos, a circulação do ar pode ser concorrente, contracorrente ou cruzada, sendo que na configuração concorrente o ar de secagem e as partículas se movem no mesmo sentido, na contra-corrente o ar de secagem e as partículas se movem no sentido contrário e na configuração cruzada o ar de secagem percola as partículas, ou seja, atravessa por entre as partículas. O escoamento cruzado aumenta significativamente a taxa de secagem devido ao maior contato ar-partícula e caso as partículas sejam muito pequenas é possível modelá-las por meio de granulação ou extrusão, formando um leito permeável de alta porosidade (McCABE *et al.*, 2005).

Por último, os secadores podem ser classificados como contínuos ou batelada e com agitação dos sólidos ou não, além da opção de utilizar o vácuo para reduzir a temperatura e o tempo de secagem.

2.5. Secadores Solares

O processo mais comum e mais antigo de secagem solar é a secagem a céu aberto, muito utilizado ainda em países tropicais. A secagem a céu aberto consiste em espalhar o produto em finas camadas e deixá-lo exposto ao sol e ao vento (MUSTAYEN *et al.*, 2014).

No entanto, essa secagem a céu aberto apresenta inúmeras desvantagens como: elevada mão-de-obra disponível, grandes áreas necessárias para espalhar o produto, perda da qualidade do produto seco devido à chuva, sereno, poeira e detritos de animais. Outra desvantagem é o longo período de secagem, altamente dependente das condições climáticas. Baseado nessas dificuldades e visando reduzir o tempo de secagem e melhorar a qualidade do produto seco, surgiram os primeiros secadores solares.

Os secadores solares são de dois tipos principais: secadores solares de exposição direta e de exposição indireta, que pode ter ou não um pré-aquecedor. Além disso, ambos podem ser alimentados por convecção natural ou convecção forçada (BEZERRA, 1998).

Os secadores solares com convecção natural são também conhecidos como secadores solares de modo passivo. Esse secador é importante devido ao seu baixo custo, simples manutenção e operação, além de ser um dos mais antigos secadores solares. Já os secadores solares com convecção forçada são também conhecidos como secadores solares de modo ativo e são interessantes devido ao baixo custo energético, maior capacidade, menor perda de produto, encolhimento uniforme durante a secagem e produto seco de boa qualidade. Entretanto, em locais onde não há energia elétrica ou é muito cara a sua geração, a utilização de secadores de modo ativo pode ficar prejudicada (MUSTAYEN *et al.*, 2014).

2.5.1. Secador Solar de Exposição Direta

Secadores de exposição direta (Figura 2.2) são aqueles em que o produto recebe diretamente a radiação solar e é comumente utilizado em regiões com alta insolação diária (MUSTAYEN *et al.*, 2014). São feitos de metal ou madeira em forma de caixa isolada

termicamente e coberta por uma superfície transparente (vidro, acrílico, policarbonato, etc). Essa caixa possui aberturas para entrada e saída de ar.

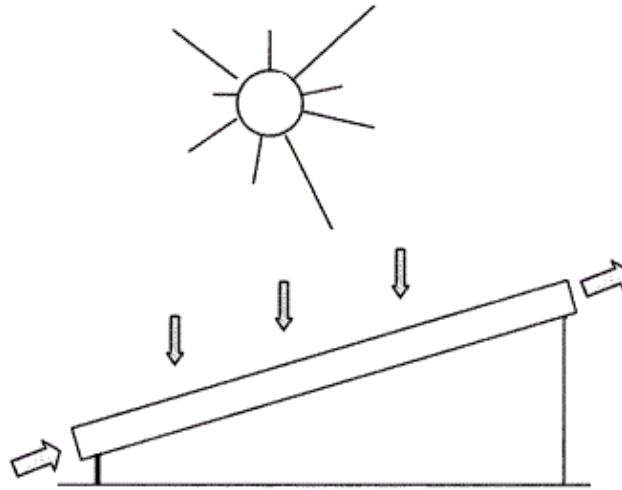


Figura 2.2 - Secador solar de exposição direta.

O secador de exposição direta funciona de maneira que a radiação solar incide e aquece o ar presente dentro do secador. O ar se move naturalmente, devido ao gradiente de densidade gerado pelo gradiente de temperatura (convecção natural) ou de maneira forçada, por meio de ventiladores e sopradores (convecção forçada). Esse mesmo ar em movimento entra em contato com o material, retirando praticamente toda a umidade presente. Em geral, o ar entra pelas aberturas inferiores e sai pelas superiores, levando consigo a umidade do material. Parte da radiação incidente é absorvida pelo material e pela base do secador em forma de energia térmica elevando a temperatura dos mesmos e a outra parte é refletida (KUMAR *et al.*, 2016). A cobertura transparente faz com que a temperatura dentro do secador seja maximizada devido ao efeito estufa gerado.

A base do secador, onde o material é colocado, geralmente metálica, deve ser pintada de preto fosco para facilitar a absorção de calor (LIMA *et al.*, 2006). O secador solar de contato direto deve ser posicionado com a mesma inclinação da latitude do local onde o secador está instalado (PINHO; GALDINO, 2014).

Finalmente, o secador solar geralmente é feito de maneira simples, com materiais de baixo custo e deve estar protegido contra poeira, chuva, animais, detritos e orvalho. No entanto possui baixa capacidade e possibilidade de superaquecimento do material. Esse superaquecimento pode prejudicar a qualidade do produto seco. A incidência direta da radiação pode levar a uma

perda de coloração do produto, bem como a deterioração de alguns importantes componentes do produto (MUSTAYEN *et al.*, 2014).

2.5.2. Secador Solar de Exposição Indireta

Os secadores de exposição indireta (Figura 2.3) são compostos por um coletor solar plano, uma câmara de secagem e pode ter ou não um ventilador (convecção natural ou forçada).

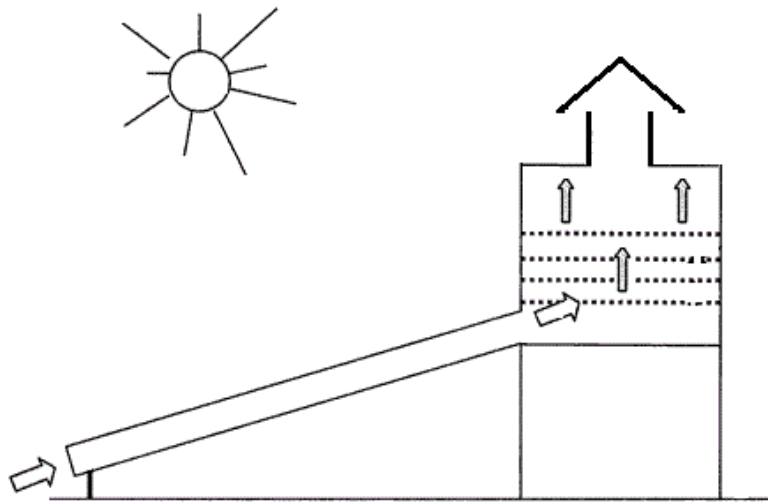


Figura 2.3 - Secador solar de exposição indireta.

O coletor solar possibilita atingir altas temperaturas com uma vazão de ar controlada, no caso da convecção forçada. Seu funcionamento é semelhante ao secador solar de exposição direta, podendo ser construído com os mesmos materiais, isolamento térmico, cobertura transparente, abertura para passagem do ar e inclinação de acordo com a latitude do local.

No caso dos coletores solares com convecção forçada, as vantagens são proporcionar uma melhor e mais rápida secagem do produto, maiores temperaturas do ar de secagem e vazão de ar controlada. A principal contribuição da convecção forçada está em manter uma vazão de ar desejada durante a secagem, resultando em uma secagem uniforme do produto (KUMAR *et al.*, 2016)

Acoplado ao coletor tem-se a câmara de secagem, também feita em madeira ou metal, onde o produto úmido é disposto sobre bandejas perfuradas, promovendo o escoamento cruzado do ar quente proveniente do coletor solar. O ar sai por uma abertura no topo da câmara de secagem levando consigo a umidade retirada do produto. Nessa abertura há um sistema de

exaustão eólico, elétrico ou fotovoltaico que favorece a retirada do ar úmido de dentro da câmara de secagem (MACHADO, 2009).

Visando aumentar a eficiência do equipamento é possível fazer algumas melhorias simples no mesmo que favorecem o aquecimento e o movimento convectivo do ar. Segundo BEZERRA (1998), é possível utilizar a cobertura do tipo duplo vitral para aumentar a temperatura dentro do coletor plano. FIOREZE (2003) afirma que a utilização de tijolos ou uma camada de brita no fundo do coletor é uma forma de armazenar energia térmica e evitar que a temperatura do ar varie sensivelmente ao longo do dia, evitando assim picos de temperatura e prolongando o período de secagem mesmo após o pôr do sol. KUMAR *et al.* (2016) sugere a recirculação do ar de secagem, antes de ser descartado para a atmosfera, melhorando a eficiência do processo.

2.5.3. Secador Solar Misto e Híbrido

Secadores solares mistos são aqueles nos quais se combinam a exposição indireta e a exposição direta a luz solar, ou seja, além do coletor solar, a parte superior da câmara de secagem também possui cobertura transparente (MUSTAYEN *et al.*, 2014).

Por sua vez, os secadores solares híbridos são aqueles onde a radiação solar incidente é combinada com outra forma auxiliar de energia como: eletricidade, queima de biomassa, placas fotovoltaicas, entre outros. Essas fontes auxiliares são usadas, em geral, para pré-aquecer o ar de secagem (SLIMANI *et al.*, 2016; KUMAR *et al.*, 2016).

2.6. Compostos Bioativos

Compostos bioativos são substâncias presentes nos alimentos que auxiliam funções específicas do corpo, além de serem nutritivos. Esses alimentos são conhecidos como alimentos funcionais e segundo o Comitê de Alimentos e Nutrição do Instituto de Medicina da FNB (Federação Náutica de Brasília), referem-se a qualquer alimento ou aditivo que possa trazer benefício à saúde, além dos valores nutricionais (HASLER, 1998).

O aumento da procura por esse tipo de alimentação deve-se ao avanço científico e tecnológico, melhoria da saúde, busca por dietas benéficas para todo o corpo e não só para a perda de peso e envelhecimento populacional (BORTOLOTTI, 2012).

Dentre os compostos bioativos, os que mais se destacam são as substâncias antioxidantes, que são definidas como substâncias sintéticas ou artificiais que retardam ou inibem a oxidação de um substrato oxidável, desde que esteja em baixas concentrações em relação ao substrato. Esse processo de oxidação gera radicais livres, elétrons independentes não-pareados presentes em moléculas orgânicas e inorgânicas, altamente instáveis, quimicamente reativos e com períodos de meia-vida curtos (HALLIWELL *et al.*, 1995; POMPELLA, 1997). Em outras palavras, segundo PODSEDEK (2007), compostos antioxidantes absorvem radicais livres, inibem a cadeia de iniciação ou interrompem a cadeia de propagação das reações oxidativas.

A formação de radicais livres está relacionada com a ação catalítica enzimática ocorrida durante os processos de metabolismo celular, a exposição à radiação ultravioleta e dieta desbalanceada (CERUTTI, 1991), podendo causar envelhecimento precoce, alterações genéticas e doenças cardiovasculares, neurológicas e degenerativas.

Para combater o excesso de radicais livres, é necessário enriquecer a dieta com alimentos ricos em compostos antioxidantes e os principais são os compostos fenólicos e flavonoides provenientes de produtos naturais (NOGUEIRA, 2016).

A obtenção ou o preparo de alimentos ricos em compostos antioxidantes naturais reduzem o uso de aditivos artificiais, resultando em alimentos saudáveis e funcionais (BORTOLOTTI, 2012).

2.6.1. Compostos Fenólicos

Os compostos fenólicos (Figura 2.4) não são sintetizados pelo corpo humano e devem ser obtidos de vegetais. Quimicamente, possuem um anel aromático com um ou mais grupos hidróxidos (BORTOLOTTI, 2012).

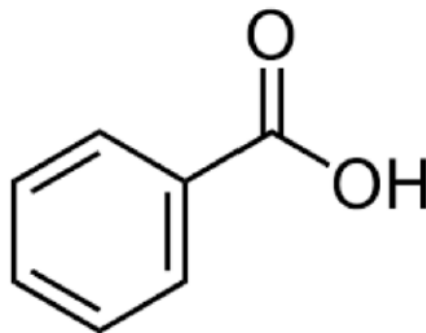


Figura 2.4 - Estrutura básica dos fenólicos.

Esses compostos são produtos do metabolismo secundário das plantas (reações de defesa), apresentam distribuição heterogênea ao longo das plantas de acordo com o tipo de composto químico e situam-se no interior das células e na parede celular. Segundo SHAHIDI *et al.* (1992), fenólicos e flavonoides são sequestrantes de radicais livres e quelantes na etapa de iniciação e propagação do processo oxidativo.

São possíveis doadores de hidrogênio ou elétrons, possuem radicais intermediários estáveis que impedem a oxidação de vários ingredientes do alimento (SILVA, 2015a).

Dentre esses compostos, alguns são pigmentos responsáveis pela coloração dos alimentos. Já outros fenólicos conferem sabor e aroma a frutas e vegetais. Além disso, possuem propriedades antioxidante, antimicrobiana, antialérgica, anticarcinogênica, anti-inflamatória, vasodilatadora, dentre outras.

Os compostos fenólicos são divididos em flavonoides (polifenóis) e não-flavonoides (fenóis simples e ácidos fenólicos).

Os flavonoides (Figura 2.5), também chamados de polifenóis, são o grupo mais importante dentro dos compostos fenólicos e são divididos em flavonóis, flavonas, flavanonas, catequinas, antocianinas, isoflavonas e chalconas. Quimicamente são compostos de um esqueleto de difenil propano com dois anéis benzênicos ligados a um anel pirano (BORTOLOTTI, 2012).

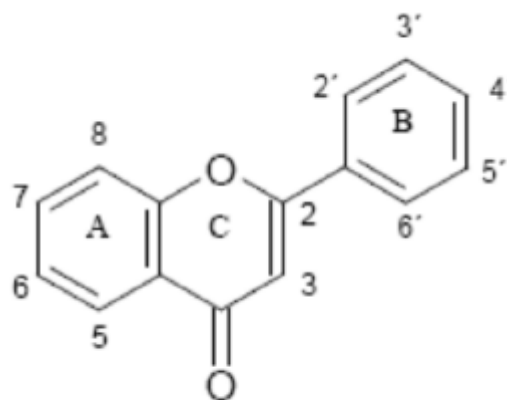


Figura 2.5 - Estrutura básica dos flavonoides.

A composição depende da cultura, do tempo, do clima, do processamento e do armazenamento. O consumo estimado na dieta humana é de 1 a 2 g por dia. Estão presentes na maioria das plantas, em sementes, frutos (maçã, acerola, uva, entre outros), casca, raízes, flores e folhas. Possuem efeito antimicrobiano, antiviral, antioxidante, antiulcerogênico, hipolipidêmico, anti-hepatotóxico, anti-hipertensivo, anti-plaquetário, antineoplásico e anti-inflamatório.

2.6.2. Ficocianina

A ficocianina é a substância predominante dentre as ficobiliproteínas que estão disponíveis nas cianobactérias (algas azuis). Ficobiliproteínas são grandes proteínas solúveis em água, responsáveis pela absorção da luz e representam de 40 a 60 % do total de proteínas solúveis (KUMAR *et al.*, 2014) e são responsáveis por receber a luz e conduzir a fotossíntese da *Spirulina platensis*.

Essas ficobiliproteínas são classificadas em três grandes grupos: ficoeritrina ($\lambda_m = 565$ nm), aloficocianina ($\lambda_m = 652$ nm) e ficocianina ($\lambda_m = 620$ nm), que é a mais abundante.

Ficocianina é o pigmento natural azul mais importante usado em alimentos e biotecnologia devido a sua cor, fluorescência e propriedades anti-oxidantes. A ficocianina é muito utilizada na indústria alimentícia na produção de gomas, balas, doces e geleias. Na indústria de cosméticos é usada em diversos itens de maquiagem. Ficocianina possui ainda propriedades terapêuticas que fortalecem o sistema imunológico, previne o câncer, tem ação anti-oxidante, anti-inflamatória e hepatoprotetora. Apresenta também propriedade fluorescente, sendo usada como contraste em diagnósticos por imagem (SARADA *et al.*, 1999).

A extração da ficocianina é difícil pela estrutura multicamada da célula e pelos vários contaminantes, tornando-se um processo demorado e aumentando o custo de produção e limitando a difusão do seu uso (KUMAR *et al.*, 2014). No entanto, essas dificuldades alimentaram várias pesquisas sobre produção e extração eficientes da ficocianina, principalmente provenientes da *Spirulina platensis*.

A extração geralmente é do tipo sólido-líquido com solventes aquosos e depende da temperatura, tipo de solvente e razão entre sólido e líquido empregada (SU *et al.*, 2014). Uma das maneiras mais simples de extração é utilizando água e macerando o material para promover a homogeneização da solução (COSTA *et al.*, 2016). Além da extração com água que em geral é a mais demorada (SARADA *et al.* 1999), têm-se outros quatro métodos de extração. São eles:

a homogeneização das células utilizando almofariz e pilão, o congelamento combinado com o descongelamento, a homogeneização em Virtimixer em diferentes velocidades e a extração ácida. Por fim, a escolha do método depende da qualidade e pureza desejadas da ficocianina.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Esta seção traz informações sobre a origem e as características da *Spirulina platensis* utilizada neste trabalho e um roteiro de como foram feitas todas as etapas experimentais necessárias à secagem.

3.1. *Spirulina platensis*

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 $83,32\% \pm 1,61\%$, determinada em estufa a 105°C por 24 h (AOAC, 1995). A forma que a microalga foi utilizada nos experimentos foi de *pellets* cilíndricos longos.

3.2. Descrição do Secador Solar

O secador solar utilizado foi construído neste trabalho. Este foi um secador solar de exposição indireta e convecção natural. 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 3.1.

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 3.1–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 3.2, 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. O coletor solar teve sua base e laterais externas pintadas de preto fosco para facilitar a absorção da radiação solar incidente.



Figura 3.2 – Vista frontal do coletor solar com destaque para as divisórias.

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 3.3).



Figura 3.3 - 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. 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, respectivamente (Figura 3.4).



Figura 3.4 - Solarímetro (A) e Termo-higro-anemômetro (B).

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 informações de umidade e temperatura eram medidas de minuto em minuto pelos sensores PT100 e RHT DM 150 mm e armazenadas na central FieldLogger (Figura 3.5) 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.



Figura 3.5 - Detalhe da instrumentação para medida de temperatura e umidade: (A) FieldLogger, (B) RHT DM 150 mm e (C) PT100.

A célula do solarímetro foi posicionada sobre o vidro que cobria o coletor solar para manter o mesmo ângulo de inclinação. O termo-higro-anemômetro foi colocado sobre um anteparo, ao lado do secador solar, para acompanhar a variação da umidade relativa do ar ao longo do período de cada teste experimental.

3.2.1. Princípio de Funcionamento

O secador solar de exposição indireta funciona de maneira simples. Primeiramente, o material a ser seco é colocado dentro da câmara de secagem, onde não incide a radiação solar, evitando, assim, a degradação de cor, nutrientes e compostos bioativos presentes no material. Em seguida, o ar de secagem insaturado é alimentado no coletor solar no qual é aquecido pela radiação solar incidente. Graças ao efeito estufa gerado pela cobertura de vidro do coletor e à inclinação do coletor, à medida que o ar vai se aquecendo, ele torna-se menos denso e tende a escoar para cima até adentrar na entrada da câmara de secagem.

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

3.2.2. Configurações Utilizadas no que Tange à Alimentação do Ar de Secagem

Neste trabalho foram utilizadas duas configurações distintas no secador solar, no que diz respeito à alimentação do ar de secagem, sendo a primeira feita mediante convecção natural (exaustor eólico apenas) e a segunda por meio de convecção forçada do ar (ventilador combinado com o exaustor eólico), conforme ilustra a Figura 3.6.

Na primeira configuração, a alimentação de ar no coletor e, conseqüentemente, na câmara de secagem era feita de forma natural, ou seja, o ar que entrava no coletor solar tinha seu escoamento apenas induzido pelo exaustor eólico combinado pelo aumento gradativo de temperatura ao longo do coletor solar. Já na segunda configuração, o ar era alimentado de maneira forçada por meio de um ventilador de uso doméstico (20 W) acoplado à entrada do coletor solar por meio de quatro fechos rápidos, como pode ser visto na Figura 3.7.

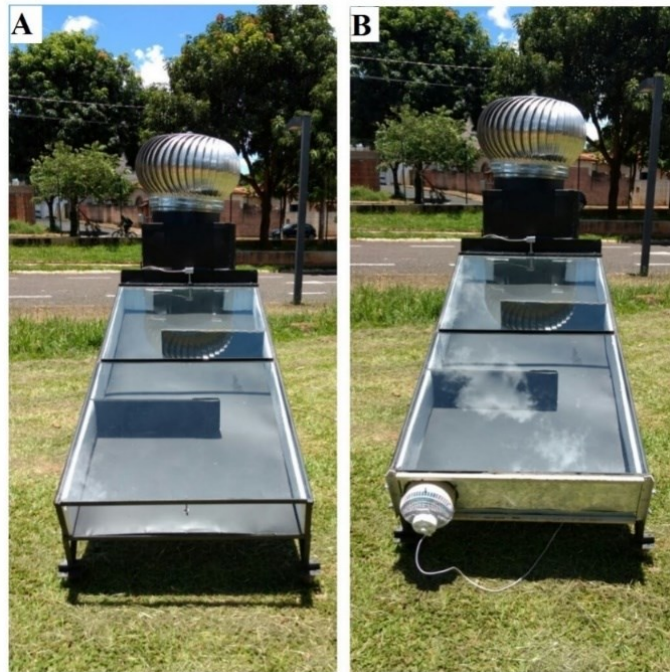


Figura 3.6 - Detalhe das duas configurações do secador solar: (A) convecção natural e (B) forçada.



Figura 3.7 - Detalhe do acoplamento do ventilador ao secador: (A) vista frontal, (B) vista lateral e (C) vista superior.

O ventilador empregado tinha 18 cm de diâmetro e possibilitava a obtenção de três velocidades de rotação fixas (mínima, intermediária e máxima).

3.2.3. Cálculo da Vazão Volumétrica de Ar Alimentada

As previsões das vazões volumétricas de ar no secador foram feitas indiretamente com base em um sistema constituído pelo ventilador mencionado anteriormente, um duto cilíndrico longo e um anemômetro de fio quente.

Para tanto, conectou-se o ventilador ao duto com 2,5 m de comprimento e 0,18 m de diâmetro. O duto possuía um orifício a 2,0 m de distância do ventilador, para garantir uma posição em que houvesse a estabilização do escoamento para que as medidas de velocidade com a sonda do anemômetro de fio quente pudessem ser realizadas (BIRD *et al.*, 1978). Para cada velocidade de rotação do ventilador, medidas de velocidade foram feitas em diversas posições ao longo do diâmetro (APÊNDICE A). De antemão e independente da rotação do ventilador, pôde-se verificar que o escoamento era bem estabelecido, cujas velocidades do fluido pouco variavam com a posição radial do duto (escoamento “pistonado”).

Logo, a vazão volumétrica de ar foi obtida pelo produto da velocidade média do fluido pela área de seção reta do duto, em cada um dos três níveis de rotação do ventilador instalado.

3.3. Testes Experimentais de Secagem

Os testes experimentais de secagem foram realizados no *campus* Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em uma área situada atrás do bloco 1Z-B e ao lado do bloco 3L. Os testes experimentais eram necessariamente realizados entre 10 h e 14 h, durante os meses de Setembro, Outubro e Novembro, 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). As variáveis monitoradas foram a umidade relativa do ar (U_R), a 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) e as umidades absolutas do ar na entrada (U_E) e na saída da câmara de secagem (U_S). As variáveis resposta foram o tempo de secagem (t), a umidade final da *Spirulina* seca (M_F), a cinética de secagem e os teores de bioativos (fenólicos, flavonoides e ficocianina). Vale ressaltar que, exceto as variáveis manipuladas, todas as outras foram representadas por valores médios do período diário de teste experimental.

Para os testes de secagem com convecção natural, a única variável manipulada foi a carga mássica, haja vista que a vazão volumétrica de ar era induzida unicamente pelo exaustor eólico e pelos gradientes de densidade do ar ao longo do coletor solar. Nessa condição operacional, as cargas mássicas utilizadas e as respectivas nomenclaturas podem ser vistas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Combinação de fatores para os testes de secagem com convecção natural.

Carga Mássica (kg/m ²)	0,3079 (-1,00)	0,4618 (0,00)	0,6158 (+1,00)
Nomenclatura	LC1	LC2	LC3

Para os testes de secagem com convecção forçada, as variáveis manipuladas (vazão volumétrica de ar e carga mássica) possuíram três níveis cada, cuja matriz de planejamento com as respectivas nomenclaturas podem ser vistas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Matriz de Planejamento e nomenclatura empregada para os testes de secagem nas condições de convecção forçada.

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

Todos os testes experimentais de secagem partiram de uma condição inicial média igual, cujos principais parâmetros estão listados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Condições iniciais para os testes de experimentais de secagem.

Parâmetros	Valores
Umidade inicial da <i>Spirulina platensis</i> (M ₀)	83,32 % ± 1,61 %
Umidade relativa do ar (U _R)	16,0 % ≤ U _R ≤ 36,0 %
Horário de início dos experimentos	10 h
Radiação solar (G)	720 W/m ² ≤ G ≤ 948 W/m ²
Temperatura ambiente (T _∞)	19 °C ≤ T _∞ ≤ 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. 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 apenas uma bandeja, 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 era realizada no equipamento LabSwift – aw (Figura 3.8).



Figura 3.8 - Medidor de atividade de água LabSwift-aw.

Com relação à 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, valor este recomendado para a estocagem segura do produto. Em seguida eram desligados todos os instrumentos de medida e a bandeja com o material seco era retirada do secador para a remoção do material. 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 para manutenção da umidade e evitar a degradação pela luz.

O recipiente era armazenado em um freezer até a realização das análises de qualidade do material seco.

3.3.1. Pellets Cilíndricos Longos

A *Spirulina platensis* úmida foi colocada no secador em uma única bandeja perfurada, permitindo o escoamento cruzado do ar de secagem, no formato de *pellets* cilíndricos longos, popularmente conhecidos como “espaguetes”. Entretanto, para a obtenção dos *pellets* era necessário descongelar o material que estava armazenado em um freezer. Para tanto, uma porção de 200 g era retirada do freezer e deixada em local livre de luz solar 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, eram feitos utilizando uma seringa de 60 mL (Figura 3.9) 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, como é mostrado na Figura 3.10.



Figura 3.9 - Seringa de 60 mL e bico de 4 mm usada na confecção dos *pellets*.



Figura 3.10 - Pellets cilíndricos longos dispostos sobre a bandeja do secador solar.

A obtenção dos *pellets* seguia os seguintes passos: pesava-se a seringa vazia em balança analítica, enchia-se a seringa com a *Spirulina* úmida, pesava-se a mesma e faziam-se os *pellets*. Cada seringa cheia tinha aproximadamente 50 g de *Spirulina*, com isso repetia-se o procedimento até atingir a carga mássica necessária para cada teste experimental de secagem.

3.3.2. Critério de Parada do Teste de Secagem

O tempo de secagem do material depende da umidade final desejada, estando, portanto, intimamente correlacionada com a atividade de água. Cada material possui uma faixa de atividade de água ideal para o armazenamento, a fim de garantir a estabilidade e a qualidade do material seco durante todo o tempo de prateleira do produto.

A atividade de água (a_w) é uma medida da quantidade de água livre ou disponível para o crescimento de microorganismos e reações de deterioração, cuja definição é dada pela relação entre a pressão parcial de vapor de água e a pressão de vapor de saturação à mesma temperatura (DITCHFIELD, 2000).

Segundo a literatura especializada, a faixa de atividade de água ideal para o armazenamento da *Spirulina platensis* seca seria entre 0,3 e 0,6, seguindo o mesmo critério de conservação para alimentos em geral. (FELLOWS, 2000). Os substratos com atividade de água inferior a 0,6 impedem o crescimento microbiano (GARCIA, 2004).

Através de alguns testes preliminares de secagem realizados em estufa, determinou-se uma curva de umidade do sólido em função da atividade de água, como pode ser visto na Figura 3.11. Notou-se que para uma atividade de água de 0,5, a umidade do sólido era de aproximadamente 13%. A curva que correlaciona atividade de água e umidade em base úmida da *Spirulina* é dada pela Equação 3.1 com coeficiente de correlação R^2 de 0,9593.

$$M_F(\%) = 1,9369 e^{3,8219 a_w} \quad (3.1)$$

Considerando que a umidade inicial da *Spirulina platensis* era de $83,32\% \pm 1,61\%$, convencionou-se que um decréscimo de umidade da biomassa de $72,24\% \pm 2,34\%$ durante a secagem já seria capaz de atender às condições de armazenamento.

Portanto, o critério de parada para os testes experimentais de secagem era promover um decréscimo de umidade do sólido de 73%, garantindo assim uma atividade de água de aproximadamente 0,5.

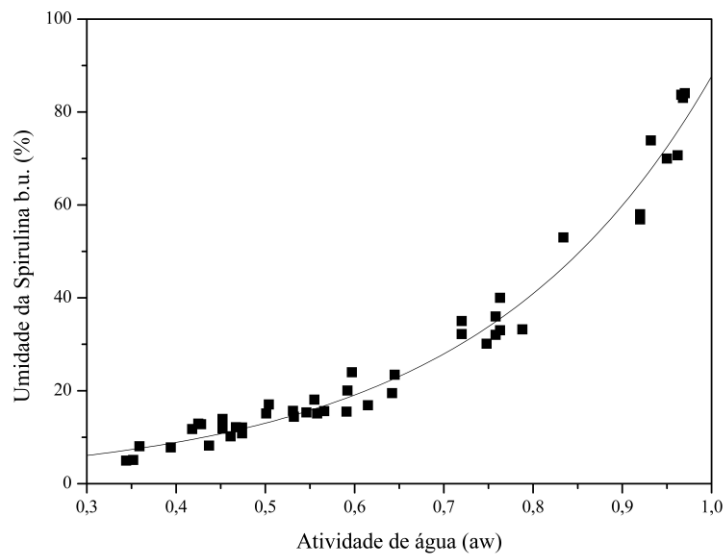


Figura 3.11 - Gráfico de umidade da *Spirulina platensis* em função da atividade de água.

3.3.3. 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. Além disso, 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. Dentre os diversos modelos disponíveis na literatura podem ser citados os modelos de Brunauer, Emmett e Teller (BET) e de Guggenheim, Anderson e Boer (GAB). Neste trabalho, a umidade de equilíbrio da *Spirulina platensis* foi calculada utilizando os modelos de BET e GAB cujos parâmetros foram estimados para a *Spirulina* por OLIVEIRA *et al.* (2009b), 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 3.2.

$$\ln P_{\text{sat,vap}} = \frac{-5800,22}{T} + 1,39 - 4,86 \cdot 10^{-2}T + 4,18 \cdot 10^{-5}T^2 - 1,44 \cdot 10^{-8}T^3 + 6,55 \ln T \quad (3.2)$$

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 3.3.

$$UA_{\text{amb}} = \frac{0,622 \frac{U_R}{100} P_{\text{sat,vap}}}{P_{\text{atm}} - \frac{U_R}{100} P_{\text{sat,vap}}} \quad (3.3)$$

Os valores de umidade relativa do ar em base seca podem ser convertidos em atividade de água por meio da Equação 3.4.

$$a_w = UA_{\text{amb}} \quad (3.4)$$

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 os modelos de GAB e BET, mostrados pelas Equações 3.5 e 3.6, respectivamente, calculou-se a Umidade de Equilíbrio (M_{eq}) da *Spirulina platensis* em base seca (OLIVEIRA *et al.*, 2009b).

$$M_{\text{eq}} = \frac{M_m C_G k a_w}{(1 - k a_w)(1 - k a_w + C_G k a_w)} \quad (3.5)$$

$$M_{\text{eq}} = \frac{M_m C_B a_w}{(1 - a_w)(1 - a_w + C_B a_w)} \quad (3.6)$$

Os valores dos parâmetros M_m , C_G , k e C_B foram consultados no trabalho de OLIVEIRA *et al.* (2009b) 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 os dois modelos citados anteriormente, no entanto, foram escolhidos os valores provenientes do modelo de GAB, por se ajustarem melhor aos dados e ter uma faixa de abrangência maior (TIMMERMANN *et al.*, 2001).

3.3.4. Adimensional de Umidade (MR)

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 de acordo com a Equação 3.7.

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (3.7)$$

Em que M_0 é a umidade inicial, M_{eq} é a umidade de equilíbrio e M é a umidade em um tempo qualquer.

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 3.8 a 3.12, foi feita com base nos maiores coeficientes de correlação quadráticos (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 3.4 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 3.4 - Modelos cinéticos de secagem.

Modelo Cinético	Referência	Equação
$MR = \exp(-k t)$	LEWIS (1921)	3.8
$MR = \exp(-k t^n)$	PAGE (1949)	3.9
$MR = \exp(-(k t)^n)$	OVERHULTS <i>et al.</i> (1973)	3.10
$MR = A \exp(-k t)$	BROOKER <i>et al.</i> (1974)	3.11
$MR = A \exp(-k t) + \frac{1}{9} \exp(-k t)$	HENDERSON e HENDERSON (1968)	3.12

3.4. Considerações Finais acerca do Secador Solar Construído

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) para contabilizar a parcela da radiação solar que efetivamente foi empregada para aquecer o ar de secagem, conforme sugere a Equação 3.13. Nela, a densidade (ρ) e o calor específico do ar (c_p) são estimados na temperatura média entre a entrada e a saída do coletor solar.

$$\eta = \frac{\rho Q c_p \Delta T}{G A} \quad (3.13)$$

Do mesmo modo que o parâmetro η , também foi proposto um número adimensional N que visou englobar os principais fatores relevantes do secador solar. A este novo adimensional foi dado a nomenclatura de Adimensional de Secagem.

Para a convecção forçada, o adimensional N correlacionou o tempo de secagem (t), a carga mássica (C), a radiação solar incidente (G) e a vazão volumétrica de ar (Q), como pode ser visto na Equação 3.14.

$$N = \frac{t}{Q^{\frac{2}{7}}} \left(\frac{G}{C} \right)^{\frac{3}{7}} \quad (3.14)$$

Já para a convecção natural, o adimensional N correlacionou as mesmas variáveis anteriores, exceto a vazão volumétrica de ar (Q) que foi substituída pela variação de densidade do fluido ($\Delta\rho$), como pode ser visto na Equação 3.15.

$$N = \frac{t}{C} [G \Delta\rho^2]^{\frac{1}{3}} \quad (3.15)$$

Em que $\Delta\rho$ para gases ideais pode ser dado pela Equação 3.16, na qual T_E representa a temperatura do ar na entrada da câmara de secagem.

$$\Delta\rho = \frac{PM}{R} \left[\frac{1}{T_{\infty}} - \frac{1}{T_E} \right] \quad (3.16)$$

3.5. Análise da *Spirulina platensis* Seca

Após os testes de secagem, a *Spirulina platensis* seca era encaminhada para a etapa de análise da qualidade que consistia em determinar a umidade, o teor de fenólicos totais (TPC), o teor de flavonoides totais (TFC), a acidez total titulável (ATT) e o teor de ficocianina (TF).

Todos os compostos bioativos anteriormente citados possuem propriedades antioxidantes.

Antes de qualquer análise, o material era triturado para garantir a uniformidade das partículas e aumentar a superfície de contato com os reagentes. O teor de umidade foi determinado através do método da estufa a 105°C por 24 h (AOAC, 1995).

O teor de fenólicos totais foi determinado pelo método de Folin-Ciocalteu, utilizando ácido gálico (C₇H₆O₅) como padrão de acordo com SINGLETON; ROSSI (1965) e leitura em espectrofotômetro a 622 nm e os resultados expressos em miligramas de ácido gálico por 100 gramas de amostra em base seca.

O reagente de Folin-Ciocalteu é uma solução de íons complexos poliméricos responsável por oxidar os fenolatos, reduzindo os ácidos a um complexo azul Mo-W, permitindo sua leitura no espectrofotômetro (SILVA, 2014).

O teor de flavonoides totais foi determinado pelo método colorimétrico com leitura em espectrofotômetro a 450 nm (ZHISHEN *et al.*, 1999). Esse método utiliza cloreto de alumínio (AlCl₃) como agente de deslocamento para diminuir a interferência dos outros compostos na leitura da absorbância. Além disso, a rutina (C₂₇H₃₀O₁₆) foi utilizada como padrão para a obtenção da curva de calibração e, com isso, os resultados foram expressos em miligrama de rutina por 100 gramas de amostra em base seca.

A extração e quantificação do teor de ficocianina foi feita de acordo com o trabalho de MORAES *et al.* (2010) em que água era empregada como solvente extrator devido à solubilidade da ficocianina em meio aquoso. O procedimento foi adaptado a partir de COSTA *et al.* (2016) em que se pesava 0,5 g de *Spirulina*, macerando-a por 5 min com adição de 250 mL de água. Ao término da maceração era feita a leitura da absorbância da solução a 620 e 652 nm. Por fim, o teor de ficocianina foi dado pela absorbância da ficocianina a 620 nm e da

aloficocianina, que é uma outra ficobiliproteína de coloração azul, a 652 nm. Esses valores eram correlacionados através da Equação 3.17 proposta por BENNETT e BOGORAD (1973).

$$PC = \frac{OD_{620} - 0,474 OD_{652}}{5,34} \quad (3.17)$$

Em que PC é o teor de ficocianina (mg/mL), OD_{620} é a absorbância a 620 nm e OD_{652} é a absorbância a 652 nm. Entretanto, o resultado final do teor de ficocianina é dado em gramas de ficocianina para cada 100 gramas de amostra seca.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O principal objetivo da secagem é a remoção da umidade para aumentar a vida útil do alimento e mantê-lo armazenado por mais tempo. A *Spirulina platensis* possui alta umidade *in natura*, até mesmo pelo seu cultivo em meio aquático, e por isso necessita de um procedimento de secagem adequado para preservar suas propriedades sensoriais e nutricionais.

Durante a secagem, notaram-se problemas como a alta aderência a qualquer superfície, material extremamente perecível e impossibilidade de recongelamento. Entretanto, é um material facilmente removido com água de qualquer recipiente ou superfície.

Observou-se ainda que a *Spirulina platensis* apresentou um encolhimento, mais nítido na direção radial, e a formação de uma camada externa rígida nos *pellets* cilíndricos (“espaguete”), que provavelmente dificulta a difusão da água do interior do *pellet* para a superfície, controlando a velocidade de secagem e deixando-a mais lenta.

O encolhimento e a camada externa rígida, também chamada de efeito vítreo, foram reportados na literatura por DESMORIEUX *et al.* (2010) e DISSA *et al.* (2010). O efeito vítreo causa um enrijecimento que contrabalança as forças capilares e reduz o encolhimento, além de causar a formação de poros e rachaduras.

4.1. 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 os modelos de BET e GAB (vide APÊNDICE B), com os parâmetros estimados por OLIVEIRA *et al.* (2009 b) a partir dos dados de equilíbrio da *Spirulina platensis*, no entanto, GAB é tido como um modelo mais abrangente e que melhor correlaciona os dados (OLIVEIRA *et al.*, 2009 b) e por isso seu resultado foi adotado neste trabalho.

A umidade de equilíbrio (M_{eq}) apresentou um valor médio de $0,05 \pm 0,01$ e os valores de cada teste estão na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valores de umidade de equilíbrio da *Spirulina platensis* para cada teste de secagem.

Testes	U _R (%)	T _E (°C)	M _m	C _G	k	P _{sat} (Pa)	U _{A amb}	a _w	M _{eq}
LC1	34,4	43,6	0,122	49,06	0,954	9284,6	0,020	0,020	0,06
LC2	34,8	47,3	0,115	42,33	0,949	11227,5	0,025	0,025	0,06
LC3	27,2	47,7	0,114	41,60	0,948	11457,0	0,020	0,020	0,05
Q1C1	16,3	53,1	0,097	36,73	0,945	14974,4	0,015	0,015	0,03
Q1C2	23,0	47,6	0,115	41,79	0,948	11399,3	0,017	0,017	0,05
Q1C3	35,1	48,7	0,112	39,78	0,947	12048,7	0,027	0,027	0,06
Q2C1	30,1	44,8	0,120	46,88	0,952	9880,2	0,019	0,019	0,06
Q2C2	29,8	45,4	0,119	45,79	0,951	10190,1	0,019	0,019	0,06
Q2C3	31,4	46,3	0,117	44,15	0,950	10670,7	0,021	0,021	0,06
Q3C1	19,6	44,1	0,121	48,15	0,953	9528,9	0,012	0,012	0,04
Q3C2	20,0	44,1	0,121	48,15	0,953	9528,9	0,012	0,012	0,04
Q3C3	33,3	42,7	0,124	50,70	0,955	8858,5	0,019	0,019	0,06

Após a determinação da umidade de equilíbrio (M_{eq}), calculou-se o adimensional de umidade (MR) para cada experimento de secagem (APÊNDICE C). 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 com convecção natural, todos os modelos cinéticos apresentaram elevados coeficientes de correlação (R^2), iguais a 0,9898. Para os testes com convecção forçada, o modelo cinético de Page apresentou coeficientes de correlação (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 ($R^2 = 0,9751$). Maiores detalhes estão dispostos no APÊNDICE D.

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 (APÊNDICE E). 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 com convecção forçada e com convecção natural são mostradas nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente.

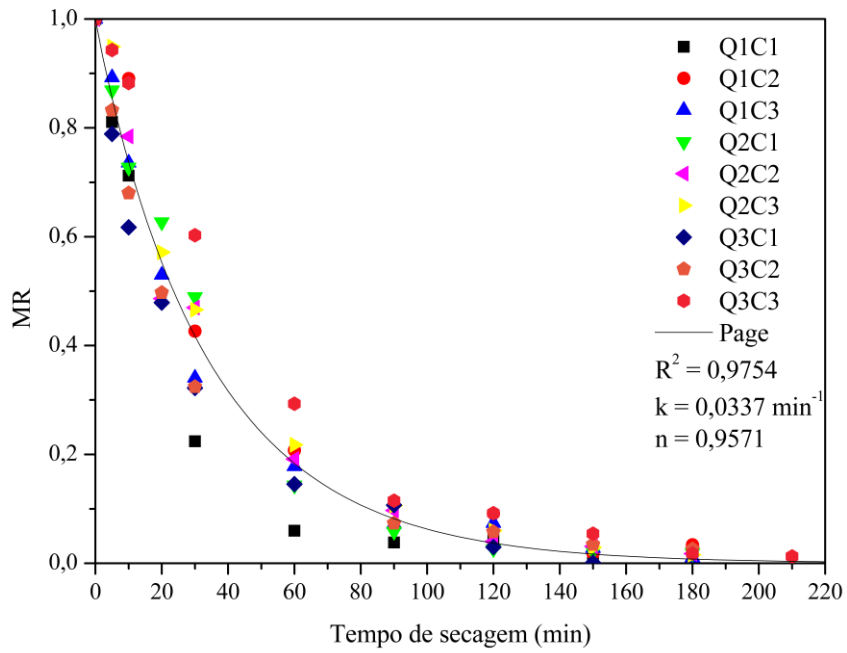


Figura 4.1 – Cinética de secagem para experimentos com convecção forçada.

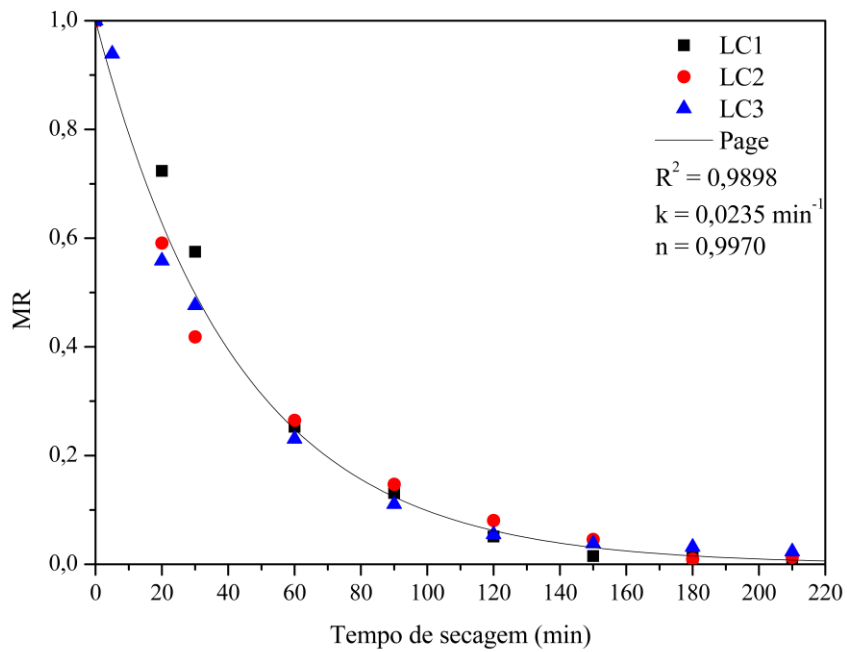


Figura 4.2 – Cinética de secagem para experimentos com convecção natural.

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 cerca de 43% maior em relação à convecção natural. 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. Comparando-se os tempos médios de secagem, o tempo para convecção natural foi 15,23% maior que para forçada. Entretanto vale a pena destacar que as condições afetam a cinética de secagem.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 foi possível observar uma queda acentuada da umidade nos primeiros 10 min onde 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 nas Figuras 4.1 e 4.2.

4.2. Desempenho do Secador Solar

O desempenho do secador solar foi analisado por meio da influência da vazão volumétrica de ar, da carga mássica de *Spirulina platensis*, da variação de temperatura do ar de secagem, da eficiência térmica do coletor e do adimensional de secagem (N).

O adimensional de secagem N correlacionou as variáveis manipuladas, carga mássica de *Spirulina platensis* e vazão volumétrica de ar, as variáveis monitoradas (APÊNDICE F), radiação solar incidente e variação de temperatura do ar de secagem e a variável resposta, tempo de secagem.

Nas Tabelas 4.2 e 4.3 são apresentados os valores das variáveis que influenciaram no desempenho do secador solar em cada condição experimental, respectivamente para os ensaios com convecção natural e forçada, respectivamente.

Tabela 4.2 - Resultados de secagem para os experimentos com convecção natural.

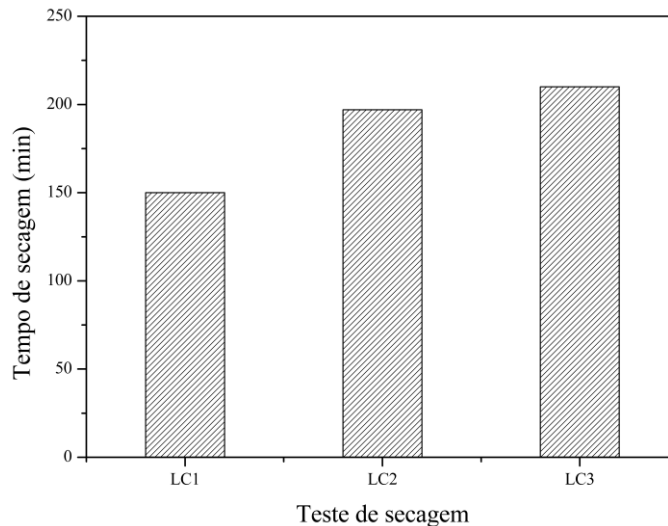
Testes	G (W/m ²)	U _R (%)	M _I (%)	ΔM (%)	M _F (%)	ΔT (°C)	t(min)	N
LC1	937	34,4	85,92	73,56	12,36	17,7	150	43153
LC2	933	34,8	84,28	74,78	9,50	21,6	197	39573
LC3	822	23,5	84,17	70,80	12,92	19,8	210	33353

Tabela 4.3 - Resultados de secagem para os experimentos com convecção forçada.

Testes	G(W/m ²)	U _R (%)	M _I (%)	ΔM(%)	M _F (%)	ΔT(°C)	t(min)	N
Q1C1	948	16,3	84,09	74,32	9,77	21,4	120	573855
Q1C2	893	23,0	84,98	75,30	9,68	20,0	147	575899
Q1C3	807	35,1	84,16	74,34	9,82	20,4	163	540535
Q2C1	720	30,1	82,93	72,74	10,19	15,3	150	575164
Q2C2	905	29,8	81,71	68,86	12,85	17,2	150	533198
Q2C3	888	31,4	80,78	71,38	9,40	16,0	180	561041
Q3C1	901	19,6	81,23	68,34	12,89	14,7	150	558494
Q3C2	826	20,0	83,77	70,15	12,79	13,8	180	542694
Q3C3	854	24,8	81,79	72,37	9,42	12,0	210	564856

Os testes de secagem mostraram um decréscimo médio de umidade do material de 72,24 % ± 2,34%, confirmando a eficácia do processo de secagem solar empregado.

A Figura 4.3 mostra o tempo de secagem para os testes de secagem submetidos a convecção natural.

**Figura 4.3** -Tempo de secagem para os testes com convecção natural.

O aumento do tempo de secagem foi proporcional à carga mássica alimentada no secador. O tempo de secagem foi 40% maior para a carga mássica C3 que é o dobro de C1. Na Figura 4.4 tem-se o tempo de secagem para os experimentos submetidos a convecção forçada.

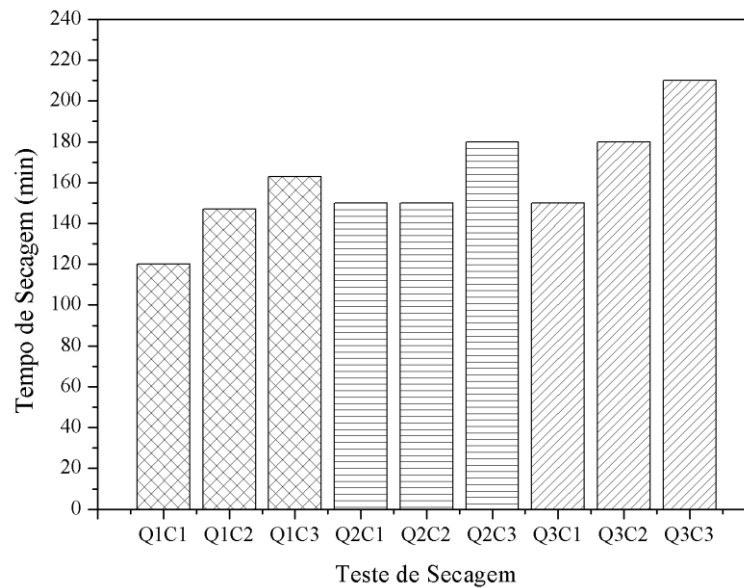


Figura 4.4 - Tempo de secagem para os testes com convecção forçada.

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 4.1 correlacionou o tempo de secagem com a carga mássica e a vazão volumétrica de fluido de secagem por meio de uma regressão múltipla (APÊNDICE H). O coeficiente de correlação quadrático médio (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 4.5 foi possível observar o comportamento diretamente proporcional do tempo em função da carga mássica e da vazão volumétrica.

$$t = 2,7251 + 0,3050 \left(\frac{Q - 195,08}{83,35} \right) + 0,3782 \left(\frac{C - 0,4618}{0,1539} \right) \quad (4.1)$$

Dentre os testes realizados sob convecção forçada, a condição operacional 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.

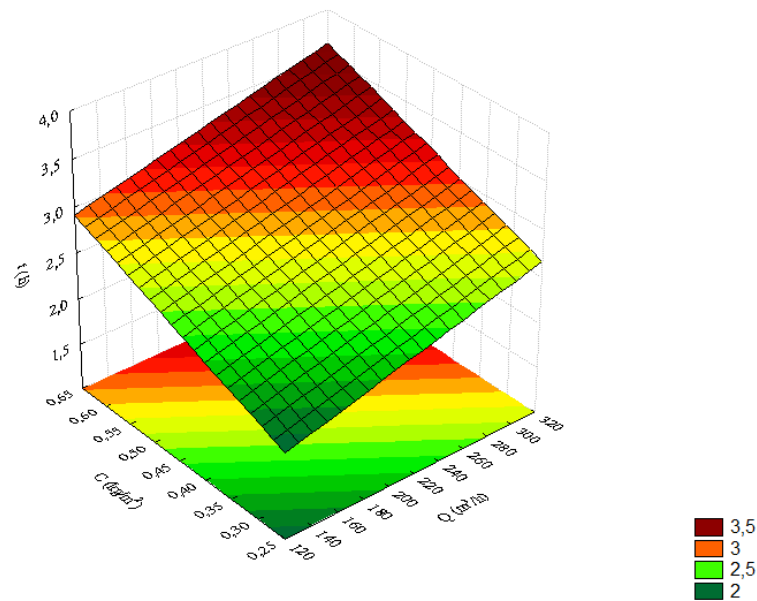


Figura 4.5 -Comportamento do tempo de secagem em função da carga mássica de *Spirulina platensis* e da vazão volumétrica de ar de secagem para testes com convecção forçada.

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 4.6 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.

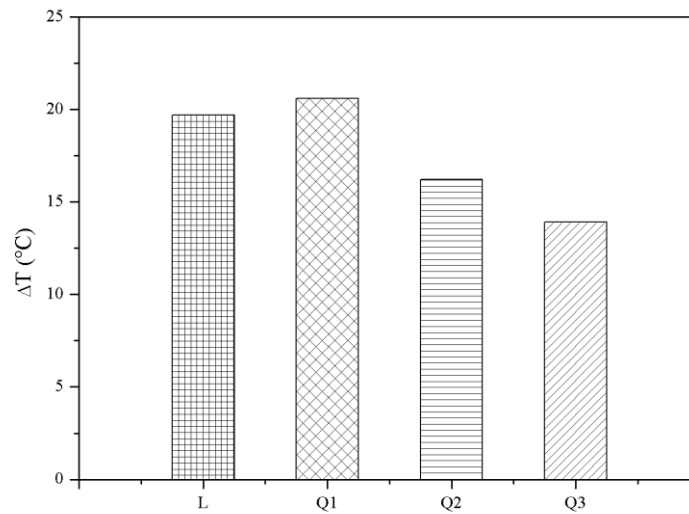


Figura 4.6- Variação de temperatura do ar de secagem entre a entrada e saída do coletor solar.

Outra constatação foi que a variação térmica do ar de secagem para a convecção natural foi praticamente igual ao observado para a menor vazão (Q1).

O adimensional de secagem N mostrou um comportamento inversamente proporcional ao aumento da carga mássica para os testes com convecção natural, conforme ilustrado na Figura 4.7.

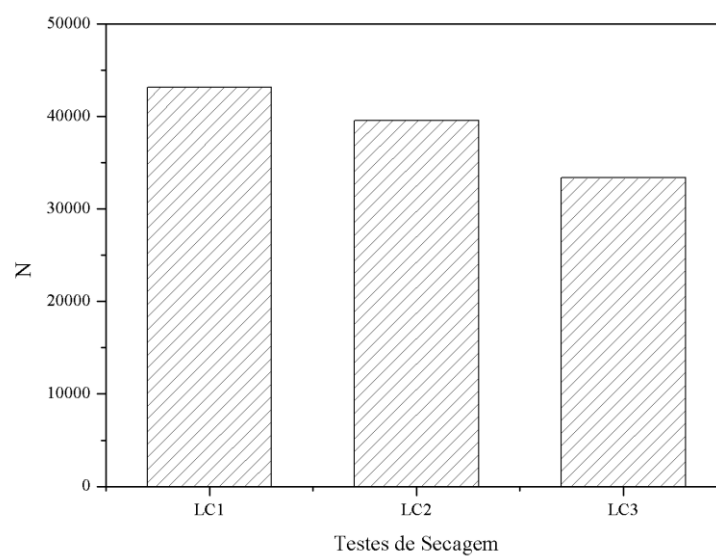


Figura 4.7 – Adimensional de secagem (N) para testes com convecção natural.

Analisou-se também o adimensional N em função do tempo de secagem na forma de uma equação linear, Equação 4.2, e obteve-se um coeficiente de correlação quadrático médio (R^2) igual a 0,7945. O aumento do tempo de secagem implica em uma redução do adimensional N para condição de convecção natural.

$$N = -140,03 t + 64692,54 \quad (4.2)$$

Para a convecção forçada, o adimensional N permaneceu praticamente constante em todas as condições analisadas, conforme mostra a Figura 4.8, com um valor médio de $558737 \pm 2,9\%$.

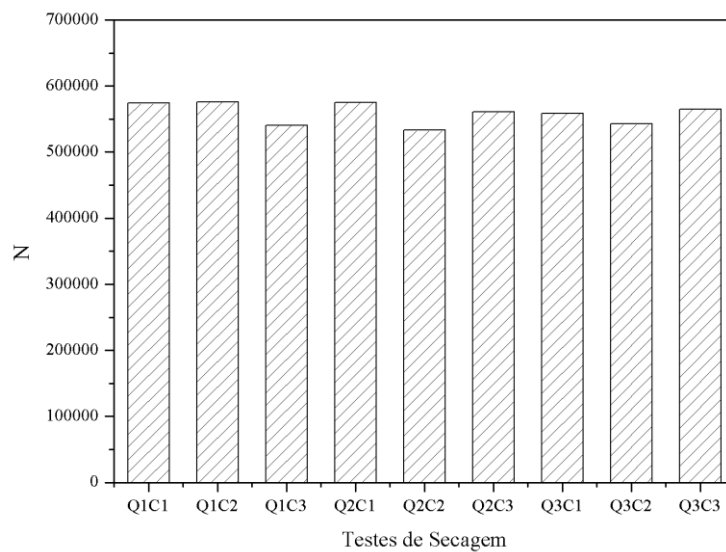


Figura 4.8 – Adimensional de secagem (N) para testes com convecção forçada.

A pequena variabilidade do Adimensional de Secagem (N) para a convecção forçada, pode mostrar-se interessante, pois essa grandeza poderia ser usada como um fator de *scale-up*, em que a combinação das diversas variáveis envolvidas no processo manteria um desempenho satisfatório do secador solar.

Outra aplicabilidade seria a possibilidade de prever o tempo de secagem, a carga mássica ou a vazão volumétrica de ar a partir da arbitragem prévia de pelo menos duas destas condições operacionais.

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.

4.3. Compostos Bioativos da *Spirulina platensis* Seca

A *Spirulina platensis* foi analisada *in natura* para determinar os teores de bioativos, como fenólicos, flavonoides e ficocianina. Esses valores foram usados como padrão, a fim de verificar a manutenção das propriedades nutricionais e sensoriais da *Spirulina platensis* após os ensaios de secagem no secador solar. Os resultados estão listados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Caracterização da *Spirulina platensis in natura*.

<i>Spirulina platensis in natura</i>	
Umidade	83,32 % \pm 1,61 %
Teor de Fenólicos Totais	252,39 \pm 13,76 mg de ácido gálico / 100 g de amostra seca
Teor de Flavonoides Totais	4,83 \pm 0,25 mg de rutina / 100 g de amostra seca
Teor de Ficocianina	8,75 \pm 0,51 g de ficocianina / 100 g de amostra seca

4.3.1. Teor de Fenólicos Totais

O teor de fenólicos totais (TPC) foi determinado para cada teste experimental de secagem (APÊNDICE G) e os resultados foram agrupados pelo tipo de convecção, sendo que os valores para os testes com convecção natural estão na Figura 4.9.

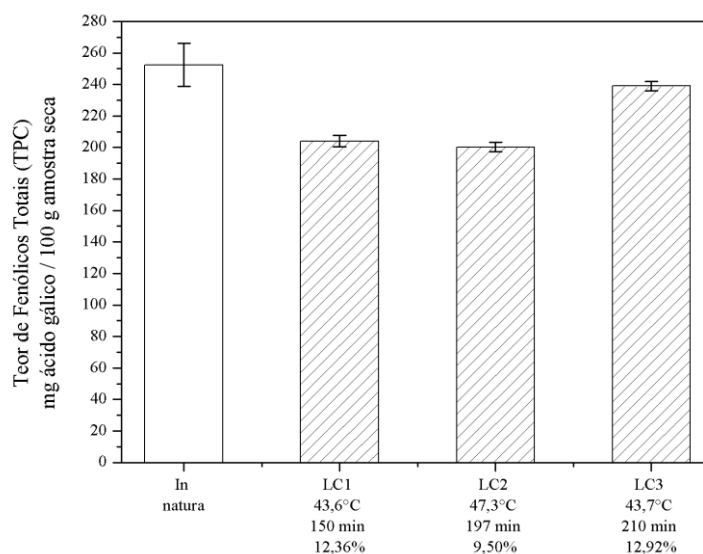


Figura 4.9 - Teor de Fenólicos Totais para os testes de secagem com convecção natural.

Os teores de fenólicos variaram entre 200,19 e 239,02 mg de ácido gálico/100 g de amostra seca. Constata-se assim, valores muito próximos entre os teores de fenólicos antes e após a secagem. Entretanto, foi possível notar uma pequena degradação do teor de fenólicos da *Spirulina platensis* seca em relação ao teor *in natura* em todos os testes experimentais, e essa degradação média foi de 15,05%. Sendo que a condição que proporcionou a menor diminuição do teor dos compostos bioativos foi a LC3. Essa degradação foi térmica e esse mesmo comportamento pôde ser observado no trabalho de NOGUEIRA (2016).

Os teores de fenólicos totais para convecção forçada estão na Figura 4.10. Pode ser observado uma degradação térmica dos teores de fenólicos em todos os testes, com uma diminuição média de 27,24 % em relação ao valor *in natura*. Essa mesmo comportamento foi reportado por NOGUEIRA (2016).

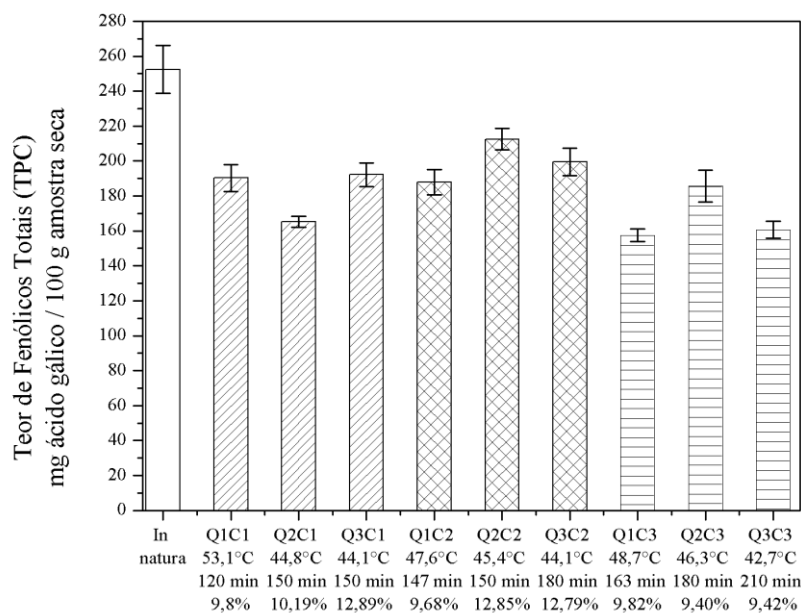


Figura 4.10 - Teor de Fenólicos Totais para os testes de secagem com convecção forçada.

Os teores de fenólicos variaram entre 157,42 e 212,86 mg de ácido gálico/100 g de amostra seca. Além disso, foi feita uma análise estatística dos dados por meio do quadro de ANOVA e concluiu-se que todos os testes apresentaram valores estatisticamente iguais ($p > 0,10$) e que a degradação não foi influenciada nem pela vazão volumétrica de ar e nem pela carga mássica. Maiores detalhes no APÊNDICE H.

Segundo VASCO (2009), compostos com teor de fenólicos totais (TPC) acima de 1000 mg de ácido gálico em 100 g de amostra seca são considerados compostos de alta concentração.

Compostos com teor entre 100 e 1000 mg de ácido gálico são de concentração intermediária e compostos com teor abaixo de 100 mg são considerados de baixa concentração. Sendo assim, conclui-se que a *Spirulina platensis* é um composto com concentração intermediária de compostos fenólicos, tanto *in natura* quanto seca e que é possível secar esta microalga no secador solar proposto neste trabalho e manter este composto bioativo em concentrações adequadas.

4.3.2. Teor de Flavonoides Totais

O teor de flavonoides totais (TFC) foi analisado de acordo com a convecção empregada durante a secagem e está disponível no APÊNDICE G. Para os experimentos com convecção natural, os valores estão mostrados na Figura 4.11.

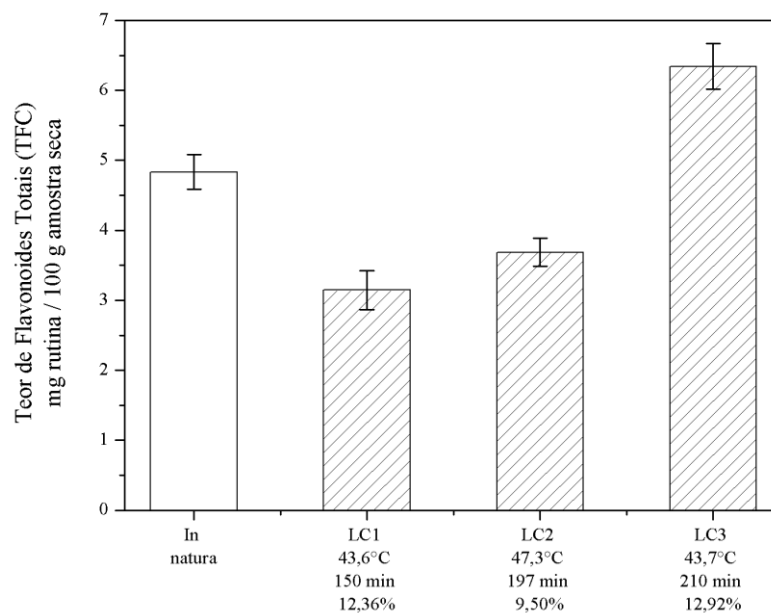


Figura 4.11 - Teor de Flavonoides Totais para os testes com convecção natural.

Os teores de flavonoides variaram entre 3,14 e 6,34 mg de rutina/100 g de amostra seca. Eles aumentaram juntamente com o aumento da carga no secador, entretanto, esse aumento também tem relação com o tempo de secagem, ou seja, para maiores tempos, tem-se maiores teores de flavonoides, chegando inclusive a superar o teor *in natura* como é o caso em LC3 (31,26%). Esse teor superior ao *in natura* pode ser explicado pela presença de melanoidinas,

provenientes da reação de Maillard (VEGA-GÁLVEZ et al., 2009) e pela inibição de enzimas que degradam os compostos bioativos (BORTOLOTTI, 2012).

Já os valores para os testes com convecção forçada estão disponíveis na Figura 4.12, inclusive, com o valor para a *Spirulina platensis in natura*.

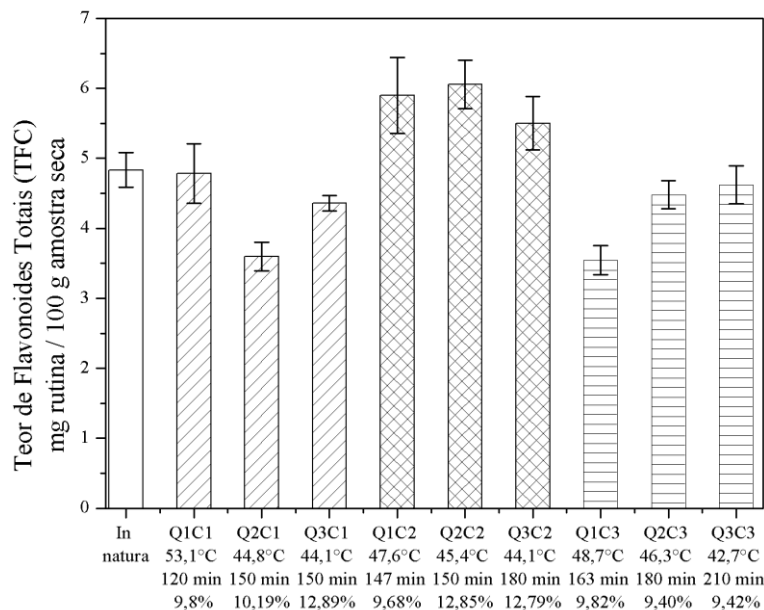


Figura 4.12 -Teor de Flavonoides Totais para os testes de secagem com convecção forçada.

Os teores de flavonoides permaneceram entre 3,54 e 6,05 mg de rutina/100 g de amostra seca. Foi feita uma análise de variância global destes resultados (ANOVA), que mostraram independência estatística com relação à vazão volumétrica de ar ($p > 0,10$) e uma dependência quadrática com relação à carga mássica ($p < 0,10$).

Assim, o teor de flavonoides totais foi influenciado pela carga mássica e a condição mais favorável foi a carga intermediária (C2) com os maiores teores, inclusive superiores ao teor *in natura*, em média 20,44% (APÊNDICE H). Esse aumento do teor de flavonoides totais foi observado nos trabalhos de BORTOLOTTI (2012), SILVA (2014), SILVA (2015a) e SILVA (2015b) e é devido a presença de melanoidinas (reação de Maillard) e a inativação de enzimas que degradam os compostos antioxidantes. No entanto, alguns experimentos apresentaram teores pouco inferiores ao *in natura* devido a uma possível e pequena degradação térmica (NOGUEIRA, 2016).

De uma maneira geral é possível concluir que a secagem da *Spirulina platensis* no secador solar desenvolvido neste trabalho, na maioria das condições utilizadas, manteve o produto final com níveis elevados de flavonoides. Isto é um resultado importante, tendo em vista o aproveitamento desta microalga como fonte alimentícia.

4.3.3. Teor de Ficocianina

Os teores de ficocianina para os testes de secagem estão listados no APÊNDICE G. A Figura 4.13 mostra o teor de ficocianina para os experimentos submetidos à convecção natural.

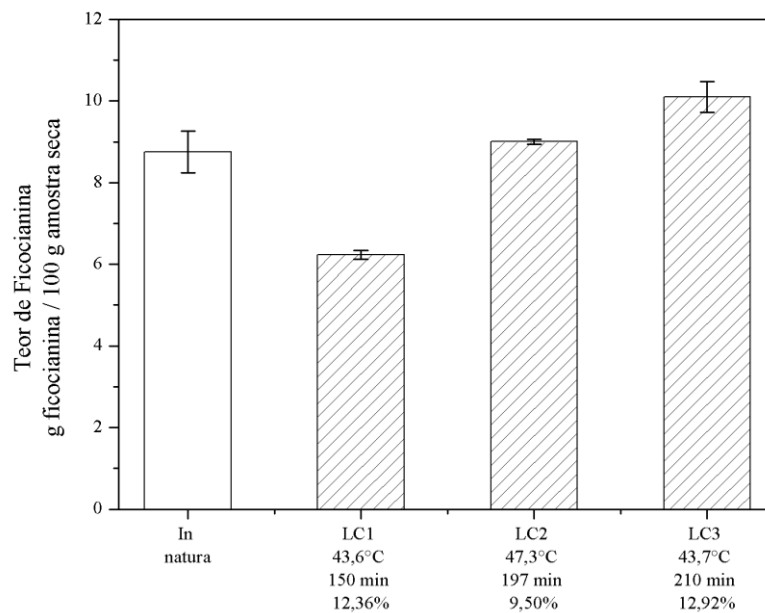


Figura 4.13 - Teor de Ficocianina para os testes com convecção natural.

Os teores de ficocianina variaram entre 6,24 e 10,10 g de ficocianina/100 g de amostra seca. Notou-se que o aumento da carga mássica foi acompanhado de um aumento no teor de ficocianina e que o LC1 apresentou um teor de ficocianina menor que o *in natura*. Logo, um maior tempo de secagem favoreceu o teor de ficocianina, como mostrado em LC2 e LC3, que foram, em média, 9,14% superiores ao *in natura*.

Os teores de ficocianina para os testes de secagem com convecção forçada são mostrados na Figura 4.14.

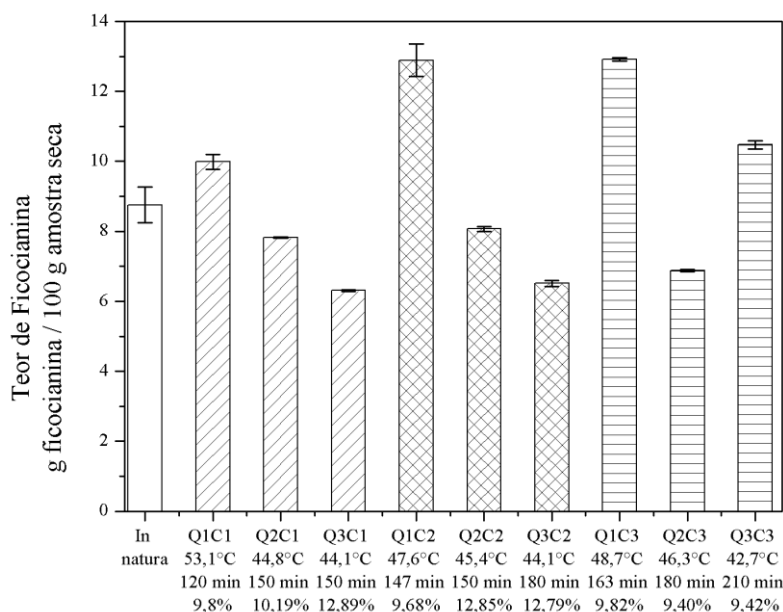


Figura 4.14 - Teor de ficocianina para os testes de secagem com convecção forçada.

Os teores de ficocianina variaram entre 6,31 e 12,92 g de ficocianina/100 g de amostra seca. Foram analisados estatisticamente através do quadro de ANOVA que mostrou a independência da carga mássica ($p > 0,10$) e comprovou, significativamente, a influência linear e quadrática da vazão volumétrica de ar ($p < 0,10$). Maiores informações disponíveis no APÊNDICE H.

Notou-se que mantendo a carga mássica constante e variando a vazão volumétrica de ar, o teor de ficocianina foi, em média, 36,32% maior que o teor *in natura* para a mínima vazão (Q1), mostrando-se como a melhor condição experimental. No entanto, o teor de ficocianina foi diminuindo com o aumento da vazão, sendo que para as vazões intermediária (Q2) e máxima (Q3) o teor ficou abaixo do *in natura*. Já o experimento (Q3C3) foi favorecido por um maior tempo de secagem e apresentou um teor também superior ao *in natura*.

Além disso, para a menor vazão (Q1) tem-se as maiores temperaturas e os menores tempos de secagem e, conseqüentemente, foram os maiores teores de ficocianina, evidenciando que o aumento da temperatura favorece a inibição de enzimas que degradam os compostos bioativos, como a ficocianina (DORTA *et al.*, 2012).

Finalmente, em geral os testes com menor umidade final (M_F) apresentaram teores maiores de ficocianina, ou seja, a ficocianina foi favorecida pela baixa umidade, no entanto não se pode esquecer das influências das outras variáveis.

5. CONCLUSÕES

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

A secagem solar foi um procedimento satisfatório para a *Spirulina platensis*, pois realizou a secagem em um curto prazo e preservou as suas propriedades, principalmente, com relação aos bioativos.

A secagem com convecção natural foi estudada e apresentou tempos de secagem maiores quando comparados com a convecção forçada. O tempo médio de secagem sob convecção natural foi 15,23% maior que sob convecção forçada.

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 a 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.

O adimensional de secagem (N) apresentou um valor decrescente para a convecção natural, conforme aumentou-se a carga, e manteve-se constante para a convecção forçada, em torno de $558737 \pm 2,9 \%$.

A eficiência térmica média do coletor solar foi de 8,77%.

Notou-se uma pequena degradação no teor de fenólicos totais de 15,5 % para convecção natural e 27,24% para forçada. Essa degradação foi devido à combinação das influências de temperatura de secagem, tempo de secagem e umidade final. Apesar dessa pequena degradação, a *Spirulina platensis* ao final da secagem foi mantida com concentração intermediária de compostos fenólicos (TPC entre 100 e 100 mg de ácido gálico por 100 g de massa seca), como era antes da secagem.

O teor de flavonoides foi influenciado pela carga mássica na convecção forçada, mostrando que a carga intermediária C2 apresentou os melhores teores de flavonoides totais (TFC), inclusive acima do teor *in natura*. O teor médio foi 20,44% maior que o teor *in natura*.

O teor de ficocianina foi influenciado pela vazão volumétrica do ar e os melhores valores são obtidos para a mínima vazão volumétrica. Esses teores foram, em média, 36,32% superiores ao *in natura*. Diante disso, mesmo após a secagem, o teor de ficocianina permaneceu em níveis elevados, mostrando que a técnica usada foi adequada para a desidratação desta microalga, mantendo em níveis elevados os compostos mais relevantes.

Em resumo, o melhor teste dentre os realizados sob estas condições específicas, ou seja, aquele que concilia os melhores aspectos de todos os itens analisados neste presente trabalho foi o que combinou a mínima vazão com a carga intermediária. Seu tempo de secagem foi de 147 min com carga mássica intermediária e menor vazão volumétrica de ar. Favoreceu o teor de fenólicos e flavonoides, pois os testes com carga intermediária mostraram maiores teores para ambos e a vazão mínima foi a que apresentou os maiores teores de ficocianina.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com as principais observações experimentais decorrentes dessa dissertação de mestrado, são propostas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Instalação de um medidor de velocidade do ar (rotâmetro ou anemômetro de hélice remota) entre o coletor solar e a câmara de secagem;
- Desidratação de outros materiais pela metodologia estudada neste trabalho;

- Análise do teor de proteína da *Spirulina platensis*;
- Realização da secagem variando o número de bandejas dentro do secador;
- Instalação de um pré-aquecedor no coletor solar;
- Aplicação das técnicas de CFD para detalhamento do escoamento e das variações térmicas do fluido ao longo do secador solar;
- Alimentação elétrica do ventilador utilizando uma placa fotovoltaica;
- Avaliação da ficocianina através de outros métodos de extração e compará-los com o deste trabalho.

APÊNDICE A

RESULTADOS DE MEDIDA DE VAZÃO VOLUMÉTRICA DO AR

Nesta seção têm-se os valores de velocidade de rotação mínima, máxima e intermediária medidos para o ventilador acoplado ao secador solar. Os valores estão listados nas Tabelas A1, A2 e A3, respectivamente.

Tabela A1 – Velocidade mínima de rotação do ventilador.

Velocidade mínima de rotação do ventilador (m/s)		
2,24	2,36	2,01
2,27	2,45	2,11
2,22	2,49	2,08
2,20	2,32	2,03
2,22	2,38	2,00
2,26	2,37	1,98
2,24	2,34	1,98
2,25	2,29	2,00
2,20	2,36	2,02
2,25	2,31	2,04
2,27	2,40	2,00
2,26	2,46	2,04
2,27	2,31	1,98
2,25	2,36	2,00
2,24	2,40	2,02
2,27	2,40	2,04
2,25	2,36	2,00
2,24	2,35	2,03
2,27	2,28	1,99
2,25	2,36	2,04

Tabela A2 – Velocidade máxima de rotação do ventilador.

Velocidade máxima de rotação do ventilador (m/s)		
4,83	5,37	4,88
4,86	5,36	4,93
4,85	5,43	4,87
4,88	5,42	4,77
4,86	5,40	4,83
4,85	5,33	4,82
4,84	5,42	4,89
4,87	5,41	4,91
4,83	5,40	4,81
4,89	5,44	4,94
4,84	5,41	4,89
4,85	5,38	4,97
4,84	5,38	4,85
4,86	5,39	4,89
4,86	5,37	4,87
4,85	5,35	4,92
4,86	5,37	4,85
4,87	5,36	4,89
4,84	5,38	4,93
4,85	5,35	4,86

Tabela A3 – Velocidade intermediária de rotação do ventilador.
 Velocidade intermediária de rotação do ventilador (m/s)

3,24	3,40	3,26
3,30	3,46	3,23
3,26	3,41	3,25
3,34	3,34	3,29
3,27	3,35	3,33
3,35	3,36	3,27
3,31	3,43	3,30
3,30	3,44	3,34
3,25	3,42	3,24
3,23	3,36	3,21
3,27	3,35	3,27
3,33	3,30	3,21
3,31	3,31	3,28
3,21	3,32	3,21
3,30	3,40	3,22
3,28	3,34	3,22
3,19	3,38	3,28
3,20	3,32	3,30
3,24	3,36	3,23
3,22	3,38	3,25

APÊNDICE B

RESULTADOS DO CÁLCULO DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO

Nesta seção têm-se os valores dos parâmetros (Tabela B1) utilizados para o cálculo da umidade de equilíbrio da *Spirulina platensis*, bem como os valores de umidade de equilíbrio pelos modelos de GAB e BET (Tabela B2 e B3).

Tabela B1 - Parâmetros dos modelos de GAB e BET.

Parâmetros		GAB			BET	
Temperatura (°C)	Temperatura (K)	M _m	C _G	k	M _m	C _B
10	283,15	0,082	84,74	0,920	0,080	89,67
20	293,15	0,073	44,71	0,970	0,071	49,75
30	303,15	0,069	17,24	0,920	0,067	16,26
40	313,15	0,129	55,61	0,959	0,122	53,82
50	323,15	0,110	37,42	0,945	0,103	38,68
60	333,15	0,068	35,19	0,944	0,066	24,35

Tabela B2 - Umidade de equilíbrio calculada pelo modelo de GAB.

Teste	U _R (%)	T _E (°C)	T _E (K)	M _m	C _G	k	P _{sat} (Pa)	U _A	a _w	M _{eq}
LC1	34,4	43,6	316,75	0,122	49,06	0,954	9284,61	0,020	0,020	0,061
LC2	34,8	47,3	320,45	0,115	42,33	0,949	11227,45	0,025	0,025	0,060
LC3	23,5	43,7	316,85	0,122	48,88	0,954	9333,03	0,014	0,014	0,049
Q1C1	16,3	53,1	326,25	0,097	36,73	0,945	14974,42	0,015	0,015	0,035
Q1C2	23	47,6	320,75	0,115	41,78	0,948	11399,26	0,017	0,017	0,046
Q1C3	35,1	48,7	321,85	0,112	39,78	0,947	12048,72	0,027	0,027	0,059
Q2C1	30,1	44,8	317,95	0,120	46,88	0,952	9880,20	0,019	0,019	0,056
Q2C2	29,8	45,4	318,55	0,119	45,79	0,951	10190,14	0,019	0,019	0,056
Q2C3	31,4	46,3	319,45	0,117	44,15	0,950	10670,72	0,021	0,021	0,057
Q3C1	19,6	44,1	317,25	0,121	48,15	0,953	9528,90	0,012	0,012	0,043
Q3C2	20	44,1	317,25	0,121	48,15	0,953	9528,90	0,012	0,012	0,044
Q3C3	24,8	39,5	312,65	0,126	53,69	0,957	7476,93	0,012	0,012	0,048

Tabela B3 - Umidade de equilíbrio calculada pelo modelo de BET.

Teste	U_R (%)	T_E (°C)	T_E (K)	M_m	C_B	P_{sat} (Pa)	UA	a_w	M_{eq}
LC1	34,4	43,6	316,75	0,115	48,37	9284,61	0,020	0,020	0,059
LC2	34,8	47,3	320,45	0,108	42,77	11227,45	0,025	0,025	0,058
LC3	23,5	43,7	316,85	0,115	48,22	9333,03	0,014	0,014	0,047
Q1C1	16,3	53,1	326,25	0,091	34,24	14974,42	0,015	0,015	0,032
Q1C2	23	47,6	320,75	0,107	42,31	11399,26	0,017	0,017	0,045
Q1C3	35,1	48,7	321,85	0,105	40,65	12048,72	0,027	0,027	0,058
Q2C1	30,1	44,8	317,95	0,113	46,55	9880,20	0,019	0,019	0,054
Q2C2	29,8	45,4	318,55	0,112	45,64	10190,14	0,019	0,019	0,054
Q2C3	31,4	46,3	319,45	0,110	44,28	10670,72	0,021	0,021	0,055
Q3C1	19,6	44,1	317,25	0,114	47,61	9528,90	0,012	0,012	0,042
Q3C2	20	44,1	317,25	0,114	47,61	9528,90	0,012	0,012	0,042
Q3C3	24,8	39,5	312,65	0,119	51,94	7476,93	0,012	0,012	0,046

APÊNDICE C

RESULTADOS DO ADIMENSIONAL DE SECAGEM

Nesta seção são apresentados os valores do adimensional de secagem (MR) para cada teste experimental. A Tabela C1 refere-se aos testes de secagem com convecção natural e as Tabelas C2, C3 e C4 referem-se aos com convecção forçada.

Tabela C1 – Adimensional de secagem para vazão natural de ar.

Tempo (min)	MR LC1	MR LC2	MR LC3
0	1,0000	1,0000	1,0000
5	0,7468	1,0060	0,9392
10	0,6540	0,9114	0,8904
20	0,7236	0,5909	0,5584
30	0,5750	0,4183	0,4763
60	0,2530	0,2647	0,2304
90	0,1311	0,1471	0,1106
120	0,0512	0,0805	0,0550
150	0,0152	0,0458	0,0381
180	0,0121	0,0095	0,0319
210	0,0028	0,0130	0,0234

Tabela C2 – Adimensional de secagem para mínima vazão forçada de ar.

Tempo (min)	MR Q1C1	MR Q1C2	MR Q1C3
0	1,0000	1,0000	1,0000
5	0,8109	1,1737	0,8924
10	0,7122	0,8906	0,7358
20	0,2339	0,8045	0,5299
30	0,2240	0,4264	0,3406
60	0,0598	0,2074	0,1780
90	0,0383	0,2373	0,0722
120	0,0447	0,0916	0,0738
150	0,0124	0,0181	0,0278
180	-	0,0340	0,0104

Tabela C3 – Adimensional de secagem para vazão intermediária de ar.

Tempo (min)	MR Q2C1	MR Q2C2	MR Q2C3
0	1,0000	1,0000	1,0000
5	0,8691	0,7449	0,9493
10	0,7275	0,7843	0,9335
20	0,6268	0,4862	0,5714
30	0,4895	0,4697	0,4658
60	0,1432	0,1912	0,2176
90	0,0584	0,0970	0,1061
120	0,0265	0,0403	0,0602
150	0,0220	0,0312	0,0292
180	0,0188	0,0178	0,0156

Tabela C4 – Adimensional de secagem para máxima vazão forçada de ar.

Tempo (min)	MR Q3C1	MR Q3C2	MR Q3C3
0	1,0000	1,0000	1,0000
5	0,7890	0,8324	0,9430
10	0,6173	0,6803	0,8825
20	0,4790	0,4973	0,5455
30	0,3221	0,3243	0,6029
60	0,1455	0,1963	0,2930
90	0,1069	0,0736	0,1150
120	0,0297	0,0577	0,0920
150	0,0012	0,0346	0,0545
180	-	0,0262	0,0179
210	-	-	0,0127

APÊNDICE D

RESULTADOS DO AJUSTE DE CURVAS DE CINÉTICA DE SECAGEM

Nesta seção têm-se os valores da variância média (R^2) e dos parâmetros referentes aos modelos cinéticos de secagem para o ajuste relacionado à convecção natural (Tabela D1) e à convecção forçada (Tabela D2).

Tabela D1 – Ajuste médio referente a convecção natural.

Convecção Natural				
Modelo Cinético de Secagem	R^2	k	n	A
Lewis	0,9898	0,0232	-	-
Page	0,9898	0,0235	0,9970	-
Overhults	0,9898	0,0232	0,9970	-
Brooker	0,9898	0,0234	-	1,0063
Henderson & Henderson	0,9898	0,0234	-	0,8952

Tabela D2 – Ajuste médio referente a convecção forçada.

Convecção Forçada				
Modelo Cinético de Secagem	R^2	k	n	A
Lewis	0,9751	0,0292	-	-
Page	0,9754	0,0337	0,9571	-
Overhults	0,9754	0,0290	0,9571	-
Brooker	0,9751	0,0291	-	0,9981
Henderson & Henderson	0,9751	0,0291	-	0,8870

APÊNDICE E

ANÁLISE DE RESÍDUOS DOS MODELOS CINÉTICOS DE SECAGEM

Nesta seção apresentou-se o comparativo entre os gráficos de resíduos dos modelos cinéticos de secagem. Os modelos analisados foram Lewis, Page, Overhults, Brooker e Henderson & Henderson. As Figuras E1, E2, E3, E4 e E5 são referentes aos testes realizados com convecção natural. As Figuras E6, E7, E8, E9 e E10 são referentes aos testes realizados com convecção forçada.

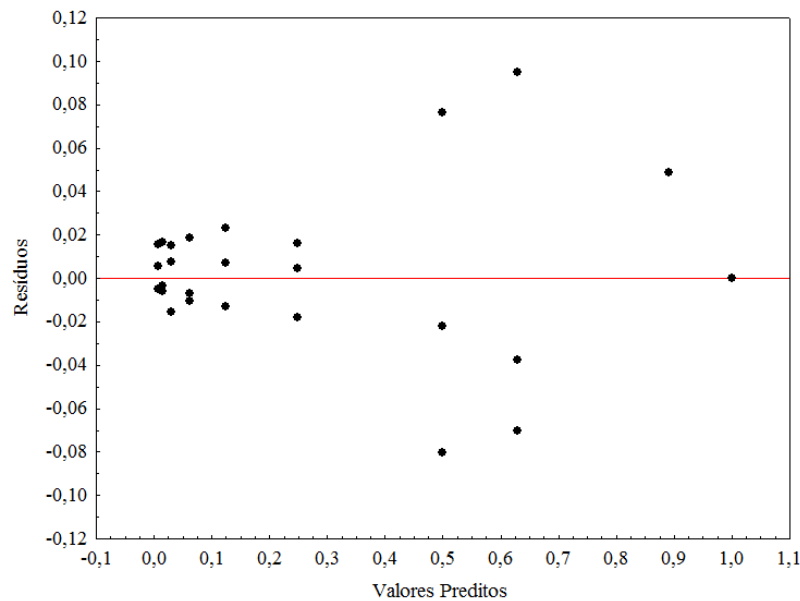


Figura E1 - Distribuição de resíduos para o modelo de Lewis.

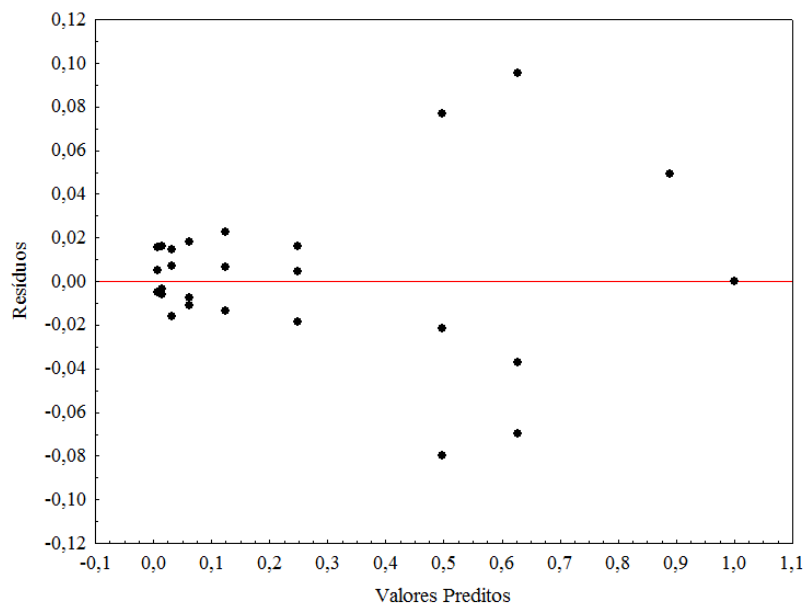


Figura E2 - Distribuição de resíduos para o modelo de Page.

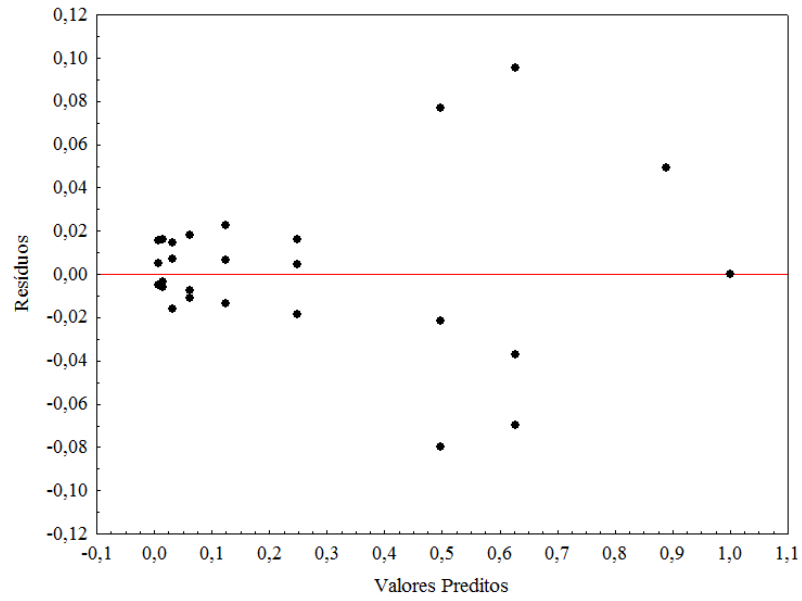


Figura E3 - Distribuição de resíduos para o modelo de Overhults.

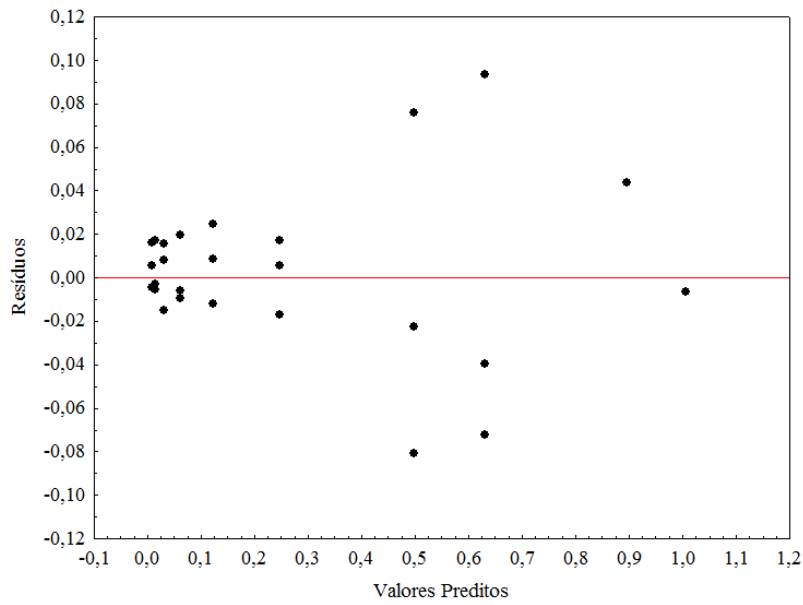


Figura E4 - Distribuição de resíduos para o modelo de Brooker.

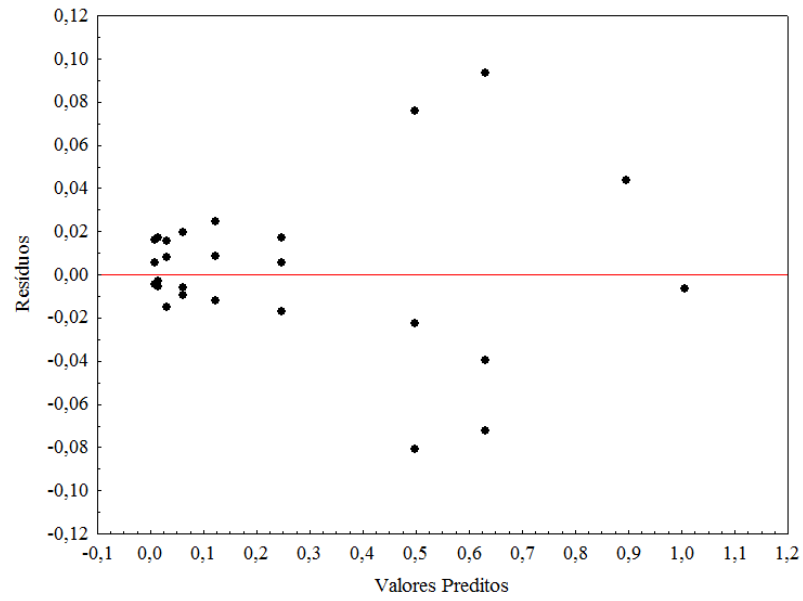


Figura E5 - Distribuição de resíduos para o modelo de Henderson & Henderson.

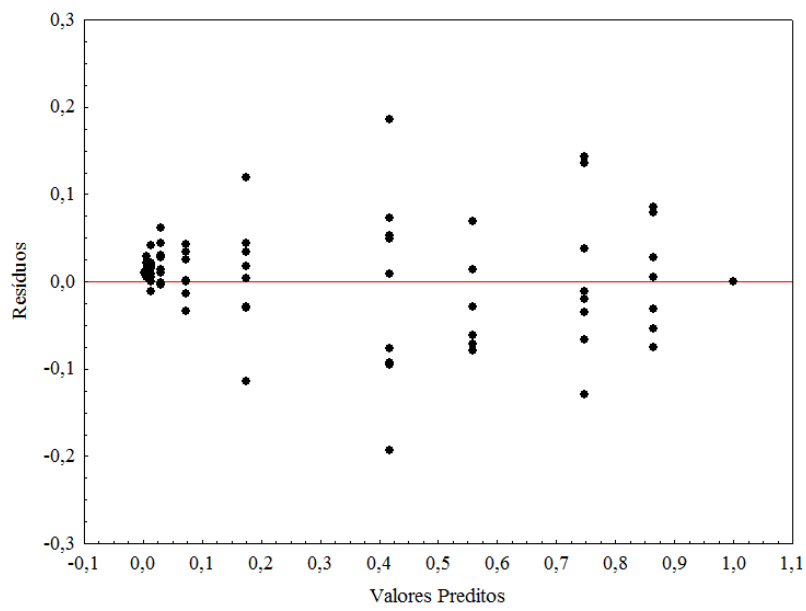


Figura E6 - Distribuição de resíduos para o modelo de Lewis.

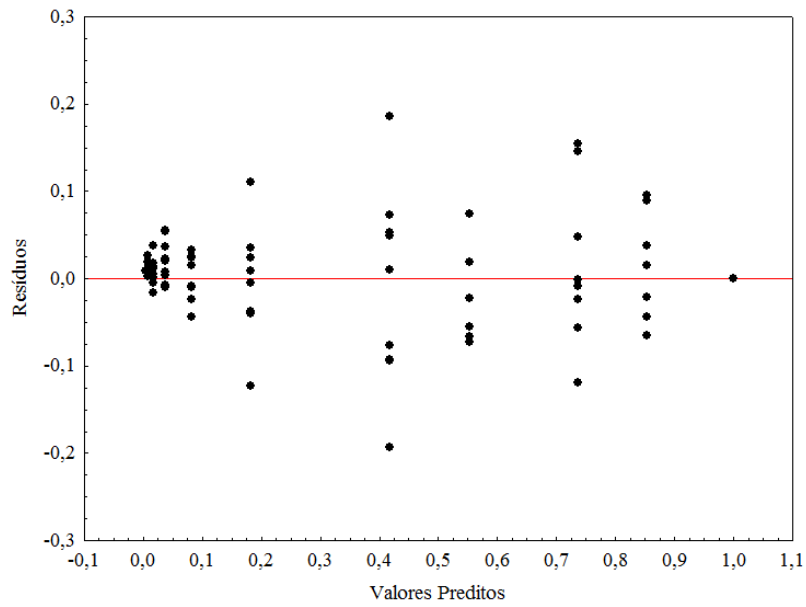


Figura E7 - Distribuição de resíduos para o modelo de Page.

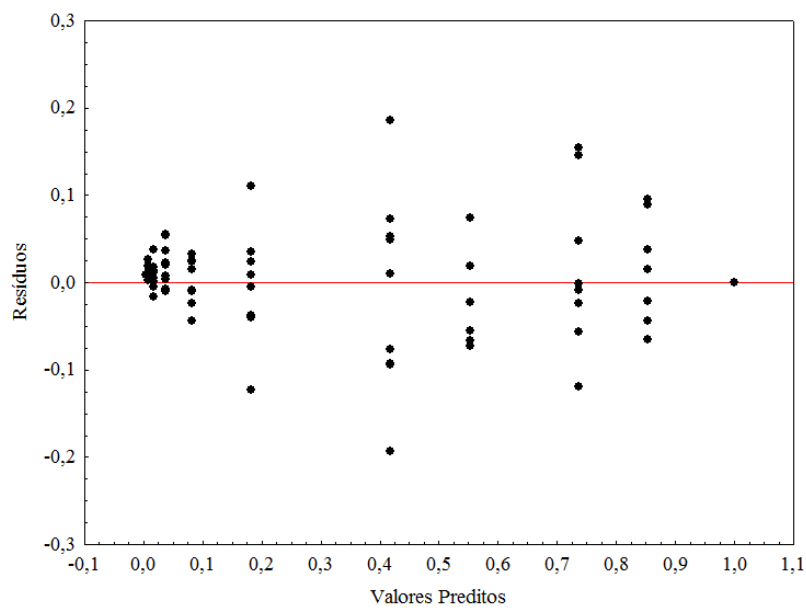


Figura E8 - Distribuição de resíduos para o modelo de Overhults.

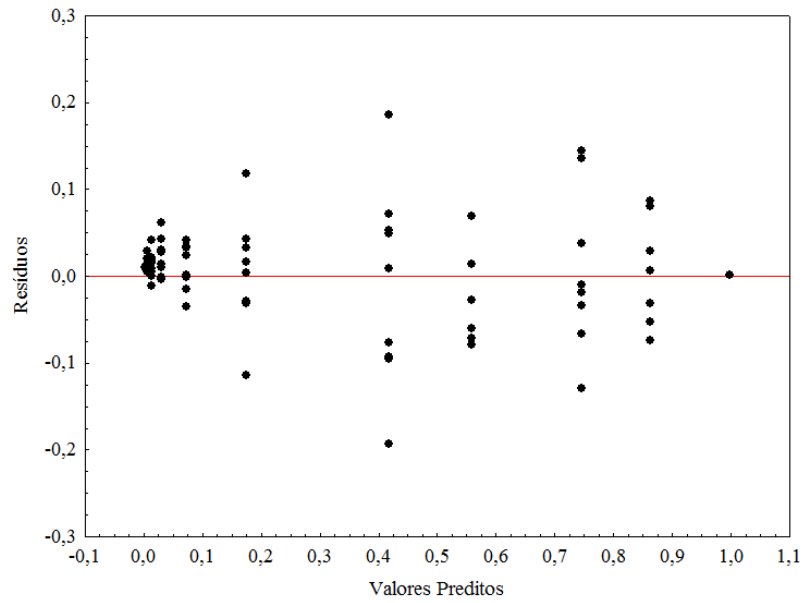


Figura E9 - Distribuição de resíduos para o modelo de Brooker.

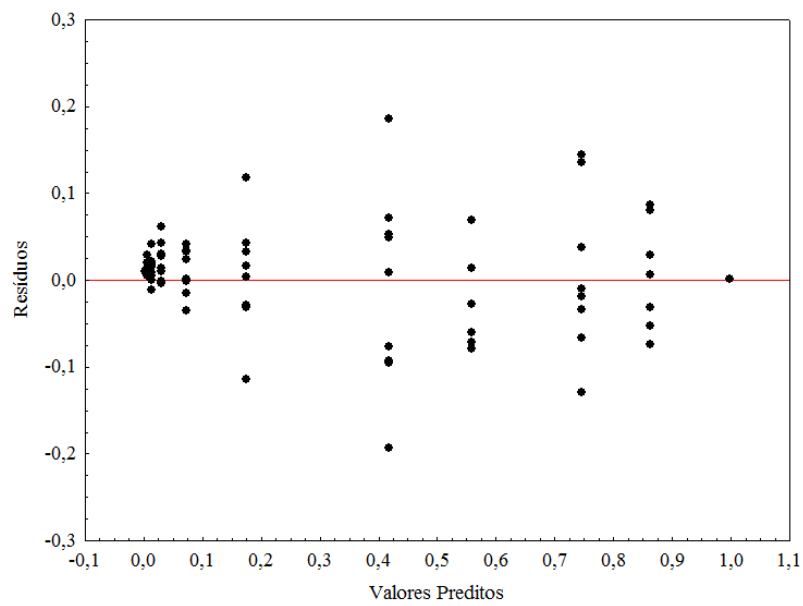


Figura E10 - Distribuição de resíduos para o modelo de Henderson & Henderson.

APÊNDICE F

VARIÁVEIS MONITORADAS NO SECADOR SOLAR

Nesta seção têm-se os valores médios das variáveis monitoradas durante os testes experimentais de secagem, listados na Tabela F1.

Tabela F1 – Variáveis monitoradas durante a secagem da *Spirulina platensis*.

Experimentos	G(W/m ²)	U _R (%)	a _w	T _∞ (°C)	T _E (°C)
LC1	937	34,4	0,459	25,9	43,6
LC2	933	34,8	0,323	25,7	47,3
LC3	822	27,2	0,403	27,9	47,7
Q1C1	948	16,3	0,458	31,7	53,1
Q1C2	893	23	0,425	27,6	47,6
Q1C3	807	35,1	0,461	28,3	48,7
Q2C1	720	30,1	0,428	29,5	44,8
Q2C2	905	29,8	0,452	28,2	45,4
Q2C3	888	31,4	0,474	30,3	46,3
Q3C1	901	19,6	0,375	29,4	44,1
Q3C2	826	20	0,501	30,3	44,1
Q3C3	854	33,3	0,464	30,7	42,7

APÊNDICE G

RESULTADOS DAS ANÁLISES DE COMPOSTOS BIOATIVOS

Nessa seção têm-se os resultados para os testes de compostos bioativos realizados com a *Spirulina platensis* seca nas diversas condições estudadas, tanto com convecção natural quanto com convecção forçada. Os resultados podem ser vistos na Tabela G1.

Tabela G1 – Valores de compostos bioativos para cada teste experimental de secagem.

Experimentos	TPC	TFC	TF
LC1	203,9927 (± 3,5642)	3,1449 (± 0,2821)	6,2359 (± 0,1080)
LC2	200,1864 (± 2,9787)	3,6862 (± 0,1988)	9,0026 (± 0,0616)
LC3	239,0193 (± 3,0049)	6,3419 (± 0,3247)	10,1018 (± 0,3790)
Q1C1	190,2341 (± 7,6690)	4,7827 (± 0,4260)	9,9858 (± 0,2084)
Q2C1	165,1487 (± 3,1578)	3,5980 (± 0,2053)	7,8193 (± 0,0107)
Q3C1	192,1275 (± 6,8724)	4,3572 (± 0,1122)	6,3113 (± 0,0237)
Q1C2	187,8569 (± 7,3424)	5,8972 (± 0,5410)	12,8841 (± 0,4635)
Q2C2	212,4101 (± 6,1214)	6,0538 (± 0,3474)	8,0698 (± 0,0707)
Q3C2	199,4506 (± 7,9180)	5,5006 (± 0,3802)	6,5130 (± 0,0871)
Q1C3	157,4204 (± 3,6368)	3,5445 (± 0,2105)	12,9155 (± 0,0514)
Q2C3	185,5755 (± 9,1055)	4,4784 (± 0,1996)	6,8751 (± 0,0286)
Q3C3	160,5990 (± 4,8160)	4,6197 (± 0,2706)	10,4728 (± 0,1164)

TPC : mg de ácido gálico / 100 g amostra seca

TFC : mg rutina / 100 g amostra seca

TF : g ficocianina / 100 g amostra seca

APÊNDICE H

REGRESSÃO MÚLTIPLA E QUADRO DE ANOVA

Nesta seção têm-se os quadros de ANOVA e de regressão múltipla calculados ao longo de todo o presente trabalho. A Tabela H1 é referente ao desempenho do secador solar e as Tabelas H2, H3, H4, H5 e H6 são referentes aos compostos bioativos analisados para a condição de convecção forçada.

Tabela H1 – Regressão múltipla do tempo de secagem em função da vazão volumétrica de ar e da carga mássica.

Regressão Múltipla ($R^2 = 0,95006$)		
	Coeficiente de regressão	p
Média	2,725081	0,000215
Q	0,305000	0,017784
C	0,378218	0,009999
QQ	-0,065637	0,631449
CC	0,053333	0,664833
QC	0,085017	0,353806

Tabela H2 – Quadro de ANOVA para o teor de fenólicos totais referentes aos testes submetidos a convecção forçada.

Quadro de ANOVA	
	p
Média	0,00005
C	0,164928
Q	0,796803

Tabela H3 – Quadro de ANOVA para o teor de flavonoides totais referentes aos testes submetidos a convecção forçada.

Quadro de ANOVA	
	p
Média	0,000021
C	0,055013
Q	0,972717

Tabela H4 – Quadro de ANOVA para o teor de ficocianina referentes aos testes submetidos à convecção forçada.

Quadro de ANOVA	
	p
Média	0,000080
C	0,402974
Q	0,054629

Tabela H5 – Regressão múltipla do teor de flavonoides totais em função da vazão volumétrica de ar e da carga mássica para os testes submetidos à convecção forçada.

Regressão Múltipla ($R^2 = 0,78688$)		
	Coefficiente de regressão	p
Média	5,72150	0,002190
C	0,04610	0,886654
Q	0,05333	0,868220
CC	-1,63667	0,049365
QQ	0,13961	0,821197
CQ	0,30446	0,456196

Tabela H6 – Regressão múltipla do teor de ficocianina em função da vazão volumétrica de ar e da carga mássica para os testes submetidos à convecção forçada.

Regressão Múltipla ($R^2 = 0,81341$)		
	Coefficiente de regressão	p
Média	6,79867	0,018482
C	1,07268	0,247246
Q	-2,07000	0,068733
CC	-0,11333	0,935408
QQ	3,13022	0,115602
CQ	0,51045	0,609501

REFERÊNCIAS

- ACADEMY OF NUTRITION AND DIETETICS. Position of the Academy of Nutrition and Dietetics: Functional Foods. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 2013; 113(8):1906-1103). <https://doi.org/10.1016/j.jand.2013.06.002>
- ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. VII Lista dos novos ingredientes aprovados –Comissões Tecnocientíficas de Assessoramento em Alimentos Funcionais e Novos Alimentos. Disponível em: http://www.anvisa.gov.br/alimentos/comissoes/novos_ingredientes.htm. Acesso em: 15 março 2017.
- AOAC, Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD, 1995.
- BARROZO, M. A. S. Transferência de Calor e Massa entre o Ar e Sementes de Soja em Leito Deslizante e Escoamentos Cruzados. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 1995.
- BENNETT, A.; BOGORAD, L. Complementary Chromatic Adaptation in a Filamentous Blue-Green Algae. *The Journal of Cell Biology*, v.58, p.419-435, 1973. <https://doi.org/10.1083/jcb.58.2.419>
- BEZERRA, A. M. Aplicações térmicas da energia solar / Arnaldo de Moura Bezerra. 3 ed. – João Pessoa, Editora Universitária - UFPB, 1998. 242p. : il (Série Tecnologia)
- BIRD, R. B.; STEWART, W. W.; LIGHTFOOT, E. N. *Transport Phenomena*. Wiley-Loppan, New York, 1978.
- BORTOLOTTI, C. T. Estudo Experimental de Fluidodinâmica de uma Mistura de Resíduo de Acerola e Soja em Leito de Jorro. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2012.
- BRASIL, B. S. A. F.; GARCIA, L. C. Microalgas: Alternativas Promissoras para a Indústria. *Agroenergia em Revista*, Brasília, n.10, p.7-10, dez. 2016.
- BRASIL SOLAIR. Incidência Solar no Território Brasileiro. Disponível em: <http://www.brasilsolair.com.br/potencial-solar-e-eolico> . Acesso em: 06 janeiro 2016.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. *Drying Cereal Grains*, Westport, CT, USA, 1974.
- CERUTTI, P. A. Oxidant Stress and Carcinogenesis. *European Journal of Clinical Investigation*, v.21, n.1, p.1-5, 1991. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2362.1991.tb01350.x>
- COSTA, B. R.; RODRIGUES, M. C. K.; ROCHA, S. F.; POHNDORF, R. S.; LARROSA, A. P. Q.; PINTO, L. A. A. Optimization of *Spirulina sp.* Drying in Heat Pump: Effects on the Physicochemical Properties and Color Parameters. *Journal of Food Processing and Preservation*, v.40, p.934-942, 2016. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12672>
- DESMORIEUX, H.; DECAEN, N. Convective Drying of *Spirulina* in Thin Layer. *Journal of Food Engineering*, v.66, p.497-503, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.021>

- DESMORIEUX, H.; HERNANDEZ, F. Biochemical and Physical Criteria of *Spirulina* after Different Drying Processes. In: Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS), B, p. 900-907, 2004.
- DEMORIEUX, H.; MADIOULI, J.; HERRAUD, C.; MOUAZIZ, H. Effects of Size and Form of *Arthrospira Spirulina* Biomass on the Shrinkage and Porosity During Drying, v.100, p.585-595, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.021>
- DISSA, A. O.; DESMORIEUX, H.; SAVADOGO, P. W.; SEGDA, B. G.; KOULIDIATI, J. Shrinkage, Porosity and Density Behaviour During Convective Drying of *Spirulina*. Journal of Food Engineering, v. 97, p.410-418, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.10.036>
- DITCHFIELD, C. Estudo dos Métodos para a Medida da Atividade de Água. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 2000.
- DORTA, E.; LOBO, M. G.; GONZÁLEZ, M. Using Drying Treatments to Stabilise Mango Peel and Seed: Effect on Antioxidant Activity. LWT – Food Science and Technology, v. 45, p. 261-268, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2011.08.016>
- 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>
- FELLOWS, P. Food Processing Technology – Principles and Practice. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2000. <https://doi.org/10.1201/NOE0849308871>
- FIGUEROA, R. Princípios de secagem de produtos biológicos. João Pessoa, Editora Universitária – UFPB, 2003. 263p.
- GARCIA, D. M. Análise de Atividade de Água em Alimentos Armazenados no Interior de Granjas de Integração Avícola. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2004.
- HALLIWELL, B., AESCHBACH, R., LÖLINGER, J.; ARUOMA, O.I. The Characterization on Antioxidants. Food and Chemical Toxicology, v. 33, n. 7, p. 601-617, 1995. [https://doi.org/10.1016/0278-6915\(95\)00024-V](https://doi.org/10.1016/0278-6915(95)00024-V)
- HASLER, C. M. Function Foods: Their Role in Disease Prevention and Health Promotion. Food Technology, v. 52, n.11, 1998.
- HENDERSON, J. M.; HENDERSON, S. M. A Computational Procedure for Deep-bed Drying Analysis. Journal of Agricultural Engineering Research, v.13, p.87-95, 1968. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(68\)90084-X](https://doi.org/10.1016/0021-8634(68)90084-X)
- IBARZ, A.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Unit Operations in Food Engineering. Boca Raton: CRC Press, 2002. <https://doi.org/10.1201/9781420012620>
- KUMAR, M.; SANSANIWAL, S. K.; KHATAK, P. Progress in Solar Dryers for Drying Various Commodities. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.55, p.346-360, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158>

- LEWIS, W. K. The Rate of Drying of Solid Materials. *Indian Chemical Engineer*, v.13, p.427, 1921. <https://doi.org/10.1021/ie50137a021>
- LIMA, A. C. B.; SILVA, E. G.; SPAROVEK, G.; STURION, G. L.; PRECOPPE, M. F. M.; MEIRA, M. L. R.; SPOTO, M. H. F.; MORAES, S. O. Manual de Desidratação Solar de Frutas, Ervas e Hortaliças. ESALQ – Divisão de Biblioteca e Documentação. 48 p. : il. (Série Produtor Rural, nº 33), Piracicaba, 2006.
- MACHADO, A. V. Estudo da secagem do pedúnculo do caju em sistemas convencional e solar: modelagem e simulação do processo / Antônio Vitor Machado – Natal, 2009. 126 f. : il.
- McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. *Unit Operations of Chemical Engineering*. 7ed. McGraw Hill, Singapore, 2005, 1140p.
- MELO, P. C. Cinética de Secagem e Armazenamento de *Spirulina platensis*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis – GO, 2016.
- MORAES, C. C.; BURKERT, J. E. M.; KALIL, S. J. C-phycoocianin Extration Process for Large-Scale Use. *Journal of Food Biochemistry*, v.34, p.133-148, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2009.00317.x>
- MORAES, M. A.; ROSA, G. S.; OLIVEIRA, E. G.; PINTO, L. A. A. Isoterma de Equilíbrio e Propriedades Termodinâmicas da *Spirulina platensis*. VII Congresso Brasileiro de Engenharia Química e Iniciação Científica, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2007.
- MOREIRA, M. F. P. Secagem de Gel Agar. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2000.
- MUJUMDAR, A. S. *Handbook of Industrial Drying*, 3ª ed., Florida: CRC/Taylor & Francis, 2006. <https://doi.org/10.1201/9781420017618>
- MUSTAYEN, A. G. M. B.; MEKHILEF, S.; SAIDUR, R. Performance Study of Different Solar Dryers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.34, p.463-470, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.020>
- NOGUEIRA, G. D. R. Estudo de Técnicas Híbridas de Desidratação de Resíduos de Acerola. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2016.
- OLIVEIRA, E. G.; ROSA G. S.; MORAES, M. A.; PINTO, L. A. A. Characterization of Thin Layer Drying of *Spirulina platensis* Utilizing Perpendicular Air Flow. *Bioresource Technology*, v.100, p.1297-1303, 2009a. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.052>
- OLIVEIRA, E. G.; ROSA G. S.; MORAES, M. A.; PINTO, L. A. A. Moisture Sorption Characteristics of Microalgae *Spirulina platensis*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v.26, p.189-197, 2009b. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322009000100018>
- OVERHULTS, D. G.; WHITE, G. M.; HAMILTON, H. E.; ROSS, I. J. Drying Soybeans with Heated Air, *Transactions of the ASAE*, v.16, p.112-113, 1973. <https://doi.org/10.13031/2013.37459>

- PAGE, G. E. Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin-layer. Purdue University, West Lafayette, IN, USA, 1949.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, CEPEL – CRESESB, 2014. 530p.
- PODSEDEK, A. Natural Antioxidants and Antioxidant Capacity of Brassica Vegetables: A Review. LWT: Journal of Food Composition and Analysis, v.40, p.1-11, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.07.023>
- POMPELLA, A. Biochemistry and Histochemistry of Oxidant Stress and Lipid Peroxidation. International Journal of Vitamin and Nutrition Research, v.67, n.5, p. 289-297, 1997.
- PORTAL SOLAR. Vantagens da Energia Solar. Disponível em: <http://www.portalsolar.com.br/energia-solar-no-brasil.html>. Acesso em: 06 janeiro 2016.
- SARADA, R.; PILLAI, M. G.; RAVISHANKAR, G. A. Phycocyanin from *Spirulina sp*: Influence of Processing of Biomass on Phycocyanin Yield, Analysis of Efficacy of Extraction Methods and Stability Studies on Phycocyanin. Process Biochemistry, v.34, p.795-801, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00153-8](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00153-8)
- SEADER, J. D.; HENLEY, E. J. Separation Process Principles. 2ª ed. Danvers: John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- SHAHIDI, F.; JANITHA, P. K.; WHANASUNDARA, P. D. Phenolic Antioxidants CRC. Critical Reviews and Food Science and Nutrition, Boca Raton, v.32, n.1, p.67-103, 1992. <https://doi.org/10.1080/10408399209527581>
- SHIMAMATSU, H. Mass Production of *Spirulina*, an Edible Microalga. Hydrobiologia, v.512, p.39-44, 2004. <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000020364.23796.04>
- SILVA, D. I. S. Estudo da Transferência de Calor e Massa na Secagem em Leito Fixo Visando o Aproveitamento de Resíduo de Acerola (*Malpighia emarginata* DC). Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2015a.
- SILVA, N. C. Desidratação de Resíduos do Processamento de Maracujá-Amarelo por Diferentes Metodologias. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2015b.
- SILVA, P. B. Secagem de Resíduos de Frutas em Secador Roto-Aerado. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2014.
- SIMIONI, T. Estudo Comparativo da Secagem de Microalgas *Scenedesmus acuminatus* em Camada Delgada e Leito de Jorro. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2015.
- SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolibdic_phosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture, v.16, p.144-158, 1965.

- SLIMANI, M. E. A.; AMIRAT, M.; BAHRIA, S.; KURUCZ, I.; AOULI, M.; SELLAMI, R. Study and Modeling of Energy Performance of a Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar Collector: Configuration Suitable for an Indirect Solar Dryer. *Energy Conservation and Management*, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.059>
- SU, C. H.; LIU, C. S.; YANG, P. C.; SYU, K. S.; CHIUH, C. C. Solid-Liquid Extraction of Phycocyanin from *Spirulina platensis*: Kinetic Modeling of Influential Factors. *Separation and Purification Technology*, v.123, p. 64-68, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.12.026>
- TIMMERMANN, E. O.; CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Water Sorption Isotherms of Foods and Foodstuffs: BET or GAB Parameters? *Journal of Food Engineering*, v.48, p.19-31, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00139-4](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00139-4)
- VASCO, C. Phenolic Compounds in Equatorial Fruits. Tese de Doutorado. Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, 2009.
- VEGA-GÁLVEZ, A.; DI SCALA, K.; RODRÍGUEZ, K.; LEMUS-MONDACA, R.; MIRANDA, M.; LÓPEZ, J.; PEREZ-WON, M. Effect of Air-Drying Temperature on Physico-Chemical Properties, Antioxidant Capacity, Colour and Total Phenolic Content of Red Pepper (*Capsicum annuum*, L. var. *Hungarian*). *Food Chem*, v. 117, p. 647-652, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.04.066>
- ZHISHEN, J.; MENGCHENG, T.; JIANMING, W. The Determination of Flavonoid Contents in Mulberry and their Scavenging Effects on Superoxide Radicals. *Food Chemistry*, v.64, p.555-559, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(98\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2)