



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**ESTUDO SOBRE A DESIDRATAÇÃO DE MICROALGAS EM
SECADOR ROTATÓRIO**

LUÍS VICTOR DANTAS DE FREITAS

Uberlândia – MG

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Estudo sobre a desidratação de microalgas em secador rotatório

Luís Victor Dantas de Freitas

Monografia de graduação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia como parte
dos requisitos necessários para a aprovação na
disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do
curso de Engenharia Química

Uberlândia – MG

2017

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE LUÍS VICTOR DANTAS DE FREITAS
APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 14 DE
DEZEMBRO DE 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marcos Antonio de Souza Barrozo
Orientador (FEQ/UFU)

Eng. MSc Neiton Carlos da Silva
FEQ/UFU

Eng. MSc Geraldo Daniel Ribeiro Nogueira
FEQ/UFU

A toda minha família e amigos

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar este trabalho, mais um ciclo de minha vida se encerra e realizo o sonho de me tornar engenheiro químico.

Agradeço a Deus, por dar-me forças e me guiar frente aos obstáculos que surgiram em minha jornada. Cada um deles, aos seus modos, me fizeram chegar aonde cheguei, e me fizeram ser quem eu sou.

Aos meus pais, Luis Alexandre e Fúlvia Andrea, e ao meu irmão, Luis Arthur, que sempre e me apoiaram com compreensão e amor, independentemente da situação em que me encontrei durante os anos de graduação.

A minha namorada, Ana Carolina, por todo o incentivo, carinho, e companheirismo. Agradeço também pela paciência durante os momentos de tensão e por estar literalmente ao meu lado durante a batalha da graduação.

A todos os meus amigos que fiz durante a graduação e aos antigos que entenderam minha ausência em momentos importantes. "Amizade verdadeira é aquela que o tempo não apaga, a distancia não destrói e acima de tudo o coração não esquece..."

Ao querido amigo, orientador e professor Marquinhos, um exemplo de pessoa e de caráter. Agradeço a todas as oportunidades que me ofereceu, a todos os ensinamentos e pela confiança em mim depositada.

Ao Neiton, pela amizade, lições e sabedoria. Sempre disposto a me ajudar a qualquer horário tirando todas as minhas dúvidas. Obrigado pelo aprendizado, paciência e por todos os valores agregados durante estes anos de trabalho e convívio.

À equipe de iniciação científica, Thaise, Andressa, Cecilia, Isabelle, e Thábata, muito obrigado pela motivação, parceria, realização de objetivos e amizade. "O sucesso é vazio se você atingir a linha de chegada sozinho".

A todos os professores da FEQUI/UFU, em especial aos professores: Damasceno, Bira, Carlão, Mezenga, Vicelma, Rubens, Valéria, Márcia, Adilson, Humberto e Luís Cláudio que estavam sempre dispostos a me ajudar. Levarei tudo que vocês me ensinaram com a certeza de que tudo será usado não só para a profissão, mas para a vida.

A todos, muito obrigado!

O que é sucesso? Rir muito e com frequência; ganhar o respeito de pessoas inteligentes e o afeto das crianças; merecer a consideração de críticos honestos e suportar a traição de falsos amigos; apreciar a beleza, encontrar o melhor nos outros; deixar o mundo um pouco melhor, seja por uma saudável criança, um canteiro de jardim ou uma redimida condição social; saber que ao menos uma vida respirou mais fácil porque você viveu. Isso é ter sucesso!

(Ralph Waldo Emerson)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA DE ABREVIACÕES E NOMENCLATURA.....	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
INTRODUÇÃO	1
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 – MICROALGAS	3
2.2 – <i>Spirulina platensis</i>	5
2.2.1 – Ficocianina	6
2.2.2 – Compostos Fenólicos	7
2.2.3 – Flavonoides	8
2.2.4 – Ácido cítrico	9
2.3 – SECAGEM DE ALIMENTOS	10
2.3.1 – Secagem da microalga <i>Spirulina</i>	11
2.3.2 – Secador Rotatório	12
MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
3.1- MATERIAL	16
3.2 – APARATO EXPERIMENTAL	17
3.2.1 – Tambor de Secagem	18
3.2.2 – Sistema de Alimentação	19
3.2.3 – Sistema de separação gás-sólido	20
3.2.4 – Material Inerte	20
3.3 – PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	21
3.4 – ANÁLISES REALIZADAS	23
3.4.1 – Umidade e Atividade de Água	23
3.4.2 – Análises de Compostos Bioativos	23

3.4.3 – Cálculo do Rendimento (%)	25
RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1 – RESULTADOS PARA A <i>Spirulina platensis</i> IN NATURA.....	26
4.2 – RESULTADOS PARA A <i>Spirulina platensis</i> DESIDRATADA	28
4.2.1 – Umidade Final (UF) e Atividade de água (Aw)	28
4.2.2 – Análise do Rendimento (%)	30
4.2.3 – Análise dos compostos bioativos	31
CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura da <i>Spirulina platensis</i> .	5
Figura 2.2 – Fórmula estrutural da ficocianina (SPOLAORE, 2006; WALTER, 2011).	7
Figura 2.3 – Estrutura química básica dos compostos fenólicos.	8
Figura 2.4 – Formula estrutural de flavonoide (apigenina) (GOIRIS et al., 2014).	9
Figura 2.5- Estrutura do ácido cítrico.	9
Figura 2.6 – Microalga <i>Spirulina</i> em pó.	12
Figura 2.7 – Esquema da estrutura de um secador rotatório: (1) Alimentador do material; (2) Entrada do gás aquecido (3) Engrenagem (4) Aparato para rotação; (5) Suspensores; (6) Rolador; (7) Corpo cilíndrico; (8) Descarga de sólidos; (9) Alívio de descarga de gás.	13
Figura 2.8 – Corte transversal do secador e diferentes tipos de suspensores.	14
Figura 3.1 – Microalga <i>Spirulina platensis in natura</i> .	16
Figura 3.3 – (1) Cilindro aço inox 12 cm Diâmetro x 36 cm Comprimento (2) Bases de Bronze.	18
Figura 3.4 – (3) Peças fixas de tecnil com anéis de teflon (4) Entrada da alimentação (5) Correia envolta na parte central do cilindro.	18
Figura 3.5 – Suspensores no interior do cilindro.	19
Figura 3.6 – Sistema de alimentação: (1) Tubo e suporte com material a ser alimentado (2) Bomba peristáltica (3) Controle da bomba (4) Mangueira de alimentação.	19
Figura 3.7 – Sistema de separação gás-sólido: (1) Saída do túnel de secagem (2) Corpo do ciclone (3) Saída e coletor do material particulado (4) Saída do gás (5) Suporte do ciclone.	20
Figura 3.8 – Esquema de um ciclone Stairmand. Adaptado de: SINGH et al. (2015).	20
Figura 3.9 – Material Inerte (Esferas de porcelana de calcita).	21
Figura 3.10 – Estufa Marconi modelo MA033 e Lab-Swift AW, Novasina.	23
Figura 4.1 – Microalga <i>Spirulina platensis</i> após as secagens.	29
Figura 4.2 – Rendimento (%) das diferentes condições operacionais.	30
Figura 4.3 – Teor de fenólicos Totais (TPC) da microalga após as desidratações e <i>in natura</i> .	31
Figura 4.4 – Teor de Flavonoides Totais (TFC) da microalga após as desidratações e <i>in natura</i> .	33
Figura 4.5 – Acidez Total Titulável (ATT) da microalga após as desidratações e <i>in natura</i> .	34
Figura 4.6 – Teor de Ficocianina (TF) da microalga após as desidratações e <i>in natura</i> .	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Planejamento fatorial 2^3	22
Tabela 3.2 – Valores das variáveis correspondentes a cada nível	22
Tabela 4.1 – Resultados das análises para a microalga <i>in natura</i>	26
Tabela 4.2 – Teores de umidade da microalga <i>Spirulina platensis</i> em diferentes estudos	27
Tabela 4.3 – Umidade Final e Atividade de Água da <i>Spirulina</i> desidratada.....	28
Tabela 5.1 – Melhores resultados para cada composto bioativo analisado	38

LISTA DE ABREVIACÕES E NOMENCLATURA

<i>S. máxima</i>	<i>Spirulina máxima</i>
<i>S. platensis</i>	<i>Spirulina platensis</i>
<i>S. fusiformis</i>	<i>Spirulina fusiformis</i>
TBA	Tiobarbitúrico
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
LPD	Laboratório de Processos Particulados
k	Quantidade de variáveis dos experimentos
b	Número de níveis das variáveis dos experimentos
F. Ench.	Fator de Enchimento
Aw	Atividade de água
TPC	Teor de Compostos Fenólicos Totais
TFC	Teor de Flavonoides Totais
ATT	Acidez Total Titulável
TF	Teor de Ficocianina
Abs	Absorbância

RESUMO

Microalgas são organismos microscópicos utilizados na obtenção de relevantes compostos para as indústrias farmacêutica, química, alimentícia, dentre outras. Possuem também sua aplicabilidade estendida a diversas importantes áreas como tratamento de efluentes, produção energia, nutrição humana e animal. *Spirulina* é um termo utilizado para denominar diversas espécies de microalgas que vem sendo utilizadas como alimento a centenas de anos e sua importância no combate à fome já foi pauta da ONU. A *Spirulina platensis* é uma micro-organismo verde-azulado que possui em sua composição bioquímica uma significativa quantidade de nutrientes tais como proteínas, carboidratos, lipídios, minerais e compostos bioativos nutracêuticos, como a ficocianina. Esta microalga possui também uma alta quantidade de umidade, o que a torna susceptível ao crescimento bacteriano e degradação, assim, este trabalho visou à desidratação desta microalga utilizando um secador rotatório com recheio de inerte. O equipamento se destaca pela possibilidade de secar materiais pastosos e por possuir um produto pós-secagem pronto para comercialização, necessitando apenas de embalagem. Para definição das condições experimentais foi utilizado um planejamento fatorial completo com três variáveis em dois níveis, as variáveis escolhidas foram: temperatura do ar de secagem (50°C e 90 °C), fator de enchimento (15% e 27%) e velocidade de rotação (40 RPM e 60 RPM). Foi realizado um cálculo de rendimento de produto para cada experimento bem como análises de umidade final (UF), atividade de água (Aw) e compostos bioativos (teor de fenólicos totais, teor de flavonoides, acidez total titulável e teor de ficocianina) conduzidas para a microalga *in natura* e após as desidratações para avaliar a eficiência de remoção de umidade e os impactos da técnica nos compostos bioativos da mesma. O experimento que obteve melhor valor de rendimento foi o de temperatura 50°C fator de enchimento (F. Ench.) de 27% e rotação de 60 RPM, atingindo um rendimento de 60,12%. Todos os experimentos atingiram valores mais que satisfatórios de umidade final e atividade de água. Em relação aos compostos bioativos não foi possível verificar uma condição ótima global para todos os compostos, porém em todas as condições ele se mantiveram próximos aos da microalga *in natura*, ou até mesmo superiores sob condições específicas. Observou-se que os fenólicos e a ficocianina tiveram seus melhores resultados com fator de enchimento de 15% e rotação 60 RPM, porém diferiram na temperatura (90°C para os fenólicos e 50°C para a ficocianina). Os flavonoides e acidez também tiveram sua condição ótima no mesmo fator de enchimento (27%) e rotação (40 RPM), porém, em temperaturas diferentes (90°C para os fenólicos e 50°C para a acidez).

Palavras-Chave: *Spirulina*, desidratação, secador rotatório, inertes, compostos bioativos

ABSTRACT

Microalgae are microscopic organisms used to obtain relevant compounds for the pharmaceutical, chemical and food industries, among others. They also have their applicability extended to several important areas such as effluent treatment, energy production or animal and human nutrition. *Spirulina* is a term used to denominate diverse species of microalgae that have been used as food for hundreds of years and its importance in the fight against hunger has already been agenda of the UN. *Spirulina platensis* is a blue-green micro-organism that has in its biochemical composition significant amount of nutrients such as proteins, carbohydrates, lipids, minerals and bioactive nutraceutical compounds, such as phycocyanin. This microalgae also has a high amount of moisture, which makes it susceptible to bacterial growth and degradation. Therefore, the aim of the work was to dehydrate the microalgae using a rotary drier with inert bed. The equipment has the possibility of drying paste materials and has a post-drying product ready for commercialization, requiring only packaging. In order to determinate the experimental conditions, a complete factorial design with three variables in two levels were used: drying air temperature (50°C and 90°C), inert filling factor (15% and 27%) and speed of rotation (40 RPM and 60RPM). A productivity estimative for each experiment as well as analysis of final moisture (UF), water activity (Aw) and bioactive compounds (total phenolic content, flavonoid content, total acidity and phycocyanin content) were performed for the microalgae *in natura* and after the dehydration process to evaluate the efficiency of moisture removal and the impacts of the technique on the bioactive compounds. The experiment that obtained the best value of productivity was the one that used temperature of 50°C, 27% of filling factor and 60RPM rotation, reaching the value of 60,12%. All the experiments reached satisfactory values of final moisture and water activity. Regarding the bioactive compounds, it was not possible to verify a better global condition for all compounds, however, in all conditions their amount stayed close to those in the *in natura* microalgae or even higher, under specific conditions. It was observed that the phenolics and phycocyanin had their best results with a 15% filling factor and 60 RPM rotation, but differed in the temperature (90°C for phenolics and 50°C for phycocyanin). Flavonoids and acidity also had their optimal condition in the same filing factor (27%) and rotation (40RPM), but at different temperatures (90°C for phenolics and 50°C for acidity).

Keywords: *Spirulina*, dehydration, rotary dryer, inert, bioactive compounds.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Microalgas são microrganismos fotossintéticos que possuem aplicações comerciais em diversas áreas, como por exemplo, no tratamento de águas residuais, produção de energia, na nutrição humana e animal bem como na obtenção de valiosos compostos para as indústrias alimentícias, farmacêuticas e químicas, dentre outras. Estima-se que possa existir desde centenas de milhares até alguns milhões de representantes deste grupo, o que reflete em diferentes composições bioquímicas, transformando-as em fontes de uma quantidade quase que ilimitada de produto (DERNER, 2006).

As microalgas possuem desde alguns nutrientes básicos como carboidratos, lipídios, proteínas, vitaminas e alguns minerais até importantes compostos que também agregam valor comercial ao produto, como antioxidantes, enzimas, fármacos, biopigmentos, marcadores fluorescentes e exopolissacarídeos (utilizados como geleificantes, emulsificantes, flocculantes e hidratantes). Alguns dos efeitos terapêuticos englobados pelas cianobactérias são: atividade antitumoral, efeito anti-hipertensivo, modulador do sistema imunológico, regulador da resposta alérgica, redução da nefro toxicidade por metais pesados e medicamentos, auxiliar no tratamento de indivíduos obesos, anêmicos e inibição da replicação viral (OLIVEIRA et al., 2013).

Spirulina é a denominação dada a diversas espécies de microalgas pertencentes ao filo Cyanobacteria, e dentre as espécies já identificadas, as mais utilizadas na dieta são a *S. máxima*, *S. platensis* e *S. fusiformes* (MARLES et al., 2011). A utilização da cianobactéria *Spirulina* como alimento na nutrição humana data de centenas de anos atrás onde era produto de consumo do povo Kanembous, que viviam na região do Lago Chaad, na África e também dos Astecas, no México. A importância da *Spirulina* como alimento e combate à fome começou a ser internacionalmente reconhecida durante a sexta sessão da Assembleia Geral das Nações Unidas (Segundo comitê, item 52 da agenda) onde um projeto com a resolução de “Uso da *Spirulina* para combater a fome e subnutrição e ajudar a alcançar um desenvolvimento sustentável” foi submetido pelos países Burundi, Camarões, República Dominicana, Nicarágua e Paraguai, no qual a Organização das Nações Unidas para a

Alimentação e Agricultura ficou responsável por redigir um trabalho sobre a *Spirulina* e esclarecer o seu uso. (HABIB, 2008).

Devido a sua alta porcentagem de umidade, as microalgas se tornam altamente susceptíveis a degradação por microrganismos, assim, faz-se necessário a utilização de um método de conservação. A desidratação é possivelmente o método mais antigo de conservação de alimentos e está sendo amplamente estudada nas últimas décadas. Existem inúmeras vantagens em se desidratar um alimento: com baixo teor de umidade, as atividades enzimáticas decrescem e assim a vida de estocagem do alimento pode ser prolongada; importantes compostos de um material podem ser elevados através da secagem agregando valor ao produto; ao remover-se a água o peso e volume do produto se minimizam facilitando a manipulação e embalagem; também devido à desidratação, a depender da temperatura de operação, os microrganismos podem ser eliminados (MUJUMDAR, 2006).

Os tambores rotativos são amplamente utilizados nas indústrias para diferentes operações e dentre elas, está a secagem. O secador rotativo se tornou o secador mais utilizado na indústria química ao longo dos anos tendo sua aplicabilidade estendida a diversas áreas. Dentre suas vantagens estão a eficiência na remoção da umidade e promoção de uma secagem homogênea devido ao seu alto grau de mistura de partículas. (KROKIDA et al., 2002; PERAZZINI, 2011). A utilização do secador rotativo convencional para secagem de materiais pastosos possui eficiência limitada e, portanto, a utilização de recheio de inerte é uma alternativa para melhoria do processo que ainda foi pouco estudada (HONORATO, 2006). Uma das vantagens da utilização do inerte é obter um produto em pó sem que seja preciso pós-tratamento.

Dentro do exposto, o objetivo deste trabalho foi realizar a desidratação da microalga *Spirulina platensis* utilizando um secador rotativo com recheio de inertes, analisando as condições de operação e verificando os impactos do processo nos compostos bioativos presentes no material, avaliando seu possível aproveitamento.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica realizada para desenvolvimento deste trabalho, no qual serão expostos conceitos importantes sobre microalgas e seus compostos bioativos, secagem em geral e secador rotatório, os quais são fundamentais para entendimento do estudo realizado.

2.1 – MICROALGAS

Microalgas são organismos microscópicos fotossintéticos que são encontradas tanto em água salgada como em água doce. São constituídas por diversos grupos de organismos procarióticos e eucarióticos. Sua classificação baseia-se na sua pigmentação, natureza química dos seus produtos da fotossíntese e outras características. Graças a sua estrutura unicelular e por estarem imersas em ambientes aquáticos possuem maior acesso à água, CO₂ e outros nutrientes e por isso geralmente são mais eficientes na conversão de energia solar em biomassa (CHÁCON-LEE, 2010). Segundo DERNER (2006), existem citações que relatam a existência entre 200 mil até alguns milhões de espécies de microalgas. Tal diversidade representa uma composição bioquímica vasta tornando as microalgas uma fonte notável de uma grande quantidade de produtos.

O cultivo de microalgas e seu estudo é algo que já existe há décadas e teve seu início nos Estados Unidos, Alemanha, e Japão. O interesse inicial aplicado em cultivar microalgas esteve principalmente no uso da sua capacidade fotossintética de troca gasosa e como fonte de proteína para viagens espaciais. Nas décadas subsequentes a produção comercial em larga começou a ser consolidada com as espécies *Chlorella* e *Spirulina* (BOROWITZKA, 1999). No cultivo de microalgas, diversos fatores são importantes e devem ser levados em consideração: biologia da alga, custos da área utilizada, trabalho, energia, água, nutrientes e o clima (caso a cultura seja ao ar livre) e tipo final do produto desejado. Uma característica comum das microalgas são que as maiores das espécies produzidas para comercialização crescem em ambientes altamente seletivos, o que significa que podem ser produzidas ao ar livre e ainda assim estarem relativamente livres de contaminação por outras espécies ou micro-organismos. (BOROWITZKA; BOROWITZKA, 1989).

As microalgas apresentam algumas vantagens em relação às plantas terrestres: são mais eficientes na utilização de energia solar e produção de matéria orgânica crescem mais rapidamente que as plantas comuns, o que viabiliza uma maior produtividade de bioamassa. A sua estrutura unicelular confere a biomassa uma mesma composição bioquímica e através da manipulação das condições do meio de cultivo, muitas espécies podem ter em sua composição compostos de interesse altamente intensificados através de uma síntese e acúmulo induzidos. Seus cultivos podem ser realizados em regiões com condições climáticas extremas e o melhoramento genético da espécie é favorecido, pois o ciclo de vida da maioria das espécies de microalgas tem uma duração de poucas horas (COHEN, 1986; RICHMOND, 1990).

O interesse na produção de microalgas está relacionado a diversos fatores advindos de seus constituintes. Segundo AARONSON; DUBINSKY (1982), tal biomassa pode possuir altas quantidades de lipídios, o que possibilita a produção de surfactantes, compostos de nitrogênio lipídicos, borracha, revestimentos, plastificantes, têxteis, aditivos alimentares, cosméticos e farmacêuticos. Muitas espécies acumulam polissacarídeos, que podem ser usados para aditivos alimentares ou até na indústria petrolífera, providenciando polímeros de cadeia longa com propriedades floculantes necessária na extração de óleo. As microalgas podem também produzir uma grande variedade de ativos farmacológicos interessantes à indústria farmacêutica como antibióticos ativos contra bactérias e fungos.

Alguns dos compostos sintetizados pelas microalgas são de imenso interesse também para a alimentação humana, tais como os ácidos graxos poli-insaturados, pois são considerados nutracêuticos ou então por possuírem propriedades terapêuticas, como os pigmentos carotenoides, clorofilas e ficobiliproteínas. Normalmente são comercializados em forma de pó, tabletes, cápsulas ou extratos, ou então como alimentos naturais ou suplementos alimentares (DERNER, 2006).

Para a obtenção de alguma substância de interesse ou emprego das microalgas em alimentos, a biomassa deve ser separada do meio de cultura, o que envolve um ou mais processos de separação sólido-líquido. A biomassa é geralmente colhida por sedimentação, centrifugação ou filtração e algumas vezes requer um passo extra de floculação. Para a remoção de umidade podem ser utilizadas diferentes técnicas, como a desidratação por *spray-drying*, que apresenta vantagens como operação contínua, produto final já em pó e rápida secagem, ou então por liofilização que consiste em três fases: congelar o material, remoção primária e secundária de umidade por sublimação (MOLINA-GRIMA, 2004).

2.2 – *Spirulina platensis*

Spirulina é um termo utilizado para se referir a diversas espécies de cianobactérias filamentosas verde-azuladas procariotas e fotossintetizantes que crescem vigorosamente sobre sol forte a altas temperaturas e em ambientes altamente alcalinos. Dentre as mais utilizadas como alimento estão: *Spirulina platensis*, *Spirulina máxima* e *Spirulina fusiformis* (MARLES, 2011; HABIB, 2008). Suas células formam tricomas (cadeias espirais) com diâmetros que variam de 1 a 12 μm dependendo da espécie e que giram em torno do próprio eixo (Figura 2.1).

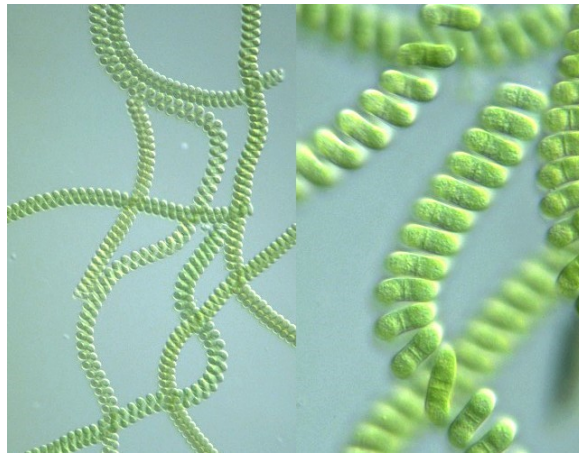


Figura 2.1 – Estrutura da *Spirulina platensis*.

Estima-se que este organismo primitivo originou-se a 3.5 bilhões de anos atrás e é considerado um alimento bastante promissor. Devido ao seu valor nutricional e presença de compostos bioativos, a *Spirulina platensis* pode ser utilizada como arma no combate a desnutrição (MELO, 2016). Sua utilização como alimento data há séculos, em que os primeiros relatos vêm do Vale do México. Os conquistadores espanhóis diziam que os astecas coletavam um “novo alimento azulado” dos lagos e faziam uma torta verde-azulada com ele. Com o desenvolvimento urbano e da agricultura na região, os lagos foram secando e atualmente, apenas o Lago Texcoco possui população de *Spirulina*. Já na África, a população Kanembous que vive em volta do Lago Chad coleta as algas úmidas, as secam ao sol e as vendem nos mercados locais em forma de tortas chamadas de Dihé. A torta Dihé é misturada com molhos, temperos, carnes e outros alimentos que fazem parte de 70% da alimentação deste povo (SASSON, 1997; ABDULQADER et. al, 2000).

Há mais de 40 anos a *Spirulina platensis* é comercializada e considerada oficialmente um alimento seguro para consumo humano através da aprovação de diversos órgãos governamentais e agências de saúde em dezenas de países. A grande maioria desta microalga que é comercializada se destina principalmente para fins nutracêuticos no consumo humano (BELAY, 1997; VONSHAK, 1997). Ao analisar seu valor nutricional, nota-se que a microalga possui uma quantidade balanceada de aminoácidos essenciais e alto teor de proteínas, que compõe cerca de 60 a 70% do seu peso em base seca. Outros compostos extremamente importantes estão presentes na composição da *Spirulina*, como vitaminas do complexo B, minerais, antioxidantes, vitaminas A, E, ferro absorvível, ácidos graxos poli-insaturados, como o ácido gama linolênico, compostos fenólicos e ficocianina (AMBROSI, 2008).

A *Spirulina platensis* se destaca justamente por apresentar uma biomassa com composição diversificada. Além da alta porcentagem de proteína, é constituída por uma média de 17-25% de carboidratos, 4-6% de lipídios, 8-13% de minerais. Os ácidos graxos correspondem à maior fração dos lipídios, dos quais o ácido gama linolênico, ou ômega 6, como é mais conhecido, se destaca representando de 20 a 25% do total dos lipídios e é raramente encontrado em outros alimentos (HABIB; PARVIN, 2008, BECKER, 2004, BROWN, 1991, HENRIKSON, 1995).

Os pigmentos naturais presentes são os azuis (ficobilinas), verdes (clorofilas) e laranjas (carotenoides), nos quais as ficobilinas e clorofilas estão em maior abundância, responsáveis pela coloração verde-azulada da microalga. Dentre as ficobilinas, uma das mais abundantes é a ficocianina, que possui aplicações como corante natural nas áreas alimentícias e de alimentos (WALTER, 2011). Tais pigmentos possuem atividade anticancer e proteção contra o envelhecimento, entre outras características benéficas ao ser humano, (MIRANDA et al., 1998).

2.2.1 – Ficocianina

A ficocianina (Figura 2.2) de coloração azul intenso, e a aloficocianina, de coloração verde-azulada, estão contidas em subunidades denominadas ficobiliproteínas que estão presentes no centro de estruturas granulares das microalgas, chamadas de ficobilissomos. É através delas que a alga garante a sua alta capacidade de absorção de energia luminosa. (WALTER, 2011). Tal composto é solúvel em água, altamente fluorescente e sua

empregabilidade estende-se a diversas áreas como usos nas áreas farmacêuticas, biotecnológicas, medicinais e alimentícias, sendo que a microalga com melhor produtividade deste pigmento (cerca de 120-140 mg de ficocianina por grama de biomassa seca) é a *Spirulina platensis* (ERIKSEN, 2008).

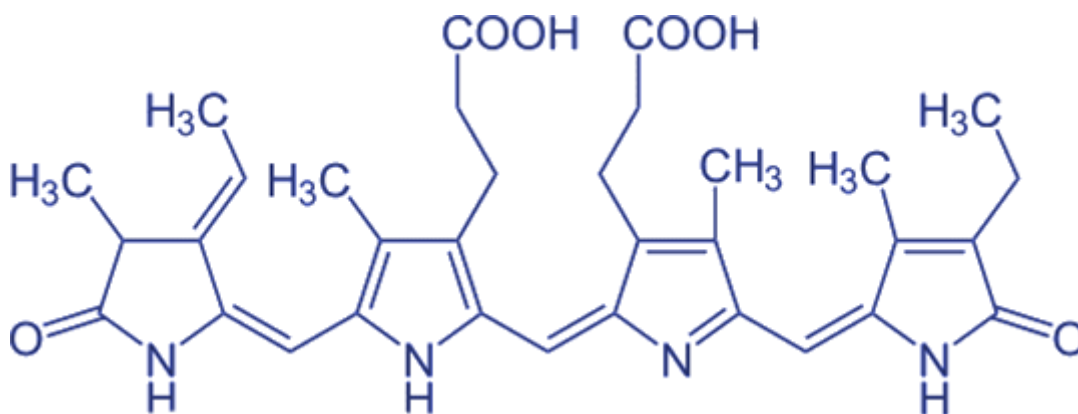


Figura 2.2 – Fórmula estrutural da ficocianina (SPOLAORE, 2006; WALTER, 2011).

Por ser hidrossolúvel e ser extraída facilmente da microalga *Spirulina*, um controle apropriado do pH e do meio durante todo o processo é fundamental para a estabilidade de suas moléculas. A degradação da ficocianina depende muito do estado de agregação das proteínas, que é diretamente influenciado pela luz, temperatura, pH e concentração das mesmas (CHAIKLAHAN, 2012). Segundo a revisão de estudos realizada por FERNÁNDEZ-ROJAS et al. (2014), a ficocianina demonstrou diversas atividades promissoras nos estudos realizados *in vitro* e *in vivo*, como atividades antioxidante, antiproliferativa, apoptótica, anti-inflamatória, hepatoprotetora, neuroprotetora, nefroprotetora, cardioprotetora, dentre outras, o que reforça a importância de sua presença como composto bioativo.

2.2.2 – Compostos Fenólicos

Os compostos fenólicos (Figura 2.3) são metabólitos secundários das plantas que englobam milhares de compostos distintos que pertencem a um amplo grupo de substâncias químicas. Tais compostos influenciam diretamente nas características sensoriais dos vegetais, como cor, sabor e aroma de frutas, vegetais e seus produtos. Muitos fenólicos apresentam atividade antioxidante, antialérgica, anticarcinogênica, antimicrobiana, entre outras (MARTÍNÉZ-VALVERDE et al., 2000; KIM et al., 2003).

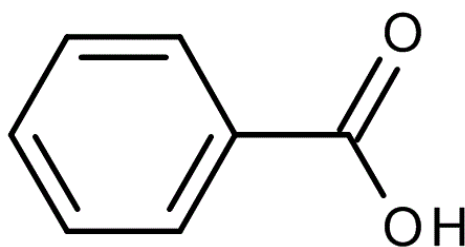


Figura 2.3 – Estrutura química básica dos compostos fenólicos.

A atividade antioxidante de cada fenol depende da sua estrutura química e a ação que o fenol exerce sobre determinado meio o relaciona com suas propriedades biológicas (MAMEDE; PASTORE, 2004). O ácido gálico, por exemplo, foi relatado por exibir atividades antibacterianas e anti-inflamatórias (RAVN et al., 1989). Tais atividades são importantes desde a área nutricional até tecnológica. Desta forma, alimentos que possuam uma grande quantidade destes compostos são naturalmente mais saudáveis, pois dispensam a utilização de aditivos antioxidantes, e assim, podem ser considerados alimentos funcionais (MARTINÉZ-VALVERDE et al., 2000).

A presença e o papel dos compostos fenólicos em plantas comuns já é alvo de estudo e está muito bem documentada, porém somente recentemente estudos tem investigado o papel dos compostos fenólicos em algas e microalgas (HAJIMAHMOODI et al. 2010, LÓPEZ et al., 2011).

2.2.3 – Flavonoides

Os flavonoides (Figura 2.4) fazem parte do grupo mais importante e variado dentro dos compostos fenólicos, distribuindo-se em subclasses com mais de 5000 compostos diferentes. (BOBBIO; BOBBIO, 1995, PIETTA, 2000). O interesse envolvendo os flavonoides advém das suas propriedades bioativas, que incluem efeitos antioxidantes, antimicrobiano, antiviral, anti-hepatotóxico, anti-hipertensivo, anti-inflamatório, dentre outros. Estes efeitos podem estar relacionados às propriedades inibitórias que os flavonoides desempenham nos vários sistemas enzimáticos (PELZER et al, 1998; FERGUSON, 2001).

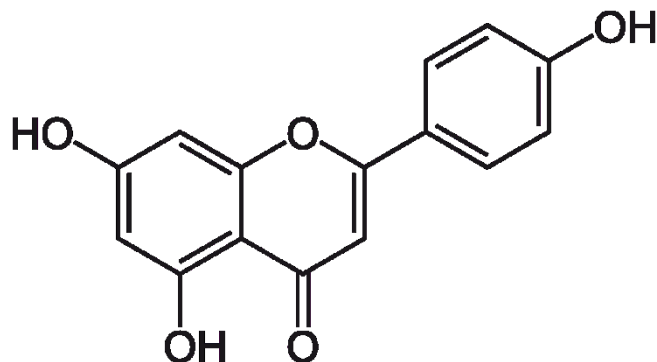


Figura 2.4 – Formula estrutural de flavonoide (apigenina) (GOIRIS et al., 2014).

Relacionados também com proteção ultravioleta e pigmentação, acreditava-se que os flavonoides eram exclusivos de plantas terrestres, tendo evoluído à exposição UV durante a transição das plantas do meio aquático para o terrestre. Entretanto, atualmente tem-se conhecimento que os flavonoides estão presentes também em diferentes linhagens de algas e cianobactérias, tendo um ancestral em comum que possuía o código genético para a biossíntese desses compostos (GOIRIS et al., 2014).

2.2.4 – Ácido cítrico

O ácido cítrico é um ácido orgânico que na temperatura ambiente corresponde a um sólido branco e cristalino, de sabor levemente ácido. Constituinte natural de plantas, tecidos animais e fluidos aparece em maior quantidade em frutas cítricas, estando presente também no corpo humano, tanto no sangue, como nos ossos (APELBLAT, 2014).

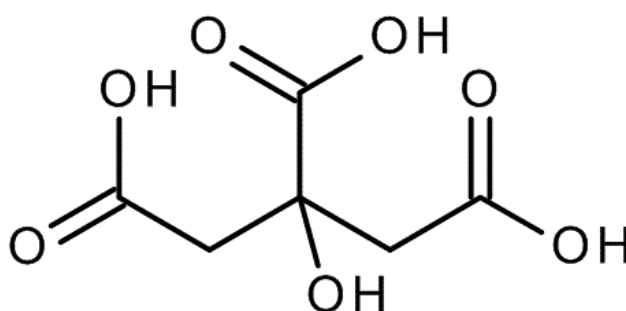


Figura 2.5- Estrutura do ácido cítrico.

É amplamente utilizado nas indústrias de alimentos e bebidas como acidulante e apresenta sabor agradável, baixa toxicidade e alta solubilidade. O ácido cítrico também confere sabor frutado, potencializa os conservantes, estende a estabilidade do ácido ascórbico e auxilia na retenção da carbonatação. Este ácido possui também a capacidade de complexação com metais pesados e como estabilizante de óleos e gorduras, sendo assim utilizado para reduzir a oxidação catalisada por estes metais (SILVA, 2014). O interesse relacionado ao aumento da produção de ácido cítrico tem sido potencializado devido a diversas aplicações avançadas, como na produção de biopolímeros e para a administração de fármacos, engenharia de tecidos e outras aplicações biomédicas (DHILLON, 2011).

2.3 – SECAGEM DE ALIMENTOS

Secar ou desidratar consiste na remoção de umidade de um material e é considerada uma das operações unitárias mais antigas e utilizadas no mundo para conservação de produtos alimentícios. Este processo envolve transferência de massa e energia simultaneamente, em que o aumento da temperatura provoca o aumento da pressão parcial de vapor no material que consequentemente reduz o teor de água no produto. (MELO, 2016). Tal processo é essencialmente importante, pois atua influenciando na manutenção da qualidade do produto durante o período de conservação, já que um baixo teor de umidade minimiza as atividades físico-químicas e impede a ação microbiana associada (COSTA, 2014). As desidratações por ar convectivo, *spray drying*, secagem a vácuo e liofilização são os métodos mais comuns de secagem de recursos agroindustriais que são comumente utilizadas para melhorar a transportabilidade e armazenamento. Geralmente são selecionados dependendo do seu custo de eficiência e a qualidade final do produto (FERNANDES et al., 2011).

Diversas vantagens estão associadas à desidratação de alimentos, como: prolongamento da vida de prateleira ou de estocagem de um produto (com baixo teor de umidade a maioria das ações enzimáticas são inibidas e o risco de oxidação diminui); agregamento de valor ao produto (qualidades e compostos nutricionais importantes podem ser potencializados pelo processo); facilidade no manuseio e embalagem de produto (com a remoção da umidade o volume e peso diminui) e em alguns casos pode ocorrer esterilização do material, visto que dependendo da temperatura em que ocorre a desidratação os micro-organismos presentes podem ser destruídos (MUJUMDAR, 2006). Desidratar também possui desvantagens, como por exemplo, a alteração de características sensoriais ou até a degradação

de compostos de interesse sendo que tudo é dependente das condições utilizadas na operação de secagem e da natureza de cada material. A otimização dos processos de secagem tem sido um desafio há anos para os engenheiros e atualmente, os avanços tecnológicos na área de preservação de alimentos têm possibilitado a desidratação de uma ampla variedade de produtos para fins comerciais (KAJIYAMA; PARK, 2008).

2.3.1 – Secagem da microalga *Spirulina*

A secagem da microalga *Spirulina* vem sendo realizada por diversos pesquisadores a fim de encontrar a melhor metodologia para conservação de suas qualidades. A seguir, alguns dos estudos mais recentes utilizando a biomassa dessa microalga.

DESMORIEUX; DECAEN (2005) estudaram a cinética de secagem convectiva da *Spirulina Arthrospira*, com diferentes temperaturas e diferentes velocidades de ar. O estudo mostrou que além da microalga ser muito higroscópica na faixa de temperatura utilizada, conseguiram atingir período de taxa constante de secagem para a condição de 40°C e velocidade do ar acima de 2,5 m/s.

OLIVEIRA et al. (2008) estudou a secagem da *Spirulina platensis* em secador de leito de jorro em duas configurações (geometria cone e cone-cilíndrica) e também em camada delgada. Ambas as técnicas apresentaram aumento similar na solubilidade em meio aquoso da *Spirulina* e o secador de leito de jorro cone-cilíndrico apresentou maior recuperação de ficocianina quando comparado ao produto obtido pela secagem em camada delgada.

OLIVEIRA et al. (2010) estudaram a otimização da secagem convectiva da microalga *Spirulina* em diferentes temperaturas e espessuras de camada para as repostas de tiobarbitúrico (TBA) e ficocianina. O estudo revelou que a temperatura do ar e a espessura da bandeja foram significativos nos impactos dos compostos analisados, tendo seus melhores valores para 55°C e espessura de amostra de 3,7mm.

COSTA et al. (2014) estudaram a comparação da secagem tradicional da microalga *Spirulina platensis* com a secagem em camada delgada utilizando bomba de calor, onde a melhor condição e melhor método foi a secagem com bomba de calor e temperatura do ar de 50°C onde houve menores valores de perda de compostos bioativos e diferença de cor.

MELO (2016) avaliou os efeitos de diferentes temperaturas na secagem convectiva no armazenamento da microalga *Spirulina platensis* tendo seu melhor resultado de secagem na temperatura de 50°C e notou um clareamento do produto na temperatura de 60°C, onde os valores de luminosidade apresentaram aumento.

PAPADAKI et al. (2017) estudaram a secagem solar acelerada e secagem a vácuo de *Spirulina platensis* e o impacto no teor de ficocianina e atividade antioxidante. Em ambas as secagens ocorreram diminuições significativas dos compostos bioativos em relação à biomassa *in natura*. A secagem a vácuo apresentou melhor atividade antioxidante, porém menor teor de ficocianina em relação à secagem solar.



Figura 2.6 – Microalga *Spirulina* em pó.

2.3.2 – Secador Rotatório

Nas indústrias, os tambores rotativos são amplamente utilizados para diversas operações e processos, como secagem, mistura, granulação, resfriamento, aquecimento e calcinação. O secador rotativo tornou-se secador convectivo mais utilizado na indústria química ao longo dos anos, tendo sua aplicabilidade nas áreas farmacêuticas, de fertilizantes, cimento e açúcar. A conveniência da utilização do secador rotativo está relacionada à sua eficiente secagem de materiais heterogêneos orgânicos e inorgânicos, promove uma secagem homogênea devido ao seu alto grau de mistura das partículas, permite a obtenção de produtos de qualidades uniformes e também não há muita dificuldade em realizar o seu *scale-up* tendo em consideração às geometrias do sistema (DING et al., 2001; SONG et al., 2003; KELLY, 1995; SMITH, 1938; KROKIDA et al., 2002; PERAZZINI, 2011).

A estrutura do secador rotatório geralmente é composta por uma casca cilíndrica ligeiramente inclinada. O material a ser seco é introduzido na extremidade superior e desloca-se através do secador por gravidade podendo ter seu contato gás-sólido por aquecimento direto ou indireto e fluxo paralelo ou contracorrente. Para a secagem de produtos alimentícios, pode ser utilizado como revestimento interior o aço inox ou qualquer outro material que evite a contaminação do produto (HONORATO, 2006).

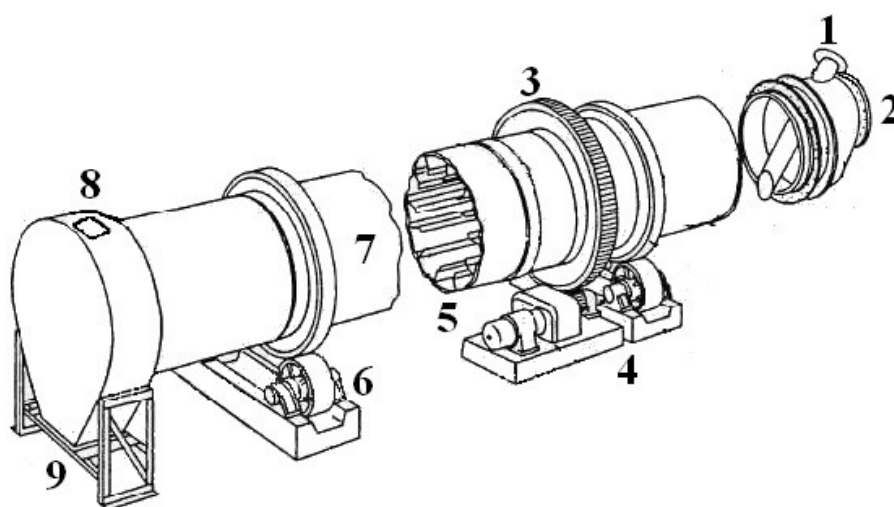


Figura 2.7 – Esquema da estrutura de um secador rotatório: (1) Alimentador do material; (2) Entrada do gás aquecido (3) Engrenagem (4) Aparato para rotação; (5) Suspensores; (6) Rolador; (7) Corpo cilíndrico; (8) Descarga de sólidos; (9) Alívio de descarga de gás.

No interior do cilindro de secagem há geralmente suspensores que funcionam como auxiliares de transporte e dispositivo de aquecimento. Que provocam a movimentação do sólido e melhoram o seu contato com o gás de secagem. Os suspensores podem ter diferentes geometrias e suas configurações variam de acordo com o projeto, ou seja, o número de suspensores, a dimensão e forma e sua influencia sobre o desempenho do secador. À medida que o secador gira, sólidos são apanhados pelos suspensores elevando-os a certa altura e os deixando cair livremente pelo ar em forma de cascata, neste momento ocorre a maior parte da secagem, pois, os sólidos entram em contato íntimo com o gás quente (HONORATO, 2006).

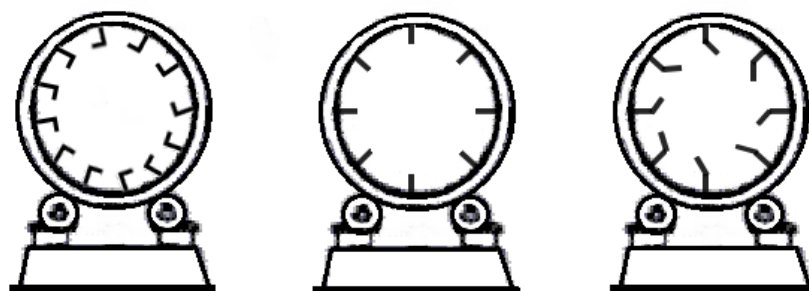


Figura 2.8 – Corte transversal do secador e diferentes tipos de suspensores.

O fluxo contra-corrente não deve ser utilizado para produtos sensíveis ao calor pois, apesar de conseguir máxima redução do teor de umidade, o material pode ser excessivamente aquecido. O fluxo paralelo possui maior viabilidade para secagem de materiais sensíveis ao calor, pois há uma rápida redução da temperatura do gás no contato com o material úmido, possibilitando também uma rápida secagem na superfície, grande vantagem caso o material tenda a grudar nas paredes (COULSON; RICHARDSON, 1999).

Os secadores rotatórios convencionais tem ótima eficiência quando utilizados para a secagem de material particulado, porém, nem sempre são considerados adequados para a secagem de materiais pastosos. Pesquisas recentes utilizam o secador rotatório com recheio de inerte com a finalidade de secar materiais fluidos. O inerte aumenta a superfície de contato entre o ar de secagem e o material a ser seco (HONORATO, 2006).

Diversos tipos de materiais foram estudados em secador rotativo convencional e com inerte. WOOD; SOKHANSANJ (1990) estudaram a secagem de alfafa em secador de tambor rotativo. PELEGRINA et al. (1999) estudaram a secagem de vegetais cortados em forma prismática em secador rotatório semi contínuo e contra corrente. ZABANIOTOU (2000) estudou a influencia do fluxo de ar, temperatura, rotação e inclinação do tambor da secagem de biomassa de *Erica Arborea* em secador rotativo convencional. MEZA et al. (2008) estudaram a secagem de biomassa de madeira em secador rotatório convencional.

PERAZZINI (2011) estudou a secagem concorrente de resíduos cítricos em secador rotatório com alimentação contínua e aquecimento direto. PUADIAN et al. (2014) estudaram a secagem de bioamassa de *Pinus Radiata* em secador rotatório convencional e SILVA et al. (2016) pesquisaram o comportamento de um secador roto-aerado na secagem de resíduo de

acerola proveniente da indústria de processamento de frutas e avaliaram o impacto da operação nos teores de compostos bioativos do mesmo.

Quanto ao uso de inertes em secadores rotatórios, alguns trabalhos podem ser citados. BURJAILI (1996) utilizou um secador rotatório com recheio de inerte metálico e cerâmico para a secagem de pasta de levedura termolisada, resíduo proveniente da indústria de açúcar e álcool. HONORATO (2006) utilizou tal sistema para a secagem de subprodutos de camarões com alimentação concorrente e avaliou as variáveis: temperatura, velocidade do ar, vazão de alimentação e concentração encapsulante, verificando a eficiência térmica, umidade do pó obtido, tempo total de secagem e produção do pó em pontos do processamento.

PADILLA et al. (2014) estudaram a secagem de pasta de banana tendo como variáveis o tempo de secagem, massa de pasta alimentada e como resposta o teor de umidade e produção de farinha de banana. MOURA (2016) estudou a secagem de resíduo de maracujá em secador rotatório com recheio de inerte, analisando diferentes condições de intermitência e de temperatura do ar de secagem, com o objetivo de avaliar a resposta na saída do secador da umidade do sólido, umidade do ar, temperatura do ar e massa produzida cumulativamente ao longo da secagem.

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo será apresentada a origem da microalga utilizada bem como toda a metodologia envolvida na desidratação da mesma e na determinação dos seus teores de compostos bioativos.

3.1- MATERIAL

A microalga *Spirulina platensis* foi fornecida pela empresa Brasil Vital, localizada na cidade de Anápolis, no estado de Goiás. As amostras foram disponibilizadas pela empresa previamente filtradas a vácuo, as quais foram separadas, empacotadas e congeladas em freezer à -18°C, onde eram mantidas até o momento dos experimentos. O empacotamento foi realizado utilizando-se pacotes plásticos transparentes de polietileno e envolvendo as unidades com papel alumínio a fim de conservar as propriedades da microalga, evitando a fotodegradação dos seus compostos.

Para a realização dos experimentos, retiravam-se as amostras do freezer cerca de 6 horas antes do início dos ensaios, as quais eram deixadas para descongelar a temperatura ambiente. Após a secagem, adotava-se o mesmo método de armazenamento do material, embalando-o até o momento da realização das análises.

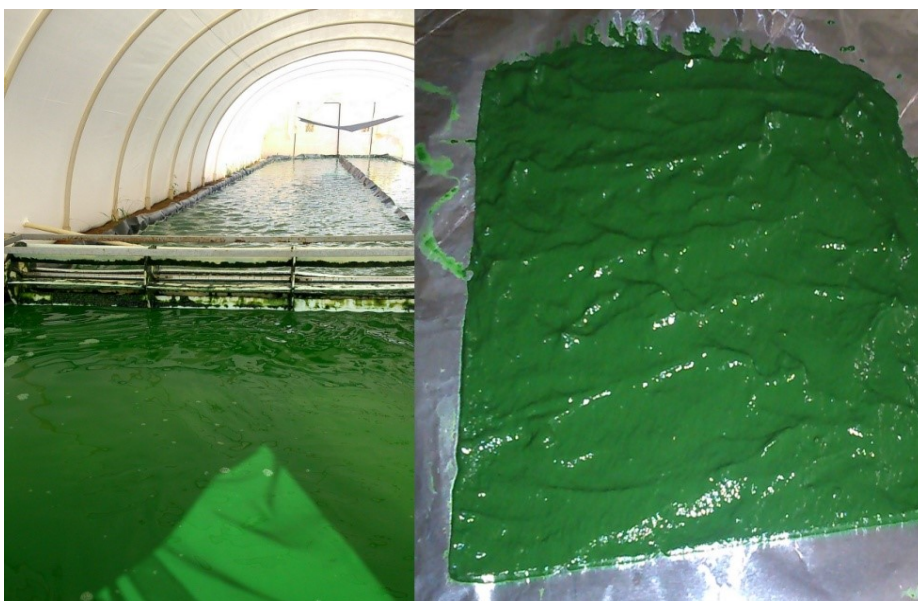


Figura 3.1 – Microalga *Spirulina platensis* in natura.

3.2 – APARATO EXPERIMENTAL

A desidratação da microalga *Spirulina platensis* foi realizada utilizando-se o secador rotatório com recheio de inertes apresentado na Figura 3.2, construído na própria Faculdade de Engenharia Química da UFU e instalado no Laboratório de Processos Particulados (LPD) no Bloco 1Z.

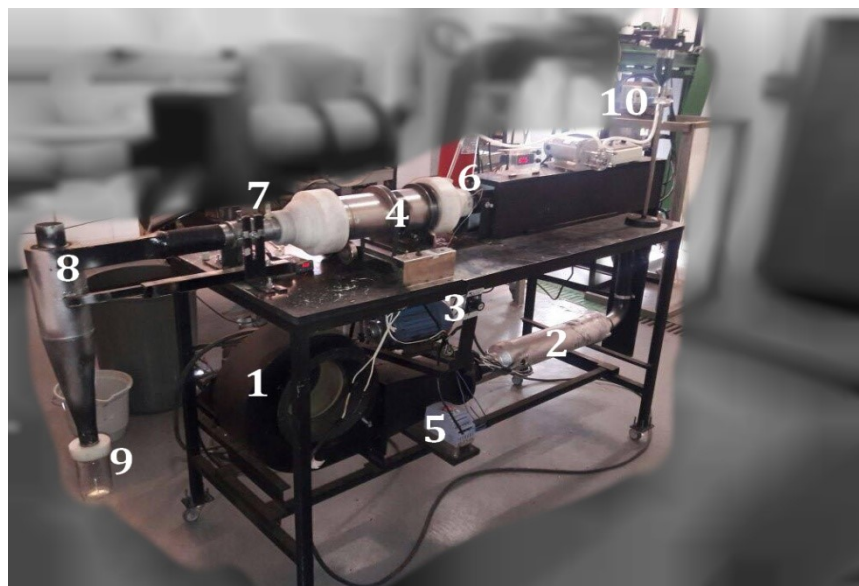


Figura 3.2 – Secador Rotatório: (1) Soprador de gás; (2) Câmara com resistências; (3) Controlador de temperatura; (4) Tambor de Secagem; (5) Controlador de rotação; (6) e (7) Termopares ; (8) Ciclone ; (9) Recipiente de coleta do particulado; (10) Dispositivo de alimentação

O secador é basicamente composto por um sistema de injeção de ar (1), realizado por um soprador do tipo ventilador radial, Marca Kepler Weber, modelo 112M, o qual força uma corrente de ar através de uma câmara (2) que contém um sistema de aquecimento elétrico, composto por duas resistências acopladas a um variador de voltagem (3). A corrente de ar chega então ao tambor rotatório (4), acoplado a um sistema de rotação, composto por um motor e inversor de frequência (5) que permitem o controle de velocidade de rotação. Termopares (6) e (7) foram instalados na entrada e saída do tambor, visando um melhor controle das variáveis experimentais. A microalga *in natura* foi inserida no sistema através de um dispositivo de alimentação (10) e após atingir certa umidade, o material na forma de pó é arrastado pela corrente de gás para o ciclone de separação (8) e, então, para o recipiente de coleta, localizado no *underflow* do mesmo (9).

Abaixo, um melhor detalhamento dos sistemas que compõem a unidade experimental:

3.2.1 – Tambor de Secagem

O tambor de secagem é composto por um cilindro de aço inox (1) com 12 cm de diâmetro por 36 cm de comprimento com bases confeccionadas em bronze em suas extremidades (2), visando uma melhor estabilidade de rotação, conforme pode ser observado na Figura 3.3 abaixo.



Figura 3.3 – (1) Cilindro aço inox 12 cm Diâmetro x 36 cm Comprimento (2) Bases de Bronze.

Quando montado (Figura 3.4), o cilindro se conecta em duas peças fixas de Tecnil, apoiado sobre anéis de teflon (3) para redução do atrito ao ser rotacionado. Há uma correia envolta na parte central do cilindro (5), conectada a um motor e um inversor de frequência para controle de rotação.



Figura 3.4 – (3) Peças fixas de tecnil com anéis de teflon (4) Entrada da alimentação (5) Correia envolta na parte central do cilindro.

No interior do tambor (Figura 3.5) há também três suspensores retos (6) de dimensão 35 x 12 x 0,12 cm, que promovem uma melhor movimentação e distribuição das partículas e auxilia na eficiência da secagem através do contato gás-sólido.

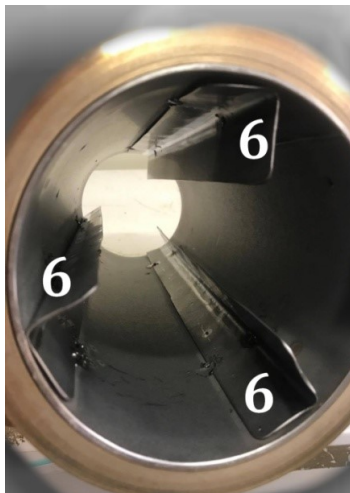


Figura 3.5 – Suspensores no interior do cilindro.

3.2.2 – Sistema de Alimentação

O sistema de alimentação é mostrado na Figura 3.6. O mesmo é composto por um recipiente de vidro com o material a ser alimentado (1), uma bomba peristáltica (2) acoplada a um controlador de vazão (3) e a mangueira de alimentação.

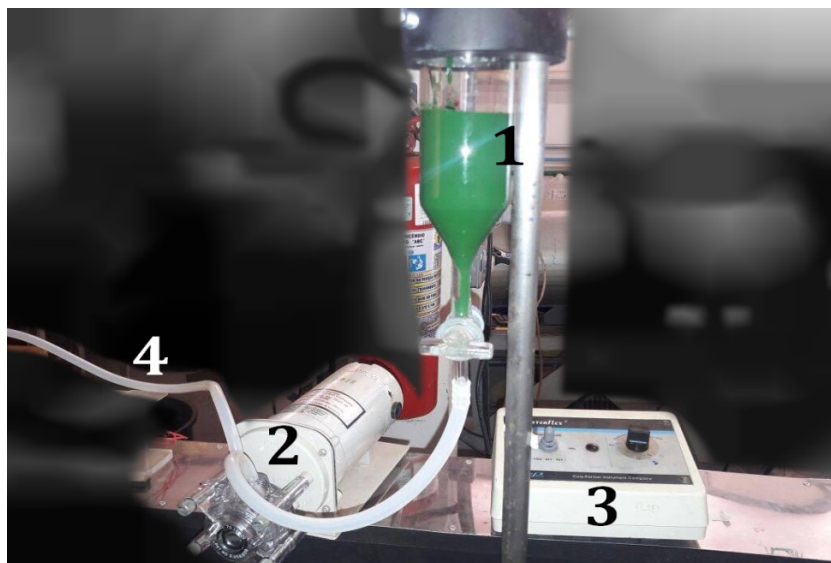


Figura 3.6 – Sistema de alimentação: (1) Tubo e suporte com material a ser alimentado (2) Bomba peristáltica (3) Controle da bomba (4) Mangueira de alimentação.

3.2.3 – Sistema de separação gás-sólido

Na extremidade final do secador há um ciclone de aço inox modelo Stairmand (Figura 3.7) utilizado para realização da separação gás-sólido. No *underflow* do mesmo foi acoplado um frasco de coleta para retirada microalga desidratada produzida ao término dos experimentos.

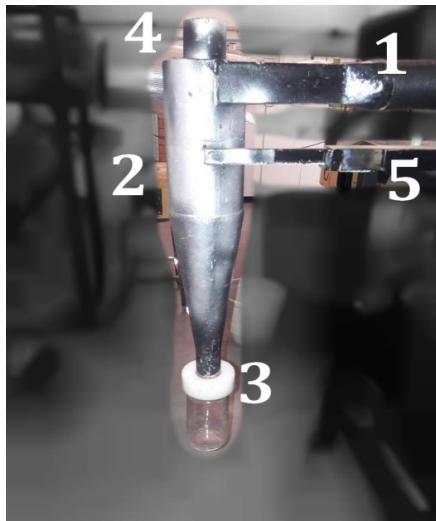
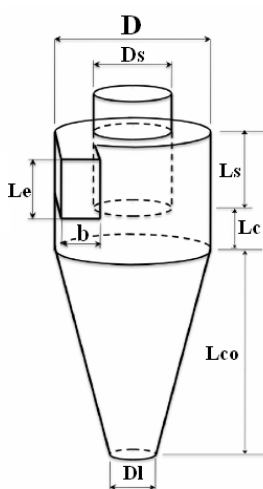


Figura 3.7 – Sistema de separação gás-sólido: (1) Saída do túnel de secagem (2) Corpo do ciclone (3) Saída e coletor do material particulado (4) Saída do gás (5) Suporte do ciclone.

Na Figura 3.8 estão expostas as relações esquemáticas das dimensões de um ciclone de modelo Stairmand. O ciclone utilizado neste trabalho possui um diâmetro de corte (D) de 10 cm.



Relação entre Dimensões	Valor da relação para modelo Stairmand
D_s/D	0,5
D_I/D	0,37
L_e/D	0,5
L_s/D	0,5
L_c/D	1
L_{co}/D	2,5
b/D	0,3

Figura 3.8 – Esquema de um ciclone Stairmand. Adaptado de SINGH et al. (2015).

3.2.4 – Material Inerte

O material inerte utilizado foi composto por esferas de porcelana de calcita (Figura 3.9), com diâmetro de 1,905 cm ($\frac{3}{4}$ de polegada) e densidade de 2,32 g/cm³. A escolha do material deve-se a boa aderência da microalga em sua superfície, além do mesmo sofrer aquecimento considerável, o que auxilia no processo de secagem do material.



Figura 3.9 – Material Inerte (Esferas de porcelana de calcita).

3.3 – PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Para melhor análise e entendimento do processo de secagem da *Spirulina* em secador rotatório, foram organizados uma série de experimentos através de um planejamento fatorial completo do tipo b^k , sendo que “k” representa a quantidade de variáveis analisadas e “b” o número de níveis escolhidos para as mesmas (NEVES et al., 2002). Para o presente trabalho foram analisadas três variáveis em dois níveis (2^3), totalizando 8 experimentos. As três variáveis escolhidas foram: temperatura do ar de secagem (°C), fator de enchimento (%) e rotação (RPM). A temperatura do ar foi monitorada através do termopar instalado na entrada do tambor rotatório. A rotação foi medida ao longo dos experimentos através de um tacômetro digital e o fator de enchimento foi calculado conforme metodologia de MACHADO (2016), levando-se em conta as dimensões do cilindro e propriedades do material inerte.

Em cada experimento foram utilizados cerca de 100 g de *Spirulina platensis in natura*, alimentada na forma de ciclos intermitentes. Para cada ciclo, cerca de 10 g do material foram introduzidos no tambor em operação e aguardava-se 15 minutos até a próxima alimentação, repetindo-se o ciclo até que toda massa fosse alimentada. Com o término dos ciclos de alimentação da microalga, o secador foi deixado então em operação por 90 minutos,

visando maximizar a remoção do material aderido tanto aos inertes quanto as paredes do tambor. A velocidade do ar também foi mantida constante em todos os experimentos, no valor de 5,4 m/s, correspondente a capacidade máxima do soprador e que favoreceria a coleta no ciclone.

Assim, o planejamento experimental adotado é mostrado na Tabela 3.2, onde os níveis estão em forma codificada, sendo -1 correspondente ao nível inferior e +1 ao nível superior.

Tabela 3.2 – Planejamento fatorial 2^3 .

Experimento	Temperatura (°C)	F. Ench. (%)	Rotação (RPM)
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1
4	-1	+1	+1
5	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1

Os valores reais das variáveis estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Valores das variáveis correspondentes a cada nível.

Variável	Níveis	
-	-1	+1
Temperatura (°C)	50	90
Fator de Enchimento (%)	15	27
Rotação (RPM)	40	60

3.4 – ANÁLISES REALIZADAS

Diversas análises foram realizadas no material *in natura* e desidratado, com o propósito de determinar sua umidade e os teores de compostos bioativos presentes. Devido à fotossensibilidade da microalga, todas as análises foram realizadas em ambiente escuro e climatizado. A metodologia aplicada a cada análise será explicada a seguir.

3.4.1 – Umidade e Atividade de Água

O teor de umidade foi determinado através método da estufa Marconi modelo MA033 (Figura 3.10a) submetendo as amostras à $105 \pm 3^\circ\text{C}$ por 24 horas (AOAC, 1995). Visando complementar as análises, mediu-se também o teor de Atividade de Água (Aw) através do equipamento Lab-Swift AW, Novasina (Figura 3.10b). Todas as análises foram realizadas em triplicata.



Figura 3.10 – a) Estufa Marconi modelo MA033 e b) Lab-Swift AW, Novasina.

3.4.2 – Análises de Compostos Bioativos

No presente trabalho, analisaram-se os seguintes compostos bioativos: fenólicos totais, flavonoides totais, teor de ácido cítrico e ficocianina. Em todas as análises, as amostras foram pesadas previamente em balança com precisão de 10^{-4}g , da fabricante Shimadzu, modelo AY220.

Na determinação dos compostos fenólicos e flavonoides, utilizou-se o método de extração com metanol absoluto, utilizando cerca de 20 mL do mesmo. Colocou-se este reagente em contato com a amostra em um tubo nalgene com tampa e agitou-o em vórtex

NSA002441, 50Hz, da Edutec por cerca de 3 minutos. Após a agitação, armazenou-se a mistura em local escuro por 1 hora a fim de obter-se uma maior extração dos compostos presentes. Ao fim do tempo, filtrou-se o sobrenadante utilizando filtros de papel Mellita Original, modelo 102, tomando-se cuidado para que o corpo de fundo permanecesse no tubo e então, iniciaram-se as análises, realizadas em triplicata.

De acordo com SINGLETON; ROSSI (1965) pode-se determinar o **teor de compostos fenólicos totais (TPC)** adotando-se o método de *Folin-Ciocalteu*, o qual utiliza ácido gálico ($C_7H_6O_5$) como padrão e leitura em espectrofotômetro. O reagente de *Folin-Ciocalteu* é uma solução de íons complexos poliméricos formados a partir de heteropoliácidos fosfomolibdicos e fosfotungsticos, responsável por oxidar os fenolatos, reduzindo os ácidos a um complexo azul Mo-W, possibilitando sua leitura no espectrofotômetro (SILVA, 2015). A leitura foi realizada a 622 nm e os resultados foram obtidos considerando-se o ácido gálico como padrão. Os resultados foram expressos em mg de ácido gálico / 100 g amostra em base seca.

Através da leitura em espectrofotômetro pode-se determinar também o **teor de flavonoides totais (TFC)**. Utilizou-se para tal o método colorimétrico descrito por ZHISHEN et al. (1999) em que cloreto de alumínio ($AlCl_3$) é utilizado como agente de deslocamento para diminuir a interferência de outros compostos na leitura de absorbância da solução. A leitura foi realizada a 450 nm e os resultados foram obtidos considerando-se a rutina ($C_{27}H_{30}O_{16}$) como padrão. Os resultados foram expressos em mg de rutina / 100 g amostra em base seca.

Para se determinar a **acidez total titulável (ATT)**, expressa na presença de ácido cítrico nas amostras, macerou-se cerca de 0,75 g das amostras com 250 mL de água destilada e filtrou-se a solução em um coador de pano. Após a filtração, iniciou-se a análise dos extratos obtidos utilizando-se o método titulométrico da *Association of Official Analytical Chemists* – AOAC (1995), em que os extratos foram titulados com NaOH 0,1 N padronizado até a viragem. Os resultados foram expressos em mg de ácido cítrico / 100 g amostra em base seca.

Para determinar o **teor de Ficocianina (TF)** das amostras, utilizou-se o método de extração com água descrito por COSTA et al. (2015), analisando a mesma solução obtida na maceração das amostras e submetendo-a a leitura em espectrofotômetro. As leituras foram

feitas nas absorvâncias de 620 e 652 nm e o teor de ficocianina foi calculado de acordo com a Equação 1. Os resultados foram expressos em g ficocianina/ 100g em base seca.

$$TF = \frac{Abs_{620} - 0,474 Abs_{652}}{5,34} \quad (1)$$

3.4.3 – Cálculo do Rendimento (%)

Além das análises previamente relatadas, efetuou-se para cada experimento do planejamento o cálculo de **rendimento**, levando-se em conta a relação entre a quantidade de Spirulina (em base seca) que é produzida ao término da secagem com a quantidade de biomassa alimentada (em base seca) no início do processo, conforme apresentado na equação 2.

$$Rendimento (\%) = \frac{massa\ seca\ que\ sai\ (g)}{massa\ seca\ que\ entra\ (g)} \times 100\% \quad (2)$$

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta todos os resultados obtidos nas secagens e análises das amostras da microalga *Spirulina platensis*. Os resultados relacionados à microalga *in natura* são apresentados inicialmente seguidos dos resultados da microalga desidratada. A microalga *in natura* foi analisada para determinar o teor de compostos bioativos iniciais para efeitos de comparação. Para o material desidratado, analisou-se o rendimento de cada experimento, a umidade final, a atividade de água e a variação na composição dos compostos bioativos.

4.1 – RESULTADOS PARA A *Spirulina platensis* IN NATURA

Os resultados das análises de umidade e dos teores de compostos bioativos para a microalga *Spirulina platensis in natura* estão apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados das análises para a microalga *in natura*

Análise	Resultado
Umidade (%)	88,56 ± 0,54
Fenólicos (mg ácido gálico/100g base seca)	253,63 ± 11,64
Flavonoides (mg rutina /100g base seca)	7,55 ± 0,74
Acidez (mg ácido cítrico/100g base seca)	2086,92 ± 196,61
Ficocianina (g ficocianina/100g base seca)	8,43 ± 0,46

Observa-se através da Tabela 4.1 que o teor de umidade da *Spirulina platensis* utilizada no presente trabalho é de 88,56 ± 0,54 % (base úmida), o que se aproxima do valor encontrado por outros autores em estudos de secagem da microalga em questão (Tabela 4.2). A alta umidade revela a necessidade de desidratação da *Spirulina*, pois, ao eliminar uma grande quantidade de água, a proliferação de bactérias e outros micro-organismos que tornariam a vida útil deste material extremamente reduzida são interrompidos (BORTOLOTTI, 2013).

Tabela 4.2 – Teores de umidade da microalga *Spirulina platensis* em diferentes estudos

Autor	Ano	Umidade(%)
TIBURCIO et al.	2007	87,39
OLIVEIRA et al.	2008	76.70 $\pm$ 0.60*
COSTA et al.	2015	83,04 $\pm$ 0,20
POHNDORF et al.	2016	76.70 $\pm$ 0.60*
MELO et al.	2016	83,40 $\pm$ 0,20
PAPADAKI et al.	2017	88.84 $\pm$ 3.30

*Valores encontrados após prensagem da biomassa

Segundo VASCO (2009) produtos que contenham concentração abaixo de 100 mg de ácido gálico/100g são considerados produtos com baixa concentração de fenólicos enquanto os que possuem valor acima de 1000 mg de ácido gálico/100 g são considerados produtos de alta concentração destes compostos. Os valores de teores de fenólicos obtidos para a microalga *in natura* foi de 253,63 $\pm$ 11,64 mg/100 g, o que significa que o material possui uma concentração intermediária destas substâncias. O conteúdo de compostos fenólicos condiz com COLLA et al. (2007) que descreveram ter encontrado durante a avaliação da produção de biomassa da mesma microalga uma concentração de fenólicos 242,0 a 499,0 mg/100 g.

O teor de flavonoides encontrados para a amostra *in natura* foi de 7,55 $\pm$ 0,74 mg/100 g amostra seca, valores considerados altos quando comparados a de frutas como o resíduo de maracujá estudado por SILVA (2015) que possui teores de 0,47 $\pm$ 0,05 mg rutina/100 g amostra seca ou nos de resíduo de acerola, descritos por SILVA et al. (2016) que atingem valores de 1,33 $\pm$ 0,14 mg / 100 g amostra seca.

A acidez da microalga *in natura* obtida foi de 2086,92 $\pm$ 196,61 mg/100 g amostra seca, valor um pouco inferior ao obtido por SILVA (2015) na análise dos resíduos de maracujá *in natura*, cerca de 2701,35 $\pm$ 89,13 mg ácido cítrico / 100 g base seca. Apesar de ser menos ácida que típicas frutas cítricas, a *Spirulina* possui teores consideráveis do composto.

Já o teor médio de ficocianina encontrado para a amostra *in natura* foi de 8,43 $\pm$ 0,46 g/100 g base seca o que evidencia uma alta quantidade deste composto presente na microalga. PAPADAKI et al. (2017) encontraram cerca de 4,93 g de ficocianina/100g base seca e Costa et al. (2015) encontraram cerca de 13,63g ficocianina/100g base seca nas

microalgas que utilizaram em seu estudo, tal diferença pode ser explicada pelas diferenças nas condições do meio de cultivo em que a composição bioquímica da microalga pode variar (COHEN, 1986; RICHMOND, 1990).

4.2 – RESULTADOS PARA A *Spirulina platensis* DESIDRATADA

4.2.1 – Umidade Final (UF) e Atividade de água (Aw)

Conforme discutido no Capítulo 2, o objetivo primordial da desidratação de um alimento é prolongar sua vida útil, entretanto, desidratar um alimento possui outras vantagens como, por exemplo, a possível destruição de bactérias devido ao processo térmico. A Atividade de água é um dos fatores predominantes na indústria e através dele é possível quantificar a água disponível para o crescimento microbiótico e as reações responsáveis por degradar os alimentos e assim, prever a estabilidade dos mesmos (CELESTINO, 2010). A umidade final e a atividade de água dos produtos de cada bem como as condições operacionais dos mesmos estão expressas na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Umidade Final e Atividade de Água da *Spirulina* desidratada

Experimento	Temperatura (°C)	Fator de Enchimento (%)	Rotação (RPM)	Atividade de Água (Aw)	Umidade Final (%)
1	50,0	15,0	40,0	0,290	4,91%
2	50,0	15,0	60,0	0,290	4,81%
3	50,0	27,0	40,0	0,309	4,94%
4	50,0	27,0	60,0	0,233	4,16%
5	90,0	15,0	40,0	0,309	4,13%
6	90,0	15,0	60,0	0,240	4,44%
7	90,0	27,0	40,0	0,244	4,39%
8	90,0	27,0	60,0	0,208	3,56%

Quando um alimento possui elevada quantidade de água ($A_w > 0,9$) os componentes deste alimento formam soluções que servem de substrato para o desenvolvimento microbiótico e assim degradam facilmente. Alimentos com A_w menor que 0,6 têm reações extremamente lentas, pois as moléculas de água estão fortemente ligadas ao material e assim não há dissolução dos componentes e os micro-organismos não são desenvolvidos (CELESTINO, 2010).

Através da análise dos resultados expressos na Tabela 4.3 observa-se que em todos os experimentos a microalga desidratada (Figura 4.1) atingiu valores satisfatórios de atividade de água e umidade final, tendo seu menor valor obtido quando as condições operacionais estavam em maior temperatura, maior fator de enchimento e maior rotação. Ao observar os experimentos de forma geral é possível verificar que à medida que cada variável é utilizada no maior nível há uma maior eficiência de remoção de umidade, este resultado era esperado pois, a cinética de remoção de umidade é superior com temperatura de ar de secagem maior, bem como o contato gás-sólido se torna mais eficiente utilizando um maior fator de enchimento e maior rotação do tambor de secagem. No entanto, deve-se analisar se os teores de compostos bioativos foram impactados nas condições onde a desidratação foi mais eficaz.



Figura 4.1 – Microalga *Spirulina platensis* após as secagens.

4.2.2 – Análise do Rendimento (%)

Os resultados de rendimento de produto final obtidos nos experimentos realizados estão expostos na figura 4.2 abaixo.

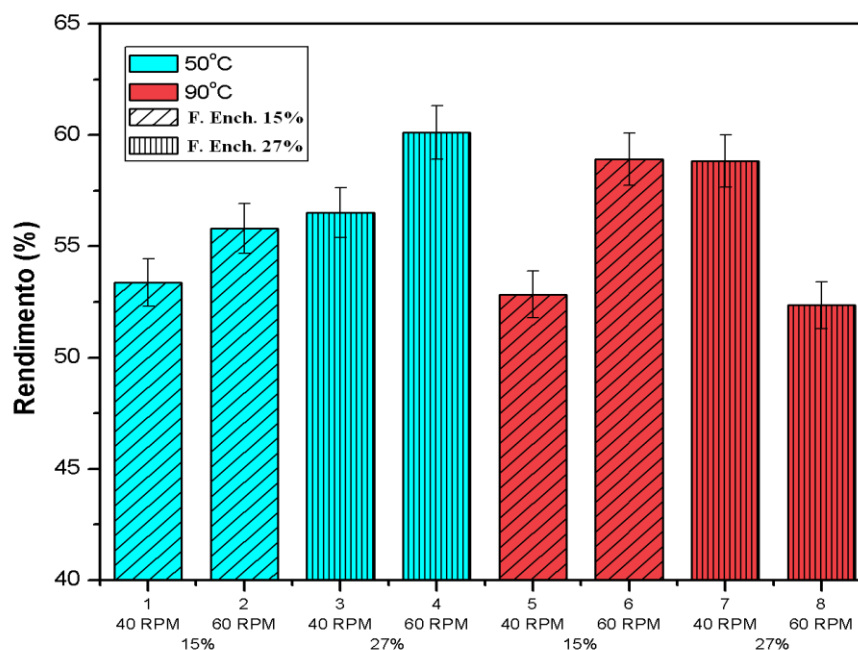


Figura 4.2 – Rendimento (%) das diferentes condições operacionais.

Pode-se observar através da figura 4.2 que nos experimentos realizados na menor temperatura de 50°C (Experimentos de 1 a 4) há um comportamento de aumento de rendimento a medida que aumenta-se o fator de enchimento (Exp. 1 → 3 e 2 → 4) e também a velocidade de rotação (Exp. 1 → 2 e 3 → 4), atingindo o melhor resultado de todos no experimento 4, de fator de enchimento 27% e velocidade de rotação 60 RPM. Este aumento de rendimento na menor temperatura, onde a secagem ocorre mais lentamente deve-se provavelmente a um melhor desprendimento do material seco das esferas inertes e das paredes do tambor de secagem. À medida que se aumenta o fator de enchimento juntamente com uma maior velocidade de rotação há um maior atrito culminando assim, em uma maior quantidade de produto final.

Ao analisar os experimentos conduzidos na maior temperatura de 90°C (Experimentos de 5 a 8) observa-se o mesmo comportamento dos de menor temperatura para o menor fator de enchimento (Experimentos 5 e 6), porém, ao utilizar-se um maior fator de enchimento (Experimentos 7 e 8) nota-se que o rendimento cai bruscamente quando aumenta-

se a rotação. Tal fato deve-se provavelmente a alta temperatura do ar de secagem combinado com a grande quantidade de material inerte e alta rotação, no qual fazem com que a secagem ocorra muito rapidamente causando maior aderência do material tanto nas paredes internas do secador quanto na superfície das esferas inertes, diminuindo assim, a quantidade de produto final.

4.2.3 – Análise dos compostos bioativos

Teor de Fenólicos Totais (TPC)

Os resultados obtidos para as análises dos teores de fenólicos totais presentes na microalga após as desidratações e *in natura* estão expostos na Figura 4.3 a seguir.

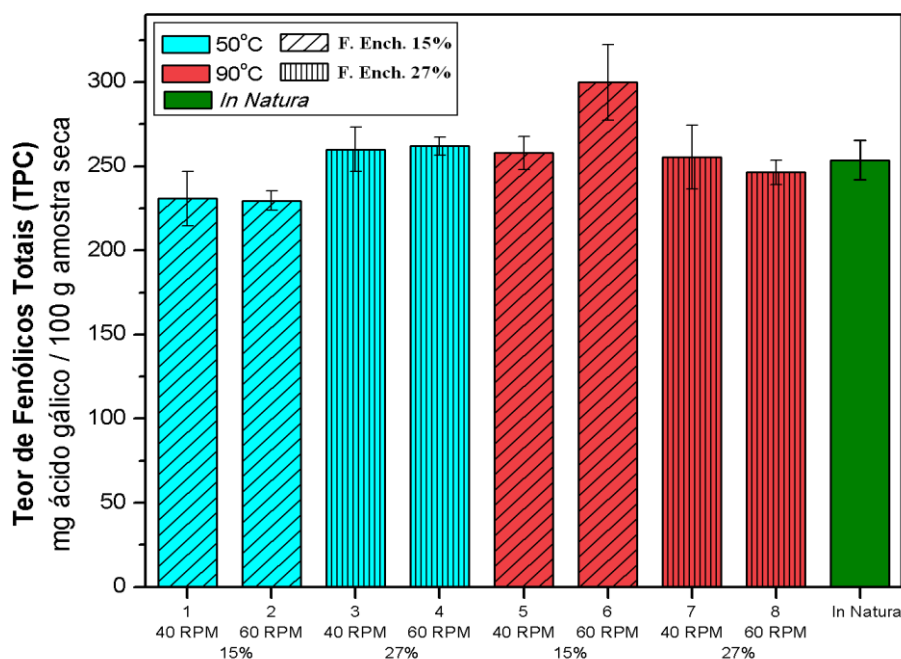


Figura 4.3 – Teor de fenólicos Totais (TPC) da microalga após as desidratações e *in natura*.

Nota-se pela análise do gráfico que em todas as diferentes condições operacionais os teores de fenólicos se mantiveram próximos aos da microalga *in natura* o que evidencia um baixo impacto deste método nestes compostos bioativos. Comparando com trabalhos na literatura, observou-se que COSTA et al. (2014) estudaram a secagem tradicional e a secagem com bomba de calor da microalga *Spirulina platensis* e relataram perdas acima de 50% do conteúdo de fenólicos da microalga independente das condições dos experimentos. OLIVEIRA (2016) estudou a secagem da microalga pela técnica de *refractance window* e

obteve teores de fenólicos superiores aos das amostras *in natura* em diversas condições operacionais.

Ao analisar-se a temperatura do ar de secagem de 50°C (Experimentos de 1 a 4) e os fatores de enchimento isolados (Experimentos 1 → 2 e 3 → 4), observou-se que não houve influência do aumento de rotação no TPC. Entretanto, quando se analisa o aumento do fator de enchimento nesta mesma temperatura para uma mesma rotação (Experimentos 1 → 3 e 2 → 4) verificou-se um ligeiro aumento nos teores de fenólicos totais. Tal aumento pode ser justificado por estudos indicam que durante a remoção de umidade há um rompimento da matriz interna do material, aumentando os teores de bioativos presentes devido a uma liberação destes compostos (CHISM & HAARD, 1996).

Na temperatura do ar de secagem de 90°C (Experimentos de 5 a 8), ao analisar-se separadamente os diferentes fatores de enchimento (Experimentos 5 → 6 e 7 → 8) verificou-se que no fator de enchimento de 15% (Experimentos 5 → 6) houve uma influência positiva com o aumento da rotação elevando os teores de fenólicos acima dos da amostra *in natura* e atingindo seu melhor resultado de todas as condições operacionais. Entretanto, quando analisa-se os experimentos com maior fator de enchimento (27%)(Experimentos 7 e 8), o acréscimo da velocidade de rotação gerou um impacto negativo nestes compostos bioativos. Comparando os experimentos de mesma rotação, observou-se que o aumento de fator de enchimento na maior temperatura não influenciou os teores de fenólicos na menor velocidade de rotação (Experimentos 5 → 7) e causou uma maior degradação dos teores na maior rotação (Experimentos 6 → 8).

NAKAGAWA (2016) afirmou que processos de secagem a altas temperaturas causam maior degradação dos compostos bioativos na microalga *Spirulina*, porém, para os experimentos realizados, tal comportamento não foi observado para os teores de fenólicos totais no qual o melhor resultado foi obtido para a temperatura de 90°C com menor fator de enchimento e maior rotação, em que provavelmente a taxa de liberação destes compostos superou a taxa de degradação dos mesmos. (CHISM; HAARD, 1996)

Teor de Flavonoides Totais (TFC)

A figura 4.4 a seguir exhibe os resultados obtidos em relação aos teores de flavonoides totais presentes nas amostras desidratadas e *in natura* da microalga *Spirulina platensis*.

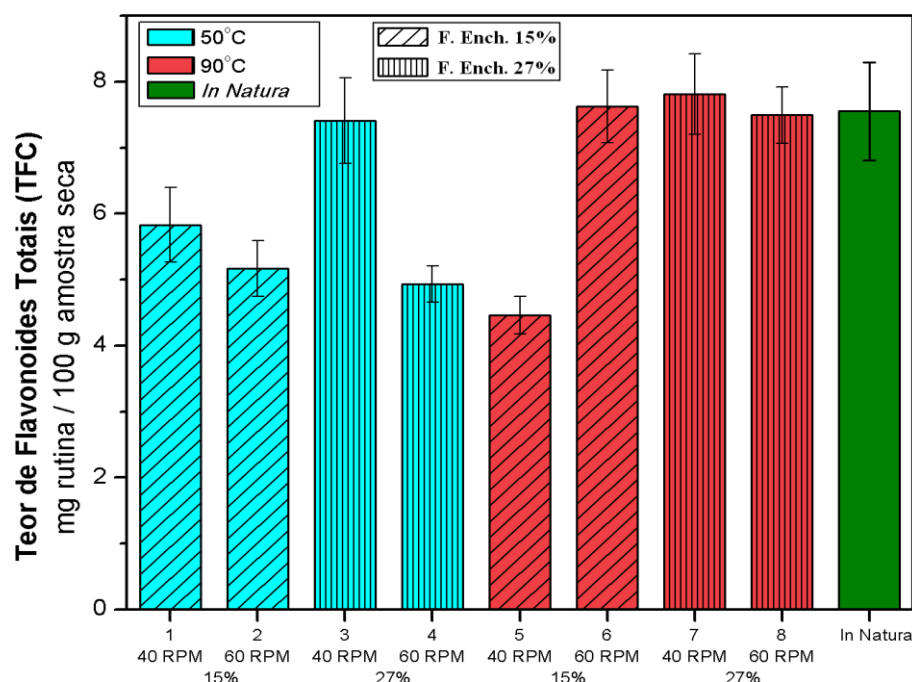


Figura 4.4 – Teor de Flavonoides Totais (TFC) da microalga após as desidratações e *in natura*.

Na figura 4.4, fica evidente ao analisar-se os resultados para a temperatura de ar de secagem de 50°C (experimentos de 1 a 4) que um incremento de rotação causou um impacto negativo no teor de flavonoides independentemente do fator de enchimento utilizado (Experimentos 1 → 2 e 3 → 4). Entretanto, para os experimentos realizados na temperatura de 90°C, tal incremento na rotação apresentou um efeito positivo nos experimentos realizados com menor fator de enchimento (Experimentos 5 → 6) e não teve nenhum impacto nos experimentos de maior fator de enchimento (Experimentos 7 → 8).

É possível observar um comportamento em relação ao fator de enchimento em todos os experimentos realizados independentemente da temperatura. Na menor rotação (40 RPM), observou-se que ao aumentar o fator de enchimento, há uma menor degradação dos flavonoides totais (Experimentos 1 → 3 e 5 → 7). Já para a maior rotação (60 RPM) quando há um incremento no fator de enchimento (Experimentos 2 → 4 e 6 → 8) não observa-se diferenças consideráveis nos teores.

Comparando-se as duas temperaturas de ar de secagem, pode-se observar que nos experimentos conduzidos na maior temperatura de ar (Experimentos 5 a 8) os teores de flavonoides sofreram menor degradação e se mantiveram próximos aos teores deste composto

na microalga *in natura*, apresentando melhores resultados em relação a menor temperatura (Experimentos 1 a 4), salvo para a condição de menor fator de enchimento e menor rotação (experimento 5). Ao analisar-se a melhor condição de operação dos experimentos realizados para o TFC, observou-se que as condições de maior fator de enchimento e menor rotação apresentaram melhores resultados em ambas as temperaturas (Experimentos 3 e 7).

Acidez Total Titulável (ATT)

Os resultados para a acidez total titulável da microalga após as desidratações e *in natura* estão expressos na Figura 4.5.

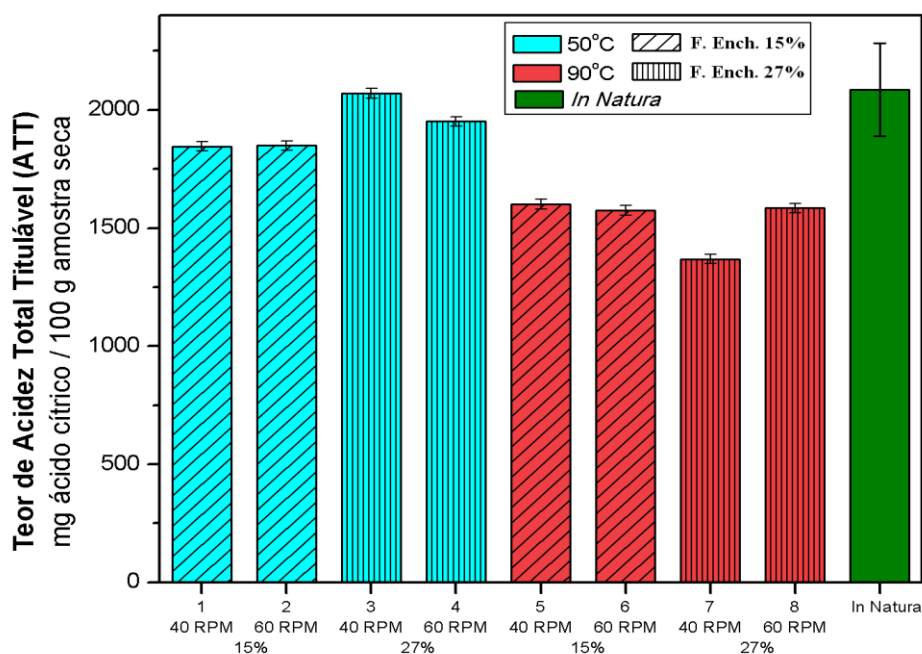


Figura 4.5 – Acidez Total Titulável (ATT) da microalga após as desidratações e *in natura*.

Observa-se através da análise da Figura 4.5 que em todas as condições analisadas os teores de ácido cítrico sofreram leve degradação ou nenhuma em relação à microalga *in natura* e que comparando-se ambas as temperaturas estudadas observa-se que os experimentos na maior temperatura (90°C) ocasionaram uma maior degradação do ácido cítrico em relação a menor temperatura (50°C). Tal comportamento foi relatado por PODSEDEK (2007) que descreveu que o ácido cítrico possui baixa estabilidade durante processos térmicos, exibindo degradação em operações com altas temperaturas.

Para ambas as temperaturas estudadas, ao utilizar-se o menor fator de enchimento (Experimentos 1 → 2 e 5 → 6) verifica-se que o incremento de rotação não alterou os efeitos na acidez das amostras. Entretanto, para a menor temperatura (50°C) e maior fator de enchimento (27%) observou-se que o incremento de rotação causou uma maior degradação do ácido cítrico na amostra (Experimentos 3 → 4), comportamento contrário do que é observado para as mesmas condições na maior temperatura (90°C, Experimentos 7 → 8) .

Ao analisar-se os efeitos do aumento do fator de enchimento, pode-se observar que na menor temperatura (50°C) para ambas as velocidades de rotação (Experimentos 1 → 3 e 2 → 4) ocorreu um menor impacto nos teores de ácido cítrico em relação a microalga *in natura* ao aumentar-se a quantidade de material inerte. Já para a maior temperatura (90°C), na menor rotação (Experimentos 5 → 7) houve um impacto negativo com o aumento do fator de enchimento, enquanto que na maior rotação (Experimentos 6 → 8) não houve diferença significativa.

Teor de Ficocianina (TF)

Os resultados das análises para os teores de Ficocianina nas diferentes condições do processo de secagem estão expostos na Figura 4.6.

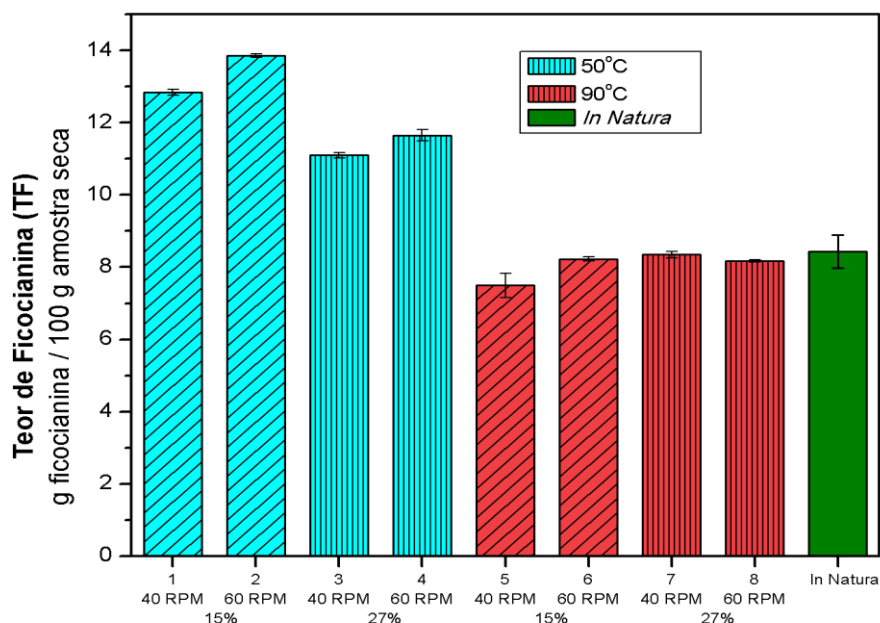


Figura 4.6 – Teor de Ficocianina (TF) da microalga após as desidratações e *in natura*.

A figura 4.6 explicita de forma geral que os experimentos conduzidos na menor temperatura de ar de secagem (Experimentos de 1 a 4) apresentaram um considerável aumento no teor de ficocianina em relação à microalga *in natura*, enquanto que os experimentos realizados na maior temperatura (Experimentos de 5 a 8) revelaram um leve ou nenhum impacto nos teores deste composto bioativo.. Este fato novamente pode ser explicado pela liberação destes compostos que ocorre durante o processo de desidratação (CHISM & HAARD, 1996). Foi relatado por MARTELLI et al. (2014) que a ficocianina é também mais estável em condições ácidas do que sob condições neutras ou alcalinas. Relacionando as Figuras 4.5 e 4.6 pode-se observar que nas condições onde a acidez era superior ocorreu um efeito positivo no teor de ficocianina, tendo sua melhor condição na temperatura de ar de secagem de 50°C, fator de enchimento 15% e velocidade de rotação 60 RPM (experimento 2).

A redução da ficocianina depende do estado de agregação da proteína, que é interferida por fatores como temperatura, luz, pH e concentração de proteína (JESPERSEN et al., 2005; SARADA et al., 1999). A ficocianina é também um composto termossensível e degrada com o aumento da temperatura, particularidade relacionada a posição periférica dos ficobilissomas na membrana tilacóide (DOKE, 2005). Assim, nos experimentos conduzidos na maior temperatura de ar de secagem (90°C) fica visível os menores teores de ficocianina em relação aos experimentos realizados a 50°C, .

Assim como nos resultados obtidos neste trabalho, COSTA (2014) também relatou durante a secagem tradicional e utilizando bomba de calor da microalga *Spirulina* que em ambos os métodos ocorreu uma diminuição dos teores de ficocianina em relação a microalga *in natura*, juntamente com uma influencia significativa do aumento da temperatura. OLIVEIRA (2016) relatou também uma considerável redução dos teores de ficocianina na secagem da microalga *Spirulina* através do método de *refractance window* em diferentes temperaturas.

Analisando os experimentos realizados com o ar de secagem na menor temperatura (50°C – Experimentos de 1 a 4), ao analisarmos os fatores de enchimento separadamente, pode-se observar que com o incremento de rotação (Experimentos 1 → 2 e 3 → 4) ocorreu um aumento nos teores de ficocianina. Ainda analisando os experimentos de menor temperatura, na mesma rotação e ao compararem-se os dois diferentes fatores de enchimento (Experimentos 1 → 3; 2 → 4), nota-se que quando há um incremento de material inerte os

teores de ficocianina sofreram redução, indicando um efeito negativo da maior quantidade de material inerte nesse composto

Já para a temperatura de ar de secagem de 90°C (Experimentos de 5 a 8) e menor fator de enchimento (15%), com o incremento de rotação (Experimentos 5 → 6) ocorreu um aumento do teor de ficocianina, mesmo comportamento observado para os experimentos conduzidos em menor temperatura. Já para os experimentos com a maior quantidade de inerte tal efeito da rotação não foi observado. Analisando-se a influência do fator de enchimento nessa mesma temperatura, observa-se que apenas na rotação de 40 RPM (Experimentos 5 → 7) ocorreu um leve aumento nos teores de ficocianina quando aumentou-se a quantidade de inertes, comportamento que não foi observado na rotação de 60 RPM (Experimentos 6 → 8).

Capítulo 5

CONCLUSÃO

Confirmando a importância nutritiva da *Spirulina platensis* exposta na revisão realizada no Capítulo 1, as análises realizadas para a microalga *in natura* exibiram elevados teores de compostos bioativos, revelando um grande potencial nutritivo. Porém, devido a sua grande quantidade de umidade, a operação de desidratação se mostra necessária para a conservação deste material. A desidratação consiste na remoção de umidade, portanto, a umidade final e atividade de água se tornam fatores importantíssimos para se avaliar a eficácia do método. Em todos os experimentos realizados obteve-se ótimos resultados com uma atividade de água entre 0,2 e 0,4. O experimento de melhor resultado para estas análises foi o de número 8, com maior temperatura de ar de secagem (90°C), maior fator de enchimento (27%) e maior velocidade de rotação (60 RPM) atingindo uma umidade final de 3,56% e atividade de água de 0,208.

Como todos os experimentos atingiram ótimos valores de remoção de umidade, o rendimento de produto final se torna o fator mais importante para se analisar a eficiência do secador rotatório com recheio de inerte. Nessas condições, a secagem conduzida na menor temperatura de ar de secagem (50°C), maior fator de enchimento (27%) e maior velocidade de rotação do tambor (60 RPM) atingiu o melhor valor de rendimento de 60,12% (experimento 4).

Em relação aos compostos bioativos, pode-se afirmar que a técnica causou baixo impacto nos teores tendo seus valores mantidos próximos ou elevados acima dos da microalga *in natura* sob condições específicas. Os experimentos que apresentaram melhores resultados para cada composto bioativo analisado estão expostos na tabela 5.1 abaixo.

Tabela 5.1 – Melhores resultados para cada composto bioativo analisado

Composto Bioativo	Experimento	Resultado (mg/100g amostra seca)	Temperatura (°C)	Fator de Enchimento (%)	Rotação (RPM)
Fenólicos	6	299,84 ± 22,60	90	15	60
Flavonoides	7	7,81 ± 0,61	90	27	40
Acidez	3	2070, 66	50	27	40
Ficocianina	2	13,85 ± 0,04	50	15	60

Por conseguinte, os resultados apresentados neste trabalho evidenciam o importante papel que a microalga *Spirulina platensis* pode ter na nutrição saudável expondo a sua necessidade de aproveitamento. A secagem por secador rotatório com recheio de inerte se mostrou promissora em todos os aspectos analisados, que englobam a eficiência na remoção de umidade, rendimento da operação e baixo impacto nos teores de compostos bioativos, podendo até ser maximizados sob condições específicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AARONSON, S.; DUBINSKY, Z. Mass production of microalgae. *Experientia Basel*, v.38, p.36-39, 1982.
- ABDULQADER, G.; BARSANTI, L.; TREDICI, M.R. Harvest of *Arthrospira platensis* from Lake Kossorom (Chad) and its household usage among the Kanembu. *Journal of Applied Phycology*, 12: 493-498 . 2000.
- AMBROSI, M. A.; REINEHR, C. O.; BERTOLIN, T. E.; COSTA, J.A.V.; COLLA, L.M., Propriedades de saude de *Spirulina spp*. *Revista de Ciencias Farmacêuticas Basica e Aplicada* , vol. 29, no. 2, pp. 109–117, 2008.
- AOAC, Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD, 1995.
- APELBLAT, A. Citric Acid. 1ed. Israel, Springer. 357p, 2014.
- BECKER, E.W., Microalgae in human and animal nutrition. In Richmond, A (Ed.), *Handbook of Microalgal Culture*. Blackwell, Oxford, p. 312-351, 2004.
- BELAY, A. M. H. A. Mass culture of *Spirulina* outdoors-the earthrise farms experience. In: Vonshak, A., ed. *Spirulina platensis (Arthrospira): physiology, cell-biology and biotechnology*. London: Taylor & Francis, p.131-158, 1997.
- BOBBIO, F. O.; BOBBIO, P. A. *Introdução à química de alimentos*, 2ª Ed. São Paulo, 1995.
- BOROWITZKA, L.J.; BOROWITZKA, M.A. Industrial production:methods and economics. In: Cresswell, R.C., Rees, T.A.V., Shah, N. (Eds.), *Algal and Cyanobacterial Biotechnology*. Longman Scientific, London, pp. 294–316, 1989.
- BOROWITZKA MA. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of Biotechnology*. 70(1–3):313–21, 1990.
- BORTOLOTTI, C. T.; SANTOS, K. G.; FRANCISQUETTI, M. C. C.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. Hydrodynamic Study of a Mixture of West Indian Cherry Residue and Soybean Grains in a Spouted Bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 91, p. 1871-1880, 2013.
- BROWN, M.R. The amino-acid and sugar composition of 16 species of microalgae used in mariculture. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, v.145, p.79-99, 1991.
- BURJAILI, M. M. Desenvolvimento de um secador rotatório com recheio de inerte. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

- CELESTINO, S.M.C. Princípios de Secagem de Alimentos. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados. 51p, 2010.
- CHAIKLAHAN R.; CHIRASUWAN N.; BUNNAG B. Stability of phycocyanin extracted from *Spirulina* sp.: influence of temperature, pH and preservatives. *Process Biochem.* 47:659–664, 2012.
- CHISM, G. W.; HAARD, N. F. Characteristics of edible plant tissues. *Food Chemistry*, 3^a Ed., p. 943-1011. New York; Marcel Dekker, Inc, 1996.
- COHEN, Z. Products from microalgae. In: RICHMOND, A. (Ed). *CRC Handbook of microalgal mass culture*. Boca Raton: CRC. p.421-454, 1986.
- COLLA, L. M.; REINEHR, C. O.; REICHERT, C.; COSTA, J. A. V. Production of biomass and nutraceutical compounds by *Spirulina platensis* under different temperature and nitrogen regimes. *Bioresource Technology*, v. 98, p. 1489–1493, 2007.
- COSTA, B, R. Secagem da microalga spirulina em camada delgada utilizando secador com bomba de calor. Dissertação (Doutorado em engenharia e ciência de alimentos). UFRG, Rio Grande, 2014.
- COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F.; BACKHURST, J. R.; HARKER, J. H. *Chemical Engineering Vol. 1: Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer*; Butterworth-Heinemann Ltd.: Oxford, United Kingdom; p 204., 1999.
- DERNER, R.B.; OHSE, S.; VILLELA, M.; CARVALHO, S. M.; FETT, R. Microalgas, produtos e aplicações. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.36, n.6, p. 1959-1967, 2006.
- DESMORIEUX, H.; DECAEN, N. Convective drying of *spirulina* in thin layer. *Journal of Food Engineering*, v. 66, p.497–503, 2005.
- DHILLON, G.S.; BRAR, S.K.; VERMA, M.; TYAGI, R.D. Recent advances in citric acid bio-production and recovery. *Food Bioprocess Technol*, v.4, p.505-529, 2011.
- DING, Y. L.; SEVILLE, J.P.K.; FORSTER, R.; PARKER, D. J. Solids motion in rolling mode rotating drums operated at low to medium rotational speeds. *Chemical Engineering Science*, v. 56, n. 7, p. 1769–1780, 2001.
- DOKE, J. M. An improved and efficient method for the extraction of phycocyanin from *Spirulina* sp. *International Journal of Food Engineering*, v. 1, p. 1–13, 2005.
- ERIKSEN, N. T. The technology of microalgal culuring. *Biotechnol. Lett.* 30: 1525 – 1536, 2008.
- FERGUSON, L. R. Role of plant polyphenols in genomic stability. *Mutation Research*, v.475, p. 89-111, 2001.

- FERNANDES, F. N.; RODRIGUES, S.; LAW, C.; MUJUMDAR, A. Drying of Exotic Tropical Fruits: A Comprehensive Review. *Food and Bioprocess Technology*, 4 (2), 163-185, 2011.
- FERNÁNDEZ-ROJAS, B.; HERNÁNDEZ-JUÁREZ, J.; PEDRAZA-CHAVERRI, J. Nutraceutical properties of phycocyanin, *Journal of Functional Foods* 11., 375-392., 2014.
- GOIRIS, K.; MUYLAERT, K.; VOORSPOELS, S.; NOTEN, B.; DE PAEPE, D.; BAART, G. J. E.; DE COOMAN, L. Detection of flavonoids in microalgae from different evolutionary lineages. *J. Phycol.* 50 483–492, 2014.
- HABIB, M.A.B.; PARVIN, M. A review on culture, production and use of Spirulina as food for humans and feeds for domestics animals and fish. *FAO Fisheries and Aquaculture n. 1034*, 41p, 2008.
- HAJIMAHMOODI, M.; FARAMARZI, M. A.; MOHAMMADI, N.; SOLTANI, N.; OVEISI, M. R.; NAFISSI-VARCHEH, N. Evaluation of antioxidant properties and total phenolic contents of some strains of microalgae. *Journal of Applied Phycology*, v. 22, p. 43–50, 2010.
- HENRIKSON, R. Microalga Spirulina: superalimento del futuro. Ediciones Urano S.A., Barcelona, 1995.
- HONORATO, G.C. Conceção de um secador rotatório para secagem do cefalotórax do camarão. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.
- JESPERSEN, I.; STROMDAHL, L.D.; OLSEN, K.; SKIBSTED, L.H. Heat and light stability of three natural blue colorants for use in confectionary and beverages. *Eur Food Res Technol*, v.220, p.261-266, 2005.
- KAJIYAMA, T.; PARK, K. J. Influência da umidade inicial da alimentação no tempo de secagem em secador atomizador. *Produção Agroindustrial*, v. 10, p. 1-8. 2008.
- KELLY, J. J. Rotary drying. In: MUJUNDAR, A. S. Handboook of industrial drying. New York: Marcell Dekker Inc., p. 161–183, 1995.
- KIM, D. J.; SHIN, D. H.; AHN, B.; KANG, J. S.; NAM, K. T.; PARK, C. B.; KIM, C. K.; KIM, Y. B.; TUN, Y. W.; JANG, D. D.; YANG, K. H. Chemoprevention of colon cancer by Korean food plant components. *Mutation Research - Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, v. 523-524, p. 99-107, 2003.
- KROKIDA, M. K.; MAROULIS, Z. B.; KREMALIS, C. Process design of rotary dryers for olive cake. *Drying Technology*, v. 20, n. 4–5, p. 771–788, 2002.
- LÓPEZ, A.; RIVERO, A.; TANGIL, M.S. The effects of solvents on the phenolic contents and antioxidant activity of *Stypocaulon scoparium* algae extracts. *Food Chemistry*, v.125, n.3, p.1104-1109, 2011.

- MACHADO, M.V.C., Estudo Experimental e Numérico da Dinâmica de Corpos Moedores em Moinhos de Bola. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFU, 99 pag, 2016.
- MAMEDE, M. E. O.; PASTORE, G. M. Compostos fenólicos do vinho: Estrutura e ação antioxidante. Boletim do Centro de Pesquisa e Processamento de Alimentos (CEPPA), v. 22, n. 2, 2004.
- MARLES R.J.; BARRETT M.L.; BARNES J.; CHAVEZ M.L.; GARDINER P.; KO R.; MAHADY G.B.; DOG T.L.; NANDAKUMARA D.S.; GIANCASPO G.I.; SHARAF M.; GRIFFITHS J. United States pharmacopeia safety evaluation of Spirulina. Crit Rev Food Sci Nutr. 51(7):593-604, 2011.
- MARTELLI, G.; FOLLI, C.; VISAI, L.; DAGLIA, M.; FERRARI, D.; Thermal stability improvement of blue colorant C-phycocyanin from *Spirulina platensis* for food industry application. Process Biochemistry, v.49, p.154-159, 2014.
- MARTÍNEZ-VALVERDE, I.; PERIAGO, M. J.; ROS, G. Significado nutricional de los compostos fenólicos de la dieta. Archivos Latinoamericanos de Nutricion, v. 50 (1), p. 5–18, 2000.
- MELO, P. C. Cinética de secagem e armazenamento de *spirulina platensis*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Engenharia de Sistemas Agroindustriais, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2016.
- MEZA, J.; GIL, A.; CORTÉS, C.; GONZÁLEZ, A. Drying costs of woody biomass in a semi-industrial experimental rotary dryer. in: 16th European Conference and Exhibition on Biomass for Energy, Biomass Resources, 2008.
- MICHAEL A. BOROWITZKA 1999. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters
- MIRANDA, M.S.; CINTRA, R.G.; BARROS, S.B.; MANCINI FILHO, J. Antioxidant activity of the microalga *Spirulina maxima*. Brazilian Journal of Medical and Biological Research, v.31, n°8, p.1075-1079, 1998.
- MOLINA-GRIMA E.; ACIÉN FERNÁNDEZ F.G.; ROBLES MEDINA A. Downstream Processing of Cell-mass and Products. In: Richmond A (ed) Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology. Blackwell, pp. 215–252, 2004.
- MOURA, B. D. Estudo da Dinâmica de Secagem em um Secador Rotatório com Alimentação Intermitente. Tese (Doutorado em Engenharia Química). UFRN, Natal, 2016.
- MUJUMDAR, A.S. Handbook of Industrial Drying. 3ed CRC Press, 1312p. 2006
- NAKAGAWA, K.; RICHAROEN, W.; SRI-UAM, P.; PAVASANT, P.; ADACHI, S. Antioxidant properties of convective-air-dried *Spirulina maxima*: Evaluation of phycocyanin retention by a simple mathematical model of air-drying. Food and Bioproducts Processing. 37p, 2016.

- NEVES, C. F. C.; SCHVARTZMAN, M. M. A. M.; J., E. Variables search technique applied to gas separation. *Química Nova*. v.25, n 2, p.327-329, 2002.
- OLIVEIRA, E. G.; ROSA, G. S.; MORAES, M. A.; PINTO, L. A. A. Phycocyanin content os *Spirulina platensis* dried in spouted bed and thin layer. *Journal of Food Process Engineering*, v. 31, p. 34–50, 2008.
- OLIVEIRA, E. G.; DUARTE, J. H.; MORAES, K.; CREXI, V. T.; PINTO, L. A. A. Optimisation of *Spirulina platensis* convective drying: evaluation of phycocyanin loss and lipid oxidation. *International Journal of Food Science and Technology*, v. 45, p. 1572–1578, 2010.
- OLIVEIRA, C.A.; CAMPOS, A. A. O.; RIBEIRO, S. M. R.; OLIVEIRA, W. C. NASCIMENTO, A. G.. Potencial nutricional, funcional e terapêutico da cianobactéria spirulina. *Revista da Associação Brasileira de Nutrição*, São Paulo, 5(1), 52-59, 2013.
- PADILLA, R. Y. C.; LIMAVERDE, J. R.; FINZER, J. R. D. Drying of banana paste in rotary dryer with inert bed. In: *INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM: DRYING 2004*, 14., 2004, São Paulo. *Proceedings of...* São Paulo-SP, 2004.
- PAPADAKI, S., KYRIAKOPOULOU, K., STRAMARKOU, M., TZOVENIS, I., & KROKIDA, M. Environmental Assessment of Industrially Applied Drying Technologies for the Treatment of *Spirulina Platensis*. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 11(1), 41-46, 2017.
- PELEGRINA, A. H.; ELUSTONDO, M. P.; URBICAIN, M. J. Rotary semi-continuous drier for vegetables: effect of air recycling. *Journal of Food Engineering*, v. 41, n. 3–4, p. 215– 219, 1999.
- PELZER, L. E.; GUARDIA, T.; JUAREZ, O. A.; GUERREIRO, E. Acute and chronic anti-inflammatory effects of plant flavonoids, *Farmaco*, v. 53, p.421-424, 1998.
- PERAZZINI, H. Secagem de Resíduos Cítricos em Secador Rotativo, 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2011.
- PIETTA, P. G. Flavonoids as antioxidants, *Journal of Natural Products*, v. 63, p.1035-1042, 2000.
- 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.
- POHNDORF, R.S., CAMARA, A.S., LARROSA, A.P.Q., PINHEIRO, C.P., STRIEDER, M.M., PINTO, L.A.A. Biomass Bioenergy, 93, p. 25, 2016.
- PUADIAN, N. LI, J. PANG, S. Analysis of Operation Parameters in a Dual Fluidized Bed Biomass Gasifier Integrated with a Biomass Rotary Dryer: Development and Application of a System Model. *Energies* 7(7), 4342-4363, 2014.

- RAVN, H.; ANDARY, C.; KOVÁCS, G.; MOLGAARD, P. Caffeic acid esters as in vitro inhibitors of plant pathogenic bacteria and fungi. *Biochemical Systematics and Ecology*, v.17, n.3, p.175-184, 1989.
- RICHMOND, A. (Ed). *CRC Handbook of microalgal mass culture*. Florida: CRC. 528p, 1990.
- SARADA, R.; PILLAI, M.G.; RAVINSHANKAR, 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.
- SASSON, A. *Micro Biotechnologies: Recent Developments and Prospects for Developing Countries*. BIOTEC Publication 1/2542. pp. 11-31 Place de Fontenoy, Paris. France. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 1997.
- SILVA, N.C. *Desidratação de resíduos do processamento de maracujá-amarelo por diferentes metodologias*. Uberlândia, 2015. 163p.
- 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.
- SILVA, P. B., DUARTE, C. R. BARROZO, M. A. S. Dehydration of acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) residue in a new designed rotary dryer: Effect of process variables on main bioactive compounds. *Food and Bioproducts Processing*, 98, 62–70, 2016.
- SINGH, P.; COUCKUYT, I.; ELSAYED, K.; DESCHRIJVER, D.; DHAENE, T.; Shape optimization of a cyclone separator using multi-objective surrogate-based optimization, *Appl. Math. Model*, 2016.
- 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.
- SMITH, B. A. Symposium on drying and air conditioning rotary dryers. *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 30, n. 9, p. 993–995, 1938. *Technology*, v. 18, n. 7, p. 1415–1431, 2000.
- SONG, Y.; THIBAUT, J.; KUDRA, T. Dynamic characteristics of solids transportation in rotary dryers. *Drying Technology*, v. 21, n. 5, p. 755–773, 2003.
- SPOLAORE, P.; CASSAN, C. J.; DURAN, E., ISAMBERT, A. Commercial Applications of Microalgae. *J. Biosci. Bioeng.* Vol. 101, No 2: 87-96, 2006.
- TIBURCIO P.C; GALVEZ F.C.; CRUZ L.J.; GAVINO V.C. Optimization of low-cost drying methods to minimize lipid peroxidation in *Spirulina platensis* grown in the Philippines. *J Appl Phycol* ;19:719–26., 2007.

- VASCO, C. Phenolic compounds in Ecuadorian fruits. Tese de Doutorado. Swedish University of Agricultural Sciences.Uppsala, 2009.
- VONSHAK, A. Outdoor mass production of Spirulina: the basic concept. In: Vonshak, A., ed. *Spirulina platensis (Arthrospira): physiology, cell-biology and biotechnology*. London: Taylor and Francis. p.79-99, 1997.
- WALTER, A. Estudo do processo biotecnológico para obtenção de ficocianina a partir da microalga *Spirulina Platensis* sob diferentes condições de cultivo. 133f. Dissertação. Pós-Graduação em Processos Biotecnológicos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- WOOD, H. C.; SOKHANSANJ, S. Heat treatment of chopped alfafa in rotary drum dryers. *Drying Technology*, v. 8, n. 3, p. 533–541, 1990.
- ZABANIOTOU, A.A. Simulation of forestry biomass drying in a rotary dryer, *Drying Technology: An International Journal*, 18:7, 1415-1431, 2000.
- 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.