



Universidade Federal do Triângulo Mineiro  
Programa de Pós-Graduação Multicêntrico em  
Química de Minas Gerais



LUCAS RODRIGO CUSTÓDIO SILVA

USO DA ENERGIA SOLAR NOS PROCESSOS DE LIXIVIAÇÃO E DESTILAÇÃO  
APLICADOS À PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL DE ÓLEOS VEGETAIS

Uberaba  
2018

Lucas Rodrigo Custódio Silva

Uso da energia solar nos processos de lixiviação e destilação aplicados à produção sustentável de óleos vegetais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Multicêntrico em Química de Minas Gerais da Universidade do Triângulo Mineiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Química.

Orientadora: Profa. Dra. Kássia Graciele dos Santos

Uberaba  
2018

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do  
Triângulo Mineiro**

S581u Silva, Lucas Rodrigo Custódio  
    Use da energia solar nos processos de lixiviação e destila-  
    ção aplicados à produção sustentável de óleos vegetais / Lucas  
    Rodrigo Custódio Silva. -- 2018.  
    162 f. : il., fig., graf., tab.

    Dissertação (Mestrado em Química) -- Universidade Federal  
    do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2018  
    Orientadora: Profa. Dra. Kássia Graciele dos Santos

    1. Energia solar. 2. Extração (Química). 3. Óleos vegetais.  
    4. Álcool. 5. Destilador solar. 6. Sustentabilidade. I. Santos,  
    Kássia Graciele dos. II. Universidade Federal do Triângulo Mi-  
    neiro. III. Título.

CDU 551.521.37

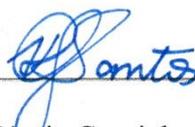
LUCAS RODRIGO CUSTÓDIO SILVA

Uso da energia solar nos processos de lixiviação e destilação aplicados à produção sustentável de óleos vegetais

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação Multicêntrico em Química de Minas Gerais, área de concentração Físico-Química, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Química.

Uberaba, 20 de Julho de 2018.

Banca examinadora:



---

Profa. Dra. Kassia Graciele dos Santos

Universidade Federal do Triângulo Mineiro



---

Prof. Dr. Ricardo Corrêa de Santana

Universidade Federal de Uberlândia



---

Profa. Dra. Nádia Guimarães Sousa

Universidade Federal do Triângulo Mineiro

*Aos meus amados pais, Maria e Emerson,  
pelo apoio incondicional na minha vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, fonte de todas as maravilhas possibilitadoras deste trabalho, desde o Sol às matérias primas utilizadas;

Aos meus pais, pelo exemplo moral e apoio em mais uma etapa dos meus estudos;

A minha companheira Caroline, pelo carinho e por me ouvir sempre;

A minha orientadora, Profa. Dra. Kássia Graciele dos Santos, pela paciência e pela confiança ao me dedicar este trabalho;

As alunas da Engenharia Química, Marina Maluf, Amanda Dornelas e Caroline Santos, pelo empenho, auxílio e companheirismo debaixo do sol;

Aos colegas de mestrado e de uma vida, Alexandre, Cléa, Roney e Uelitom, pelas suas amizades e horas de companhias nos estudos;

Ao PPGMQ-MG – UFTM, aos professores e a secretária Mayla pelo apoio institucional;

Aos membros das bancas, especialmente à Profa. Dra. Nádia Guimarães Sousa pelas considerações na qualificação e na defesa;

A CAPES, pela bolsa concedida.

*“Julga-se o poder de uma inteligência pelas suas obras. Como nenhum ser humano pode criar o que a Natureza produz, a causa primária há de estar numa inteligência superior à Humanidade.*

*Sejam quais forem os prodígios realizados pela inteligência humana esta inteligência tem também uma causa e, quanto maior for a sua realização maior deve ser a causa primária. Esta inteligência superior é a causa primária de todas as coisas qualquer que seja o nome pelo qual o homem a designe.”*

Allan Kardec. **O Livro dos espíritos.**

## RESUMO

O apelo por processos mais limpos em aspectos econômicos e ambientais são desafios na busca de metodologias que atinjam a sustentabilidade na produção dos mais diversos gêneros englobando conceitos que vão da minimização de resíduos a substituição de matrizes energéticas. Neste mesmo cenário, a demanda por óleos vegetais tem se intensificado em virtude do crescimento do mercado oleoquímico nos segmentos de biocombustíveis, alimentos, fármacos e cosméticos. Nas diversas nuances da sustentabilidade, a energia solar vem se destacando por representar uma fonte não poluente e praticamente inesgotável da Terra com grande potencial de aproveitamento. Este trabalho teve como objetivo principal estudar o uso da energia solar nos processos de lixiviação e destilação, associados à obtenção de óleos de amendoim, coco e baru. Na extração, o solvente é aquecido e percola as partículas do material contido no interior de um leito fixo. Foram utilizados nos experimentos dois modelos de concentradores solares para o aquecimento do solvente etanol hidratado combustível, sendo um de formato cilíndrico-parabólico e outro de geometria biangular de doze lados. Para os testes, foram variadas as vazões de alimentação do solvente em 15, 25 e 35 mL/min, sendo a de 25 mL/min que apresentou melhor hidrodinâmica em todas as extrações. O protótipo biangular alcançou uma eficiência 15,34% maior que o primeiro na extração do óleo de amendoim, quando comparado o rendimento com o Soxhlet. Para as extrações com o coco e o baru foram empregues duas granulometrias diferentes em cada e o concentrador biangular atingiu eficiência de 70,88% e 89,24%, respectivamente para a menor granulometria avaliada. A destilação solar foi utilizada na recuperação do solvente resultante da miscela. Os testes em batelada revelaram como sendo 0,16 cm a altura ideal para melhor taxa de evaporação. Tal valor permitiu projetar um modelo de alimentação continua para que o destilador operasse sempre próximo a faixa de altura calculada. Nos processos em batelada e continuo, a destilação alcançou respectivamente 84,2% e 75,58% de rendimento na coleta de destilado e, em contrapartida, 26,86 % e 44,22% de eficiência térmica. Foram obtidos dados do INMET para analisar a influência das condições meteorológicas.

**Palavras-chave:** Energia Solar. Concentradores Solares. Extração. Óleos Vegetais. Etanol. Destilação Solar. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The requirement for cleaner processes in economic and environmental aspects are challenges in the search for methodologies that achieve sustainability in the production of the most diverse genres, encompassing concepts ranging from waste minimization to substitution of energy matrices. In this same scenario, the demand for vegetable oils has intensified due to the growth of the oleochemical market in the biofuel, food, pharmaceutical and cosmetic segments. In the various nuances of sustainability, solar energy has stood out because it represents a non-polluting and virtually inexhaustible source of the Earth with great potential of use. The main objective of this work was to study the use of solar energy in the leaching and distillation processes associated with obtaining peanut, coconut and baru oils. Upon extraction, the solvent is heated and percolates the particles of the material contained within a fixed bed. Two models of solar concentrators for the heating of the hydrous ethanol fuel solvent were used, one of parabolic-cylindrical shape and the other of twelve-sided biangular geometry. For the tests, the solvent feed rates were varied at 15, 25 and 35 mL/min, with 25 mL/min that presented better hydrodynamics at all extractions. The biangular prototype achieved a 15.34% greater efficiency than the first one in the extraction of the peanut oil, when compared the yield with the Soxhlet. For the extraction with the coconut and the baru two different granulometries were used in each one and the biangular concentrator reached efficiency of 70.88% and 89.24%, respectively, for the smaller granulometry evaluated. Solar distillation was used to recover the solvent resulting from miscella. The batch tests revealed to be 0.16 cm the ideal height for better evaporation rate. This value allowed the design of a continuous feed model so that the distiller always operated near the calculated height range. In the batch and continuous processes, distillation reached 84.2% and 75.58%, respectively, in the distillate collection and, in contrast, 26.86% and 44.22% of thermal efficiency. INMET data were obtained to analyze the influence of meteorological conditions.

**Keywords:** Solar Energy. Solar Concentrators. Extraction. Vegetable Oils. Ethanol. Solar Distillation. Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura geral de um triacilglicerol em que: $R_1$ , $R_2$ , $R_3$ = grupo alquil saturado ou insaturado; podendo ser igual ou diferente] .....	26
Figura 2 – Etapas no processamento de óleos .....	27
Figura 3 – Fruto do baru: (a) fruto; (b) endocarpo e (c) sementes. ....	45
Figura 4 – Insolação média mundial entre os anos de 1983-2005 em kWh/m <sup>2</sup> /dia...50	
Figura 5 – Insolação média América do Sul entre os anos 1983-2005, variando de 4 a 6 kWh/m <sup>2</sup> /dia no Brasil. ....	50
Figura 6 – Processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.....	53
Figura 7 – Descrição ilustrativa dos comprimentos de onda. ....	54
Figura 8 – Utilidades da Energia Solar.....	57
Figura 9 – Tipos de Concentradores Solares relatados por DIB (2009).....	59
Figura 10 – Concentrador Cilíndrico-Parabólico: (a) aspecto real da planta da <i>Acwa Power</i> ; (b) representação esquemática.....	62
Figura 11 – Concentradores Tipo Fresnel: (a) parte da planta solar da AREVA na Califórnia; (b) representação esquemática.....	64
Figura 12 – Representação dos raios solares nos cones de abertura: (a) 45°; (b) 30° .....	65
Figura 13 – Concentradores Parabólicos: (a) foto do sistema da <i>Global Nevada Corp</i> nos EUA; (b) representação esquemática.....	66
Figura 14 – Desenho esquemático do funcionamento de um destilador <i>basin type</i> ..	70
Figura 15 – Etapas simplificadas dos processos desenvolvidos no trabalho. ....	75
Figura 16 – Concentrador Solar Cilíndrico-Parabólico: (a) Fotografia do equipamento; (b) representação esquemática.....	80

Figura 17 – Perfil do corte da calha parabólica e região focal calculada para o concentrador por CUNHA <i>et al.</i> (2014). .....	80
Figura 18 – Esquema explodido da unidade extratora CSCP. ....	81
Figura 19 – Dimensões dos lados das peças do CSBDL. ....	82
Figura 20 – Concentrador Solar Biangular de Doze Lados: (a) Fotografia do equipamento; (b) representação esquemática. ....	83
Figura 21 – Leitos fixos utilizados: (a) Leito de extração no CSCP; (b) Leito absorvedor e de extração do CSBDL; (c) Representação esquemática. ....	84
Figura 22 – Representação gráfica para a determinação do ponto focal. ....	87
Figura 23 – Funções matemáticas que representam a curva geradora do coletor....	88
Figura 24 – Incidência (azul) e Reflexão (vermelho) dos raios solares: (a) no concentrador solar biangular de doze lados; (b) na parábola correspondente.....	90
Figura 25 – Extrator Soxhlet utilizado.....	97
Figura 26 – Cobertura do destilador: (a) Aspecto da cobertura; (b) representação esquemática e ângulo de inclinação. ....	99
Figura 27 – Representação esquemática da montagem do destilador. ....	100
Figura 28 – Destilador solar construído: (a) Suporte em madeira com a bacia; (b) unidade destiladora em operação. ....	101
Figura 29 – Curvas de aquecimento de água no CSCP para as vazões: (a) 15 mL/min; (b) 25 mL/min; (c) 35 mL/min.....	105
Figura 30 – Curvas de aquecimento de água no CSBDL para as vazões: (a) 15 mL/min; (b) 25 mL/min; (c) 35 mL/min.....	107
Figura 31 – Temperaturas registradas no experimento de granulometria 0,69 mm. para as vazões: (a) 15 mL/min; (b) 25 mL/min; (c) 35 mL/min. ....	113
Figura 32 – Temperaturas registradas no experimento de granulometria 1,77 mm. para as vazões: (a) 15 mL/min; (b) 25 mL/min; (c) 35 mL/min. ....	114

Figura 33 – Cinética de extração para as três vazões com a granulometria 0,69 mm. .....	119
Figura 34 – Cinética de extração para as três vazões com a granulometria 1,77 mm. .....	119
Figura 35 – Temperaturas registradas no experimento de granulometria 1,59 mm. para as vazões: (a) 15 mL/min; (b) 25 mL/min; (c) 35 mL/min. ....	120
Figura 36 – Temperaturas registradas no experimento de granulometria 2,18 mm. para as vazões: (a) 25 mL/min; (b) 35 mL/min. ....	122
Figura 37 – Gráfico da variação cinética do teor de óleo do farelo de baru. ....	125
Figura 38 – Temperaturas registradas e dados do INMET para os experimento de: (a) 500 mL; (b) 750 mL; (c) 1000 mL.....	127
Figura 39 – Produtividade volumétrica <i>versus</i> radiação solar para os experimentos de: (a) 500 mL; (b) 750 mL; (c) 1000 mL.....	129
Figura 40 – Temperaturas registradas para o Experimento 1. ....	134
Figura 41 – Temperaturas registradas para o Experimento 2. ....	134

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diferentes Matérias-primas para Extração de Óleos Vegetais Utilizados para Avaliação das Cadeias Produtivas nas Regiões do Brasil .....	24
Tabela 2 – Polaridade dos solventes .....	32
Tabela 3 – Comparação entre o solvente Hexano e o solvente Etanol.....	35
Tabela 4 – Composição de ácidos graxos do óleo de amendoim.....	40
Tabela 5 – Composição de ácidos graxos de amêndoas de Baru.....	46
Tabela 6 – Outras aplicações da energia solar térmica.....	57
Tabela 7 – Coordenadas Cartesianas do Coletor Solar.....	88
Tabela 8 – Ordenada do Ponto de Concentração ( $Y_f$ ) para determinadas coordenadas ( $X_p, Y_p$ ) para o concentrador solar biangular de doze lados e a parábola.....	90
Tabela 9 – Propriedades físico-químicas dos solventes .....	96
Tabela 10 – Teor médio de óleo obtido pelo método Soxhlet para o amendoim.....	109
Tabela 11 – Teor médio de óleo obtido pelo método Soxhlet para o coco.....	109
Tabela 12 – Teor médio de óleo obtido pelo método Soxhlet para o baru.....	110
Tabela 13 – Teor de óleo de amendoim obtido em cada experimento.....	111
Tabela 14 – Eficiência obtida nas extrações.....	111
Tabela 15 – Teor de óleo de coco obtido em cada experimento.....	116
Tabela 16 – Eficiências obtidas para cada experimento.....	118
Tabela 17 – Teor de óleo de baru para o experimento de 1,59 mm de granulometria.....	123
Tabela 18 – Teor de óleo de baru para o experimento de 2,18 mm de granulometria.....	123

Tabela 19 – Eficiência o teor de óleo de baru com granulometria 1,59 mm.....	124
Tabela 20 – Eficiência para o teor de óleo de baru com granulometria 2,18 mm....	124
Tabela 21 – Massa de óleo de baru obtido em cada experimento cinético.....	125
Tabela 22 - Espessura de líquido no tempo para cada experimento .....	130
Tabela 23 – Eficiência térmica para o experimento com $V_0 = 500, 750$ e $1000$ mL.	132
Tabela 24 – Rendimento global nos processos de separação obtidos nos experimentos.....	133
Tabela 25 – Volumes de destilado coletado nos experimentos.....	135
Tabela 26 – Condições meteorológicas e volumes de destilado obtidos. ....	136
Tabela 27 – Rendimento global da destilação contínua.....	137
Tabela 28 – Eficiência térmica do destilador operando em regime contínuo. ....	137

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AGCM – Ácidos Graxos de Cadeia Média

CSBDL – Concentrador Solar Biangular de Doze Lados

CSCP – Concentrador Solar Cilíndrico-Parabólico

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

PFNM – Produtos Florestais Não Madeireiros

## ÍNDICE

Resumo.....	7
<i>Abstract</i> .....	8
Lista de Figuras.....	9
Lista de Tabelas.....	12
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	14

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	18
1.1 OBJETIVOS.....	22
1.1.1 Objetivo Geral.....	22
1.1.2 Objetivos Específicos .....	22
2 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA.....	24
2.1 ÓLEOS VEGETAIS .....	24
2.1.1 Composição Química .....	25
2.1.2 Processos de extração de sementes oleaginosas .....	27
2.1.2.1 <i>Extração por Prensagem</i> .....	28
2.1.2.2 <i>Extração com Solventes</i> .....	29
2.1.2.3 <i>Solventes de Extração</i> .....	30
2.1.3 Matérias-primas graxas.....	37
2.1.3.1 <i>Amendoim (Arachis hypogaea L.)</i> .....	38
2.1.3.2 <i>Coco (Cocos nucifera L.)</i> .....	41
2.1.3.3 <i>Baru (Dipteryx alata Vog.)</i> .....	44
2.2 ENERGIA SOLAR .....	48
2.2.1 Panorama Geral.....	48
2.2.2 Aspectos da Radiação Solar .....	51
2.2.2.1 <i>Energia Radiante</i> .....	53
2.2.3 Aproveitamento da Energia Solar.....	55
2.2.3.1 <i>Processos de Transferência de Calor</i> .....	58
2.2.4 Concentradores Solares.....	59
2.2.4.1 <i>Concentradores de Foco Linear</i> .....	62

2.2.4.2 Concentradores de Foco Pontual .....	65
2.2.5 Destilação Solar .....	67
2.2.6 Destiladores Solares .....	71
2.2.6.1 Tanque .....	72
2.2.6.2 Cobertura.....	73
2.2.6.3 Demais componentes .....	74
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	75
3.1 EXTRAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO.....	76
3.1.1 Preparo das Matérias-Primas Graxas .....	76
3.1.1.1 Amendoim.....	77
3.1.1.2 Coco .....	77
3.1.1.3 Baru .....	78
3.1.2 Unidades experimentais dos Concentradores Solares.....	78
3.1.2.1 Concentrador Solar Cilíndrico-Parabólico – CSCP.....	79
3.1.2.2 Concentrador Solar Biangular de Doze Lados – CSBDL ..	81
3.1.2.3 Leitos .....	83
3.1.2.4 Parâmetros geométricos para construção do concentrador.....	85
3.1.3 Processos de Extração nos Concentradores .....	91
3.1.3.1 Amendoim.....	92
3.1.3.2 Coco .....	93
3.1.3.3 Baru .....	94
3.1.4 Extração com Método Soxhlet .....	95
3.2 DESTILAÇÃO SOLAR.....	98
3.2.1 Construção da Unidade Experimental de Destilação Solar.....	99
3.2.2 Processo de Destilação Empregando Energia Solar.....	102
3.2.3 Aspectos Quantitativos do Processo de Destilação .....	102
3.2.3.1 Cálculo da espessura de líquido na bacia .....	103
3.2.3.2 Análise de Desempenho do Destilador.....	103
3.2.3.3 Destilação por alimentação contínua.....	104
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	105
4.1 TESTES DE AQUECIMENTO COM ÁGUA.....	105
4.2 EXTRAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO.....	108

4.2.1 Extração pelo método convencional (Soxhlet) .....	108
4.2.1.1 <i>Amendoim</i> .....	109
4.2.1.2 <i>Coco</i> .....	109
4.2.1.3 <i>Baru</i> .....	110
4.2.2 Extrações Utilizando os Concentradores Solares .....	110
4.2.2.1 <i>Amendoim</i> .....	110
4.2.2.2 <i>Coco</i> .....	112
4.2.2.3 <i>Baru</i> .....	120
4.3 DESTILAÇÃO SOLAR .....	126
4.3.1 Influência das Condições Meteorológicas no Processo de Destilação .....	126
4.3.2 Estudo da Espessura de Líquido Ótima para o Processo .....	130
4.3.3 Análise da Eficiência do Destilador .....	131
4.3.4 Destilação por alimentação contínua .....	134
4.3.4.1 <i>Rendimento global da destilação contínua</i> .....	137
4.3.4.2 <i>Eficiência do destilador com operação contínua</i> .....	137
5 CONCLUSÃO.....	139
6 REFERÊNCIAS.....	143

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por processos mais limpos e viáveis em aspectos tanto econômico quanto ambiental, é objeto de preocupação na pesquisa por metodologias que contemplem diferentes abordagens para o manuseio de matérias-primas visando prevenir ou minimizar impactos ambientais em diferentes fases de processos produtivos. Neste sentido, alguns destes processos, vão ao encontro de novas rotas e recursos que compreendam estratégias para produção sustentável dos mais diversos gêneros.

Os métodos produtivos mais sustentáveis devem englobar conceitos que vão da minimização de resíduos a substituição de matrizes energéticas, estas são de suma importância para a sustentabilidade das sociedades modernas. Na atualidade, a busca por novas formas de se aproveitar a energia provinda de fontes renováveis e a crescente necessidade energética da população mundial é um fator imprescindível na resolução deste dilema para o bem-estar das atuais e futuras gerações.

Em um mesmo cenário onde prevalece a busca por métodos mais sustentáveis, COSTA; ZAGONEL (2009) relataram que a recente intensificação da demanda por óleos de origem vegetal vem crescendo significativamente na última década em virtude do crescimento do mercado oleoquímico, especialmente nos segmentos de biocombustíveis, alimentos, fármacos e cosméticos. Neste aspecto, ANDRADE *et al.* (2006) apontaram que, há muito tempo se sabe que as propriedades de muitos ácidos graxos e outros componentes dos óleos vegetais aportam benefícios para a saúde, e que, é conveniente reforçar que o Brasil, pela diversidade de sua flora, especificamente sobre o setor de plantas oleaginosas, é um país que possui elevado potencial para ser um dos líderes mundiais no que se refere à exploração, produção e comercialização de produtos do setor de óleos e gorduras vegetais.

Assim como há uma grande diversidade de matérias-primas graxas vegetais, os métodos de extração de óleos também possuem elevado grau de variabilidade. Uma das tecnologias mais antigas e rudimentares consiste na extração mecânica

por prensagem, segundo RAMALHO; SUAREZ (2012) este método é utilizado há milênios pelo ser humano e fundamenta-se no esmagamento dos tecidos oleaginosos das plantas. A Extração com Fluido Supercrítico (EFS) é um dos métodos mais avançados e sofisticados conhecidos atualmente. Na EFS é comumente empregado o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) como solvente em estado supercrítico. Nesta fase o  $\text{CO}_2$  possui uma interface gás/líquido e adquire uma baixa viscosidade e alta capacidade de difusão através de materiais sólidos conferindo ao fluido maior capacidade para atuar como solvente.

A extração sólido-líquido realizada pelos solventes orgânicos está sujeita a algumas variações que surgem eventualmente em função dos diversos tipos de plantas de extratores, porém, basicamente, estes podem ser classificados em extratores por percolação ou extratores por imersão. No extrator por percolação, o solvente é bombeado sobre a superfície do leito a uma taxa suficientemente baixa para evitar a inundação do leito contendo a matéria oleaginosa. O solvente, então, lixivia as partículas da matéria prima contida no leito até finalmente sair por um ducto onde é coletado (DAGOSTIN, 2015).

BRUM *et al.* (2009) explicaram que nestas extrações são empregados geralmente solventes orgânicos em função da sua maior afinidade com os óleos contidos nas matrizes graxas. Os solventes mais utilizados para estes processos são: hexano, éter etílico, etanol, metanol, clorofórmio (extração Bligh & Dyer), entre outros. Embora a extração com solventes orgânicos seja eficiente, esse procedimento se torna danoso ao operador por fazer uso de substâncias tóxicas e ao meio ambiente em função dos derivados de petróleo ser proveniente de fontes não renováveis.

Quanto aos solventes utilizados, em substituição ao hexano, RODRIGUES (2011) explica que os solventes alcoólicos apresentam vantagens bastante atrativas do ponto de vista ambiental, uma vez que são produzidos por via biotecnológica, não gera resíduos tóxicos, apresentam menor risco de manuseio por seu menor grau de inflamabilidade e é considerado seguro para a saúde humana, além de ser produzido em larga escala no Brasil. SAWADA (2012) relata ainda que os óleos são completamente solúveis no álcool no seu ponto de ebulição, mas pouco solúveis à temperatura ambiente. Esta característica possibilita a separação das fases oleosa e

solvente sem a necessidade de evaporação/destilação, o que reduz em cerca de 25% a necessidade energética quando comparada à extração utilizando hexano.

Embora os métodos mais clássicos e os mais sofisticados de extração de óleo possuam suas próprias características, é possível identificar um conjunto de operações básicas que proporcionam uma visão global das metodologias envolvidas nestes processos. Em se tratando do aspecto de fornecimento de energia aos processos de extração, o leque de energias alternativas a partir de fontes renováveis abre um conjunto de oportunidades para intervir no sentido de desenvolver tecnologias limpas que garantam a eficiência energética do processo e amplie conceitos que abordem a redução de impactos ambientais.

No que se refere aos processos de extração sólido-líquido, GANDHI *et al.* (2003) explicaram que quando o solvente opera em temperatura próxima ao seu ponto de ebulição, reduz-se a viscosidade do óleo, aumentando sua solubilidade no solvente, e conseqüentemente, aumentando a eficiência e rapidez da extração. MARTINS; PELUZIO (2015) e HEMWIMOL; PAVASANT; SHOTIPRUK (2006) complementam que esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que temperaturas mais elevadas facilitam o trânsito do solvente que tem sua densidade diminuída, com isso, um aumento da energia cinética permite um maior coeficiente de difusão do solvente resultando no aumento das taxas de transferência de massa. SAMARAM *et al.* (2015) citaram que a extração conduzida em temperaturas elevadas também proporciona a ruptura dos tecidos vegetais, melhorando a difusão e promovendo uma melhor eluição do óleo ligado no interior da semente para o meio.

Diante deste conceito, elevadas taxas de temperaturas no aquecimento de fluidos têm sido alcançadas com o uso da radiação solar através do emprego dos coletores solares. Estes sistemas de aproveitamento térmico consistem em um tipo especial de trocador de calor que transforma energia solar radiante em energia térmica ou calor. Ao realizar esta conversão, os coletores solares transferem a energia recebida para os mais variados fluidos e aplicações, que se estendem desde o simples uso para o aquecimento de água em residências até a processos de produção de vapor, onde altas temperaturas e equipamentos mais sofisticados são requeridos.

Os coletores podem ser basicamente de dois tipos: não-concentradores e concentradores. Os coletores não-concentradores possuem a mesma área de abertura (área para interceptação e absorção da radiação) e são aplicáveis para sistemas que necessitem de baixa temperatura. Em aplicações que demandem temperaturas mais elevadas, são mais adequados os concentradores solares, que possuem em geral uma superfície refletora (em alguns modelos são utilizadas lentes) que direcionam a radiação direta a um foco, onde há um receptor pelo qual escoar o fluido absorvedor de calor (KALOGIROU, 2009).

Além do emprego para o aquecimento de fluidos, o aproveitamento da energia solar vem também ganhando destaque para processos de destilação. Embora uma vasta literatura cite os trabalhos que relatem o uso desta técnica para a evaporação da água, JOAS (2014) sistematiza que os processos de mudanças de temperatura e de transformação de estados da matéria demandam, normalmente, elevadas quantidades de energia, e que, transformar pequenas quantidades de matéria de um estado para outro (de líquido para vapor) ao menor custo financeiro possível deve-se valer de opções que introduzam maneiras alternativas de fornecer energia aos sistemas.

Considerando-se que a energia solar é a denominação dada a toda forma de captação de energia luminosa proveniente do sol, e sua transformação em uma forma utilizável de energia, OLIVEIRA (2011) reportou que o planeta Terra recebe, ao longo de um ano, cerca de  $1,74 \times 10^{11}$  GWh, tendo em vista que o consumo energético anual atinge a marca de  $1,5 \times 10^8$  GWh, conclui-se que a energia solar incidente nos continentes é, aproximadamente, mil vezes o consumo de energia da humanidade. HO; ITO (2007) ainda afirmam que o uso de energias renováveis, além de reduzir os impactos negativos resultantes da queima dos combustíveis fósseis, permite uma melhoria do nível de vida, diminuindo a dependência econômica dos países em desenvolvimento.

JACOB (2016) enfoca que a energia solar traz inúmeros benefícios para um país, pois colabora com uma matriz energética mais limpa e com a diminuição das emissões dos gases de efeito estufa, como consequência da diminuição da dependência dos combustíveis fósseis. O Brasil, pelo fato de estar localizado na sua maior parte na região intertropical, possui grande potencial de energia solar durante

todo ano. A utilização dessa energia poderia trazer benefícios em longo prazo para o país, viabilizando o desenvolvimento de regiões remotas. Esta pode ser utilizada em sistemas de irrigação de culturas; de refrigeração de alimentos, vacinas e remédios; aquecimento e iluminação artificial; conforto térmico e iluminação natural em projetos de construção civil, processos de dessalinização, secagem de grãos, geração de vapor e até para produção de energia elétrica, ampliando a aplicação na indústria (VASCONCELLOS; LIMBERGER, 2012; MARTINS; PEREIRA; ECHER, 2004).

## 1.1 OBJETIVOS

Em face da introdução apresentada, o trabalho teve como objetivo valer-se da inclusão do máximo de concepções e entendimentos metodológicos que possam resultar em um produto final, cujo perfil tenha contemplando técnicas que o caracterizem como um óleo extraído de maneira sustentável. Para tanto, faz-se necessário que as etapas envolvidas no processo incorporem os seguintes objetivos:

### 1.1.1 Objetivo Geral

- Empregar a energia solar como fonte alternativa de energia aos processos de extração por lixiviação e destilação, associados à obtenção sustentável de óleos vegetais.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar a extração sólido-líquido (lixiviação) de óleos vegetais das matrizes amendoim, coco e baru utilizando o etanol como solvente aquecido via energia solar;

- Determinar a vazão adequada de alimentação de solvente para obter uma maior eficiência de extração de óleo;
- Avaliar a eficiência dos concentradores solares no aquecimento dos líquidos como água e solvente;
- Conduzir medidas de cinética da extração de óleos no leito fixo assistido por energia solar;
- Empregar o Álcool Etílico Hidratado Combustível como solvente em substituição ao hexano;
- Contrastar o rendimento de óleo obtido entre os métodos propostos e o método convencional Soxhlet;
- Recuperar o solvente resultante da miscela através da construção de um protótipo de destilador solar operando em batelada e em regime contínuo;
- Construir um protótipo de destilador solar para recuperação do solvente resultante da miscela;
- Calcular aspectos quantitativos que estimem a eficiência do destilador solar construído;
- Analisar a influência das condições meteorológicas sobre o processo de destilação solar;
- Comparar o desempenho do destilador operando em batelada e por alimentação contínua.

## 2 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

### 2.1 ÓLEOS VEGETAIS

As oleaginosas são plantas que contêm um alto teor de óleo, tanto a partir de suas sementes (soja, colza/canola, girassol) como a partir de seus frutos (palma, babaçu, coco), podendo ser utilizadas para a produção de óleo vegetal. Outra característica importante de algumas dessas plantas é o fato de que após a extração do óleo, os subprodutos podem ser utilizados para diferentes aplicações (MME/STPC, 2006).

No Brasil, a utilização de matérias-primas como a palma, o babaçu e a soja destaca-se para a região Norte, por exemplo. Na região Nordeste, as oleaginosas com destaque são o babaçu, a soja, a mamona, a palma (dendê), o algodão e o coco. Em relação ao Centro-Oeste destaque para a soja, mamona, algodão, girassol e dendê. Para o Sul a soja, a colza, o girassol e o algodão. Para a região Sudeste a soja, a mamona, o algodão e o girassol (CAMPOS, 2003). A **Tabela 1** relaciona a diversidade de culturas agrícolas (oleaginosas) a serem empregadas, estas variam conforme as características de cada região ou estado brasileiro.

**Tabela 1** – Diferentes Matérias-primas para Extração de Óleos Vegetais Utilizados para Avaliação das Cadeias Produtivas nas Regiões do Brasil

REGIÃO	OLEAGINOSAS
Norte	dendê, babaçu, soja
Nordeste	soja, mamona, palma (dendê), algodão, côco
Sudeste	soja, mamona, algodão, girassol, amendoim
Sul	soja, colza, girassol, algodão
Centro-Oeste	soja, mamona, algodão, girassol, dendê

(FONTE: CAMPOS (2003))

CAMPOS (2003) ainda explica que, para cada Estado e região do País, o desenvolvimento das cadeias produtivas das diferentes espécies oleaginosas

precisa levar em consideração fatores que envolvem o meio ambiente e suas inter-relações com a sociedade moderna. Nota-se que a soja possui potencial de cultivo em todas as regiões brasileiras, com destaque para as que tradicionalmente a produzem: a região Centro-Oeste e a região Sul.

Diversas espécies vegetais e animais possuem tecidos especializados em armazenar óleos e gorduras, tais como polpas de frutos, sementes, peles e ossos. Existem, também, diversas espécies microbianas, como algas e fungos, que possuem organelas para armazenagem de óleos e gorduras (RAMALHO; SUAREZ, 2012). Os óleos vegetais representam um dos principais produtos extraídos de plantas da atualidade e cerca de dois terços são usados em produtos alimentícios fazendo parte da dieta humana. Os lipídios, juntamente com as proteínas e os carboidratos, são fontes de energia, apresentando grande importância para a indústria, na produção de ácidos graxos, glicerina, lubrificantes, carburantes, biodiesel, além de inúmeras outras aplicações (REDA; CARNEIRO, 2007).

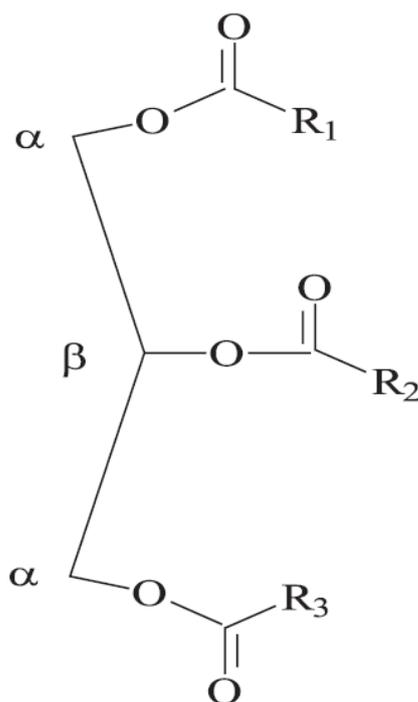
### **2.1.1 Composição Química**

Os lipídios formam uma classe bem complexa de biomoléculas, que se caracterizam mais por sua solubilidade em solventes orgânicos apolares (como clorofórmio, éter, benzeno) e baixa solubilidade em solventes polares (como água, etanol, metanol) e não por apresentar algum grupo funcional comum a todos eles (BARREIROS, 2012). As gorduras e os óleos são as duas substâncias mais conhecidas dessa categoria orgânica dos lipídios (FOOD INGREDIENTS BRASIL, 2016). Os óleos vegetais são constituídos principalmente de triacilgliceróis (> 95 %) e pequenas quantidades de mono e diacilgliceróis (REDA; CARNEIRO, 2007).

Os ácidos graxos são as unidades básicas da maioria dos lipídios (contendo apenas um grupo carboxila — COOH). O grupo carboxila se liga a uma longa cadeia hidrocarbonada cujo número de carbono varia de 4 a 36. Os ácidos graxos podem ser classificados em saturados e insaturados, ou seja, que contêm uma ou mais duplas ligações. Esses ácidos graxos são líquidos à temperatura ambiente e são encontrados em óleos vegetais (BARREIROS, 2012).

Os triacilgliceróis (**Figura 1**) são compostos insolúveis em água e a temperatura ambiente, possuem uma consistência de líquido para sólido. Quando estão sob forma sólida são chamados de gorduras e quando estão sob forma líquida são chamados de óleos. Além de triacilgliceróis, os óleos contêm vários componentes em menor proporção, denominados componentes menores. A chamada fração insaponificável corresponde ao material constituído principalmente de esteróis, hidrocarbonetos, tocoferol (importante antioxidante); proteínas, esteróis e vitaminas (REDA; CARNEIRO, 2007; GIOIELLI, 1996).

**Figura 1** – Estrutura geral de um triacilglicerol em que:  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  = grupo alquil saturado ou insaturado; podendo ser igual ou diferente]



(FONTE: REDA; CARNEIRO (2007))

### 2.1.2 Processos de extração de sementes oleaginosas

Dada à diversidade dos tecidos que armazenam as substâncias graxas, não existe um processo único de extração e purificação de óleos e gorduras, pois ele depende das características da fonte oleaginosa. No entanto, é possível identificar algumas operações unitárias básicas envolvidas na extração: prensagem mecânica, extração à solvente ou autoclavagem. Os óleos ou gorduras obtidos geralmente passam por processos posteriores de purificação, para ajustar as suas propriedades físico-químicas (RAMALHO; SUAREZ, 2012).

As sementes de modo geral contêm maior ou menor quantidade de óleo em sua composição. A indústria de esmagamento de sementes tem na matéria-prima vegetal seu principal componente com influência direta nos custos, bem como na qualidade do produto final. Isso faz com que sejam necessários uma particular atenção e cuidado no tratamento dos insumos e itens principais dos processos industriais. O processamento industrial de óleos e gorduras pode ser apresentado de modo simplificado nas seguintes fases: preparação da matéria-prima, extração do óleo bruto e refinação. Cada fase, por sua vez, é constituída de diversas etapas e o conjunto de todas as operações permite a obtenção do produto final, ou seja, os óleos vegetais. A preparação das sementes para a extração pode variar bastante em função da matéria-prima (JORGE, 2009).

GIOIELLI (1996) sistematiza que o processamento industrial de óleos e gorduras pode ser apresentado de modo simplificado nas seguintes fases, de acordo com a **Figura 2**:

**Figura 2** – Etapas no processamento de óleos



JORGE (2009) descreveu que, como regra geral, sementes oleaginosas e outros materiais gordurosos com menores teores de óleo (<20 – 25%) são diretamente submetidos à extração do óleo por solvente. Os materiais com maiores

teores de óleo (> 25%) são pré-prensados, obtendo-se tortas com 10 – 15% de óleo, que posteriormente é extraído por solvente. As seguintes denominações são normalmente empregadas:

- **Torta:** é o residual das matrizes graxas obtidos após a extração do óleo;
- **Farelo:** é o residual obtido após a secagem da torta;
- **Solvente:** líquido utilizado na extração;
- **Miscela:** mistura do óleo extraído com o solvente orgânico.

A extração de óleo a partir de oleaginosas é realizada basicamente por dois tipos de processos: extração mecânica e extração por solvente.

#### *2.1.2.1 Extração por Prensagem*

Na extração mecânica a matriz oleaginosa recebe pressão mecânica suficiente para romper seus tecidos e liberar o extrato oleoso. Este método é utilizado geralmente para obtenção de óleos especiais - como o azeite de colza virgem e o azeite de oliva extra virgem, óleos produzidos em pequena escala ou como pré-extração na extração por solvente (MATTHÄUS, 2012).

A extração com o uso de prensas para a obtenção de óleo é mais recomendada para matérias-primas de altos teores de óleo. Após a extração há uma quantidade apreciável de óleo na torta que pode ser extraída com o uso de solvente. A vantagem da utilização da prensa frente ao uso de solvente na extração é o seu baixo custo operacional e a versatilidade para diferentes matérias-primas e pequenas capacidades. A prensa mais conhecida é a prensa de parafuso contínuo. Para a extração é necessário um preparo do grão, quebrando ou laminando, e um tratamento térmico, a 115 °C. As cascas podem ser utilizadas para a produção de fibras para alimentos ou podem ser queimadas. Elas são retiradas do grão por separadores de cascas, ou através de ciclones e ventiladores, para maior rendimento da operação (REGITANO-D`ARCE, 2006).

### 2.1.2.2 Extração com Solventes

A extração de óleo de matrizes sólidas por solvente, também chamada de lixiviação ou extração sólido-líquido, é um processo que envolve o contato da matéria-prima com um solvente adequado, capaz de solubilizar, transportar e dissolver o óleo de dentro para fora da matriz (DAHLSTROM *et al.*, 1997)

A extração por solvente teve sua patente registrada pelo francês Deiss no século XIX e nesse mesmo século virou um processo industrial na Europa. Os solventes mais empregados na época eram o dissulfeto de carbono, uma mistura de hidrocarbonetos, o tricloroetileno e o etano. O mecanismo para extração de óleos de frutos e grãos envolve os processos de: lixiviação, lavagem, difusão e diálise. O material oleaginoso é geralmente preparado por quebra, condicionamento e laminação. Estas operações deformam as células, rompendo a parede celular dos esferossomos, facilitando a extração do óleo (JOHNSON; LUSAS, 1983).

DAGOSTIN (2015) destaca que este processo é amplamente utilizado na indústria química e de alimentos, onde os métodos mecânicos e térmicos de separação não são possíveis ou práticos. A extração de compostos de chás e a obtenção de óleo de sementes de oleaginosas por solvente líquido são exemplos típicos de extração sólido-líquido. Considera-se que este processo de extração ocorre devido a três fenômenos principais:

1. Difusão do solvente através dos poros do sólido;
2. Contato do solvente com soluto, permitindo sua transferência à fase líquida.
3. Transferência da solução do interior do sólido para a solução circundante.

O processo de extração de óleo depende da dinâmica do óleo dissolvido, liberado com o rompimento das células na fase de preparo do material, e do óleo obtido da célula intacta, quando o solvente entra na célula e forma a miscela intracelular, que aumenta a pressão osmótica do meio, e altera a permeabilidade da membrana. A diferença de concentração entre o ambiente interno e externo age como força motriz, permitindo a difusão dos triglicerídeos para a miscela extracelular (REGITANO-D'ARCE, 1991).

O processamento da matéria-prima se inicia com o preparo do grão. A retirada das cascas pode aumentar o rendimento em proteína no farelo. Uma preparação normal do grão para a extração deve contemplar a redução de tamanho, de espessura e um aquecimento (TOMAZIN JUNIOR, 2008). As extrações por solvente podem ser classificadas em dois grupos principais: extração por percolação ou por imersão. Na percolação, o solvente ou a miscela é bombeado e pulverizado sobre a superfície do leito a uma taxa suficientemente baixa para evitar a inundação do leito de flocos da matéria oleaginosa (DAGOSTIN, 2015; REGITANO-D`ARCE, 2006).

Ao término do processo de extração por solvente, obtêm-se dois produtos: o óleo e a torta. O óleo que sai do processo de extração por solvente é chamado de óleo bruto. Este óleo necessita de etapas posteriores de refino para ser consumido. Um exemplo importante é o da soja, que em sua forma bruta possui diversos contaminantes. Dentre os contaminantes podemos citar os ácidos graxos livres, fosfolipídeos como a lecitina, que promovem emulsões estáveis com água, e tocoferol, que confere odor e gosto extremamente desagradáveis. Para torná-lo adequado para uso em alimentação humana, ou para diversos processos industriais, o óleo bruto deve passar por um refino, onde estas impurezas são retiradas (RAMALHO; SUAREZ, 2012).

Os processos que ocorrem são meramente físicos, pois o óleo transferido para o solvente é recuperado sem nenhuma reação química (BRUM *et al.*, 2009). Para se atingir um baixo teor de óleo residual na torta, é necessário uma alta capacidade de lixiviação e uma alta eficiência de extração. Essa alta eficiência é obtida através do efeito da temperatura aplicada ao sistema e tempo total de extração com o solvente em questão, juntamente com o pré-tratamento e o grau de umidade do material oleaginoso (REGITANO-D`ARCE, 1991).

### 2.1.2.3 Solventes de Extração

JORGE (2009) relata que pela utilização de um solvente orgânico, o farelo obtido apresenta teor de óleo muito baixo, normalmente inferior a 1%. O solvente é

recuperado da miscela e do farelo e volta novamente ao circuito de extração. Diversos solventes podem ser empregados. As características do solvente ideal são as seguintes, embora nenhum preencha todos os critérios:

- Faixa de ebulição estreita e não muito alta;
- Deve permanecer líquido em temperaturas baixas;
- Ser neutro ao óleo, com dissolução fácil e seletiva;
- Ser estável e inerte quando em contato com superfícies metálicas;
- Insolúvel em água;
- Não tóxico;
- Não inflamável e não explosivo;
- Disponível em baixos preços e em quantidades adequadas.
- Baixos valores de calor específico; vaporização, viscosidade e densidade;

Além dos requisitos citados anteriormente, a escolha de um determinado solvente deve atender a certas condições operacionais, já que a solubilidade de triacilgliceróis é função da temperatura e da pressão aplicada (THOMAS, 2003). Quanto maior a temperatura e/ou pressão de um sistema de extração, maior a solubilidade dos triacilgliceróis no solvente. No entanto, deve-se levar em conta o alto custo necessário para a operação de sistemas nestas condições. Ainda, temperaturas muito altas podem conduzir reações indesejadas, como a oxidação ou até mesmo a pirólise em casos mais extremos (DAGOSTIN, 2015).

Existem diversos tipos de solventes capazes de extrair óleo do grão. Solventes comerciais utilizados para extração incluem naftas, hidrocarbonetos, halogenados, álcoois, aldeídos e cetonas (JOHNSON; LUSAS, 1983). Além disso, pode-se fazer também a mistura entre os solventes, denominados solventes mistos. Quando se utiliza um solvente apolar juntamente com um solvente polar, o primeiro permite a extração de todos os lipídeos presentes no grão e o segundo permite um pré-refino (TOMAZIN JUNIOR, 2008). A **Tabela 2** mostra alguns solventes existentes e suas respectivas polaridades.

**Tabela 2 – Polaridade dos solventes**

<b>Solvente</b>	<b>Polaridade</b>
Ciclohexano	0,04
Hexano	0,1
Éter etílico	2,8
Tetrahidrofurano	4
Cloroformio	4,1
Etanol	4,3
Metanol	5,1
Acetonitrila	5,8
Água	10,2

(FONTE: SKOOG; HOLLER; NIEMAN (2002))

Na literatura é possível encontrar diversos estudos onde se propõe o uso de solventes alternativos para extratores de oleaginosas, como por exemplo: dióxido de carbono supercrítico, hidrocarbonetos em geral e álcoois diversos. A seleção de um solvente a ser usado na extração de óleo de sementes deve levar em conta uma série de fatores que maximizem a qualidade (pureza) e a quantidade de óleo removida da matriz (DAGOSTIN, 2015).

Dos vários solventes testados na extração supercrítica, o que mais parece atrativo é o dióxido de carbono, que já é utilizado na extração de produtos de alto valor agregado (MENDES; PESSOA; ULLER, 2002). O problema do uso de tecnologia supercrítica está no menor volume de operação e alto custo dos equipamentos necessários quando comparado à extração por hexano (BOSS, 2000).

#### Hexano:

DAGOSTIN (2015) explica que, devido a fatores econômicos, políticos, de saúde e segurança, a legislação brasileira vem tornando-se cada vez mais rigorosa quanto às tecnologias e processos utilizados na indústria de alimentos. Estes processos devem garantir ao consumidor alimentos de qualidade e com os mais baixos níveis de resíduos possíveis. O processamento de grãos para obtenção de

óleo e farelo é realizado hoje quase que exclusivamente pelo método de extração por solvente, normalmente o hexano comercial.

BOSS (2000) relata que o hexano tem sido usado extensivamente na extração de óleo de soja e várias outras oleaginosas por apresentar diversas vantagens, tais como:

- Alta estabilidade;
- Baixos efeitos residuais graxos;
- Baixa corrosividade;
- Imiscibilidade em água, não formando azeótropos;
- Baixo calor latente de ebulição, o que auxilia sua recuperação por evaporação;
- Capacidade de diluição do óleo com facilidade sem atuar sobre os outros componentes da matéria oleaginosa;
- Composição homogênea e estreita faixa de temperatura de vaporização;

O hexano é um solvente alifático com faixa de destilação compreendida entre 62 °C e 74 °C, obtido por destilação de frações do petróleo. Suas principais características são o seu alto poder extrativo e sua rápida evaporação, com curva de destilação estreita. Este ainda apresenta vantagens como a separação facilitada do óleo ou gordura, simplificando o processo de recuperação do solvente; e alta pureza, não afetando a qualidade dos produtos obtidos. Em contrapartida, devido ao seu ponto de fulgor ser ao redor de -35 °C, em temperaturas superiores a esta, o líquido libera vapores que podem formar uma mistura inflamável com o ar. Além disso, seu manuseio requer os cuidados, pois este é classificado como um produto que altera o comportamento, assim, deve-se evitar inalação de seus vapores e um contato prolongado com a pele (PETROBRAS, 2017).

O hexano comercial compreende uma mistura de hidrocarbonetos que geralmente possui ponto de evaporação na faixa de 65 – 69 °C. O hexano comercial contém aproximadamente 65% de n-hexano (cadeia linear), sendo que os 35% restantes consistem de ciclopentano (C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>) e isômeros estruturais do hexano (2-metilpentano, 3-metilpentano, 2,2-dimetilbutano, 2,3-dimetilbutano). Seu vapor é três

vezes mais pesado que o ar e pequenas quantidades são o suficiente para criar uma mistura explosiva. Desta forma, deve ser tomado cuidado especial durante a construção e operação de plantas de extração por solvente (KEMPER, 2005).

### Etanol:

A extração de óleo com o uso de etanol como solvente ressurgiu como alternativa para o hexano, normalmente utilizado na indústria de processamento da soja. Esse processo tem a vantagem de eliminar a etapa de destilação do solvente da miscela extraída (óleo + solvente) por um simples período de resfriamento (até 30°C), obtendo-se duas fases distintas, uma miscela rica em óleo e outra miscela rica em álcool (REGITANO-D'ARCE, 1985).

O etanol apresenta também vantagens econômicas e ambientais, pois possui um custo relativamente baixo no Brasil, uma vez que o país é pioneiro na produção do etanol de cana-de-açúcar, é oriundo de fontes renováveis, é atóxico, e não depende do mercado internacional do petróleo (CARVALHO, 2001). Como desvantagem, o etanol apresenta maior calor latente de vaporização, ou seja, necessita maiores gastos energéticos para transição de fase nas etapas de destilação da miscela e dessolventização (DAGOSTIN, 2015).

Quando o solvente é o etanol em sua concentração anidra, para uma melhor eficiência de extração, é necessário que o processo opere próximo a temperatura de ebulição do solvente, pois na temperatura de ebulição tem-se a diminuição da viscosidade do óleo e um aumento de solubilidade, o que permite ao etanol interagir com o óleo e transportá-lo para fora da célula. Entretanto, quando o solvente utilizado é o álcool hidratado, tem-se a diminuição da solubilidade e a necessidade de se trabalhar com temperaturas maiores e sistemas pressurizados. Nesse caso, para compensar o efeito da polaridade da água é necessário abaixar a concentração de óleo na micela alcoólica, aumentando assim o rendimento, mas com uma menor eficiência de extração (TOMAZIN JUNIOR, 2008).

Outro aspecto levantado por TOMAZIN JUNIOR (2008) é de que o etanol é um solvente polar, biodegradável, não tóxico e possui grande potencial para a extração de óleo. Este se destaca por ser uma boa alternativa para a substituição do hexano, composto derivado do petróleo e tóxico, como solvente de extração sem

perdas de rendimento. Uma outra vantagem do uso do etanol para extração de óleos, é que o óleo obtido desse processo apresenta baixos teores de ácidos graxos livres e fosfolipídios, uma vez que esses se deslocam para a fase álcool durante o resfriamento da micela. Além disso, o farelo obtido apresenta uma coloração clara e um aroma melhorado quando comparado ao obtido com hexano. A **Tabela 3** faz uma rápida comparação entre as vantagens e desvantagens, algumas já apresentadas para os solventes hexano e etanol.

**Tabela 3** – Comparação entre o solvente Hexano e o solvente Etanol.

Hexano		Etanol	
<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Ponto de ebulição: 65°C - 70 °C	Derivado do petróleo	Derivado de fonte renovável, biodegradável	Ponto de ebulição: 78°C
Seletivo aos compostos apolares	Alta inflamabilidade, explosividade e toxidez	Apresenta uma pequena polaridade e não tóxico	Miscível em água
Baixo calor latente de ebulição	Vapor de hexano mais denso que o ar	A extração com etanol promove um pré-refino	Inflamável
Imiscível com a água	Recuperação do solvente por destilação	Recuperação do solvente sem gasto de energia	

(FONTE: TOMAZIN JUNIOR (2008))

Para se atingir um baixo teor de óleo residual no farelo é preciso uma alta eficiência de extração e uma alta capacidade de lixiviação, e essa eficiência é resultado do efeito da temperatura de extração aplicada ao sistema e ao tempo de extração com o determinado solvente, juntamente com o pré-tratamento e o grau de umidade do material oleaginoso (REGITANO-D`ARCE, 1991).

GHANDI *et al.* (2003), verificaram que outros solventes como isopropanol, etanol, isobutanol, n-propanol, n-heptano, tetracloreto de carbono, dicloroetileno e tricloroetileno, podem ser usados em alternativa ao hexano, trabalhando sempre com uma temperatura próxima a ebulição do solvente. A extração com hexano comercial acontece em temperatura próxima ao seu ponto de ebulição, o que reduz

a viscosidade do óleo e aumenta sua solubilidade no solvente, aumentando a eficiência e rapidez da extração.

SCHARLACK (2015) estudou a viabilidade técnica da substituição do hexano por solventes alcoólicos, etanol e isopropanol na extração do óleo de sementes de girassol. A influência das variáveis tipo e grau de hidratação do solvente alcoólico e temperatura foi avaliada sobre a composição em ácidos graxos, a estabilidade oxidativa do óleo extraído. A matéria prima foi submetida ao processo de extração sólido-líquido, utilizando os solventes em grau absoluto e hidratado, nas temperaturas de 60 a 90 °C, sendo objetivo de estudo o rendimento do óleo. Em linhas gerais, este estudo inferiu que a hidratação do solvente afetou de forma negativa o rendimento da extração e observou-se também que com o aumento da temperatura, aumenta-se a quantidade de material lipídico extraído.

SAWADA *et al.* (2014) também utilizaram o etanol com diferentes graus de hidratação para a extração de óleo de soja nas temperaturas de 40 a 90 °C. Os resultados demonstraram que com o aumento da hidratação do solvente o rendimento do óleo diminuiu significativamente, enquanto a extração de proteínas foi aumentada. Entretanto, com o aumento da temperatura a extração dos lipídeos foi favorecida. Os autores observaram também que não são notadas diferenças estatisticamente significativas entre as composições em ácidos graxos dos óleos obtidos via etanol e via hexano.

Os álcoois de cadeia curta, como etanol e isopropanol, em temperatura ambiente apresentam como característica a miscibilidade parcial com os óleos vegetais, enquanto o hexano apresenta miscibilidade total. Esta característica de miscibilidade parcial pode levar a uma diminuição da demanda energética na etapa de recuperação do solvente contido na fase extrato. O álcool etílico pode ser obtido através de uma grande variedade de matérias-primas e fontes fósseis, sendo sua maior demanda por fontes renováveis como cana-de-açúcar, beterraba açucareira, mandioca e batata doce. O emprego do etanol para a extração de oleaginosas no Brasil foi cogitado na década de 1980, quando o país aumentou a produção deste tipo de solvente para fins automobilísticos (REGITANO-D'ARCE, 1985; CAPELLINI, 2013).

### 2.1.3 Matérias-primas graxas

Além de terem um papel fundamental na alimentação humana fornecendo calorias, os de óleos e gorduras agem como veículo para as vitaminas lipossolúveis, como A, D, E e K, são fontes de ácidos graxos essenciais como o linoleico, linolênico, araquidônico e contribuem para o sabor dos alimentos estes também são utilizados como matérias-primas em diferentes aplicações industriais na produção de lubrificantes, biodiesel, plastificantes, surfactantes, cosméticos, farmacêuticos, alimentício, etc., (SARAIVA, 2008).

O termo produtos florestais não madeireiros (PFNM) é um termo genérico que se refere aos diferentes produtos de origem vegetal e animal e podem ser obtidos dos recursos naturais. Entre os principais PFNM destacam-se os produtos para o consumo humano (alimentos, bebidas, plantas medicinais e extratos, como por exemplo, frutas, bagas, nozes, mel, fungos, entre outros); farelos e forragem (campos para pastagem); e outros produtos não madeireiros (tais como cortiça, resinas, taninos, extratos industriais, plantas ornamentais, musgos, samambaias, óleos essenciais, etc.) (FIEDLER; SOARES; SILVA, 2008).

WUNDER (1998) relata que, atualmente, os recursos florestais não madeireiros consistem na principal fonte de renda e alimentação de milhares de famílias que vivem da extração florestal em várias partes do mundo, constituindo oportunidade real para o incremento da renda familiar dos extrativistas, seja por meio de sua exploração em manejo ou em cultivos domesticados. Entretanto, apesar da grande importância sócioeconômica dos PFNM, constata-se que, geralmente, existe pouca informação sistematizada sobre a quantia, valor, processos de produção (manejo e conservação), industrialização e comercialização desses produtos.

Para FIEDLER; SOARES; SILVA (2008) a busca de novas alternativas de renda para as populações locais, faz-se mister a inclusão e desenvolvimento de programas voltados à extração, beneficiamento e comercialização de PFNM. Esta atividade produtiva, assim como qualquer outra, tem na sustentabilidade econômica e na busca de informações científicas e culturais alguns de seus pilares de

sustentação que beneficiem cooperativas ou comunidades que retiram da natureza sua fonte de renda implantando tecnologias que incrementem a renda dessas pessoas através da comercialização de produtos que contenham maior valor agregado e baixo custo de implementação.

Um bom exemplo consiste na criação e no fortalecimento de diferentes modelos de unidades de conservação, dentre as quais se incluem as reservas extrativistas para a exploração de produtos florestais não madeireiros (em geral frutos comestíveis, óleos, látex, fibras e plantas medicinais) que servem de matéria-prima para várias indústrias. Dentre os produtos florestais não madeireiros, as espécies oleaginosas apresentam grande potencial para exploração econômica, principalmente por serem abundantes e renováveis, desde que manejadas e processadas racionalmente (SARAIVA, 2008).

Os itens a seguir descrevem algumas características das matrizes oleaginosas selecionadas para o estudo deste trabalho:

#### 2.1.3.1 Amendoim (*Arachis hypogaea* L.)

O amendoim (*Arachis hypogaea* L.) é uma planta originária do continente sul americano, com descrições de espécies selvagens encontradas nas regiões Sul da Amazônia, no Brasil, ao norte da Argentina, entre os rios Paraná e Paraguai. Muito antes dos portugueses terem chegado ao Brasil, em 1500, o amendoim já era conhecido e utilizado pelos índios brasileiros. Em algumas tribos ele era chamado de Mandubi ou Mandobim e, em outras, de Manobi (FERREIRA, 2015).

A importância econômica do amendoim está relacionada ao fato de seus grãos possuírem sabor mais agradável e inigualável, sendo consumidos “in natura”, torrados, ou empregados na culinária e na confecção de doces (SANTOS *et al.* 1997). Seu óleo pode ser utilizado diretamente na alimentação humana e na indústria de tintas, de conserva, de produtos farmacêuticos e tem potencial na produção de biodiesel (GODOY; MINOTTI; RESENDE, 2005). A torta, subproduto da

extração do óleo, é rica em proteínas (aproximadamente 45%) sendo destinada à alimentação animal (CARNEIRO, 2006).

O amendoim é consumido mundialmente, e cerca de 8 milhões de toneladas anuais de grãos destinam-se ao consumo *in natura* ou industrializados, e de 15 a 18 milhões são esmagados para fabricação de óleo comestível (ARAÚJO; SOBREIRA, 2008). É utilizado ainda como torrado, em forma de manteiga (muito consumido nos EUA) ou transformado em doces. Os grãos caracterizam-se por seu alto valor energético e pela presença de vitaminas: B1 (tiamina), ácido nicotínico (niacina), outras do complexo B e vitamina E (GODOY *et al.*, 2003).

O grão de amendoim é formado pela casca ou pericarpo (28 - 30%), o tegumento ou perisperma que é a fina película que envolve o endosperma (1,45 - 3,22%), o embrião (1,8 - 2,6%) e a amêndoa (67,70 - 71,88%). O conteúdo médio de água é 5,4%, de carboidratos 11,7%, de fibras 2,5%, de cinzas 2,3% e de proteína pode variar conforme a localidade, maturidade e estação do ano entre 22-30% (PEIXOTO, 1972; PRETTI, 2010).

Nos dias atuais o amendoim é quarta oleaginosa mais cultivada no mundo, ocupando cerca de 23 milhões de hectares. Em termos de importância econômica, esta oleaginosa fica atrás apenas da soja (41,8% do total mundial), do algodão (14,1%) e da colza (13,1%), participa com cerca de 10% da produção mundial de oleaginosas (FAO, 2013).

Entre as oleaginosas comestíveis, o amendoim apresenta rendimento industrial superado apenas pelo girassol, com média de aproveitamento em torno de 40% para óleo e 50% para farelo. Predominantemente, é utilizado na indústria de gêneros alimentícios graças à nobre qualidade de seu óleo. O óleo do amendoim caracteriza-se como resistente à saturação, é de sabor agradável, o que o nivela ao óleo de milho, de girassol e ao de oliva. Normalmente, cerca de 60% da produção mundial da oleaginosa é transformada industrialmente em óleo. O aumento progressivo do consumo do óleo de amendoim tem impelido muitos lavradores a optar por sua cultura. A elevação do consumo vem sendo registrada, mesmo nas nações tradicionalmente consumidoras de azeite de oliva (TASSO JÚNIOR; MARQUES; NOGUEIRA, 2004).

O amendoim, assim como outras leguminosas, é fonte variada de opções de consumo para os segmentos alimentícios e oleoquímicos. Esta semente possui elevados teores de proteína, com média de aproximadamente 28% e teores de óleo variando de 44 a 51%. Além disso, o óleo do amendoim é composto principalmente pelos ácidos graxos oléico (C18:1) e linoléico (C18:2). Os ácidos oléico e linoléico também podem ser usados como parâmetros para avaliar a resistência do óleo à rancificação. HOLLEY; HAMMONS (1968) *apud* ZULLO *et al.* (1993) observaram que uma maior relação oléico/linoléico indica uma capacidade maior de armazenamento do óleo, sem alteração de suas qualidades. A **Tabela 4** relaciona os teores da composição de ácidos graxos do óleo de amendoim levantados por três autores citados por LIMA (2012).

**Tabela 4** – Composição de ácidos graxos do óleo de amendoim.

Ácidos graxos (g.100g <sup>-1</sup> de lipídios)	AUTORES <sup>1</sup>		
	CARRÍN, CARELLI, 2010	FREITAS, 2009	JONNALA; DUNFORD; CHENAULT, 2005
<b>Saturados</b>	<b>18,34</b>	<b>19,37</b>	<b>14,81</b>
Palmítico (C16:0)	10,95	12,41	7,2
Estearico (C18:0)	1,95	2,92	1,84
Araquídico (C20:0)	1,35	1,26	1,19
Behênico (C22:0)	2,7	2,78	2,85
Lignocérico (C24:0)	1,39	(-)	1,73
<b>Monoinsaturados</b>	<b>49,89</b>	<b>42,72</b>	<b>43,93</b>
Oléico (C18:1)	48,63	41,03	42,48
Gadoléico (C20:1)	1,26	0,76	1,45
<b>Poliinsaturados</b>	<b>32,05</b>	<b>36,31</b>	<b>37,81</b>
Linoléico (C18:2)	32,05	36,31	37,52
Linolênico (C18:3)	(-)	(-)	0,29

(FONTE: LIMA (2012)): <sup>1</sup> Valores referentes à média de dados da literatura; (-): Dados não encontrados na literatura

O óleo do amendoim refinado tem praticamente todas as propriedades necessárias a um óleo próprio para alimentação. É um óleo de belo aspecto, quase incolor, de gosto agradável e de aroma suave e característico. Conserva-se bem, com menor tendência a ficar rançoso que o azeite de dendê e outros. Em valor nutritivo, equivale às demais gorduras de origem animal ou vegetal, usadas na alimentação. Além da alimentação humana, o óleo é utilizado para fins medicinais e farmacêuticos, como veículo solvente de medicamentos, em produtos injetáveis. Também é empregado na indústria pesqueira, na fabricação de sabões e sabonetes, tintas, vernizes e ainda como combustíveis e lubrificantes (NAKAGAWA; ROSOLEM, 2011).

A composição em ácidos graxos mono e poliinsaturado é importante para a saúde, pois o consumo desses ácidos interfere no perfil sérico lipídico, contribuindo para a redução das frações de lipoproteína de baixa densidade (LDL) e de muito baixa densidade (VLDL), responsáveis pelo aumento do colesterol sérico e o risco de doenças cardiovasculares (JENKINS *et al.*, 2002; PELKMAN *et al.*, 2004).

Atualmente, com a evolução do Programa Brasileiro de Biodiesel, o amendoim vem sendo incluído como alternativa para o fornecimento de matéria-prima. Esta difusão se baseia no rendimento de óleo do grão, que varia entre 45 a 50% (MARTIM; ASSUNÇÃO; LIMA, 2009). Neste cenário, o cultivo do amendoim pode ser o caminho para agricultores familiares acessarem o programa supracitado, uma vez que o cultivo desta oleaginosa seria mais uma alternativa para diversificação da produção, resultando em geração de renda.

### 2.1.3.2 Coco (*Cocos nucifera* L.)

O coco, de nome científico *Cocos nucifera* L., tem sua distribuição mundial por todas as regiões tropicais e subtropicais. São frutos secos que apresentam a camada mais externa chamada exocarpo ou epiderme, mesocarpo fibroso que se apresenta fibroso, e por fim, o endocarpo lenhoso (BONTEMPO, 2008; CHAN; ELEVITCH, 2006).

O coqueiro, originário do Sudeste asiático, foi introduzido no Brasil em 1553, onde se apresenta naturalizado em longas áreas da costa nordestina,

proporcionando abundante matéria-prima tanto para as agroindústrias regionais, quanto para uso alimentício (FERREIRA; WAREICK; SIQUEIRA, 1994; SOBRAL, 1976). O coqueiro é uma das árvores mais importante do mundo, pois sua atividade gera emprego e renda para toda a região. Analisando o cenário nacional o cultivo do coqueiro, apresenta viabilidade técnico-ambiental, seus frutos podem ser consumidos *in natura* ou industrializados, na forma de mais de 100 produtos e subprodutos de interesse econômico (ARAGÃO *et al.*, 1993).

O Brasil é o único país produtor onde o coco é tratado como uma fruta e não como uma oleaginosa. Durante a década de 70, no Brasil, houve um forte incentivo governamental para a implantação de unidades industriais para processamento de sua polpa (coco ralado, leite e óleo). Essas empresas foram implantadas com sucesso e passaram a gerar emprego e renda para as áreas onde eram instaladas e postas em funcionamento. Nessa fase, todas as empresas foram implantadas na Região Nordeste, onde a cultura do coqueiro já estava bem difundida. A inclusão da cultura do coqueiro entre as oleaginosas com potencial para produção de biodiesel no Brasil constitui-se numa alternativa a ser analisada pelos órgãos de desenvolvimento, reforçando assim a necessidade de implementação de um programa de revitalização da cultura (ARAUJO, 2008)

O óleo de coco é derivado da polpa do coco. Segundo dados do Centro de Informações Tecnológicas e Comerciais para Fruticultura Tropical, da Embrapa, os países asiáticos, como Índia, Filipinas e Indonésia, são considerados os principais produtores da fruta e seus produtos secundários, enquanto o Brasil ocupa a 10ª colocação no ranking mundial de produção de coco (LIAU *et al.*, 2011).

O conteúdo de óleo na polpa é superior a 60%, o que equivale a uma produção de 500 a 3000 kg de óleo/ha (MAZZANI, 1963). Quanto aos ácidos graxos, o endosperma do fruto do coqueiro é a principal fonte mundial de ácido láurico usado na indústria de alimentos, cosméticos, sabões e na fabricação de álcool (BALACHANDRAN; ARUMUGHAN; MATHEW, 1985).

Conhecidos pelo termo “óleos láuricos”, os óleos de coco, palmiste (dendê), babaçu e outros, são assim conhecidos por conterem altos níveis de ácido láurico (12:0). Comumente comercializados nos mercados internacionais e locais, os óleos originários do coqueiro (*Cocos nucifera* L.) e da palmeira (*Elaeis guineensis* Jacq.)

crecem produtivamente em regiões tropicais da Ásia, África e nas Américas Central e Sul. Os óleos láuricos são utilizados para aplicações alimentares e não alimentares. São usados nas indústrias de confeitaria e podem ser combinados com óleos  $C_{16/18}$  para produzir margarina, pastas e gorduras vegetais. Os óleos láuricos também são usados em cosméticos, produtos de higiene pessoal e lubrificantes (AMRI, 2011).

GUNSTONE; HARWOOD (2007) estimam que 61% da produção de óleo de coco destina-se para fins alimentícios. Segundo YOUNG (1983) a outra grande parcela desta produção segue para fins técnicos, dos quais a principal é a fabricação de cosméticos como sabonetes e óleos para o corpo e para o cabelo. Além desta aplicação, o óleo de coco também é empregado como matéria-prima na fabricação de detergentes. A importância deste óleo para esta última finalidade está crescendo devido aos custos crescentes de produção baseada em produtos petrolíferos. Nos grandes países produtores, o óleo de coco é amplamente utilizado para cozinhar e fritar.

O primeiro passo na extração de óleo de coco é o descascamento; isto é, quebrando a casca para retirar o miolo que contém cerca de 50% de umidade e tem que ser seco até um teor de umidade de 6-8% antes da extração do óleo. O caroço seco é conhecido como copra e tem um teor de óleo de 64%. Tradicionalmente, o óleo de coco é extraído da copra por esmagamento em um bagaço, seguido por extração com solvente para recuperar o óleo residual da torta (CANAPI *et al.*, 2005).

A composição dos óleos láuricos é caracterizada pelo alto nível de ácidos graxos de cadeias curta e média (AGCM) ( $C_6 - C_{14}$ ), atingindo cerca de 80% da constituição do óleo de coco. Os principais ácidos graxos são láuricos e mirístico (14:0), em cerca de 48% e 18%, respectivamente, enquanto nenhum outro ácido graxo está presente em mais do que cerca de 8%. É essa forte preponderância do ácido láurico que dá ao óleo de coco as suas propriedades de fusão, como a resistência à temperatura ambiente (20 °C), combinada com um baixo ponto de fusão (24 – 29 °C). Devido à sua baixa insaturação, os óleos láuricos são também muito estáveis à oxidação (PANTZARIS; BASIRON, 2002).

Assim como conclui RODRIGUES (2012) em sua revisão sistemática, embora muito se discuta ainda sobre os possíveis efeitos medicinais do óleo de coco na

saúde humana, diversos estudos têm sido realizados no sentido de mitigar os poderes milagrosos. DEBMANDAL; MANDAL (2011) reforçam a existência em abundância dos AGCMs, que são conhecidos por não serem estocados como gordura, e terem imediata disponibilização de energia devido à rápida absorção pelo organismo. Além deste efeito, os AGCMs não participam da biossíntese e transporte de colesterol, o que destaca o seu efeito cardioprotetor.

Desde que extraído a frio, o óleo de coco possui os ácidos: láurico (44 a 52%), mirístico (13 a 19%), palmítico (7,5 a 10,5%), oléico (5,8%), caprílico 5,5 a 9,5%), cáprico (4,5 a 9,5%), linoléico (1,5 a 2,5%), esteárico (1 a 3%), capróico (0,3 a 0,8%), araquídico (até 0,4%) (BONTEMPO, 2008).

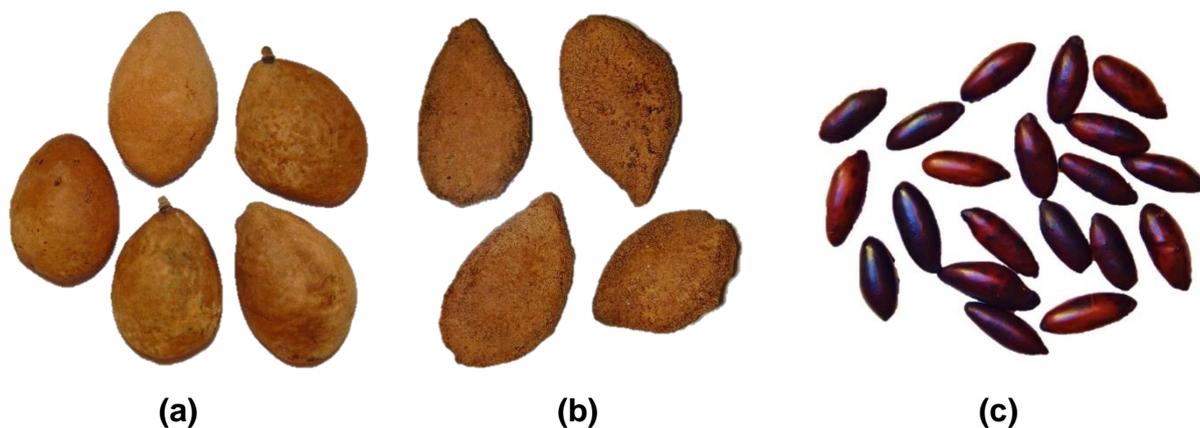
Demais estudos revelam atividades antioxidantes (NEVIN; RAJAMOHAN, 2006); antitrombóticas e hipolipemiantes, isto é, reguladores dos níveis de colesterol (NEVIN; RAJAMOHAN, 2008); antibacterianas (OYI; ONAOLAPO; OBI, 2010); antidermatófitas, para tratamento de lesões cutâneas (CARPO; VERALLO-ROWELL; KABARA, 2007); antivirais (ARORA *et al.*, 2011); antifúngicas (ŘIHÁKOVÁ *et al.*, 2002; OGBOLU *et al.*, 2007), além de validada e patenteada ação como repelente de insetos em função da presença do ácido dodecanóico (DAUTEL *et al.*, 2001) e potencial matéria-prima para a produção de biodiesel (ROBEERTO, 2001).

### 2.1.3.3 Baru (*Dipteryx alata* Vog.)

O barueiro (*Dipteryx alata* Vog.) é uma leguminosa arbórea, que ocorre geralmente nas áreas férteis do cerrado. Apresenta uma multiplicidade de usos, e em muitas propriedades tradicionais da região essas árvores são mantidas nas pastagens. Na época da seca, a polpa do fruto é consumida pelo gado bovino (ALMEIDA; SILVA; RIBEIRO, 1987). Disseminada irregularmente pelo Bioma, faz parte do grupo das espécies nativas usadas pela população regional como fonte de renda familiar. É uma das espécies mais promissoras para cultivo, devido a seu uso múltiplo, alta taxa de germinação de sementes e de estabelecimento de mudas (SANO; RIBEIRO; BRITO, 2004).

O nome popular varia com o local, sendo mais conhecido como baru, cumaru ou cumbaru. No exterior, o baru é conhecido como *tonka beans*. O barueiro é uma árvore com altura média de 15 m, podendo alcançar mais de 25 m em solos mais férteis. O fruto (**Figura 3 (a)**) possui cerca de 1,5 a 5 cm de comprimento, de formato ovóide levemente achatado, constituído internamente por um endocarpo (**Figura 3 (b)**) lenhoso e rígido, de cor mais escura que o mesocarpo fibroso. Apenas uma única semente (**Figura 3 (c)**) é obtida por fruto. Com forma elipsoide, a castanha apresenta dimensão e massa variadas, associada com a massa do fruto. O comprimento varia de 1 a 3,5 cm e a largura de 0,9 a 1,3 cm (SANO; RIBEIRO; BRITO, 2004; MELHEM, 1974).

**Figura 3** – Fruto do baru: **(a)** fruto; **(b)** endocarpo e **(c)** sementes.



(FONTE: AUTOR (2018))

O óleo extraído da semente, cujo teor de lipídios é cerca de 38% (ALMEIDA, 1998), possui alta fração de ácido oleico (50%) e linoleico (28%) de grande utilização na indústria alimentícia e farmacêutica (TAKEMOTO *et al.*, 2001). O ácido oléico é usado em inúmeras aplicações industriais como cosméticos e lubrificantes para equipamentos (ALMEIDA, 1998). Com 81% de insaturação, o óleo, é comparável ao de oliva, portanto, com potencial para ser usado como óleo de cozinha (VALLILO; TAVARES; AUED, 1990). Também é empregado como anti-reumático (FERREIRA, 1980; BARROS, 1982) e apresenta propriedades sudoríferas, tônicas e reguladoras

da menstruação, sendo também usado em tabacaria como aromatizante do fumo (CORRÊA, 1931).

O óleo é composto principalmente pelos ácidos graxos oleico (C18:1) e linoleico (C18:2). A composição dos ácidos graxos se encontra na **Tabela 5**.

**Tabela 5** – Composição de ácidos graxos de amêndoas de Baru.

Ácido graxo (g.100g <sup>-1</sup> de lipídeos)	Amêndoa de baru	
	<i>In natura</i> <sup>1</sup>	Torrada <sup>2</sup>
<b>Saturados</b>	<b>18,77</b>	<b>15,3</b>
Palmítico C16:0	7,39	6,99
Esteárico C18:0	4,62	4,42
Araquídico C20:0	1,1	1,37
Behêmico C22:0	2,64	0,32
Lignocérico C24:0	3,02	2,12
<b>Monoinsaturados</b>	<b>51,07</b>	<b>50,88</b>
Oléico C18:1	48,37	50,78
Gadoléico C20:1	2,7	(-)
<b>Poliinsaturados</b>	<b>32,35</b>	<b>30,83</b>
Linoléico C18:2	30,13	27,7
Linolênico C18:3	2,22	3,14

Adaptado de LIMA (2012): <sup>1</sup> Valores se referem à média de dados da literatura - Amêndoa de baru *in natura* (TOGASHI; SGARBIERI, 1994; VALLILO; TAVARES; AUED, 1990); <sup>2</sup> Amêndoa de baru torrada (FREITAS, 2009); (-): Dados não encontrados na literatura.

VALLILO; TAVARES; AUED (1990) destacam que pelo fato do óleo de baru possuir elevado grau de instauração e teor relativamente alto de ácido linoleico, sua utilização em substituição ao óleo de soja ou gordura hidrogenada na alimentação humana pode ser recomendável.

De maneira geral, uma composição em ácidos graxos mono e poliinsaturado é importante para a saúde, uma vez que o consumo desses ácidos interfere no perfil sérico lipídico, contribuindo para a redução das frações de lipoproteína de baixa densidade (LDL) e de muito baixa densidade (VLDL), responsáveis pelo aumento do colesterol sérico. Estudos sobre a influência do consumo de amêndoas e nozes sobre o perfil sérico lipídico, numa porção de aproximadamente 40 a 75 g/dia durante um mês, apontam efeito positivo no perfil sérico lipídico de pacientes com hiperlipidemia moderada (JENKINS *et al.*, 2002; ROS *et al.*, 2004).

As funções biológicas dos ácidos graxos poli-insaturados, como o ácido linoleico, são variadas, sendo destacadas: manutenção da integridade das células endoteliais, prevenindo aterosclerose e alterações cardiovasculares; estimulação da liberação de insulina, inibição da vasoconstrição e agregação plaquetária (ANDRADE; CARMO, 2006). Além da concentração considerável de ácidos graxos, a amêndoa do baru é constituída, ainda, por tocoferóis, sendo o  $\alpha$ -tocoferol presente em níveis comparados ao de óleo de amendoim (CORRÊA *et al.*, 2000). Genericamente, o tocoferol corresponde à vitamina E, caracterizada pela sua lipofilicidade e por atuar na prevenção do dano oxidativo. Essa substância age como um antioxidante fisiológico das estruturas celulares.

Quanto à composição em macro e micronutrientes, a semente de baru apresenta elementos como cálcio, potássio, fósforo, magnésio, manganês, ferro, zinco, cobre e selênio (CÔRREA *et al.*, 2000; VERA *et al.*, 2009; DE OLIVEIRA *et al.*, 2011; MARIN; ARRUDA; SIQUEIRA, 2009; TAKEMOTO *et al.*, 2001). O zinco e selênio são compostos bioativos relacionados a atividade antioxidante. O quantitativo de proteínas da amêndoa é mais elevado que muitas sementes popularmente utilizadas na culinária, como ervilha, grão de bico, castanha de caju e castanha do Pará (TAKEMOTO *et al.*, 2001; SANO, RIBEIRO; BRITO, 2014).

## 2.2 ENERGIA SOLAR

### 2.2.1 Panorama Geral

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é hoje uma das alternativas energéticas mais promissoras para prover a energia necessária ao desenvolvimento humano. Quando se fala em energia, deve-se lembrar de que o Sol é responsável pela origem de praticamente todas as outras fontes de energia na Terra. Em outras palavras, as fontes de energia são, em última instância, derivadas, em sua maioria, da energia do Sol (PINHO; GALDINO, 2014).

Nesse sentido, quase todas as fontes de energia – hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos – são formas indiretas de energia solar. É a partir da energia do Sol que se dá a evaporação, origem do ciclo das águas, que possibilita o represamento e a consequente geração de eletricidade (hidroeletricidade). É também através da energia do Sol que a matéria orgânica, como a cana-de-açúcar, realiza a fotossíntese e se desenvolve para, posteriormente, ser transformada em combustível nas usinas. A radiação solar também induz a circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos. Assim, também a energia eólica é uma forma indireta de manifestação da energia solar. Petróleo, carvão e gás natural foram gerados a partir de resíduos de plantas e animais que originalmente obtiveram do recurso solar a energia necessária ao seu desenvolvimento (ANEEL, 2005; PINHO; GALDINO, 2014).

Na matriz energética brasileira, a energia hidráulica é a principal fonte de energia para geração de eletricidade. Apesar de não ocorrer emissão de poluentes para a atmosfera, as usinas hidroelétricas produzem um impacto ambiental ainda não adequadamente avaliado, devido ao alagamento de grandes áreas cultiváveis e, além disso, as reservas brasileiras para geração hidroelétrica tendem a se esgotar nas próximas décadas. Estima-se que 40% da energia utilizada no setor agropecuário brasileiro seja produto da queima de combustíveis fósseis e 20% seja derivada da queima de lenha (biomassa). Programas de incentivo para adoção de

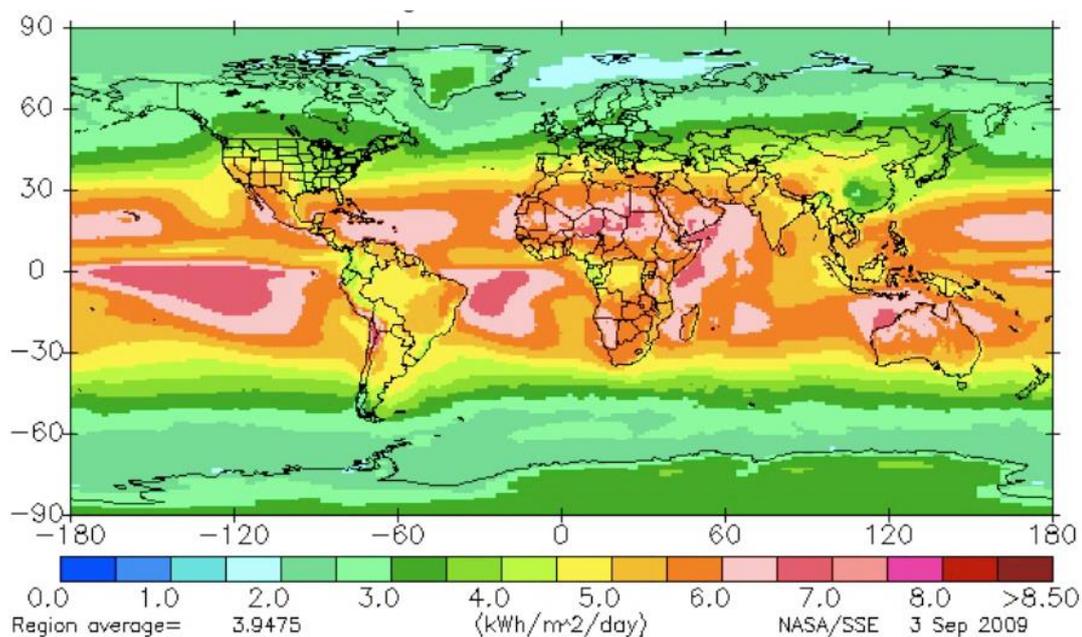
queima de biomassa (etanol e biodiesel) estão em implementação no país e espera-se que num futuro próximo, a biomassa tenha uma contribuição significativa nesses setores, reduzindo a contribuição brasileira para a emissão global de gases de efeito estufa (MARTINS; PEREIRA; ECHER, 2004).

O aumento da demanda energética em conjunto com a possibilidade de redução da oferta de combustíveis convencionais e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente estão impulsionando a comunidade científica a pesquisar e desenvolver fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ambiental. Para tanto, as fontes tradicionais teriam que ser substituídas por recursos menos agressivos ao meio ambiente e os consumidores seriam induzidos a substituir energéticos mais poluentes por outros de menor impacto ambiental aderindo assim, a práticas mais eficientes, obtendo o mesmo resultado utilizando menor quantidade de energia (MARTINS; PEREIRA; ECHER, 2004; ANEEL, 2008).

Durante todo o século XX, a oferta farta de energia, obtida principalmente a partir dos combustíveis fósseis como petróleo e carvão mineral, deu suporte ao crescimento e às transformações da economia mundial. Já nos primeiros anos do século atual, o cenário mudou ao ser colocado à prova por uma nova realidade: a necessidade do desenvolvimento sustentável (ANEEL, 2008).

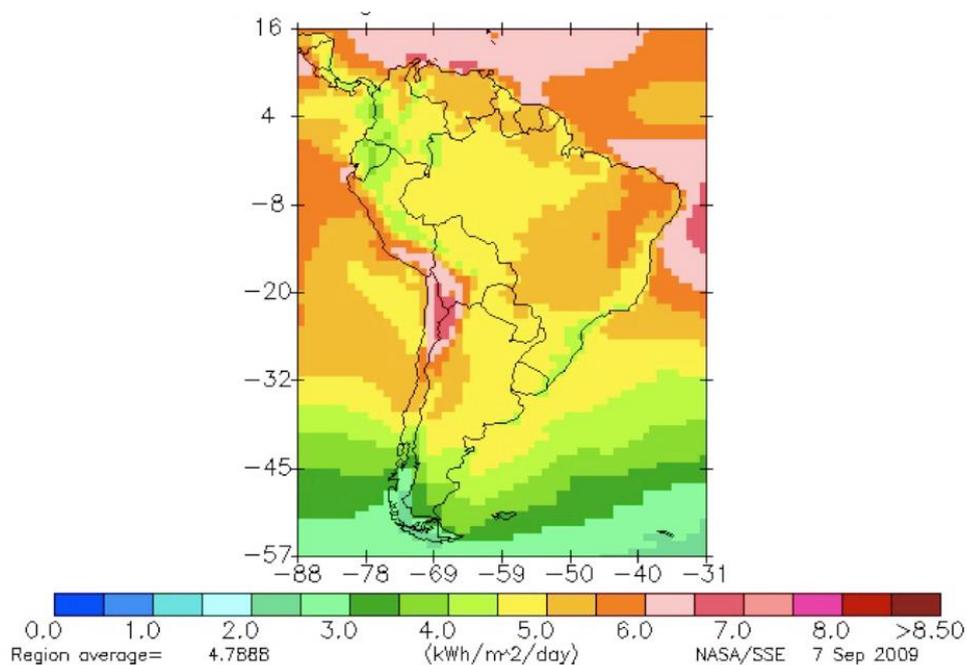
O Brasil, por ser um país localizado na sua maior parte na região intertropical (**Figuras 4 e 5**), possui grande potencial para aproveitamento de energia solar durante todo ano. Esse aproveitamento traz benefícios a longo prazo para o país como, desenvolvimento de regiões remotas onde o custo da eletrificação convencional é alto, diminuição da dependência de termoelétricas reduzindo, assim, as emissões de gases poluentes à atmosfera. Existe uma gama de possibilidades a médio e longo prazo para aproveitamento dessa abundante forma de energia renovável, no entanto, hoje em dia essa energia ainda tem uma participação incipiente na matriz energética brasileira - apenas a energia solar térmica para aquecimento de água tem despertado interesse no mercado nacional, principalmente para o emprego entre as classes A e B da sociedade, na indústria e nos serviços de hotelaria (MARTINS; PEREIRA; ECHER, 2004).

**Figura 4** – Insolação média mundial entre os anos de 1983-2005 em kWh/m<sup>2</sup>/dia.



(FONTE: NASA *apud* DIENSTMANN (2009))

**Figura 5** – Insolação média América do Sul entre os anos 1983-2005, variando de 4 a 6 kWh/m<sup>2</sup>/dia no Brasil.



(FONTE: NASA *apud* DIENSTMANN (2009))

A taxa de insolação não é apenas uma função da latitude, mas também das condições geográficas, meteorológicas e topográficas. Regiões mais ensolaradas são referidas como *Sunbelts*. Nestes *Sunbelts*, a máxima insolação direta frequentemente alcança valores de  $1 \text{ kW/m}^2$  (KODOMA, 2003). Dessa forma, países tropicais são bastante favoráveis ao uso de equipamentos solares devido a sua posição geográfica, recebendo maiores quantidades de radiação solar. Possuem ainda mais dias ensolarados que os países subtropicais e temperados (ANDRADE, 2015).

### **2.2.2 Aspectos da Radiação Solar**

O Sol é uma estrela média, semelhante a milhares de outras no Universo. É uma poderosa máquina de energia, produzindo cerca de  $4,0 \times 10^{23}$  quilowatts de potência por segundo. Numa pequena comparação, se o Sol tivesse sua energia canalizada por um segundo isto daria energia suficiente para abastecer o nosso país nos próximos nove milhões de anos. A fonte de energia básica do Sol é a fusão nuclear. Devido as altas temperaturas e densidades do seu interior ocorre a fusão do hidrogênio, criando energia e produzindo o hélio como um subproduto (TAVARES, 2000).

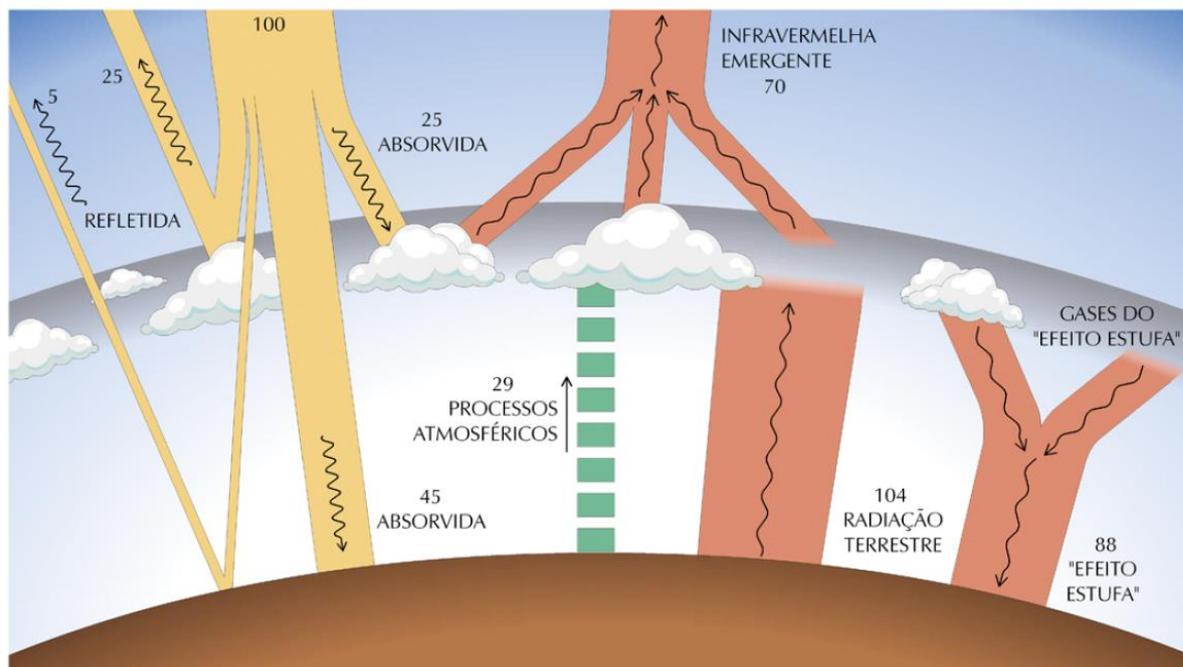
A fusão nuclear é a base de nossas vidas, uma vez que a energia solar, produzida por esse processo é indispensável para a manutenção da vida na Terra. As reações de fusão estão acontecendo por bilhões de anos no universo, sendo responsáveis pela produção de energia na maioria das estrelas, incluindo o nosso sol. O que ocorre é que esta reação libera uma quantidade de energia mais de um milhão de vezes maior que a que temos em uma típica reação química. Esta enorme quantidade de energia liberada por essas reações é decorrente da fusão de dois núcleos leves, com isso, a massa do núcleo produzido é menor que a soma das massas dos núcleos iniciais. A equação de equivalência massa-energia de Einstein, explica que a massa perdida é convertida em energia, carregada pelo produto da fusão (fonte: [portal.if.usp.br/fnc/pt-br/página-de-livro/fusão](http://portal.if.usp.br/fnc/pt-br/página-de-livro/fusão), acesso em: 25/11/2016).

A radiação solar global, composta pela radiação difusa e direta, é utilizada tradicionalmente como fonte de energia térmica para aquecimento de fluidos, iluminação de ambientes e para a geração de energia mecânica ou elétrica. A radiação direta em determinado local é aquela medida por um elemento na superfície terrestre perpendicular aos raios do sol, excluindo a insolação difusa, que é aquela refratada ou refletida por componentes atmosféricos (nuvens, neblinas, etc). A radiação refletida pela superfície do planeta é chamada de albedo. A medição da radiação global é extremamente importante, para tanto, certos instrumentos são utilizados, como os piranômetros e os pireliômetros (LIMA *et al.*, 2013)

As nuvens, a superfície do planeta, e os gases e partículas atmosféricas refletem cerca de 30% da radiação incidente. Os outros 70% restantes são absorvidos, produzindo aquecimento do sistema e causando evaporação de água (calor latente) ou convecção (calor sensível). A absorção da radiação solar é seletiva, sendo o ozônio (O<sub>3</sub>), o vapor d'água e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) os principais agentes absorvedores. A energia absorvida pelo sistema Terra-Atmosfera é reemitida na faixa do infravermelho do espectro de radiação eletromagnética sendo que 6% são provenientes da superfície e 64% tem origem em nuvens e constituintes atmosféricos (MARTINS; PEREIRA; ECHER, 2004).

Ao atravessar a atmosfera, a radiação solar sofre processos físicos de absorção e reflexão, e o mesmo fenômeno ocorre na superfície do planeta. As nuvens, os gases, as partículas atmosféricas refletem cerca de 25% e absorvem 25% da radiação incidente. Os outros 50% chegam superfície terrestre sendo 45% absorvido e uma pequena porção, 5%, refletida (LIMA *et al.*, 2013). Estes processos estão esquematizados no diagrama da **Figura 6**.

**Figura 6** – Processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.



(FONTE: PEREIRA *et al.* (2006))

Visto da Terra, o Sol se comporta como um corpo negro a uma temperatura de 5777 K. Na superfície do sol, a intensidade da radiação por ele emitida é da ordem dos 63 MW/m<sup>2</sup>. Este valor é reduzido para 1367 W/m<sup>2</sup> no topo da atmosfera terrestre e é conhecido como constante solar, GSC. Ela é medida quando a Terra está em sua distância média do sol, no topo da atmosfera, em um plano cuja normal é paralela à direção de propagação da radiação solar (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

### 2.2.2.1 Energia Radiante

Segundo PRADO (2011), a energia radiante é usualmente descrita a partir das partículas de fótons, viajando em ondas transversais na velocidade da luz. Cada fóton possui um comprimento de onda  $\gamma_0$ , gerando uma quantidade de energia  $E_r$ . Esses são relacionados pela Eq. (1):

$$E_r = \frac{K_p c}{\gamma_0} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que  $K_p$  é a constante de Planck, igual a  $6.6 \times 10^{-34}$  J.s, e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo, igual a  $3 \times 10^8$  m/s. A frequência  $\nu$  da radiação é dada pelo comprimento de onda  $\gamma_0$  na Eq. (2):

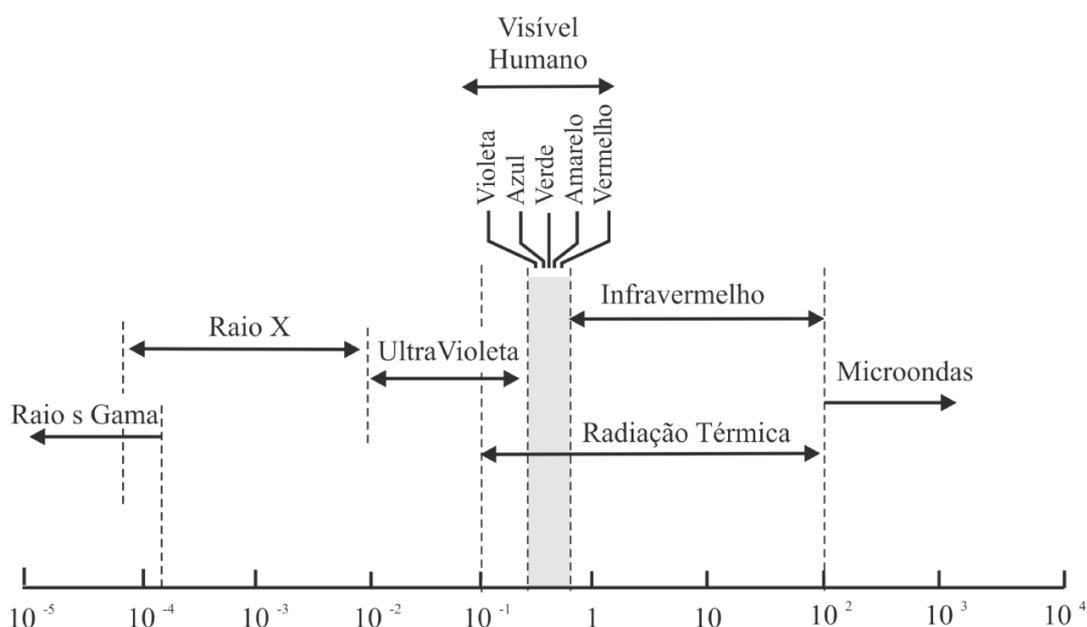
$$\nu = \frac{c}{\gamma_0} \quad \text{Eq. (2)}$$

Logo a Eq. (1) se transforma em Eq. (3):

$$E_r = K_p \nu \quad \text{Eq. (3)}$$

Segundo BEZERRA (1998) a radiação eletromagnética, vinda do sol, é distribuída em 3% de raios ultravioletas, 42% de luz visível e 55% de raios infravermelhos. Alguns nomes foram padronizados conforme o comprimento de onda e são expressos na **Figura 7**.

**Figura 7** – Descrição ilustrativa dos comprimentos de onda.



(FONTE: PRADO (2011))

### 2.2.3 Aproveitamento da Energia Solar

A energia solar pode ser utilizada principalmente de duas formas distintas: a térmica, baseada na quantidade de energia que um corpo é capaz de absorver sob a forma de calor, a partir da radiação que incide sobre ele, sendo então utilizada diretamente como fonte de energia térmica ou para aquecimento de fluidos e ambientes, ou a fotovoltaica que consiste na transformação direta de energia solar em energia elétrica através de efeitos sobre determinados materiais, particularmente os semicondutores, entre os quais se destacam as células solares e o efeito termoelétrico (ANEEL, 2005; PINHO; GALDINO, 2014).

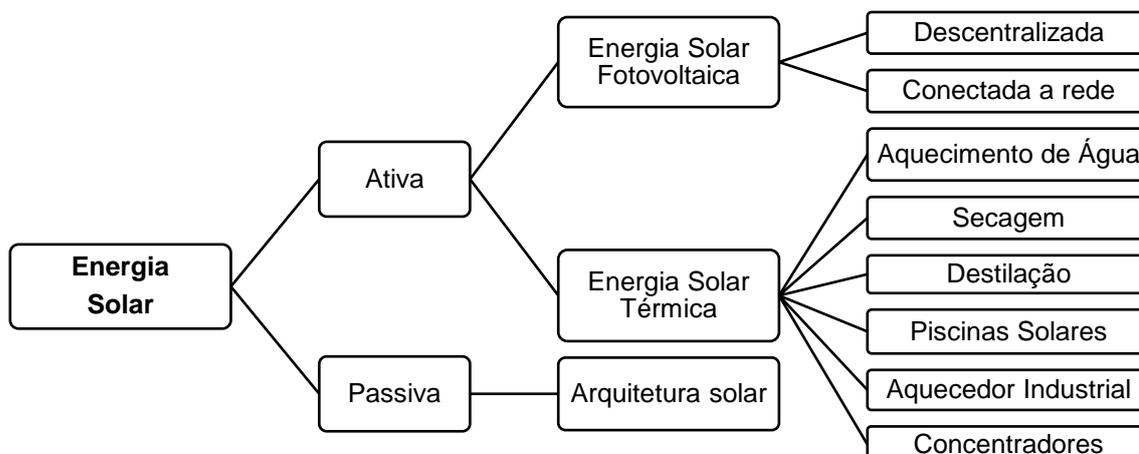
Entre os vários processos de aproveitamento da energia solar, os mais usados atualmente são o aquecimento de água e a geração fotovoltaica de energia elétrica. O aproveitamento térmico para aquecimento de fluidos é feito com o uso de coletores ou concentradores solares. Os coletores solares são mais usados em aplicações residenciais e comerciais (hotéis, restaurantes, clubes, hospitais etc.) para o aquecimento de água (higiene pessoal e lavagem de utensílios e ambientes). Os concentradores solares destinam-se a aplicações que requerem temperaturas mais elevadas, como a secagem de grãos e a produção de vapor. Neste último caso, pode-se gerar energia mecânica com o auxílio de uma turbina a vapor, e, posteriormente, eletricidade, por meio de um gerador (ANEEL, 2005).

O uso da energia solar para aquecimento pode ser rastreado de volta à antiguidade. Arquimedes comprovadamente utilizou espelhos para direcionar os raios solares e atacar uma frota hostil em 212 a.C., incendiando suas velas a uma distância de algumas centenas de pés. Mais de mil anos atrás os índios Anasazi, do sudoeste norte-americano, construíram suas casas nos lados de penhascos para fazer uso da baixa altitude do Sol para o aquecimento solar passivo no inverno e das saliências dos penhascos para fornecer proteção contra os raios solares no verão. Nos séculos XVII e XVIII, cientistas concentraram os raios solares com espelhos ou lentes para derreter metais. Antoine Lavoisier (1743-1794), frequentemente chamado de pai da química moderna, atingiu temperaturas próximas a 1.700°C usando o Sol. (HINRICHS; KLEINBACH, 2003).

Segundo ALDABÓ (2002) é comum a utilização do recurso solar para o aquecimento residencial passivo e o fornecimento de energia elétrica para sistemas autônomos remotos. O primeiro grupo de sistemas, juntamente com o aquecimento solar de água, faz parte das aplicações térmicas e o segundo das fotovoltaicas. A conversão térmica ativa consiste no aproveitamento da energia radiante como calor, enquanto a conversão fotovoltaica, por sua vez, transforma a energia radiante diretamente em energia elétrica. Essa conversão térmica pode ser baseada em coletores planos ou em coletores de concentração, objetos de estudo do presente trabalho. URIAS *et al.* (2014) destacam que os sistemas de conversão de energia solar podem ser divididos em três grandes categorias:

1. Conversão direta para aquecimento: aquecimento de água, de ambientes, secagem de alimentos e materiais, cozinha, aquecimento industrial, incluindo vapor e fornos solares;
2. Conversão com etapa termodinâmica intermediária: destilação de água, refrigeração, potência mecânica ou produção de eletricidade a partir do calor;
3. Conversão direta para eletricidade: conversão fotovoltaica, fotoemissão etc.

A principal diferença entre os módulos solares fotovoltaicos e os coletores solares térmicos está no princípio de funcionamento. Enquanto os primeiros utilizam os fótons da luz para excitar elétrons e, sob condições definidas, geram eletricidade em corrente contínua, podendo ser usada diretamente ou armazenada em baterias para uso posterior, os segundos transferem para uma superfície absorvedora pintada de preto o calor da luz do sol. O material das placas solares é diferente em cada caso. No coletor solar térmico usa-se alumínio, vidro e isolante térmico (lã de vidro). Já os painéis fotovoltaicos têm como principal elemento o silício, semimetal bastante caro (CARBONO, 2008). Através da **Figura 8** é possível observar as utilidades da energia solar de forma mais sucinta.

**Figura 8** – Utilidades da Energia Solar.(FONTE: Adaptado de URIAS *et al.* (2014))

Embora o uso de energia solar não seja uma novidade no campo de engenharia, além das aplicações triviais, listadas na **Figura 8**, a **Tabela 6**, lista algumas das aplicações não usuais que podem ser encontradas na literatura.

**Tabela 6** – Outras aplicações da energia solar térmica.

Aplicação	Conceito	Propósito	Autores
Fotocatálise	Aceleração de uma reação química envolvendo luz na presença de catalisador.	Degradação de compostos orgânicos e inorgânicos em efluentes; desinfecção de água contaminada.	MALATO <i>et al.</i> (2009); CHACÓN <i>et al.</i> (2011); GUMY <i>et al.</i> (2006).
Pirólise	Decomposição térmica de materiais orgânicos (baseados em carbono) com pouco ou nenhum oxigênio.	Produção de carvão, extratos ácidos e bio-óleo a partir de biomassa para combustíveis alternativos; produção de carvão para biossorventes.	ZENG <i>et al.</i> (2015); ANDRADE (2015); MORALES <i>et al.</i> (2014).
Destilação	Procedimento pelo qual dois líquidos com diferentes pontos de ebulição podem ser separados.	Dessalinização de água; tratamento de água poluída; destilação de álcool.	TIWARI; TIWARI (2007); PRADO (2011); MEUKAM <i>et al.</i> (2004).
Secagem	Remoção de água em alimentos.	Reduzir a atividade de água e reações enzimáticas do produto; maior prazo de validade.	MIRANDA <i>et al.</i> (2015); YALDÝZ; ERTEKÝN (2001).
Processos industriais	Processos industriais que exigem altas temperaturas.	Metalurgia; calcinação.	MURRAY (1999); MEIER <i>et al.</i> (2006).
Desinfecção	Eliminação de substâncias tóxicas ou patógenos.	Tratamento de água, ar e solo.	GOSWAMI (1999); GHINI (1997).

### 2.2.3.1 Processos de Transferência de Calor

O calor pode ser transferido por meio de três processos: condução, convecção e radiação.

**Condução:** A condução é a transferência de calor de molécula a molécula através de um corpo, podendo ser considerada como transporte molecular de energia. O fluxo se dá do mais quente ao mais frio, até que estes cheguem ao equilíbrio (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2010).

**Convecção:** A convecção ocorre devido à diferença de massas específicas entre a parte do fluido mais fria (mais densa) e mais quente (menos densa). O fluido mais quente sofre ação do empuxo, fazendo com que este se desloque para regiões mais altas, que era preenchido pelo líquido frio. Esse processo gera as chamadas correntes de convecção responsáveis em manter o fluxo de fluido entre a vizinhança e a região sujeita ao aquecimento, quando a massa específica de um fluido reduz na região exposta ao aquecimento.

Quando calor é transferido pela circulação de fluidos devido às mudanças de densidade induzidas pelo próprio calor, então o processo é conhecido como convecção natural. Enquanto que se a transferência de calor ocorrer devido a outras forças, como através de uma bomba, por exemplo, este é denominado como convecção forçada (INCROPERA; DEWITT, 2008).

**Radiação:** A radiação consiste em um mecanismo eletromagnético que admite o transporte de energia com a velocidade da luz mesmo em regiões do espaço desprovidas de matéria. A taxa de transporte entre dois corpos “negros” no vácuo é proporcional à diferença da quarta potência de suas temperaturas absolutas. Esse mecanismo é qualitativamente diferente dos demais e corresponde ao principal processo de troca de energia entre a Terra e o Sol (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2010; PEREIRA, 2010).

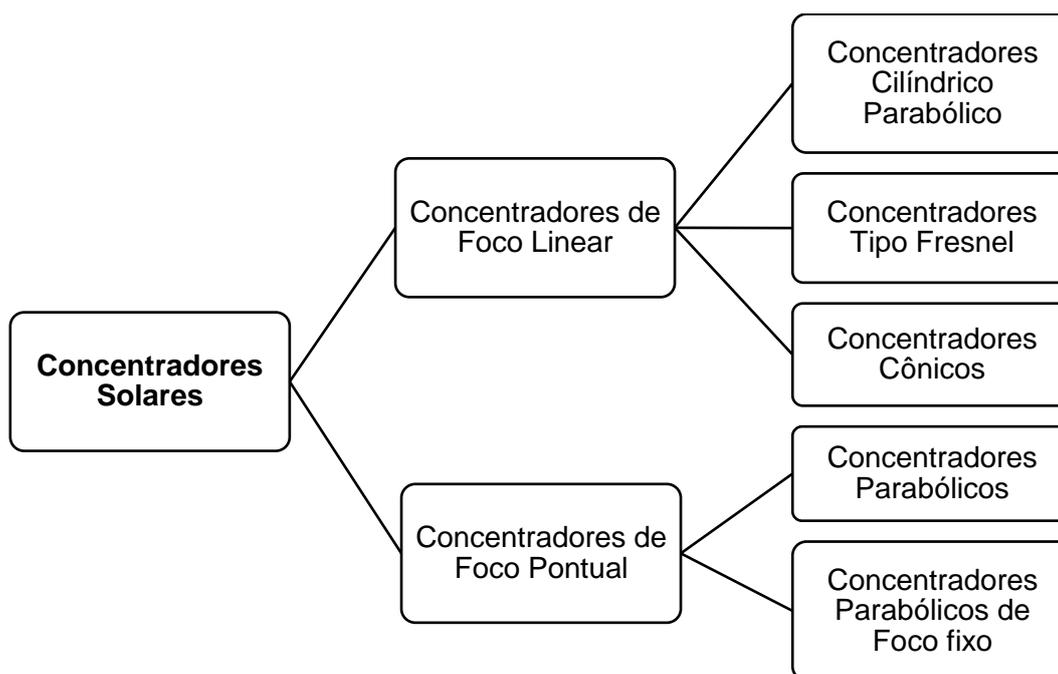
No Sol, a irradiação é de cerca de  $63 \text{ MW/m}^2$ , mas a geometria Sol-Terra diminui drasticamente o fluxo de energia solar para cerca de  $1 \text{ kW/m}^2$  na superfície da Terra. No entanto, esta desvantagem pode ser superada com a utilização de sistemas

solares de concentração, que transformam a energia vinda do sol, em energia térmica. Estes sistemas são classificados devido a sua geometria: sistemas de foco de ponto, receptor central e antenas parabólicas, ou focos de linha concentradores, coletores parabólicos e linear (GOLDEMBERG; LUCON, 2012).

#### 2.2.4 Concentradores Solares

Os concentradores se destinam a situações onde se deseja obter grandes taxas de energia térmica e temperaturas mais elevadas. Seu funcionamento é apoiado nas leis de reflexão e de refração de espelhos ou lentes, os quais direcionam a luz para um foco linear ou pontual (URIAS *et al.*, 2014). A superfície refletora dos concentradores tem forma parabólica ou esférica, de modo que os raios solares que nela incidem sejam refletidos para uma superfície bem menor, denominada foco, onde se localiza o material a ser aquecido (ANEEL, 2005). DIB (2009) classifica as principais classes de concentradores em dois grupos e suas respectivas variações exemplificadas na **Figura 9**.

**Figura 9** – Tipos de Concentradores Solares relatados por DIB (2009).



(FONTE: Adaptado de DIB (2009))

A radiação solar pode ser concentrada em um foco pontual ou linear. Estes tipos de concentradores são classificados em concentração pontual ou linear da radiação. Com concentração pontual consegue-se fatores de concentração maiores e, conseqüentemente, obter maiores temperaturas (RABL, 1985). Existem diversas abordagens possíveis para o formato dos concentradores, as quais são condicionadas pelo tipo de aplicação desejada. Os concentradores solares são constituídos essencialmente de uma superfície refletora-concentradora da radiação solar direta, cuja finalidade é captar a energia solar incidente numa área relativamente grande e concentrá-la numa área muito menor, a qual está localizada o corpo absorvedor, aumentando sua temperatura substancialmente (ANEEL, 2005).

PRADO (2011) ainda sistematiza que os concentradores podem ser divididos em outras duas categorias, os que não formam imagem e os que formam imagens. O primeiro, como sugere o nome, não produz claramente uma imagem definida do sol no seu absorvedor, mas sim distribui radiação das partes do disco solar em todas as partes do absorvedor. Já os concentradores que formam imagem no absorvedor, em contraste, produzem índices de concentração variável, mas, teoricamente, muito altos.

Segundo BEZERRA (1998), o material mais indicado para compor a superfície refletiva é o alumínio com alto grau de polimento, muito embora existam outros materiais como o mylar (plástico auto-adesivo), que tem o inconveniente de ser importado, tendo, por este motivo, um custo muito elevado e não sendo, portanto, aconselhável. O vidro espelhado de dois milímetros de espessura seria ideal para se utilizar no Brasil, porém tem o inconveniente de ser muito frágil, além de não ser suficientemente flexível para se adaptar à superfície curvada do parabolóide, o que termina por provocar dispersões energéticas.

PRADO (2011) ainda explica que a conversão da energia solar difere dos outros sistemas de energia por um importante aspecto: a dificuldade de controle. Não é possível, por exemplo, acrescentar uma determinada quantidade de energia solar em um coletor. Para isso seria necessário a criação de sistemas que simulassem a radiação o que obviamente se tornaria inviável financeiramente. Por isso DANIELS (1978) defende a importância do estudo do comportamento do Sol

possibilitando ao menos a previsão da intensidade e dos melhores meios de coletá-la.

Segundo KREIDER; KREITH (1981), há pelo menos 7 fatores principais que afetam a quantidade de incidência da radiação solar em um coletor, são eles:

- **A localização geográfica:** A eficiência do coletor solar é prejudicada quando predomina na região o clima chuvoso ou nublado.
- **Posição do Coletor:** Árvores e construções podem provocar sombras no coletor diminuindo a captação da energia.
- **Orientação do Coletor:** Os coletores que acompanham a posição do Sol mantendo seus raios na perpendicular tiram o máximo proveito da captação. Já para os que são fixos, deve-se considerar como variáveis as estações do ano e a latitude da instalação (DUFFIE; BECKMAN, 1980).
- **Tempo do Dia:** Quanto mais horas de luminosidade solar o dia tiver, maior sua eficiência.
- **Tempo do Ano:** Na maioria dos locais o verão possibilita dias com maior tempo de insolação aumentando a eficiência do coletor.
- **Condições atmosféricas:** As nuvens são capazes de reduzir a incidência da radiação em até 90%. A avaliação da energia solar pode ainda ser afetada pela umidade, presença de partículas de sujeira, poluição, etc.
- **Concepção do Coletor:** O formato do coletor, ou seja, se ele é inclinado, simples ou múltiplo resultará em diferentes níveis de eficiências.

### 2.2.4.1 Concentradores de Foco Linear

#### Concentradores Cilíndrico Parabólico:

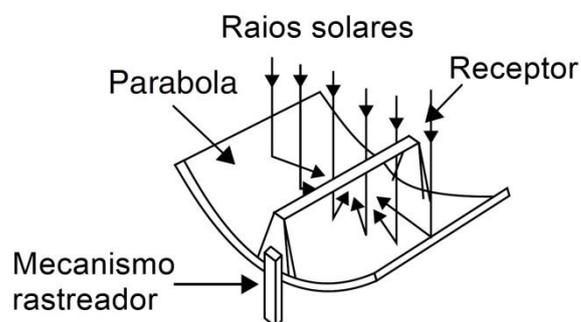
O Sistema cilindro parabólico é atualmente a tecnologia mais testada e comprovada dentre os sistemas de geração de energia solar térmica. Isto ocorre devido a seu histórico de operação comercial, principalmente pela construção das plantas SEGS (*Solar Energy Generating Systems*), localizadas no deserto de Mojave na Califórnia, que opera comercialmente desde 1984, e depois pela construção de outras usinas importantes como a *Nevada Solar One* e outras plantas mais recentes na Espanha (BIANCHINI, 2013).

O sistema de concentradores cilíndrico-parabólicos (calhas parabólicas) é composto por grandes fileiras paralelas de espelhos côncavos conectados. O formato parabólico dos espelhos focaliza o calor refletido para o tubo absorvedor de calor. Por este tubo passa um fluido de alta capacidade térmica, pode ser óleo, sal fundido, ou alguma outra substância que retenha bem o calor. A **Figura 10 (a)** exibe uma planta instalada na África do Sul da *Acwa Power* e a **Figura 10 (b)** mostra um diagrama esquemático do sistema.

**Figura 10** – Concentrador Cilíndrico-Parabólico: **(a)** aspecto real da planta da *Acwa Power*, **(b)** representação esquemática.



**(a)**



**(b)**

(FONTE: a) NEGREIROS (2015); b) Adaptado de KALOGIROU (2009))

O absorvedor se situa em uma linha que passa pelo foco dos espelhos, pois partem do princípio de que todo raio de luz que incide paralelamente ao eixo principal do espelho reflete na direção que passa pelo seu foco principal. É uma tecnologia mais difundida que as demais, abrangendo cerca de 90% das centrais mundiais (ALMEIDA, 2013). A utilização de sistemas parabólicos visa maximizar a razão de concentração no coletor, com a intenção de aumentar sua eficiência. Com esta mesma finalidade, a utilização de sistemas que permitem a variação da posição dos espelhos de acordo com a localização da fonte solar é comum, majorando inevitavelmente o desempenho do concentrador, geralmente com um ou dois eixos com graus de liberdade (NEGREIROS, 2015).

Alguns conceitos devem ser inseridos com a finalidade de melhorar a assimilação dos métodos a serem abordados posteriormente. O termo coletor solar caracteriza uma peça composta por um isolamento térmico, um vidro que visa provocar o efeito estufa e o absorvedor. Os absorvedores ou receptores são componentes de material escuro ou revestidos com uma coloração negra ou seletiva, com o objetivo de absorver a irradiação solar e transferi-la para o fluido circulante na forma de calor. Como características, devem possuir alta absorção à irradiação solar e baixa emitância para irradiação térmica para o meio. Em geral, utiliza-se uma cobertura de vidro ao seu redor, reduzindo as perdas de calor por convecção, podendo-se também manter um vácuo no espaço entre o vidro e o tubo receptor para otimizar essa redução (NEGREIROS, 2015).

#### Concentradores Tipo Fresnel:

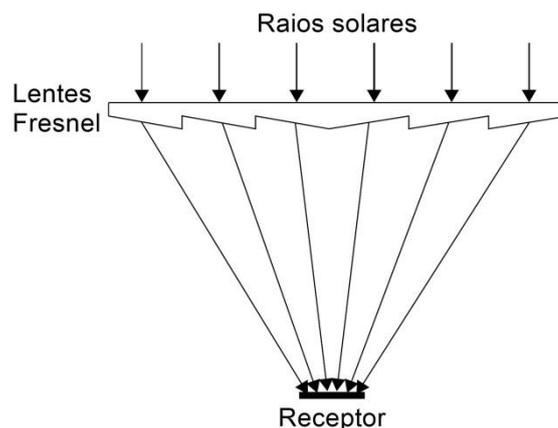
O concentrador solar Fresnel Linear consiste na utilização de uma série de espelhos longos, estreito e planos, onde concentra toda a irradiação incidida em um receptor localizado acima dos espelhos. Este tipo surge com o intuito de se ter um desempenho aproximado do concentrador cilindro parabólico de maneira mais econômica e com menos perdas, utilizando o princípio de Fresnel que afirma que uma parábola pode ser aproximada por um conjunto de segmentos de reta tangentes (CANAVARRO, 2010).

A estrutura pode ser melhor visualizada observando a **Figura 11**, onde está representada uma foto de parte da planta solar, Kimberlina, da AREVA, na Califórnia (**Figura 11 (a)**) e o desenho esquemático (**Figura 11 (b)**).

**Figura 11** – Concentradores Tipo Fresnel: **(a)** parte da planta solar da AREVA na Califórnia; **(b)** representação esquemática.



**(a)**



**(b)**

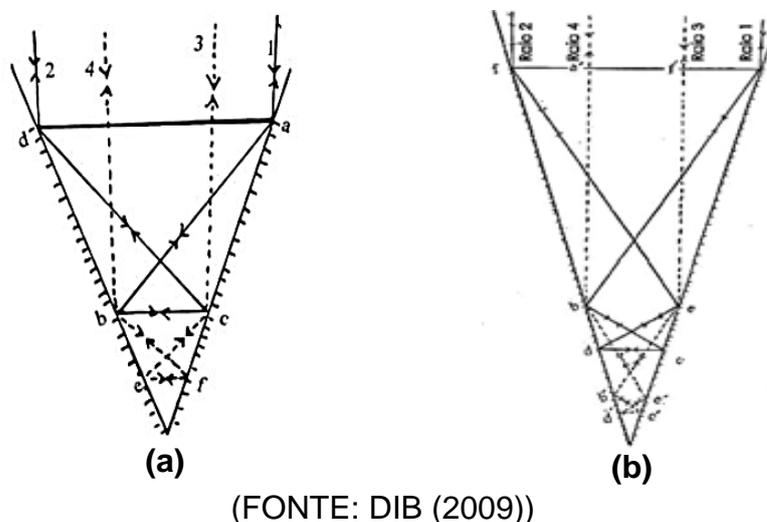
(FONTE: a) BIANCHINI (2013); b) Adaptado de KALOGIROU (2009))

NEGREIROS (2015) explicita que os Coletores Linear Fresnel buscam assemelhar-se aos coletores parabólicos, com o uso de uma série de espelhos planos colocados em diferentes ângulos para se concentrar a luz em um receptor fixo localizado a alguns metros acima do campo de espelhos. Cada linha de espelhos é equipada com um sistema de rastreamento de um único eixo e é otimizado individualmente para garantir que a reflexão da luz atinja o receptor.

### Concentradores Cônicos:

SHARAF (2002) *apud* DIB (2009) desenvolveu um modelo cônico, em que o foco do concentrador se localizou em uma região centralizada e alinhada próximo ao vértice do cone. Este construiu um concentrador com ângulo de abertura de  $45^\circ$  e um concentrador com abertura de  $30^\circ$ , com área de reflexão de 1146,08 e 4596,03  $\text{cm}^2$  respectivamente, conforme mostra a **Figura 12**.

**Figura 12** – Representação dos raios solares nos cones de abertura: **(a)** 45°; **(b)** 30°



SHARAF (2002) observou que para o concentrador com ângulo de 30°, a água alcançou 100 °C em apenas 20 min, enquanto o cone de abertura de 45 °C levou cerca de 30 min. Também realizou testes de aquecimento de óleo, com o objetivo de medir a temperatura do óleo após 20 min de aquecimento. O concentrador com abertura de 30° alcançou 135 °C e o concentrador cone com abertura de 45° alcançou 150 °C. Mesmo que esse modelo apresente diversas vantagens para o uso em pequenas dimensões, como alta eficiência, facilidade na fabricação, baixo peso e custo, em sua obra alega-se que a cada 30 min há a necessidade de redirecioná-lo para o sol devido ao movimento de rotação da Terra.

#### 2.2.4.2 Concentradores de Foco Pontual

##### Concentradores Parabólicos

Os coletores de disco parabólico (**Figura 13**) consistem em um concentrador de superfície especular que foca os raios do sol e os reflete em um receptor instalado acima do disco em seu ponto focal. Cada disco pode ser uma unidade independente ou ser um módulo de um sistema múltiplo para produzir potência. O fluido em um disco parabólico pode alcançar temperaturas de até 1500 °C e pode

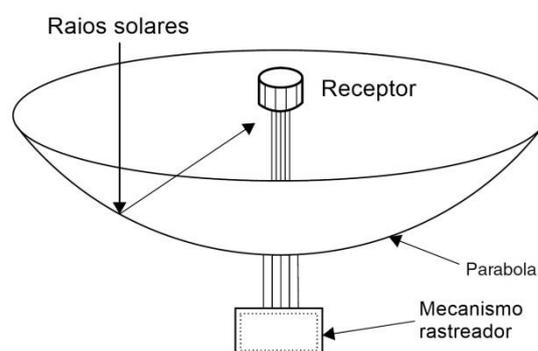
produzir até 50 kW de eletricidade ou 150 kW de potência térmica. Neste tipo de tecnologia de concentração solar, o gerador, usualmente um motor *stirling* ou uma micro turbina, está acoplado ao receptor.

O motor *Stirling* usa o calor para variar a pressão no interior de uma câmara de hidrogênio selado, fazendo os pistões produzirem energia mecânica. Esses motores podem ser particularmente vantajosos em aplicações para bombeamento de água, em que o trabalho mecânico é necessário, para acionar uma bomba, em vez de eletricidade para outros fins.

**Figura 13** – Concentradores Parabólicos: **(a)** foto do sistema da *Global Nevada Corp* nos EUA; **(b)** representação esquemática.



**(a)**



**(b)**

(FONTE: a) NEGREIROS (2015); b) Adaptado de KALOGIROU (2009))

Segundo KALOGIROU (2009), a tecnologia do sistema disco parabólico, tem alta eficiência na concentração de calor e baixa perda térmica, por rastrear o sol em dois eixos, sendo capaz de apontar para o sol durante o dia todo, e porque o calor focado é aplicado diretamente para a unidade de calor do motor-gerador. Por isso, possui as maiores taxas de concentração (600 a 2000 vezes) e por essa razão é o coletor mais eficiente. Conseqüentemente, atinge temperaturas muito elevadas, podendo chegar acima de 1500 °C. No entanto, os custos de instalação tendem a ser mais elevados do que os custos da calha parabólica, refletor Fresnel e sistemas de torre central.

### 2.2.5 Destilação Solar

Devido ao fato da energia solar ser uma fonte de energia limpa, abundante e inesgotável, sua utilização em diversos processos, como na destilação solar, desperta grande interesse e vem sendo objeto de diversos estudos atualmente. De acordo com ARSLAN (2012), o processo de destilação solar tem um futuro promissor, devido às vantagens de se utilizar a energia solar, sendo esta uma fonte de energia limpa e abundante, ou seja, ecologicamente correta. Uma extensa lista de trabalhos têm sido relatados na literatura quanto o uso da energia solar empregado nos processos de destilação da água, seja para obtenção de água com padrões de potabilidade (SOARES, 2004; CRUZ, 2012; MARINHO *et al.*, 2012) ou para tratamento de efluentes (RAMOS, 2009; COSTA, 2008; SOUSA, 2010), visando melhorar a qualidade dos mesmos para despejo.

Segundo SOUZA (2009) este processo já vem sendo amplamente utilizado na indústria com a finalidade de recuperar solventes contaminados oriundos de processos de pinturas, em geral, onde a tinta impregnada com solvente é descartada durante a limpeza dos equipamentos. SOUZA (2009) avaliou diferentes processos de destilação de resíduos gerados no processo de pintura de móveis com fins de subsidiar uma forma de gerenciamento ambiental para resíduos dessa indústria. A destilação simples é o processo mais empregado na recuperação de solventes. Através de processos de destilação simples ocorre a separação do solvente e dos contaminantes ou componentes, e este praticamente volta à suas condições iniciais (DURSUN; SENGUL, 2006).

Sabe-se que a destilação é uma operação unitária que integra o conjunto das operações baseadas na transferência de massa. O mecanismo subentendido a esta operação de separação é o do equilíbrio líquido/vapor. Ao fornecer calor a uma mistura líquida, ao promover a sua vaporização parcial, obtém-se duas fases, uma líquida e outra de vapor, que têm composições diferentes. As aplicações industriais do processo de destilação são várias, sendo uma das mais conhecidas a separação de misturas de hidrocarbonetos na indústria petroquímica (fonte: labvirtual.eq.uc.pt, acessado em 20/072017).

Processos industriais como o craqueamento do petróleo, produção de álcool, alambiques, produção de vinho, dentre outros setores da indústria utilizam esta operação, dado a necessidade de separar componentes com pontos de ebulição (PE) relativamente distintos a pressão constante. Esta operação possui algumas variantes, como a destilação simples ou convencional, a destilação fracionada e a destilação a vácuo, sendo que estas ainda podem ser subdivididas em contínuas e em batelada (SOUZA, 2009).

A destilação solar, que é feita via destilador solar do tipo tanque raso (*basin type*), é uma tecnologia muito simples que imita um processo natural: a radiação solar aquece o líquido a ser destilado que fica contido num recipiente raso revestido, ou não, por uma cobertura negra. O líquido se transforma em vapor, que então, se condensa na cobertura de vidro (que tem uma temperatura mais baixa) e a lâmina do líquido destilado é, assim, coletado em um duto metálico meia-cana localizado na parte lateral do destilador. A energia solar é aprisionada dentro da câmara, pois o vidro comum é transparente para a radiação solar, mas opaco para a radiação infravermelha reemitida (efeito estufa). Quando o líquido evapora, os componentes de maior PE são deixados para trás no recipiente. A cobertura de vidro fica em uma posição inclinada de modo a evitar que as gotas d'água caiam de volta para o reservatório do líquido. Os plásticos não são tão apropriados porque podem gerar um efeito chamado de *wettable* - em que gotas de água não se fixam bem à cobertura e acabam por cair de volta no tanque (MALUF, 2005; COSTA, 2008).

PRADO (2011) complementa que a distribuição da energia solar e os processos de transferência de calor e de massa são a base do funcionamento de um evaporador solar. Embora haja diferenças de geometria entre eles, o mecanismo é basicamente o mesmo: captação dos raios solares, evaporação do líquido e condensação no recipiente.

A destilação solar é mais comumente utilizada no processo de destilação da água, porém a destilação solar mostra-se também eficiente na destilação do álcool. A implantação do Programa Nacional do Álcool incrementou a produção e utilização do álcool como fonte energética. Os processos de destilação convencionais têm sido largamente utilizados pelos grandes centros produtores. Em pequena escala, a nível das chamadas microusinas de álcool (produção diária em torno de 120 L de álcool),

acredita-se que tais processos possam ser substituídos, com vantagens, pela destilação solar (ISMAIL; LIU; PIMENTEL, 1984). Na maioria das vezes é usada para separar um líquido de impurezas não voláteis (em solução no líquido) de um solvente usado numa extração, ou excepcionalmente, para separar líquidos de ponto de ebulição afastados (SOUZA, 2009).

O etanol (ponto de ebulição 78,4 °C) é produzido por um processo biotecnológico que não gera resíduos tóxicos e é considerado seguro para a saúde humana. Economicamente, as vantagens do etanol também são evidentes porque é produzido em larga escala no Brasil e pode ser facilmente recuperado para posterior reutilização. O etanol apresenta calor latente de vaporização (200 cal/g) superior ao hexano (80 cal/g), requerendo mais energia para separar o óleo do solvente por destilação. Em temperaturas próximas ao seu ponto de ebulição, o etanol é um bom solvente, desde que eles permaneçam na forma líquida. Uma vantagem da utilização deste solvente é a baixa solubilidade do óleo em temperaturas inferiores, sendo a redução da temperatura uma forma de separar o óleo do solvente, em substituição à destilação (MENEZES, 2016).

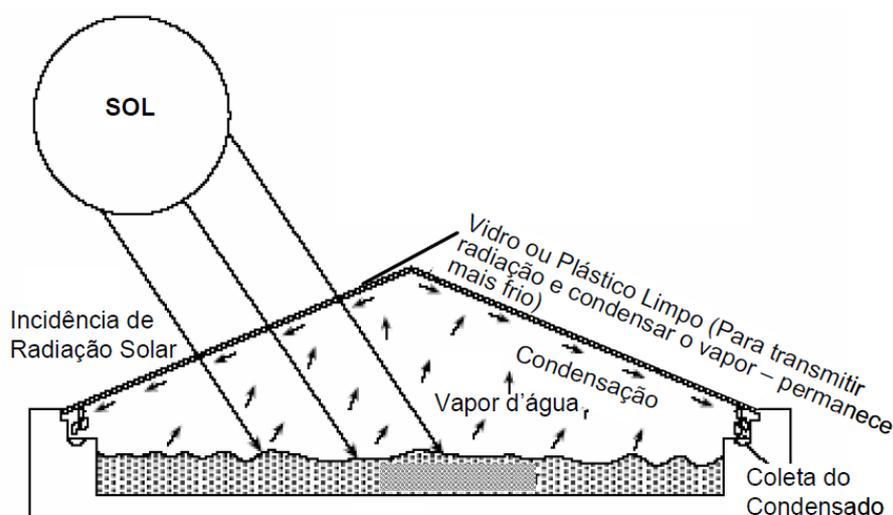
A destilação solar pode ser dividida como direta (passiva) e indireta (ativa). No sistema passivo, o sistema recebe energia proveniente apenas do sol e já no caso da ativa, o sistema recebe além da radiação solar, uma parcela extra de calor advinda de outra fonte de energia (JORGE, 2011). Sabe-se que, em relação à produtividade, a destilação solar ativa possui vantagens com relação à passiva, porém do ponto de vista ambiental, a destilação passiva é mais favorável visto que utiliza apenas uma fonte de energia limpa, o sol (TIWARI; TIWARI, 2007).

Existem alguns parâmetros influentes na destilação solar, que GARG; MANN (1976) citam sendo os parâmetros climáticos, como por exemplo, a radiação solar, a velocidade do vento, a temperatura do ambiente, as condições do céu e a umidade. Ainda de acordo com o autor, os ventos aumentam a produtividade do destilador, elevando a taxa de condensação.

Além dos fatores climáticos, o projeto do destilador e sua disposição influenciam bastante na eficiência térmica do mesmo, bem como nos rendimentos. Outro fator importante na construção do destilador solar é o ângulo de inclinação da cobertura, já que a mesma interfere tanto na passagem dos raios solares, como

também, como suporte para o escoamento do líquido a ser destilado. Comumente admite-se que a melhor inclinação para a cobertura é a soma da latitude local mais 15°. A **Figura 14** demonstra o esquema ilustrativo do funcionamento e dos princípios utilizados para a construção do destilador de água, o que são basicamente o mesmo para destilar etanol.

**Figura 14** – Desenho esquemático do funcionamento de um destilador *basin type*.



(FONTE: SOARES (2004))

MALUF (2005) relata que a operação destes destiladores é muito simples e não requer um alto custo de manutenção ou trabalhadores especializados, apesar de que uma correta manutenção seja fundamental para que eles funcionem adequadamente. O destilador deve ser limpo regularmente para a retirada de quaisquer impurezas que se acumulem no fundo do reservatório evitando que diminua a produção de destilado. Uma das principais razões de perdas de calor e, conseqüentemente, de perda de eficiência são os vazamentos de calor, principalmente em grandes destiladores. O uso de bons selantes e vedadores (como o silicone) é muito importante. O nível do destilado no tanque deve ser sempre mantido dentro de limites adequados e o vidro deve ser limpo e sem trincas que podem levar a uma perda extra de calor.

MCCRACKEN, (1985), *apud* MALUF (2005) analisou que perdas típicas em um destilador solar do tipo tanque raso são causadas pela reflexão da radiação incidente no vidro (cerca de 10% da energia total), absorção no vidro (10%), perdas

por radiação da cobertura de vidro para o céu (3,7%), perdas por convecção do vidro para o ambiente (12,2%), perdas por condução da base do reservatório para o solo (16%, mas com o uso de um bom isolante térmico pode cair para 5%) e outras perdas menores devido as perdas de calor (9,7%). A velocidade do vento (efeito Bernoulli) e as diferenças de temperatura contribuem para os vazamentos de calor. Assim, considerando esses números como referência, de 38% a 43% (a eficiência máxima atingida não passa de 60%) da energia solar recebida pelo destilador é utilizada no processo de transferência de massa da evaporação.

Já para BEZERRA (1998), quanto aos rendimentos associados aos evaporadores solares, da radiação solar incidente no evaporador, 68% é dissipada seja pelo vitral, pelas paredes do destilador, pela refletividade, pelo isolamento térmico, restando apenas 32% de energia útil.

### **2.2.6 Destiladores Solares**

O primeiro documento oficial do conceito de um evaporador solar foi feito em 1742 por Nicolo Ghezzi na Itália, embora outras pessoas já o utilizaram como Aristóteles, no século IV a.C e os alquimistas árabes para produção de água potável no século XVI d.C. A primeira unidade moderna foi construída por Charles Wilson em 1872 em Las Salinas, no Chile. Tinha uma área total de 4459 m<sup>2</sup> com 64 reservatórios de água feitos de madeira preta e recobertos por vidros inclinados. Produzia diariamente 20000 L de água potável e ficou ativa durante 40 anos (TALBERT, EIBLING; LOF, 1970; PRADO, 2011).

Diferentemente de outros equipamentos do sistema solar, como os coletores solares, que já podem ser comprados prontos, o destilador solar deve ser construído. Assim, uma revisão bibliográfica das partes constituintes de um destilador solar é fundamental, a fim de permitir a escolha dos melhores materiais e a melhor forma de montagem. Os materiais utilizados para a construção de destiladores solares devem possuir uma série de características, como: longa vida útil nas condições às quais serão expostos ou suficientemente baratos para serem substituídos quando necessário; resistência às intempéries; atoxidade; inércia

química; resistência às altas temperaturas; resistência à corrosão; peso e tamanho adequados ao transporte e montagem. Uma construção mais cara e bem feita pode levar a economias futuras, pois muitos dos destiladores de baixo custo construídos foram abandonados em pouco tempo. Os principais componentes de um destilador solar tipo tanque raso são: tanque; cobertura; suportes; canaletas e isolamento térmico.

#### *2.2.6.1 Tanque*

Os tanques ou o recipiente que contém o líquido a ser destilado devem ser construídos de acordo com as necessidades do projeto de destilação. Atualmente tem predominado a construção de destiladores com materiais não-metálicos. A fibra de vidro é usada em várias construções de destiladores, todavia é um material não tão acessível. As resinas de polietileno e epoxy podem ter reações com o fluido a ser destilado, o que pode ser solucionado com um revestimento específico. O acrílico tem baixo poder resistivo à radiação solar e sofre degradação rápida. O tanque deve ser, sobretudo nesse caso, resistente principalmente à corrosão, e pintado de uma cor escura, para que possa absorver melhor a radiação incidente e transformá-la em calor. O concreto, o cobre, o ferro galvanizado e o alumínio anodizado são alguns exemplos já utilizados sendo que sua superfície deverá ser lisa para uma melhor limpeza (COSTA, 2008; RAMOS, 2009).

Quanto à profundidade da água no tanque, a literatura recomenda um valor entre 1,5 cm e 2,5 cm (AL-HAYEK; BADRAN, 2004). De modo geral, quanto mais raso o tanque, melhor. Mas, se o tanque for raso demais, secará facilmente. Na prática, nenhum destilador com tanques mais profundos atinge a eficiência típica de 43% dos destiladores de tanque rasos (RAMOS, 2009).

### 2.2.6.2 Cobertura

Com relação à cobertura do destilador, é necessário que esta seja de material transparente, podendo ser de vidro ou de plástico. A luz visível passa através do material transparente e é absorvida e refletida por materiais dentro do destilador, gerando o chamado efeito estufa em seu interior. O vidro permite que a luz visível, que possui um comprimento de onda curto, entre na estufa, porém impede que os comprimentos de onda longos saiam como é o caso das ondas de infravermelho, fazendo com que seu interior se aqueça.

De acordo com LUIZ (1985), o vidro é um material melhor que o plástico para a cobertura, devido ao efeito estufa gerado pelo vidro no interior do destilador ser mais intenso que o gerado pelo plástico e também a condensação do vapor sobre o plástico produz gotas de líquido que podem cair novamente no recipiente contendo a mistura, enquanto que no vidro, forma-se uma película contínua de condensado. No caso de se formarem gotas de água (característica conhecida em inglês como *wettability*), a performance do destilador será afetada, pois as gotas funcionam como pequenos espelhos que refletem a radiação solar.

Quanto ao ângulo de inclinação da cobertura, sabe-se que este tem influência na quantidade de radiação solar que entra no destilador. Quanto mais ortogonal à superfície do vidro for esse ângulo de incidência, melhor. Ou seja, quanto menor o ângulo de inclinação, mais radiação é transmitida pelo vidro. BEZERRA (2004) escolheu o ângulo de 20° como ideal em termos energéticos, já que permite uma boa transmissão de radiação solar, o que equivale a altas taxas de evaporação (a perda por reflexão é menor). Maiores ângulos de inclinação provocam um aumento na condensação devido ao aumento da área da cobertura, mas apresentam maior perda por convecção do ar presente, além de menor eficiência energética.

Ainda segundo RAMOS (2009) não é necessário haver uma inclinação muito grande do vidro para que a água escorra por ele: com o vidro limpo, uma inclinação de apenas 1° é necessária para que isso ocorra. Uma inclinação pequena é sugestiva, pois assim se gasta menos vidro, o destilador tem volume e peso menores (custando menos) e a quantidade de ar entre a água e o vidro é menor,

umentando a eficiência. De acordo com a literatura, o melhor ângulo para a cobertura, a fim de maximizar a incidência solar é a latitude local mais 15°.

A distância entre a cobertura de vidro e a superfície da água é outro parâmetro importante na configuração do destilador e não deve ser maior que cinco ou sete centímetros. À medida que a distância entre o vidro e a água aumenta as perdas térmicas por convecção com o ar presente também aumentam e a eficiência do destilador diminui. É necessário um cuidado para que a cobertura não possua trincas ou espaços por onde o calor e o vapor possam vazar. Para isso pode-se utilizar borrachas, silicões ou outros produtos que auxiliem na vedação (BEZERRA, 2004; TORRI, 2015).

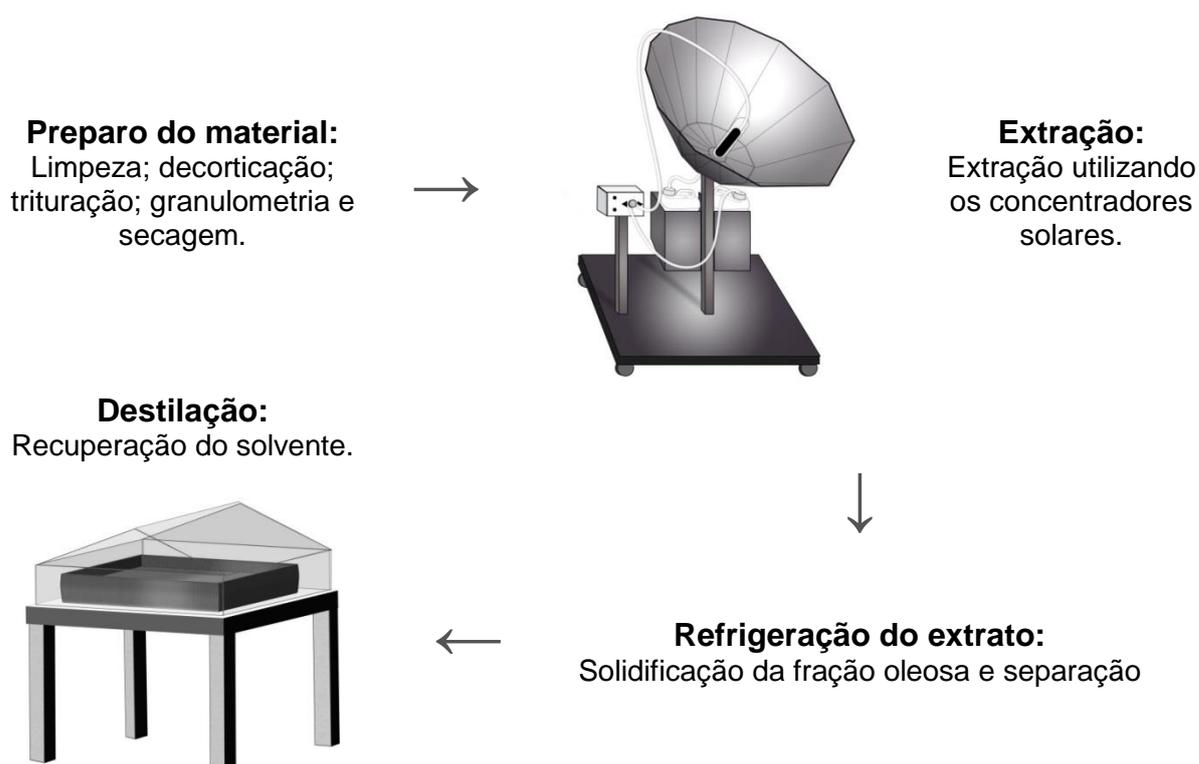
#### *2.2.6.3 Demais componentes*

Os principais componentes auxiliares são o isolamento térmico e os vedadores (como o silicone). O isolamento térmico serve para evitar perdas de calor para o ambiente, aumentando a eficiência do destilador em até 14% para tanques rasos, e geralmente é utilizado por baixo do tanque. Se construído com bom isolamento térmico, durante a noite também há destilação devido ao calor armazenado na massa de água do tanque (RAMOS, 2009). As canaletas de coleta ficam localizadas na base da cobertura de vidro e servem para coletar a água condensada e levá-la ao tanque de armazenamento. Estas devem ser pequenas, para não provocar sombreamento no tanque. Segundo MALUF (2005), o material mais indicado é o aço inoxidável, porém, o alumínio e o PVC também são opções viáveis.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados todos os materiais, metodologias e a descrição dos equipamentos que foram empregados nos processos divididos no [item 3.1](#) sobre a extração sólido-líquido dos óleos e subdivido para cada oleaginosa, e no [item 3.2](#) sobre o processo de destilação, o qual descreve a construção da unidade experimental e as metodologias empregadas. De maneira geral, o esquema mostrado na **Figura 15**, representa resumidamente todas as etapas e o objetivo simplificado de cada passo do trabalho:

**Figura 15** – Etapas simplificadas dos processos desenvolvidos no trabalho.



Os experimentos foram realizados nos períodos entre 10h e 15h, horários de maiores taxas de incidência solar, em dias de baixa nebulosidade. Dados meteorológicos como: velocidade do vento; radiação solar e temperatura ambiente foram obtidos em intervalos de uma hora pelo site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), por meio da central meteorológica automática localizada na Unidade II da UFTM – Univerdecidade.

### 3.1 EXTRAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO

Os itens a seguir descrevem o preparo das matérias-primas graxas utilizadas; as unidades experimentais dos concentradores solares, seus respectivos componentes e as metodologias empregadas para cada extração bem como suas variáveis testadas. Também será descrito neste tópico sobre o processo de extração pelo método Soxhlet, utilizado como referência nas outras extrações para o cálculo de rendimento.

#### 3.1.1 Preparo das Matérias-Primas Graxas

Para os procedimentos de extração realizados em ambos os concentradores, algumas etapas prévias são necessárias e seguem os passos convencionais de qualquer outro processo no preparo desses materiais.

As etapas iniciais antes da extração em si pelas quais a matéria-prima normalmente é submetida são: limpeza, decorticação (visa retirar a casca que envolve as sementes, se houver); a trituração que realiza o rompimento dos tecidos das sementes, o que facilita a extração de óleo por aumentar a superfície para ação dos solventes extratores, desse modo, a difusão do solvente será mais rápida quanto mais eficiente for a trituração e quanto maior for a temperatura (próximo à temperatura de ebulição do solvente), e menos úmido for o material, sendo necessário passarem antes por uma estufa, reduzindo o teor de água presente nas partículas.

Na fase da trituração outro aspecto deve ser levado em consideração: a granulometria, através da análise granulométrica, que consiste na determinação da distribuição de tamanhos de uma amostra de partículas para se obter amostras mais homogêneas. A finalidade de verificar a faixa de granulometria utilizada no trabalho é importante, pois ela reflete na análise dos dados quando pretende-se avaliar como o diâmetro médio das partículas influencia na eficiência de extração.

### 3.1.1.1 Amendoim

O amendoim utilizado no trabalho foi obtido comercialmente na sua forma *in natura*. Para facilitar o processo de decorticação, os amendoins foram levemente aquecidos em uma panela. Após a retirada das cascas, o mesmo foi triturado em liquidificador, pois, para se garantir uma maior eficiência no processo de extração sólido-líquido, deve-se aumentar a superfície de contato da amostra.

O material triturado foi levado à estufa ajustada em 100 °C por um período de 24 horas afim de diminuir a água presente nas partículas. Após esse processo as amostras foram separadas em peneiras da série Tyler obtendo-se como granulometria 2,00 mm.

### 3.1.1.2 Coco

Os cocos utilizados foram obtidos comercialmente na sua forma seca na cidade de Uberaba. O coco foi aberto, de onde retirou-se a polpa, copra, do seu interior. A polpa do coco seco foi triturada em liquidificador industrial e, em seguida, levadas à estufa a 60°C, por 48 h. Após retirada da estufa, as amostras foram separadas em peneiras da série Tyler afim de definir dois diâmetros médios de partículas para os experimentos de extração.

Foram utilizadas peneiras de 0,18; 1,18 e 2,36 mm de diâmetro de abertura para obter duas amostras com diâmetros médios distintos. Dessa forma, obteve-se duas amostras de partículas com diâmetro médios diferentes. Uma de 0,69 mm (Tipo 1) e outra amostra com diâmetro médio de 1,77 mm (Tipo 2). Esse processo foi realizado para o coco com a intenção de estudar a influência do diâmetro das partículas na eficácia da extração, tendo estes testes sido feitos com esses dois tipos de diâmetros médios de amostras.

### 3.1.1.3 Baru

Os frutos de barueiro foram adquiridos comercialmente *in natura*, em duas formas distintas. Parte dos frutos encontrava-se ainda envolta pelo mesocarpo e outra pelo endocarpo, sendo este último caracterizado por bastante rigidez, fazendo-se necessário a utilização de um torno morsa para ruptura da casca e extração da única semente contida em cada fruto. Após esta etapa, as castanhas foram limpas e seguiram para a decorticação, realizada de forma manual e de simples execução.

Para a trituração do material, utilizou-se um martelo em substituição ao liquidificador, de modo que a fragmentação das amêndoas pudesse ser mais controlada, uma vez que, dada a pouca disponibilidade e acesso as castanhas, o uso do liquidificador inviabilizaria a obtenção de amostras nas granulometrias desejáveis.

No peneiramento, utilizaram-se peneiras da série Tyler, com 2,80; 2,36; 2,00; 1,18 e 0,84 mm de diâmetro de abertura permitindo obter dois tamanhos médios de partículas, sendo: 1,59 mm e 2,18 mm. Uma considerável quantidade das castanhas trituradas foi reduzida a um tamanho menor que os dois tamanhos médios obtidos, tornando-se um farelo, e para o seu completo aproveitamento foram feitos os testes de cinética utilizando desta fração. Por fim, as amostras foram levadas à estufa a 100 °C por um período de 24 h para a redução da umidade.

### 3.1.2 Unidades experimentais dos Concentradores Solares

No presente trabalho foram utilizadas e avaliadas duas unidades de concentradores solares. A primeira unidade consiste em um concentrador solar de geometria cilíndrico-parabólico, descrito no [item 3.1.2.1](#). A segunda unidade experimental, um Concentrador Solar Biangular de Doze Lados ([item 3.1.2.2](#)), foi concebida inicialmente por URIAS *et al.* (2014) para a extração de óleo de pinhão manso. Após os testes desenvolvidos pelos autores ante citados, TAVARES; SANTOS (2016-a) realizaram modificações na estrutura concentradora e o

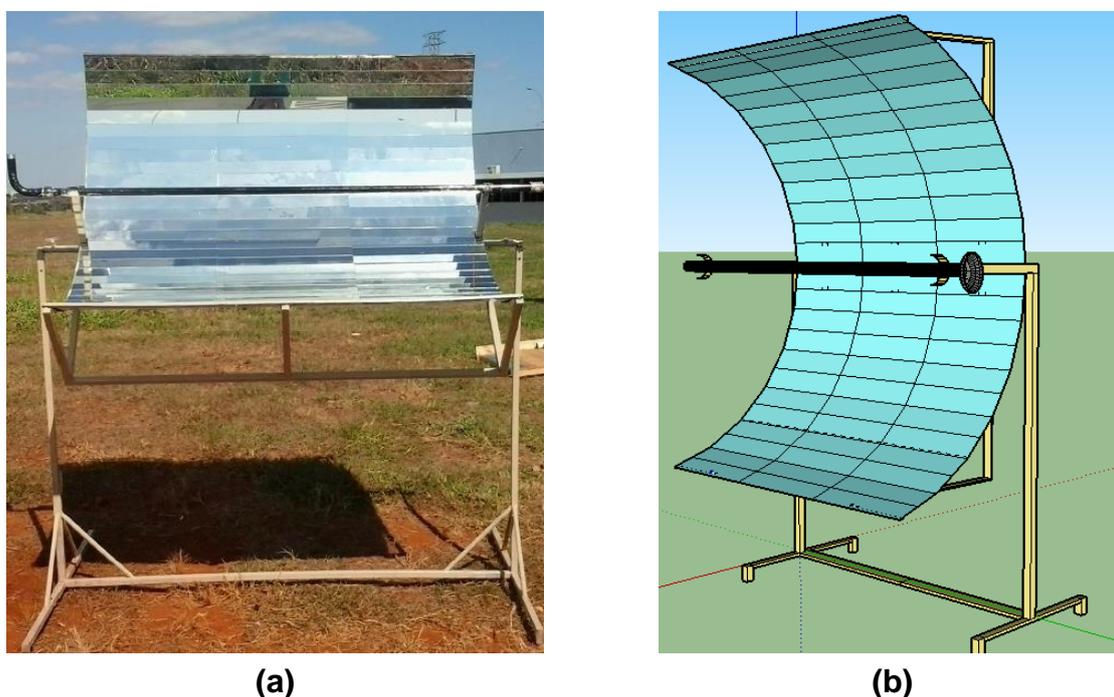
reempregaram na extração de óleo de pinhão manso (TAVARES; SANTOS, 2016-b) e de amendoim (TAVARES; SANTOS, 2016-c). Todos os componentes do aparato completo são descritos nos tópicos que se seguem.

Em ambos os concentradores foram realizados, primeiramente, testes de aquecimento utilizando a água para analisar a eficiência térmica de cada um dos concentradores, variando-se as vazões em 15, 25 e 35 mL/min. A água, foi bombeada com o auxílio de uma bomba peristáltica para o interior do leito, nas vazões determinadas. Este parâmetro foi importante, pois permitiu que fosse possível projetar valores que pudessem ser aplicados posteriormente quando fosse realizado, afinal, o processo de extração empregando o álcool etílico como solvente. Os valores das temperaturas de saída da água obtidos nos dois concentradores são discutidos na [Seção 4.1](#).

### 3.1.2.1 Concentrador Solar Cilíndrico-Parabólico – CSCP

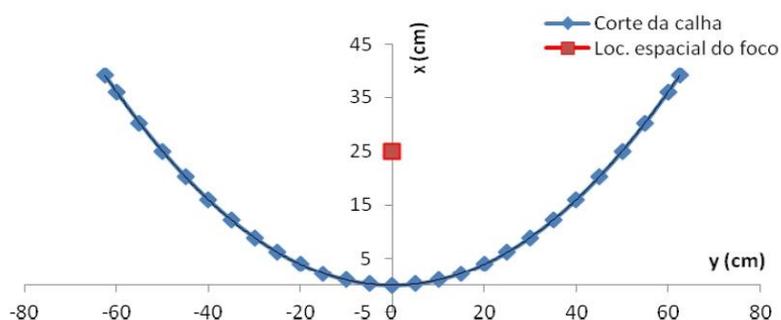
A unidade experimental já se encontrava pronta, tendo sido esta projetada e construída por CUNHA *et al.* (2014) com a finalidade de aquecimento de fluidos. A superfície parabólica do concentrador solar foi construída em uma chapa de zinco e sua superfície foi revestida com segmentos de espelhos cortados em tiras de tamanhos iguais (53 x 5 cm) constituindo a superfície refletora. O concentrador possui ainda, um eixo que permite ajustar sua inclinação de acordo com a mudança da posição do sol. A **Figura 16 (a)** apresenta uma fotografia do equipamento e a **Figura 16 (b)** sua representação esquemática.

**Figura 16** – Concentrador Solar Cilíndrico-Parabólico: **(a)** Fotografia do equipamento; **(b)** representação esquemática.



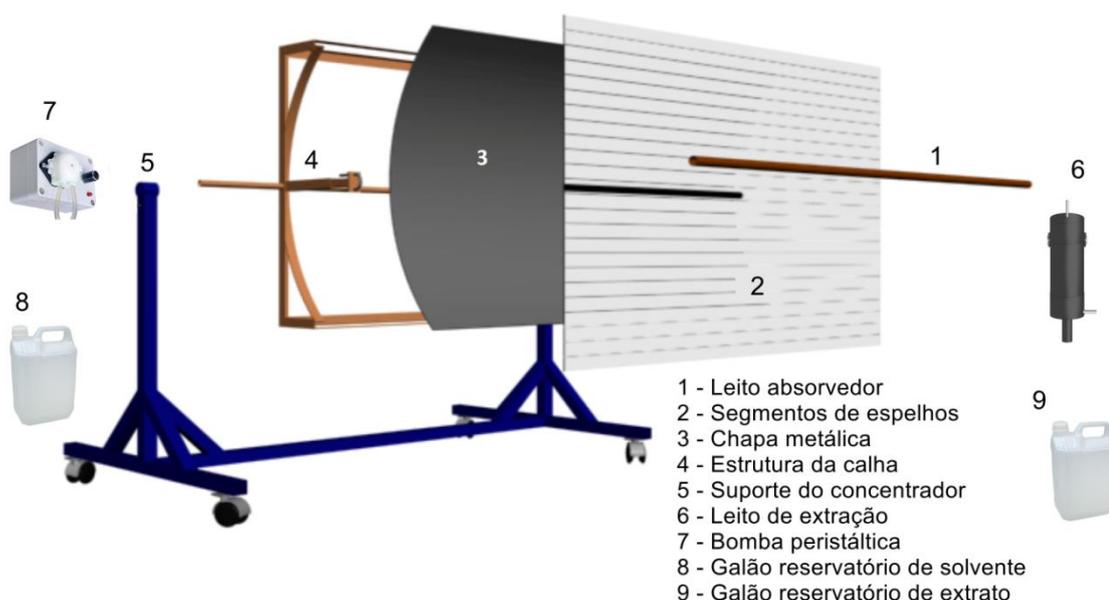
A tubulação absorvedora é composta por um tubo de cobre, com diâmetro de 3 cm e 160 cm de comprimento, colocado na linha de foco. Este tubo foi revestido com tinta preta fosca de modo a aumentar absorção dos raios refletidos. Os ensaios experimentais realizados com o objetivo de determinar a eficiência do concentrador solar foram realizados em batelada, sendo o tubo absorvedor preenchido com 1131 cm<sup>3</sup> de água. A temperatura máxima alcançada foi 86 °C. A região ideal para a altura do foco foi baseada de acordo com a da altura da calha sendo este definido em 25 cm como mostra a **Figura 17**.

**Figura 17** – Perfil do corte da calha parabólica e região focal calculada para o concentrador por CUNHA *et al.* (2014).



Para operar como equipamento extrator, foi adaptado separadamente um segundo leito onde as partículas do material graxo pudessem ser inseridas. Na **Figura 18**, o esquema de montagem representa de maneira visual o equipamento de extração do CSCP, o qual foi empregado na extração do óleo de amendoim:

**Figura 18** – Esquema explodido da unidade extratora CSCP.



(FONTE: Adaptado de PRADO (2011))

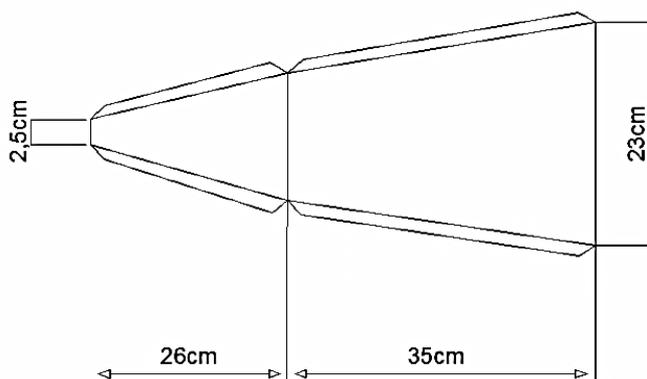
No esquema mostrado anteriormente, o solvente percorre o tubo ou leito absorvedor (1), propellido através de uma bomba peristáltica (7) e segue já aquecido para o leito de extração (6) onde o material graxo está inserido.

### 3.1.2.2 Concentrador Solar Biangular de Doze Lados – CSBDL

Inicialmente o projeto e a construção do CSBDL desenvolvido por URIAS *et al.* (2014) foi realizado com a proposta de uma geometria próxima a de uma parábola. Para a construção do primeiro concentrador solar utilizou-se 12 peças de

papelão dispostas lado a lado e presas por uma fita e, em seguida, revestiu-se a superfície interna de todos os lados do equipamento com uma folha de alumínio. A mesma geometria foi usada por TAVARES; SANTOS (2016-a) com adaptações e sua montagem refeita em outro material, sendo utilizado o aço galvanizado cortado em doze peças como esquematizado na **Figura 19**.

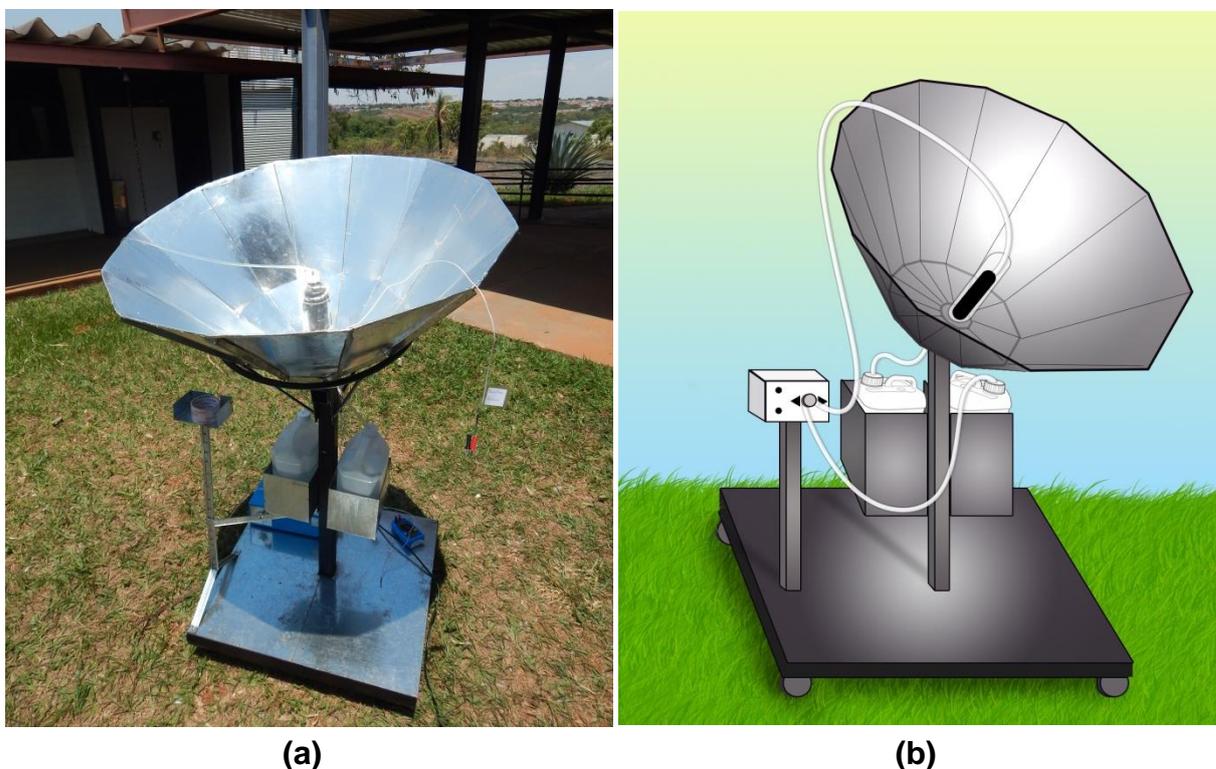
**Figura 19** – Dimensões dos lados das peças do CSBDL.



No presente trabalho, a unidade extratora do CSBDL passou por uma última modificação. A estrutura concentradora foi completamente refeita, em substituição a anterior. As 12 placas que constituem os lados foram cortadas novamente e unidas por suas abas externas por soldagem. Desta maneira, a parte interna do concentrador passou a ser mais plana e com emendas mais sutis, permitindo assim, que o adesivo laminado, utilizado como material refletor, fosse aplicado de maneira mais regular, evitando quaisquer rugosidades que dificultassem a reflexão.

A estrutura de sustentação do concentrador também passou por algumas modificações, sendo estas: a inclusão de suportes para os galões reservatórios de solvente e extrato e outro suporte para a bomba peristáltica. A **Figura 20 (a)** mostra o aspecto real da montagem do equipamento em operação e a **Figura 20 (b)**, sua representação esquemática.

**Figura 20** – Concentrador Solar Biangular de Doze Lados: **(a)** Fotografia do equipamento; **(b)** representação esquemática.



Na haste central que fixa o concentrador ao suporte, há um eixo que permite que o mesmo possa se inclinar no sentido Leste-Oeste, garantindo assim, a permanente exposição em direção ao sol e eventuais ajustes de focos necessários. Em uma última adaptação, foram instalados rodízios para facilitar a locomoção da unidade. Para alimentar o solvente, também foi utilizada uma bomba peristáltica com seletor de vazões que propelia o solvente para o interior do leito, localizado na região focal.

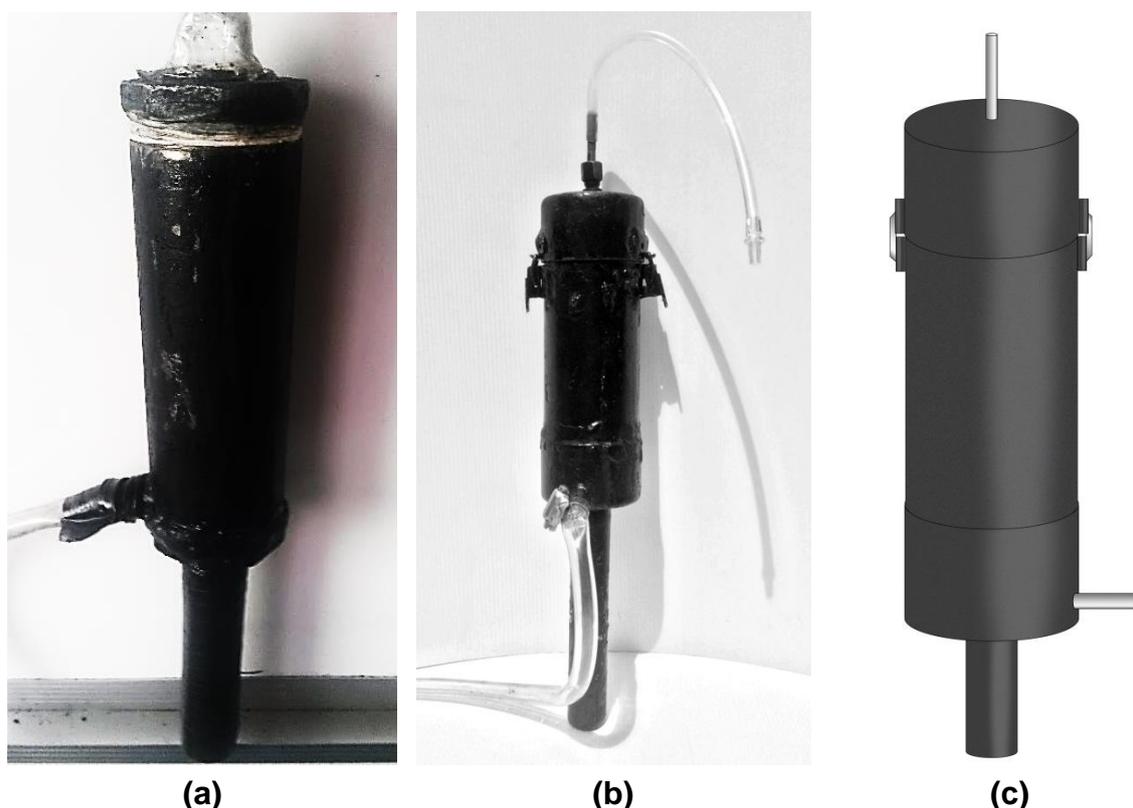
### 3.1.2.3 Leitos

O leito é um componente fundamental em ambas as unidades experimentais. Para esses processos foram usados, basicamente, três diferentes tipos de modelos. O primeiro leito, já apresentado no [item 3.1.2.1](#), é o leito que compõe o CSCP, localizado na sua região focal. Este consiste em um tubo de cobre enegrecido de

160 cm de comprimento. Esse ducto faz o papel de tubo absorvedor da energia solar, por onde o solvente é aquecido e segue para a extração, que é realizada num segundo leito, conforme representado na **Figura 21 (a)**. Este recipiente, empregado na extração do óleo de amendoim no CSCP, foi fabricado com um tubo de aço em formato cilíndrico, possui um volume útil de 295 cm<sup>3</sup> e abriga as partículas da matéria-prima graxa, recebendo o solvente aquecido pelo primeiro leito.

Por fim, o último leito (**Figura 21 (b)**), empregado exclusivamente no CSBDL, foi construído em cobre, também em formato cilíndrico, de mesmas dimensões do leito anterior, usado por TAVARES; SANTOS (2016-a), 16 cm de comprimento por 5 cm de diâmetro. Este leito fez o papel de tubo absorvedor e encontra-se na região focal do CSBDL, por isso a necessidade de se utilizar o cobre como metal.

**Figura 21** – Leitos fixos utilizados: **(a)** Leito de extração no CSCP; **(b)** Leito absorvedor e de extração do CSBDL; **(c)** Representação esquemática.



Em ambos os leitos, há dois ductos menores, de entrada de solvente e de saída do extrato. A alimentação do solvente é realizada na parte superior por um tubo acoplado a tampa do leito, sendo este tubo ligado à bomba peristáltica através

de uma mangueira. Na parte inferior dos leitos, outro tubo permite que o extrato escoe para um galão coletor através de mangueiras de silicone. Entre o ducto final e a mangueira, é inserida uma tela fina que impede a passagem das partículas graxas para o extrato. A tampa do primeiro modelo (**Figura 21 (a)**) é enroscada no leito para fixação enquanto no segundo modelo (**Figura 21 (b)**) foram instaladas duas travas de fecho rápido.

Por fim, a estrutura final do leito conta ainda com um invólucro transparente que tem a finalidade de provocar o efeito estufa e proteger o leito de eventuais perdas de calor por convecção. Nos experimentos realizados, foram utilizados dois tipos de material estufa. Nas extrações realizadas com o coco, empregou-se como revestimento o polímero plástico PET. Já nas extrações com o baru, o material foi substituído por vidro, o que possibilitou melhorias no desempenho de aquecimento, acompanhamento melhor de novos perfis de temperaturas e maior vida útil, uma vez que, o PET apresenta propriedades termoplásticas e sua constante substituição era imprescindível na realização de novos experimentos.

#### *3.1.2.4 Parâmetros geométricos para construção do concentrador*

Para a predição da região focal no CSBDL foram dotados alguns parâmetros geométricos na construção da estrutura e no formato do concentrador. Segundo a metodologia apresentada por PRADO (2011), ao considerar o conhecimento das leis da reflexão e trigonometria, é possível determinar os pontos focais de qualquer tipo de curvatura. Assim, para calcular o ponto de concentração da radiação solar, a metodologia utilizada é dada pelas etapas a seguir e são mostradas visualmente na **Figura 22**.

1. Traça-se, em um plano cartesiano, a função matemática " $f[x]$ " que representa a curva responsável pela geração da estrutura do coletor;

2. Dado um ponto  $P$  qualquer, cujas coordenadas são  $(x_p, y_p)$ , é necessário determinar a reta que tangencia esse ponto, denominada reta “ $t$ ”, sendo o seu coeficiente angular a derivada da função geradora ( $f' [x_p]$ ) e está representada na Eq. (4). Além disso, é preciso determinar a reta perpendicular a esta no ponto  $P$ , chamada de reta normal ou reta “ $n$ ”, representada pela Eq. (5):

$$y_t - y_p = f' [x_p] (x_t - x_p) \quad (\text{Eq. 4})$$

$$y_n - y_p = \frac{-1}{f' [x_p]} (x_n - x_p) \quad (\text{Eq. 5})$$

3. Após determinação das retas “ $t$ ” e “ $n$ ”, traça-se o raio de incidência solar, representado pela reta “ $i$ ” e dado pela Eq (6):

$$x = x_p \quad (\text{Eq. 6})$$

4. O ângulo entre o raio incidido (reta “ $i$ ”) e a normal (reta “ $n$ ”) é o mesmo ângulo entre a normal e o raio refletido, denominado de “ $\theta$ ”:

$$\theta = 90^\circ + \text{arctg} \left( \frac{-1}{f' [x_p]} \right) \quad (\text{Eq. 7})$$

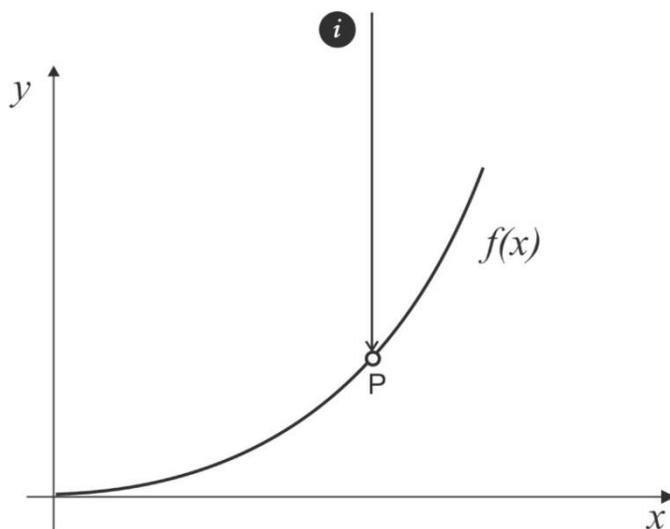
5. Dessa maneira, sendo o mesmo ângulo, para determinar a reflexão do raio de incidência utiliza-se a Eq. (8), representada pela reta “ $r$ ”:

$$y_r - y_p = \text{tg} (90^\circ + 2\theta) (x_r - x_p) \quad (\text{Eq. 8})$$

6. E por fim, o ponto focal “ $F$ ” de interesse estará sobre o eixo “ $Y$ ”, onde a reta “ $r$ ” o intercepta, ou seja,  $F (0, y_F)$ , em que a ordenada “ $y_F$ ” é dada pela Eq. (9):

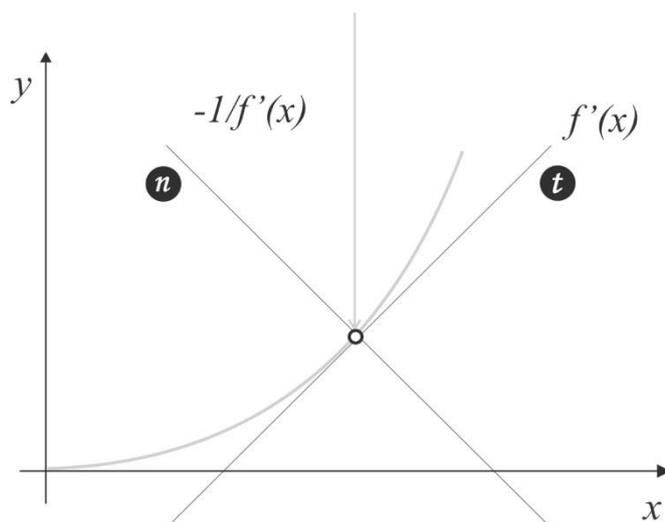
$$y_F = y_p - \text{tg} (90^\circ + 2\theta) x_p \quad (\text{Eq. 9})$$

**Figura 22** – Representação gráfica para a determinação do ponto focal.



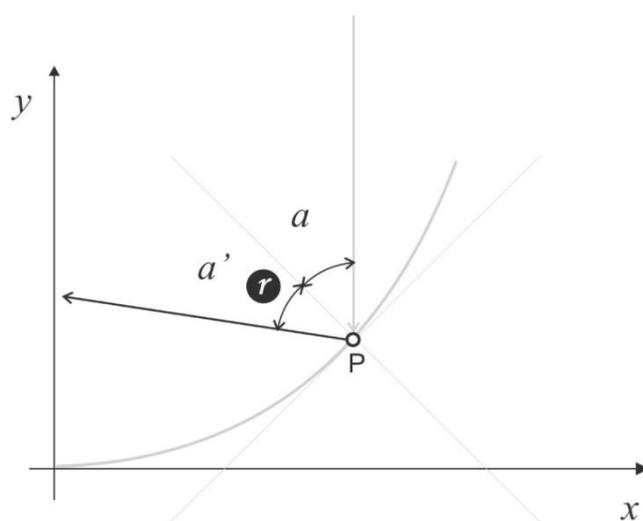
**Etapas 1 e 2.**

Incidência do raio solar, representado pela reta “ $i$ ”.



**Etapas 3.**

Reta “ $t$ ” tangencia o ponto “ $P$ ”; a reta “ $n$ ” é perpendicular à reta “ $t$ ” no ponto “ $P$ ”.



**Etapas 4, 5 e 6.**

O ângulo entre o raio incidido e a normal é o mesmo ângulo entre a normal e o raio refletido.

(FONTE: Adaptado de PRADO (2011))

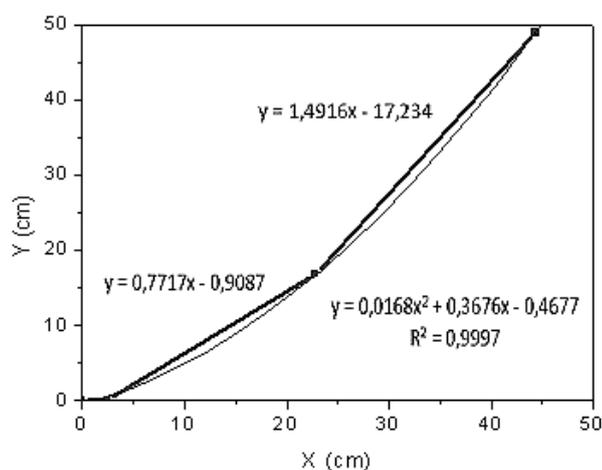
Para a construção do concentrador com a geometria aproximada a uma parábola, foi projetada a estrutura composta de doze lados com um ângulo interno que produziria o aumento da captação da radiação solar. Devido ao formato adquirido na montagem final, o concentrador foi então denominado Concentrador Solar Biangular de Doze Lados. Para determinar a função geradora que corresponde ao perfil do concentrador biangular e também a forma parabólica que mais se aproxima dessa geometria, foi utilizado o *software* Excel. As coordenadas cartesianas pertencentes às extremidades do aparato experimental, sendo sua base menor e o centro considerados como o ponto (0; 0), estão expostas na **Tabela 7**.

**Tabela 7** – Coordenadas Cartesianas do Coletor Solar.

X (cm)	Y (cm)
0	0
2,55	0
22,83	16,82
44,83	48,89

Após a obtenção das coordenadas cartesianas do coletor, foi possível encontrar as respectivas equações de linha, através de seu gráfico na **Figura 23**. Com a determinação da equação matemática de cada linha que compõe o concentrador solar foi possível conhecer a faixa focal do concentrador, isto é, a diferença entre a altura máxima e a altura mínima em que o leito absorvente deve estar localizado.

**Figura 23** – Funções matemáticas que representam a curva geradora do coletor.



Para validar a aproximação entre o coletor construído e um coletor parabólico, foi determinada a equação de segunda ordem através da análise sobre a linha de tendência polinomial. Assim, para exemplificar a similaridade entre as duas geometrias, foi utilizado o  $x_p = 15 \text{ cm}$ . Assim, usando as equações de linha obtidas, para o concentrador solar tem  $P_c = (15; 10,66)$  e para a parábola tem  $P_p = (15; 8,83)$ . Sendo  $f' [x_p]$  dado pela derivada da função geradora  $f [x_p]$ , foram utilizadas as Eqs. (4) a (7) para encontrar o foco de ambas as geometrias. Assim, é possível obter as Eqs. (10) e (11):

$$\text{Concentrador Solar } f' [x_p] \quad (Eq. 10)$$

$$\text{Parabola } f' [x_p] = 0,0336x_p + 0,3676 \quad (Eq. 11)$$

Para calcular o ângulo que a reta “i” faz com a normal, recorreu-se à Eq.(7), reescrita pela Eqs. (12) e (13):

$$\text{Concentrador Solar } \theta = 90^\circ + \arctg \left( \frac{-1}{0,7717} \right) = 90^\circ - 52,34^\circ = 37,66^\circ \quad (Eq. 12)$$

$$\text{Parabola } \theta = 90^\circ + \arctg \left( \frac{-1}{(0,0336 \times 15) + 0,3676} \right) = 90^\circ - 48,92^\circ = 41,08^\circ \quad (Eq. 13)$$

Desta forma, foi possível calcular a ordenada do ponto de concentração para este conjunto de coordenadas, para o coletor e a parábola, utilizando a Eq. (9):

$$\text{Concentrador Solar } y_F = 10,66 - \text{tg} (90^\circ + 2 \times 37,66^\circ)15 = 14,59 \text{ cm} \quad (Eq. 14)$$

$$\text{Parabola } y_F = 8,83 - \text{tg} (90^\circ + 2 \times 41,08^\circ)15 = 10,89 \text{ cm} \quad (Eq. 15)$$

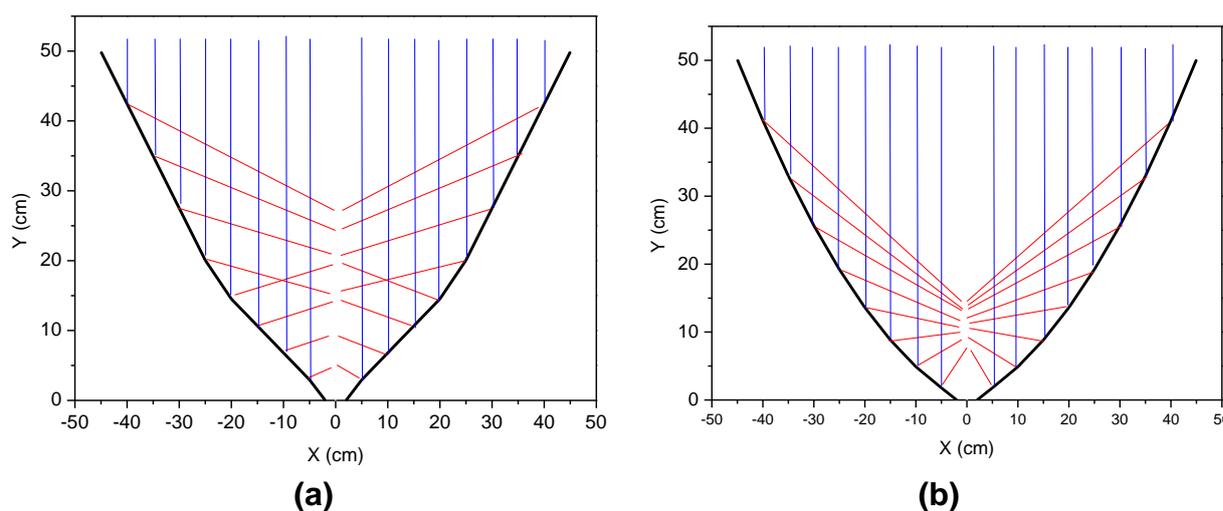
Portanto, para  $x_p = 15 \text{ cm}$ , o ponto focal no concentrador é de 14,59 cm e na parábola é de 10,89 cm. Assim, para a representação real do foco das geometrias estudadas, foram plotados alguns pontos representando os raios incidentes do concentrador solar e da parábola, a fim de ilustrar a incidência e reflexão dos raios solares no concentrador e na parábola. Esses pontos são mostrados na **Tabela 8**. A

**Figura 24 (a)** mostra a incidência (em azul) e a reflexão (em vermelho) dos raios solares para a geometria biangular e a **Figura 24 (b)** para a parabólica.

**Tabela 8** – Ordenada do Ponto de Concentração ( $Y_f$ ) para determinadas coordenadas ( $X_p, Y_p$ ) para o concentrador solar biangular de doze lados e a parábola.

$X_P$ (cm)	Concentrador solar		Parábola	
	$Y_P$ (cm)	$Y_F$ (cm)	$Y_P$ (cm)	$Y_F$ (cm)
5	2,9498	4,2601	1,79	5,119
10	6,8083	9,429	4,888	8,477
15	10,6668	14,5979	8,826	10,894
20	14,5253	19,7667	13,604	12,827
25	20,056	9,7913	19,222	14,478
30	27,514	15,1963	25,68	15,951
35	34,9721	20,6014	32,978	17,302
40	42,432	26,0064	41,116	18,569
45	49,888	31,4115	50,094	19,774

**Figura 24** – Incidência (azul) e Reflexão (vermelho) dos raios solares: **(a)** no concentrador solar biangular de doze lados; **(b)** na parábola correspondente.



Como o observado, a geometria proposta trata-se de uma aproximação válida uma vez que apresenta eficiência semelhante à da parábola, porém, como já era esperado, com uma menor eficiência, uma vez que os raios solares, ao se refletirem

pela superfície, concentram-se mais em pontos espalhados, sendo que para esses conjuntos de coordenadas, a faixa de altura obtida foi de 25 cm. Enquanto que para a geometria parabólica esta altura varia aproximadamente de 15 cm.

### **3.1.3 Processos de Extração nos Concentradores**

Após o preparo das matrizes graxas, os materiais foram encaminhados para os processos de extração. Os itens a seguir descrevem as metodologias adotadas para cada um dos processos, bem como, qual unidade experimental concentradora foi utilizada em cada matéria-prima; duração dos experimentos; quantidades de material utilizado e variáveis estudadas em cada um dos casos.

Nas extrações dos óleos vegetais foi empregado como solvente o Álcool Etilico Hidratado Combustível (AEHC), denominação do álcool com graduação alcoólica em torno de 96 °GL, em geral utilizado como combustível automotivo. Todo o AEHC consumido nos experimentos foi adquirido em postos de combustível da cidade Uberaba.

No processo de extração com alimentação contínua de solvente em leito fixo, a vazão de alimentação é uma das variáveis mais importantes a ser manipulada para que se atinja a condição ideal de operação. Para estes experimentos, a variável vazão de alimentação do solvente também foi estudada em valores próximos do de NAVARRO (2002), 15 mL/min, e mesmos valores de TAVARES; SANTOS (2016-b), que foram 15, 25 e 35 mL/min. Esse estudo permitiu não só registrar as temperaturas obtidas em cada uma das vazões, como também calcular a fração mássica de óleo extraído em cada processo, obtendo assim, posteriormente, o rendimento em cada extração comparado com o método convencional Soxhlet.

A alternância das vazões consiste em uma importante variável no processo de extração uma vez que, este fator permite estabelecer as condições de operação ideal desejadas no processo de extração. TAVARES; SANTOS (2016-b) explicam que o aumento da vazão geralmente aumenta a extração até certo ponto, pois aumenta a velocidade relativa entre fluido e partícula, aumentando assim, os coeficientes convectivos de transferência de massa. Por outro lado, o aumento da

vazão também diminui o tempo de residência do solvente, reduzindo assim o tempo de contato fluido-partícula, essencial à etapa de difusão, tanto do solvente para o interior dos poros, quanto da micela para o meio da solução.

Essa variação para a extração no concentrador solar também influencia a temperatura do fluido de extração, sendo que maiores tempos de residência conduzem à maiores temperaturas de operação. A temperatura ideal do processo é próximo à temperatura de ebulição do solvente, pois nessa temperatura tem-se a diminuição da viscosidade do óleo e um aumento de solubilidade deste, o que permite ao etanol interagir com o óleo e transportá-lo para fora da célula. As vazões trabalhadas com os solvente ( $Q_s$ ) nos valores de 15, 25 e 35 mL/min, permitem obter um resultado que mostra qual a melhor taxa de alimentação para que não seja empregada uma quantidade nem maior e nem menor de solvente.

Ao término de cada experimento, a torta do material que sofreu extração era levada para a estufa, e após 24 h realizava-se a pesagem da torta seca, esse procedimento permite obter a diferença entre a massa inicial das amostras e a massa da torta seca, calculando-se assim, a massa removida no processo de lixiviação. Após o término de cada experimento, os extratos coletados foram levados para refrigeração. Esse processo permitiu que a parte oleosa da extração mudasse para sua fase sólida, uma vez que, não é possível realizar o congelamento do álcool etílico em refrigeradores domésticos. Essa solidificação da fase oleosa por refrigeração pode ser facilmente separado por uma filtração simples em uma separação gravitacional comum.

### *3.1.3.1 Amendoim*

O processo de extração do óleo de amendoim foi realizado em ambos os concentradores. Os leitos foram preenchidos com 120 g de amendoim, mesma quantidade usada na metodologia de TAVARES; SANTOS (2016-c) e em todos os experimentos realizados para esse material. Após a inserção das partículas nos leitos, os processos foram realizados alternando-se a vazão em cada experimento.

Tanto para o CSCP como o CSBDL tiveram duração total de 2 h, com ajustes de focos realizados a cada 30 min.

Por se tratarem de equipamentos diferentes, principalmente quanto à localização do material no leito, este estudo possibilitou comparar os rendimentos das extrações para cada uma das unidades, uma vez que, para o CSCP, são utilizados dois leitos, o primeiro que atua somente como ducto absorvedor e aquece o solvente, e o segundo, que somente abriga as partículas. Esse processo é diferente para o CSBDL, onde um único leito realiza o papel de tubo absorvedor e recipiente para as partículas, dessa maneira, o material-graxo inserido neste tubo também é aquecido junto com o solvente.

Após a realização dos testes, o extrato coletado foi submetido à refrigeração. Este procedimento permite obter o óleo por processos de separação simples e posterior estudo de suas características. A torta remanescente foi levada para estufa a 100°C por 24 h, e então, foi pesada para calcular a massa de óleo extraída e obter o rendimento de cada experimento, comparando a massa removida na extração com o teor de óleo teórico presente no amendoim obtido pelo método convencional de Soxhlet.

### 3.1.3.2 *Coco*

Para os testes de extração com o coco utilizou-se somente o CSBDL como unidade experimental. Para esta extração foi estudado, além da vazão, a influência do tamanho das partículas utilizadas, uma vez que, foram utilizados dois diâmetros médios do material (0,69 e 1,77 mm.). O leito absorvedor foi preenchido com 90 g da amostra e os testes tiveram a mesma duração do experimento anterior. Ao final, a torta foi levada para a estufa, obtendo-se após 24 h a massa da torta seca. A mistura óleo/álcool também foi levada para um refrigerador para a solidificação do óleo e posteriormente separação.

Neste experimento também foi levantado um estudo que analisasse a variação do teor de óleo extraído de acordo com o tempo. Para isso, foram coletadas, utilizando tubos de ensaios, treze amostras nos seguintes intervalos de

tempos: 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100 e 120 min a taxa de vazão de 25 mL/min. Este estudo permitiu determinar uma curva cinética de extração de óleo no concentrador solar, relacionando o decaimento da massa de óleo extraída com o decorrer do tempo. Os tubos de ensaio utilizados foram previamente pesados antes das coletas e após o experimento. Os tubos contendo as amostras foram levados a estufa a 60 °C por 48 h, de modo que, o álcool presente evaporasse e fosse mensurada a massa de óleo extraída de acordo com tempo em cada um dos intervalos.

Nesses mesmos intervalos de tempo, para esse experimento, realizou-se a medição da temperatura utilizando termopares do Tipo K em três diferentes posições do equipamento. Os termopares foram instalados para medir a temperatura de saída do extrato ( $T_{\text{extrato}}$ ); a temperatura do ar dentro da estufa ( $T_{\text{ar}}$ ), ou seja, entre o invólucro transparente e o leito; e a temperatura da parede externa do leito ( $T_{\text{leito}}$ ). As temperaturas obtidas foram dispostas em seis gráficos que relacionam esses valores registrados para diferentes vazões e granulometrias do material.

### 3.1.3.3 Baru

As extrações com a amêndoa de baru foram realizadas utilizando o CSBDL como concentrador. Para a extração também foram empregadas as mesmas condições operacionais de solvente e vazão. A granulometria menor, de 1,59 mm, foi testada nas três vazões avaliadas ao longo deste trabalho, enquanto que a granulometria maior (2,18 mm), dada a disponibilidade do material, foi avaliada somente nas vazões de 25 e 35 mL/min. O leito absorvedor foi preenchido com 120 g de cada amostra e cada teste teve duração de 2 h. Após o término da extração a massa da torta remanescente foi encaminhada a estufa por um período de 24 h a 100 °C para a etapa de dessolventização e determinação da massa seca e massa removida pelo processo. O extrato seguiu para a refrigeração.

Com a obtenção de um farelo derivado do processo de extração, realizou-se, assim como no coco, um estudo cinético da variação do teor de óleo extraído de acordo com o tempo. Utilizou-se para este experimento 50 g de farelo em cada teste

a uma taxa de vazão de 25 mL/min. Neste estudo, as amostras foram trocadas para cada teste. Os intervalos de tempo avaliados foram de 5, 10, 20, 30, 60 e 120 min. E ao fim de cada coleta, a torta era encaminhada à estufa a temperatura de 100°C por 24 horas. Após a secagem, pesava-se a amostra e obtinha-se o valor de óleo retido em cada tempo.

Por fim, a substituição do invólucro de plástico do leite por um de vidro, permitiu que, nesta nova adaptação a possibilidade registrar duas novas temperaturas, sendo estas, parede externa e parede interna do vidro. Portanto, para este experimento, foram realizadas as leituras das temperaturas do ar dentro da estufa ( $T_{ar}$ ); parede do leite ( $T_{leito}$ ); temperatura de saída do extrato ( $T_{extrato}$ ); temperaturas externa e interna do vidro estufa ( $T_{vidro\ interno}$  e  $T_{vidro\ externo}$ ). As temperaturas foram medidas nos intervalos de tempo de 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100 e 120 min através de Termopares Tipo K.

### **3.1.4 Extração com Método Soxhlet**

Com o objetivo de contrastar os resultados obtidos nos processos de extrações alternativos estudados e assim calcular o rendimento das operações, foi realizada em laboratório a etapa de extração com solventes usando o aparelho Soxhlet por se tratar de um método de referência para esse processo. Este método de extração foi criado em 1879 por Franz Von Soxhlet para a extração de lipídios a partir de um material sólido. Segundo CASTRO; GARCÍA-AYUSO (1998) este tipo de extração é bastante utilizada em escala laboratorial, principalmente em extrações de matrizes sólidas, como é o caso das extrações de substâncias em plantas no geral. É uma técnica de extração antiga, mas que permanece como referência com a qual os novos métodos são comparados.

O método Soxhlet utiliza um aparato que permite a extração de lipídios através da contínua passagem de um solvente através da amostra. O método tem como características:

- O extrator utiliza o refluxo do solvente;

- Uso de amostras sólidas;
- A amostra não fica em contato direto com o solvente em ebulição;

Esta técnica inicia-se colocando a amostra dentro de um cartucho e este dentro de uma cápsula de extração. O equipamento fornece calor ao solvente, que é aquecido no balão originando vapor. O vapor proveniente do solvente aquecido passa por um condensador onde é refrigerado passando ao estado líquido e circulando dentro da cápsula que contém a amostra, arrastando os compostos solúveis presentes. Após vários ciclos, obtém-se o extrato solubilizado no solvente. O solvente é então evaporado, obtendo-se como extrato final o óleo (CORREIA, 2009).

Para efeito comparativo no cálculo dos rendimentos em ambos os processos, foi realizada a extração usando o hexano, álcool etílico anidro (99,3%) e AEHC como solventes neste método. As propriedades do etanol e do hexano são comparadas na **Tabela 9**.

**Tabela 9** – Propriedades físico-químicas dos solventes

<b>Propriedades</b>	<b>Hexano</b>	<b>Álcool Etílico</b>
Fórmula química	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH
Densidade Relativa (g/mL)	0,66	0,789
Ponto de Ebulição	63 - 69° C	77 - 79° C
Pressão de Vapor (19°C)	130 mm Hg	40 mm Hg

(FONTE: SOLOMONS; FRYHLE (2005))

NAUDÉ *et al.* (1998) e LUQUE DE CASTRO; PRIEGO-CAPOTE (2010) salientam que o Soxhlet é uma técnica tradicional para extrair lipídios, mas possui diversas desvantagens como: o uso de solventes orgânicos líquidos perigosos e inflamáveis; emissões potencialmente tóxicas durante as extrações; são exigidos solventes caros de alta pureza; o procedimento é trabalhoso e demorado. Além disso, não possui agitação que poderia acelerar o processo e é uma técnica difícil de automatizar.

Para SAHENA *et al.* (2009) o ideal é que os procedimentos de extração sejam ecologicamente corretos e não poluam. A extração Soxhlet não atende este critério. Recentemente, tecnologias limpas, como Extração Supercrítica, para extração de ácidos graxos de matrizes complexas estão sendo desenvolvidas onde possam ser usadas como rotina.

O equipamento utilizado para esse procedimento foi o Extrator de Óleos e Gorduras MARCONI – MA-491/6 (**Figura 25**). O aparato é composto basicamente por um condensador; uma câmara de extração; béquer contendo o solvente de extração; válvula de controle de fluxo do solvente condensado e de uma base aquecedora.

**Figura 25** – Extrator Soxhlet utilizado.



Os procedimentos gerais para a extração convencional de todas as oleaginosas seguiram a metodologia descrita por CAVALCANTE; SOUZA; HAMAWAKI (2011), definidas pelas seguintes etapas:

1. As amostras, contendo 15 g do material, e em duplicata, foram colocadas no interior do cartucho da câmara de extração de tal forma que o mesmo ficasse totalmente submerso em solvente durante a extração;

2. Adicionou-se 150 mL do solvente, e então, a circulação de água foi ligada para condensar o solvente e evitar perda do mesmo por evaporação;

3. Concluído o período de extração de 4 h, a fim de separar o solvente do óleo, a mistura continuou sendo aquecida até que cessasse a evaporação do solvente;

4. Após o resfriamento, o balão de fundo chato contendo o óleo (tarado e pesado previamente em balança semianalítica antes da extração), foi levado à estufa a 100 °C durante 24 h.

Após esse tempo, o balão foi transferido para dessecador com sílica gel até alcançar a temperatura ambiente e após, foi pesado em balança para determinar a massa de óleo extraído. Ao subtrair o peso do balão do valor obtido (peso do balão + óleo), chegou-se ao peso do óleo. O material particulado residual da extração também foi introduzido na estufa, a fim de determinar sua massa seca final.

Para o amendoim, os valores obtidos como referência neste processo de extração foram determinados por TAVARES; SANTOS (2016-c), onde o solvente empregado foi o álcool anidro (99,3%). Para o coco, a extração por Soxhlet no presente trabalho, foi realizada utilizando o hexano como solvente, e seguiu todas as mesmas metodologias descritas anteriormente. Quanto ao baru, o solvente empregado foi o AEHC. Os teores médios de óleos encontrados para as três matrizes são apresentados na [Seção 4.2.1](#).

### 3.2 DESTILAÇÃO SOLAR

De modo a recuperar o solvente empregado nas extrações, foi desenvolvida a técnica de destilação utilizando-se um destilador solar. Este projeto envolveu a construção de uma unidade destiladora baseada nos princípios revisados da literatura. O óleo contido no extrato, após ser separado por solidificação, foi analisado para determinar a concentração de óleo restante no solvente.

O solvente a ser destilado possuía concentração de óleo restante com fração mássica de 0,12%. Este valor foi determinado coletando uma pequena quantidade do extrato, após a separação, em tubo de ensaio com massa conhecida. O tubo foi levado para a estufa durante 48 h para a evaporação completa do etanol. Posteriormente, a nova pesagem indicou uma fração consideravelmente pequena de óleo restante no solvente.

Os itens a seguir descrevem a construção da unidade destiladora e as variáveis estudadas para o processo, bem como, a influência da espessura da película de líquido, que permitiu analisar uma espessura de líquido ótima para o processo e, assim, relacioná-lo com a influência das condições meteorológicas sobre o processo de destilação, obtendo-se a eficiência do destilador.

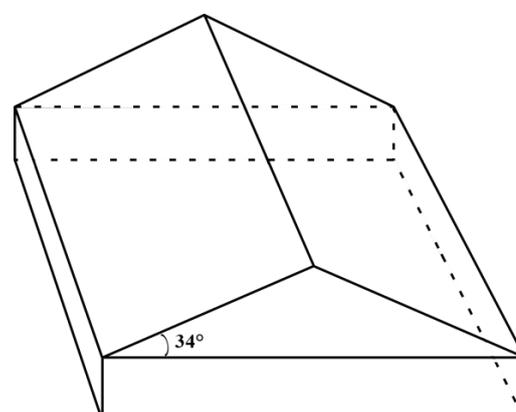
### 3.2.1 Construção da Unidade Experimental de Destilação Solar

Para construção do destilador, utilizou-se como base as medidas de um destilador construído por FARIA *et al.* (2015) utilizado para dessalinização de água salgada. FARIA *et al.* (2015) construíram a cobertura do destilador em formato de uma pirâmide com quatro faces. A geometria proposta para a cobertura do destilador deste trabalho foi feita em vidro no formato de um telhado. A **Figura 26 (a)** apresenta o aspecto real da cobertura e a **Figura 26 (b)** sua representação esquemática.

**Figura 26** – Cobertura do destilador: **(a)** Aspecto da cobertura; **(b)** representação esquemática e ângulo de inclinação.



**(a)**

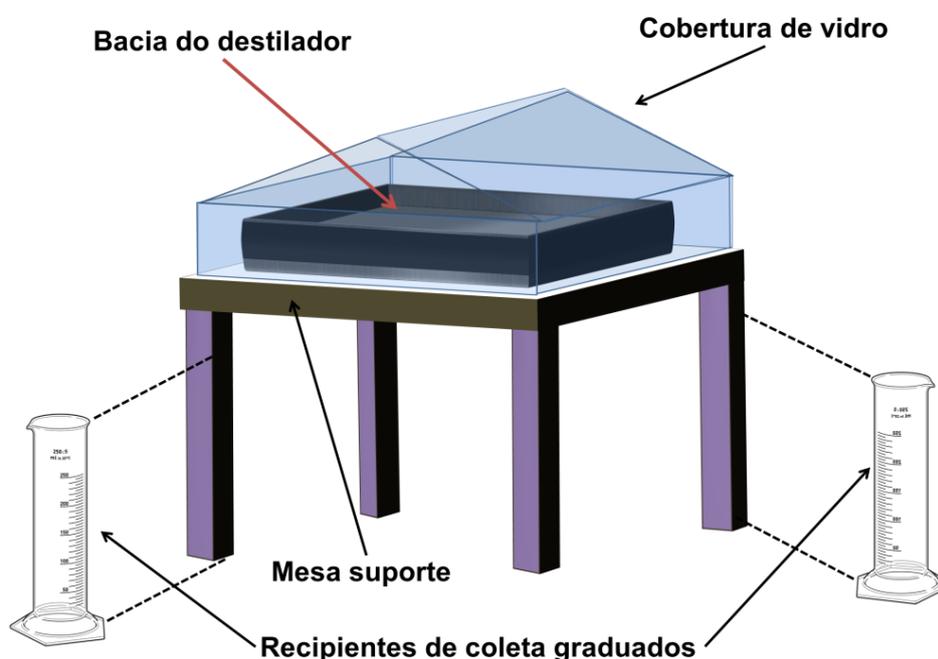


**(b)**

A geometria foi escolhida devido à sua maior superfície de condensação, a fim de facilitar a passagem do vapor de álcool para o estado líquido. De acordo com a literatura, o melhor ângulo para a cobertura, a fim de maximizar a incidência solar, é a latitude local mais  $15^\circ$ . Logo, considerando a latitude da cidade de Uberaba  $19^\circ$  aproximadamente, o ângulo de inclinação da cobertura de vidro foi de  $34^\circ$ .

No corpo do destilador, também de vidro, de dimensões 50x50x12 cm, foram anexadas oito canaletas de alumínio, sendo quatro retas, localizadas na base do destilador, e quatro inclinadas. Por toda a superfície da base da cobertura, foi colada uma borracha de EPDM com cola de silicone, para evitar perdas de vapor. O álcool destilado escoava para os vértices de duas extremidades situadas nas diagonais do destilador, onde foram feitas duas perfurações para o encaixe de uma mangueira de silicone com  $\frac{1}{4}$  in de diâmetro. O álcool condensado escoava pelas mangueiras que estavam fixadas a dois recipientes de vidro graduados para a coleta do mesmo. A **Figura 27** mostra a representação esquemática do destilador solar projetado.

**Figura 27** – Representação esquemática da montagem do destilador.



O suporte utilizado, feito em madeira, além de sustentar a cobertura de vidro, também apoia a bacia que comporta o líquido a ser destilado. Essa bacia, de dimensões 45x45x7 cm, é constituída do material alumínio e seu interior foi pintado com tinta automotiva de cor preta fosca, a fim de uma melhor absorção da radiação

solar. A base para o conjunto bacia e cobertura foi feita em isopor, material que auxilia no isolamento térmico. O isopor foi revestido de um adesivo preto, melhorando assim a vedação do sistema, e recebeu duas perfurações para a passagem das mangueiras. A **Figura 28 (a)** apresenta a estrutura do suporte e a **Figura 28 (b)** ilustra a unidade destiladora por completa.

**Figura 28** – Destilador solar construído: **(a)** Suporte em madeira com a bacia; **(b)** unidade destiladora em operação.



**(a)**



**(b)**

O sistema montado por completo, já com o líquido inserido dentro da bacia, recebeu a cobertura de vidro que, ao final, foi presa com dois elásticos (**Figura 28 (b)**), pressionando assim essa cobertura contra a base de isopor. Este procedimento visa diminuir a perda de vapor, uma das perdas mais comuns deste tipo de destilador. Os recipientes utilizados para a coleta do destilado foram duas provetas graduadas. A boca da proveta foi tampada com uma borracha de Acetato de vinila (EVA) e nesta tampa foi feito um furo para a entrada das mangueiras. Na superfície externa da proveta utilizou-se um tecido para envolvê-la, sendo que, este tecido era constantemente umedecido para arrefecer o etanol destilado.

### 3.2.2 Processo de Destilação Empregando Energia Solar

Para os testes com o destilador solar, estudou-se, como variável, o volume do líquido inserido para destilar, neste processo, realizado em batelada, escolheu-se três volumes da mistura, sendo eles: 500, 750 e 1000 mL. Para cada volume, analisou-se o tempo necessário para finalizar o processo de destilação completo. Essa análise permitiu obter a espessura da película de líquido que preenche a bacia, através de sua área superficial, e obter dados sobre a influência dessa espessura de líquido na eficiência da destilação.

A unidade destiladora foi colocada em um local onde houvesse grandes taxas de incidência solar ao longo do dia, visto que é um processo relativamente demorado. A cada trinta minutos, media-se o volume coletado pelas provetas e as temperaturas em cinco pontos diferentes do destilador, sendo eles: Ar do interior da câmara de destilação; temperaturas das superfícies externa e interna da cobertura de vidro; temperatura da parede interior da bacia e do líquido contido por ela. Estas temperaturas foram medidas utilizando termopares tipo K conectados a um multímetro.

A duração de cada experimento variou conforme cada volume colocado na bacia. O volume de 1000 mL chegou a durar 6 h para a destilação completa. Outra variável que é proporcional ao tempo gasto no processo são os fatores climáticos do dia. Os fatores como velocidade do vento; de radiação solar e temperatura ambiente puderam ser relacionados ao processo através dos dados do INMET disponibilizados em seu site.

### 3.2.3 Aspectos Quantitativos do Processo de Destilação

Um princípio muito importante a ser analisado no destilador solar é sua eficiência, a qual expressa de acordo com a Eq. (16), a relação entre a radiação solar incidente sobre o destilador e o calor transferido pela evaporação-condensação (DUFFIE, 1991 *apud* SANTOS *et al.*, 2008).

$$\eta = \frac{q_e}{A \times I} = \frac{m_p \times h_{vap}}{A \times I} \quad (Eq. 16)$$

Em que  $\eta$  é a eficiência do destilador,  $q_e$  é a quantidade de calor transferida pelo processo de evaporação-condensação,  $m_p$  é a taxa mássica de destilado produzida ( $m \cdot t^{-1}$ ),  $h_{vap}$  é o calor latente de vaporização do líquido a ser destilado, no caso o álcool ( $kcal \cdot kg^{-1}$ ),  $A$  é a área útil da bacia do destilador ( $L^2$ ) e  $I$  é a radiação solar recebida pelo destilador durante a operação ( $kcal \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ ).

### 3.2.3.1 Cálculo da espessura de líquido na bacia

A fim de determinar a espessura de filme ótima, isto é, que maximiza a eficiência do processo de destilação, calculou-se a espessura da película através da Eq. (17):

$$e = \frac{V_{bacia}}{A_{util}} \quad (Eq. 17)$$

Sendo  $e$  a espessura de líquido que se deseja encontrar,  $V_{bacia}$  o volume ainda disponível na bacia e  $A_{util}$  a área útil da bacia.

### 3.2.3.2 Análise de Desempenho do Destilador

Também foi possível analisar a variação das temperaturas e a velocidade do vento durante a operação, bem como suas influências na produtividade volumétrica  $P_v$  do destilador. A produtividade foi calculada pela Eq. (18).

$$P_v = \frac{V}{A} \quad (Eq. 18)$$

Na qual  $V$  é o volume de álcool coletado (mL) e  $A$  é a área útil da bacia ( $cm^2$ ).

A eficiência do destilador foi estimada utilizando a Eq. (19).

$$\eta = \frac{m_p \times h_{vap}}{A \times I} \times 100 = \frac{P_m \times h_{vap}}{I} \times 100 \quad (Eq. 19)$$

Em que  $\eta$  é a eficiência do destilador solar,  $A$  é a área útil da bacia do destilador ( $L^2$ ),  $I$  a radiação solar recebida durante a operação ( $kJ \cdot L^{-2} \cdot t^{-1}$ ),  $m_p$  é a taxa mássica de destilado produzida ( $kg \cdot h^{-1}$ ),  $h_{vap}$  é o calor latente de vaporização do álcool sendo  $836 \text{ KJ} \cdot \text{Kg}^{-1}$  e  $P_m$  a produtividade mássica ( $kg \cdot L^{-2} \cdot t^{-1}$ ). Para o cálculo da produtividade mássica, usou-se a densidade do álcool como sendo  $0,789 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

### 3.2.3.3 Destilação por alimentação contínua

Posterior a realização dos experimentos em batelada, os cálculos efetuados a cerca da espessura ideal de líquido para o processo, permitiram determinar que a destilação é maximizada quando o tamanho da lâmina de líquido é de 0,16 cm, o que corresponderia a uma vazão de 3 mL/min de acordo com a área útil da bacia. Neste intuito, foi avaliada a performance do destilador frente a alimentação contínua realizada por meio de uma bomba peristáltica.

Foram feitos dois experimentos com duração de duas horas cada e efetuada a leitura das medidas de temperaturas a cada 10 min, sendo: Temperaturas da bacia ( $T_{bacia}$ ); Vidros interno e externo ( $T_{vidro \text{ interno}}$  e  $T_{vidro \text{ externo}}$ ); ar do interior do destilador ( $T_{ar \text{ no interior}}$ ); temperaturas dos líquidos iniciais ambiente ( $T_{líquido \text{ inicial}}$ ); de saída da alimentação ( $T_{líq. \text{ alimentação}}$ ) e do interior da bacia ( $T_{líq. \text{ interior}}$ ), plotadas em gráfico. Também foram obtidas novas medidas para o rendimento global de coleta de destilado e novos valores para a eficiência térmica do destilador.

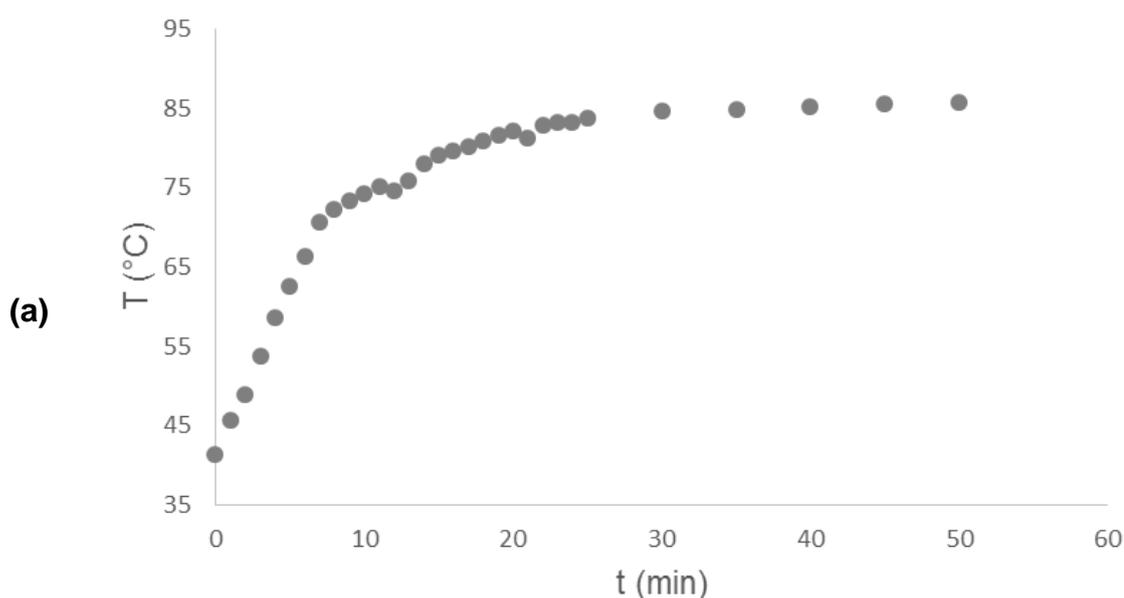
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

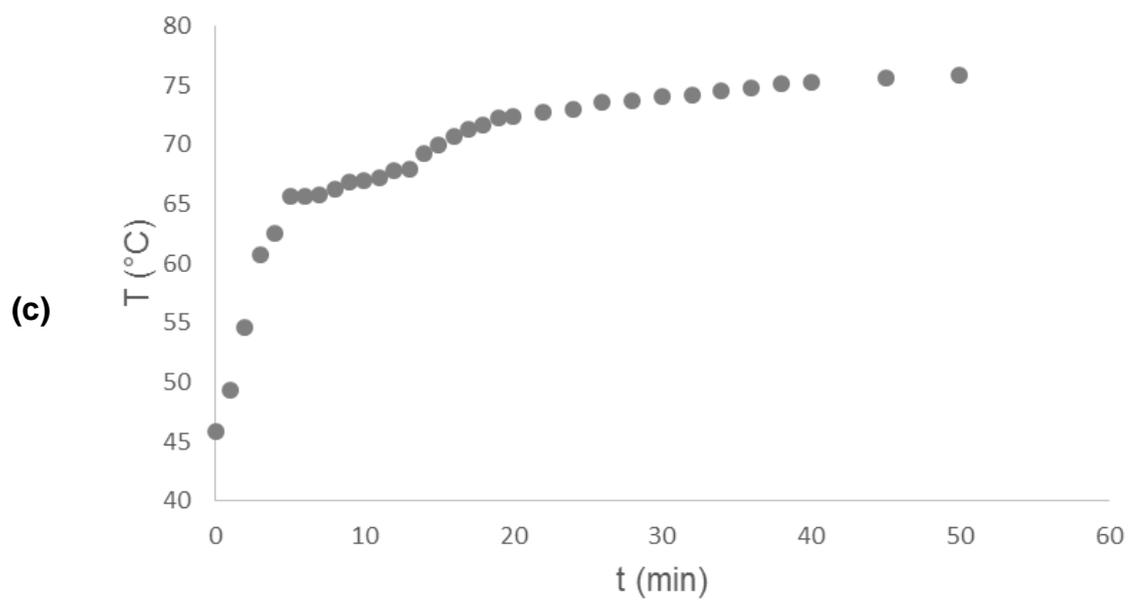
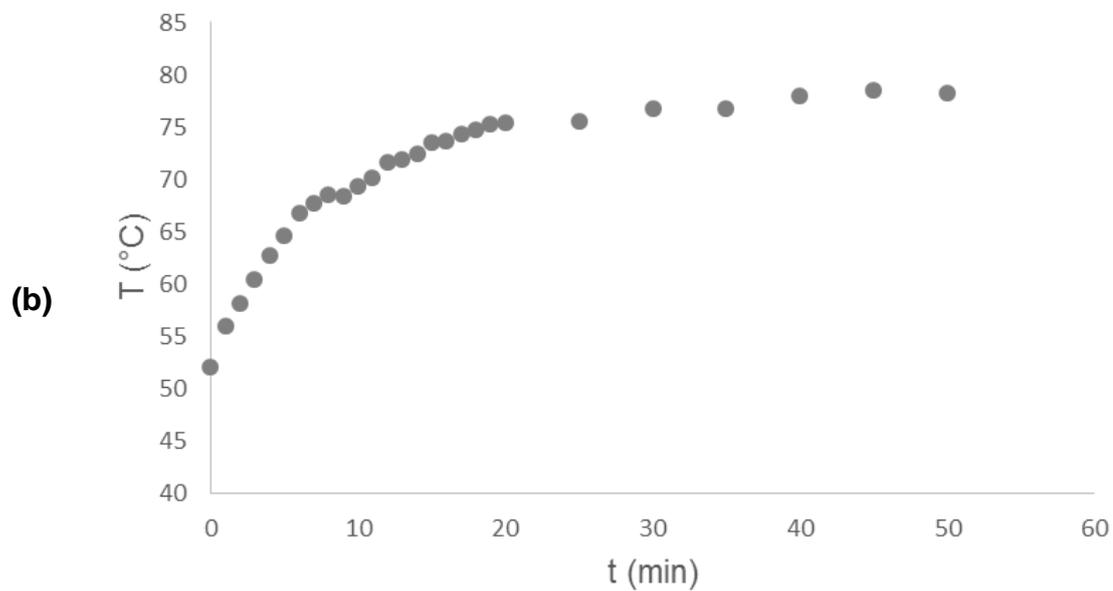
Esta seção é dividida em três partes, a primeira apresenta os resultados para os testes de aquecimento com água realizados em ambas as unidades concentradoras. A segunda apresentará todos os resultados obtidos nas extrações dos óleos vegetais e, por fim, a última seção apresentará os resultados sobre os testes realizados na recuperação do solvente por destilação solar.

### 4.1 TESTES DE AQUECIMENTO COM ÁGUA

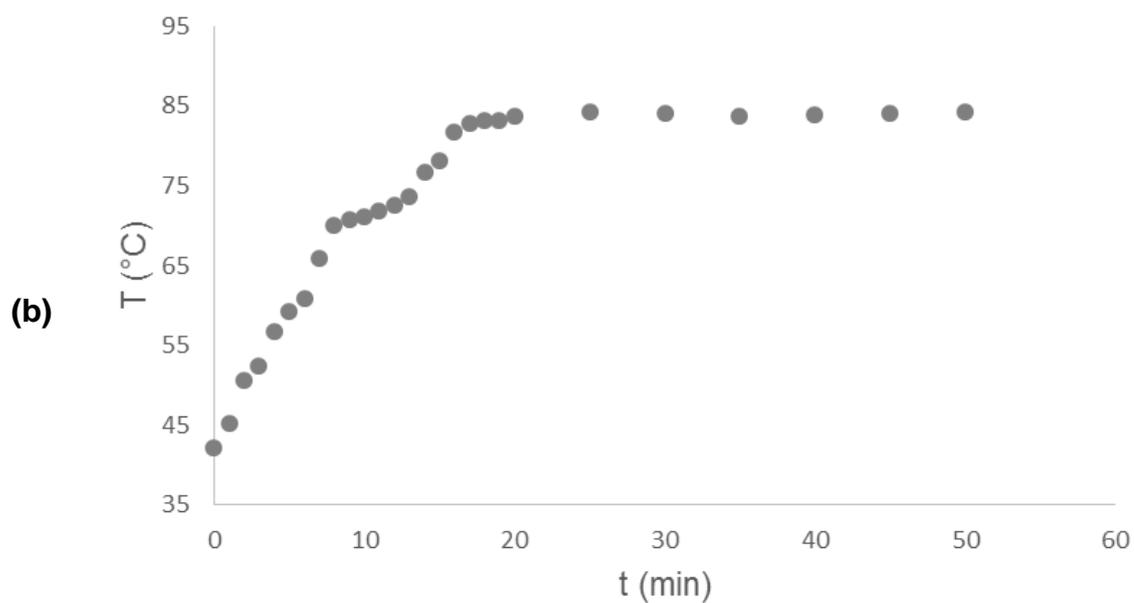
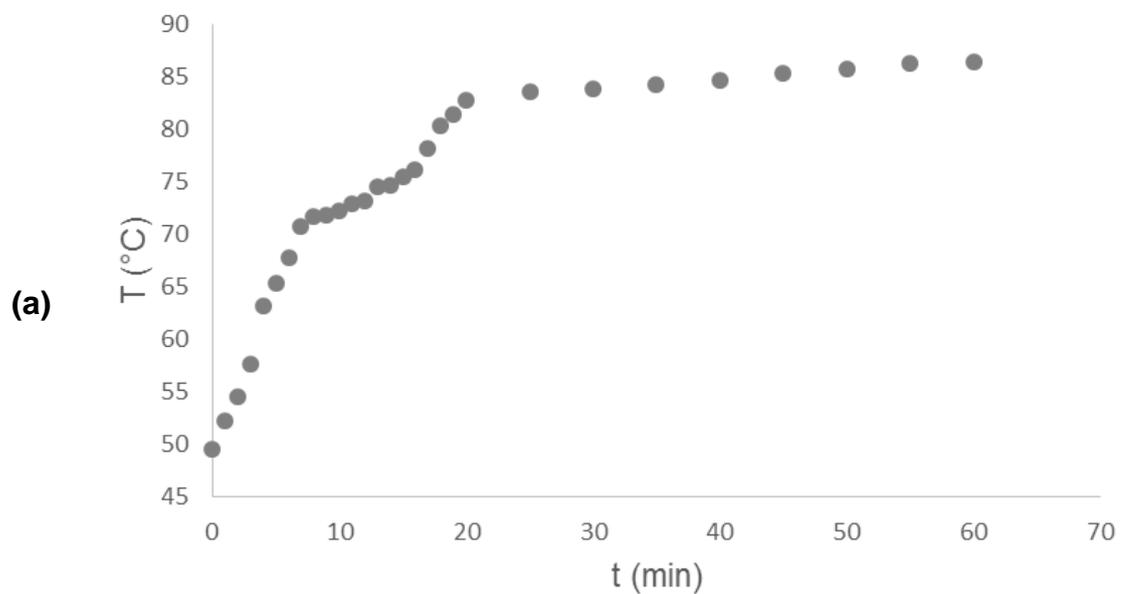
Os testes foram feitos com vazões de alimentação de 15, 25 e 35 mL/min, a fim de definir as vazões a serem estudadas nos testes de extração com solvente. As curvas de aquecimento obtidas nos testes realizados com água nos dois concentradores são mostradas na **Figura 29** para o CSCP e na **Figura 30** para o CSBDL em cada uma das vazões analisadas. As temperaturas foram medidas na saída da água inserindo um Termômetro Digital Tipo Espeto da marca Incoterm.

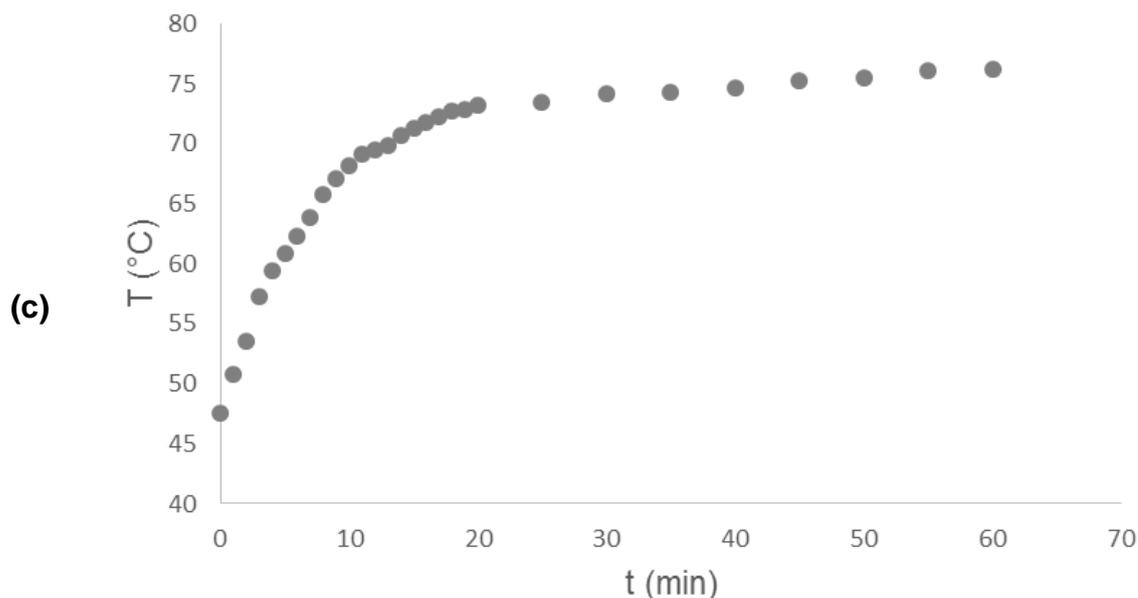
**Figura 29** – Curvas de aquecimento de água no CSCP para as vazões: **(a)** 15 mL/min; **(b)** 25 mL/min; **(c)** 35 mL/min.





**Figura 30** – Curvas de aquecimento de água no CSBDL para as vazões: **(a)** 15 mL/min; **(b)** 25 mL/min; **(c)** 35 mL/min.





Como pode ser observado nos gráficos, os testes que atingiram as maiores temperaturas, em ambos os concentradores, foram com a vazão de 15 mL/min, nos quais as temperaturas chegaram em 85,7 °C no CSCP e de 86,5 °C no CSBDL. Com uma vazão de alimentação menor, o tempo de residência do fluido no leito é maior, logo, é possível atingir uma temperatura maior até chegar à saída.

## 4.2 EXTRAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO

Para ter-se previamente como referência os valores do teor médio de óleo para o cálculo do rendimento nas extrações empregando os concentradores solares, serão apresentados primeiramente os resultados obtidos na extração pelo método convencional do Soxhlet para as três matrizes graxas testadas até o momento.

### 4.2.1 Extração pelo método convencional (Soxhlet)

Os resultados obtidos como referência são apresentados nas **tabelas 10, 11 e 12**. Para o amendoim, utilizou-se como referência o valor encontrado por

TAVARES; SANTOS (2016-c). As massas iniciais foram de 15 g. Todos os testes foram realizados em duplicata.

#### 4.2.1.1 Amendoim

Para o amendoim, o teor médio encontrado foi de 50,61%, tal valor é condicente com as literaturas visitadas. A extração foi realizada utilizando como solvente etanol anidro (99,3%).

**Tabela 10** – Teor médio de óleo obtido pelo método Soxhlet para o amendoim.

<b>Amostra</b>	<b>M<sub>amostra</sub></b> (g)	<b>M<sub>torta</sub></b> (g)	<b>M<sub>óleo</sub></b> (g)	<b>Teor de óleo</b> (%)	<b>Teor médio de óleo (%)</b>
1	15	7,431	7,569	50,46	50,61
2	15	7,384	7,616	50,77	

Fonte: (TAVARES; SANTOS, 2016-c)

#### 4.2.1.2 Coco

Para o coco, o teor médio encontrado foi de 74,56%. A extração foi realizada utilizando hexano como solvente.

**Tabela 11** – Teor médio de óleo obtido pelo método Soxhlet para o coco.

<b>Amostra</b>	<b>M<sub>amostra</sub></b> (g)	<b>M<sub>torta</sub></b> (g)	<b>M<sub>óleo</sub></b> (g)	<b>Teor de óleo</b> (%)	<b>Teor médio de óleo (%)</b>
1	15,003	3,582	11,283	75,21	74,56
2	15,001	3,789	11,091	73,94	

(FONTE: DO AUTOR (2018))

#### 4.2.1.3 Baru

Para o baru, o teor médio encontrado foi de 34,53%. A extração foi realizada utilizando etanol hidratado combustível como solvente.

**Tabela 12** – Teor médio de óleo obtido pelo método Soxhlet para o baru.

Amostra	$M_{\text{amostra}}$ (g)	$M_{\text{torta}}$ (g)	$M_{\text{óleo}}$ (g)	Teor de óleo (%)	Teor médio de óleo (%)
1	15	9,8053	5,1947	34,6313	34,539
2		9,8330	5,1670	34,4467	

(FONTE: DO AUTOR (2018))

#### 4.2.2 Extrações Utilizando os Concentradores Solares

Os resultados que se seguem encontram-se divididos em duas partes. Na extração do amendoim, realizada em ambos os concentradores, sendo que avaliou-se a eficiência de cada um deles perante a variação das vazões. Na extração do coco, realizada apenas no CSBDL, foi estudada mais detalhadamente a variação da temperatura em três diferentes pontos do sistema. Também avaliou-se a influência do tamanho das partículas e a cinética de extração do processo.

##### 4.2.2.1 Amendoim

Os resultados para a extração do amendoim nos dois concentradores estão dispostos na **Tabela 13**. A porcentagem foi calculada a partir da massa removida pelo processo de lixiviação, contudo, este valor não representa o real rendimento do processo. O rendimento é calculado de acordo com a fração mássica oleosa em cada semente, que, no caso de amendoim é cerca de 60 g para uma amostra de

120 g. A **Tabela 14** apresenta a eficiência calculada para cada concentrador no comparativo com o método Soxhlet.

**Tabela 13** – Teor de óleo de amendoim obtido em cada experimento.

Unidade concentradora	Vazão (mL/min)	M <sub>amostra</sub> (g)	M <sub>torta</sub> (g)	M <sub>óleo</sub> (g)	Teor de óleo (%)
CSBDL	15	120	78,441	41,559	34,63
	25		66,972	53,028	44,19
	35		84,533	35,467	29,55
CSCP	15		80,276	39,724	33,1
	25		76,176	43,824	36,52
	35		91,564	28,436	23,69

(FONTE: DO AUTOR (2018))

**Tabela 14** – Eficiência obtida nas extrações.

Concentrador	Vazão (mL/min)	$\eta$ (%)
CSBDL	15	69,27
	25	88,38
	35	59,11
CSCP	15	66,21
	25	73,04
	35	47,39

(FONTE: DO AUTOR (2018))

A partir dos dados da **Tabela 14**, dois importantes pontos sobre os processos foram levantados:

1. O melhor rendimento foi obtido com a vazão de 25 mL/min. Esta vazão mostrou-se como um bom coeficiente convectivo de transferência de massa, fornecendo uma hidrodinâmica necessária ao processo, apresentando velocidade relativa adequada entre fluido e partícula e, obtendo uma temperatura de operação que favorecesse a transferência de calor necessária

para melhor solubilização do solvente no óleo. Com essa vazão, obteve-se uma temperatura de operação por volta de 66 °C para o CSBDL e de 63°C para o CSCP.

2. Entre os concentradores, o CSBDL apresentou um rendimento 15,34% maior quando comparado ao CSCP para a vazão de 25 mL/min. Tal valor deve-se ao fato do matriz-graxa estar contida dentro do próprio leite absorvedor, desta maneira, as partículas do amendoim também receberam calor enquanto eram submetidos ao processo de extração. Este processo é análogo à operação de cozimento, já utilizado amplamente na indústria. No cozimento, o material é aquecido entre 75 °C e 85 °C por equipamentos chamados “cozedores” que são aquecidos por vapor. Este processo visa o rompimento das paredes celulares aumentando assim, a fluidez do óleo.

Tal condição do equipamento que favorece um incremento na temperatura do solvente e das partículas já haviam sido discutidos por HEMWIMOL *et al.* (2006) e SAMARAM *et al.* (2015), para os quais o efeito da temperatura pode ser atribuído ao aumento da solubilidade do óleo com o acréscimo desta variável termodinâmica, visto que a viscosidade e a densidade do solvente diminuem, resultando no aumento das taxas de transferência de massa. A extração conduzida em temperaturas elevadas proporciona a ruptura dos tecidos vegetais e melhora a difusão, promovendo a eluição do óleo ligado no interior da partícula para o meio.

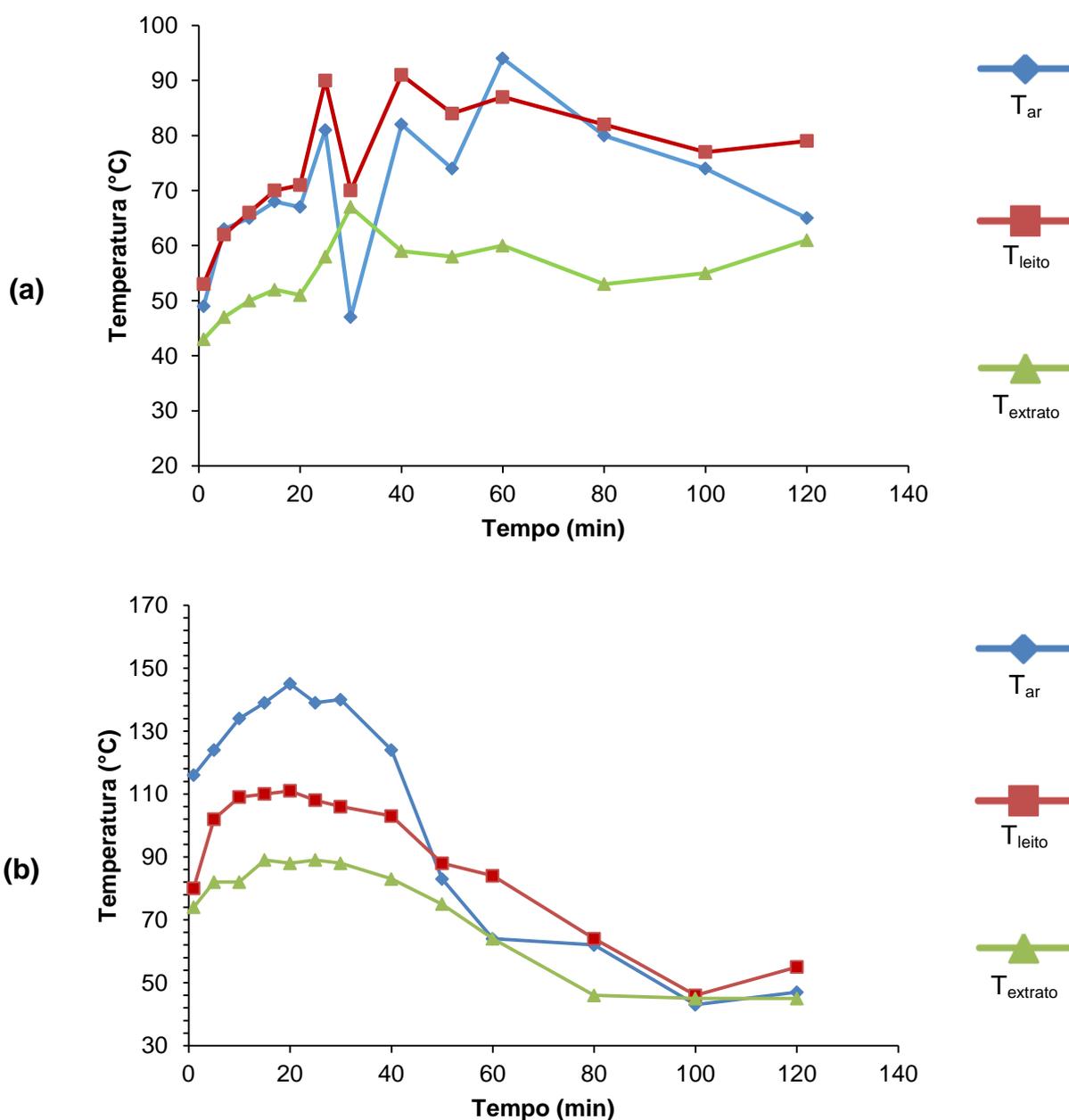
#### 4.2.2.2 Coco

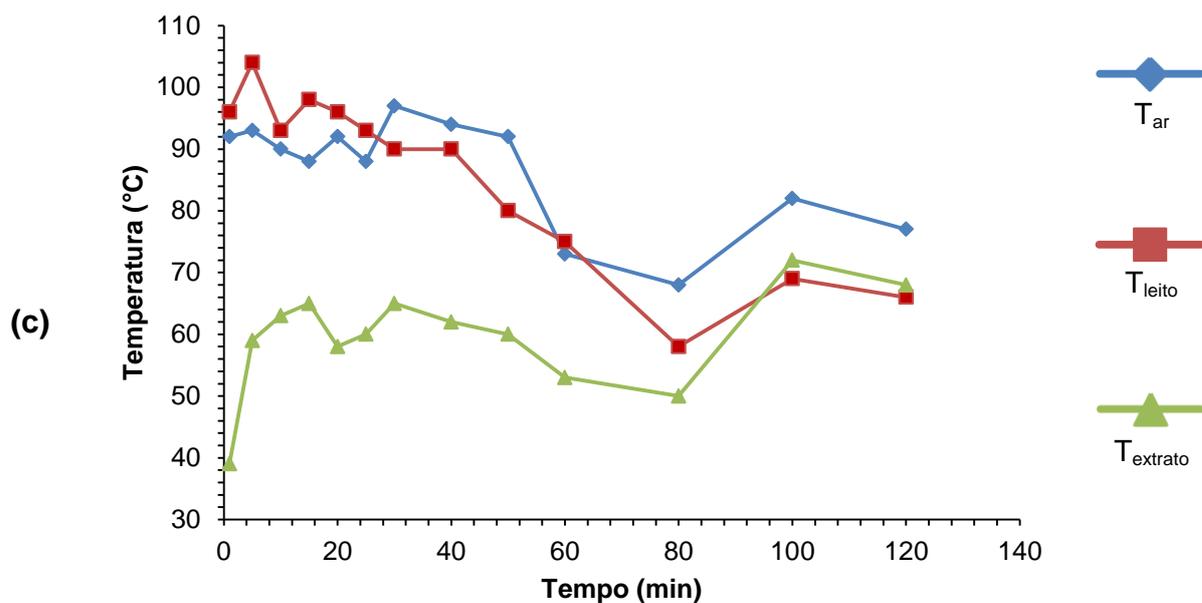
Nos testes de extração realizados com coco, utilizou-se somente o CSBDL como unidade experimental. Nestes procedimentos, utilizaram-se duas granulometrias diferentes e três termopares instalados no equipamento a fim de traçar um gráfico do perfil de temperatura durante o processo.

O leite foi preenchido com 90 g do material, ocupando um volume de 280 cm<sup>3</sup>. A densidade *bulk* ( $\rho_{\text{bulk}}$ ) das partículas, que representa a quantidade de massa presente por unidade de volume do recipiente por elas ocupada pode ser calculada sendo a  $\rho_{\text{bulk}}$  da amostra já triturada e seca de 0,321 g/cm<sup>3</sup>.

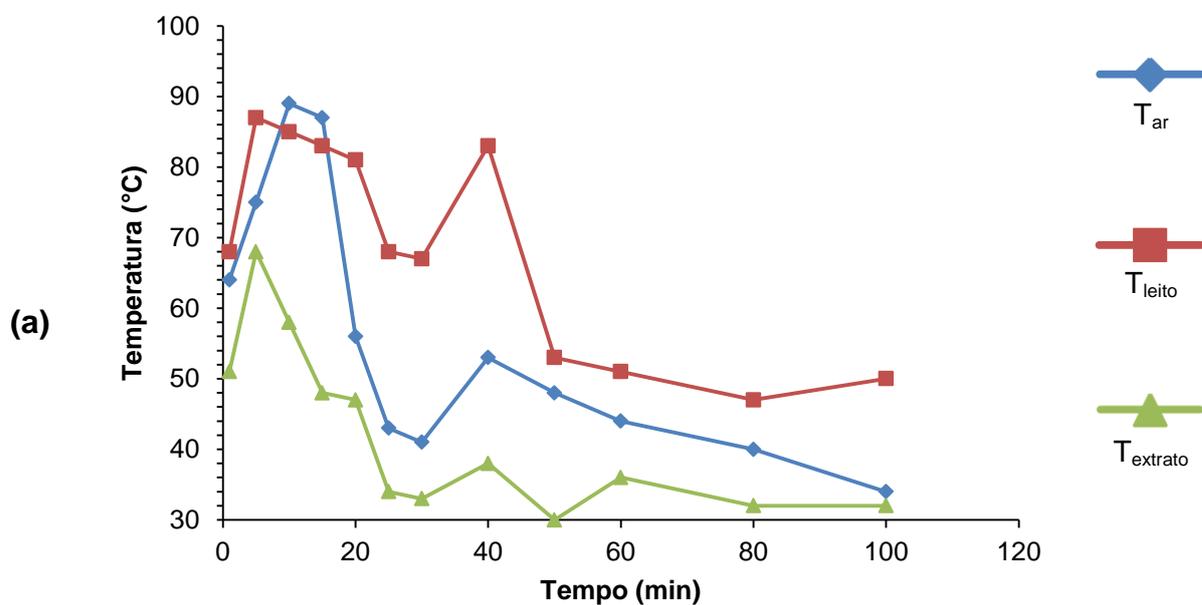
As temperaturas registradas nos experimentos pelos termopares tipo K foram: ar entre a parede do leito e o material estufa ( $T_{ar}$ ); temperatura da parede do leito ( $T_{leito}$ ) e a temperatura de saída do extrato ( $T_{extrato}$ ). Os gráficos das **Figuras 31** e **32** apresentam respectivamente os valores registrados para as granulometrias 0,69 mm, e 1,77 mm, em todas as vazões estudadas.

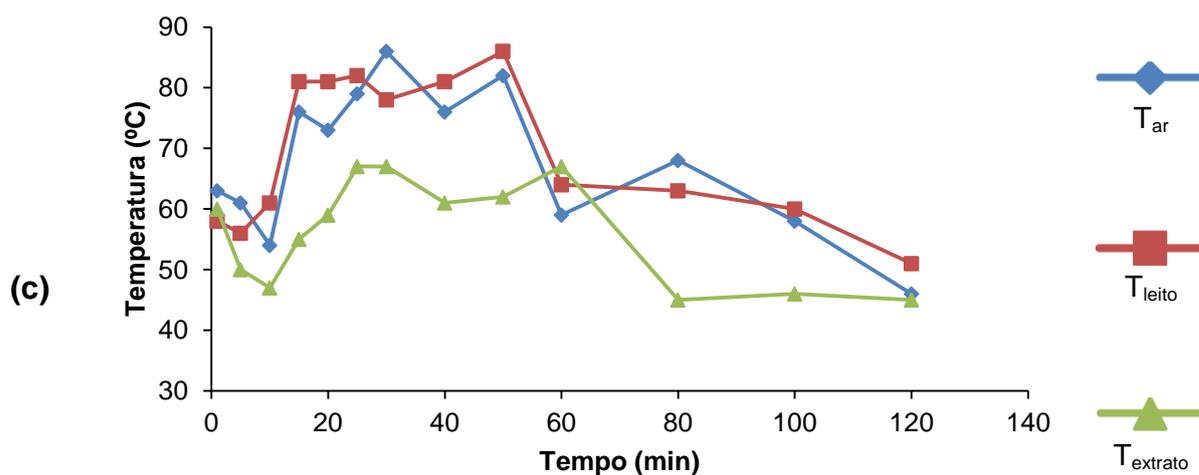
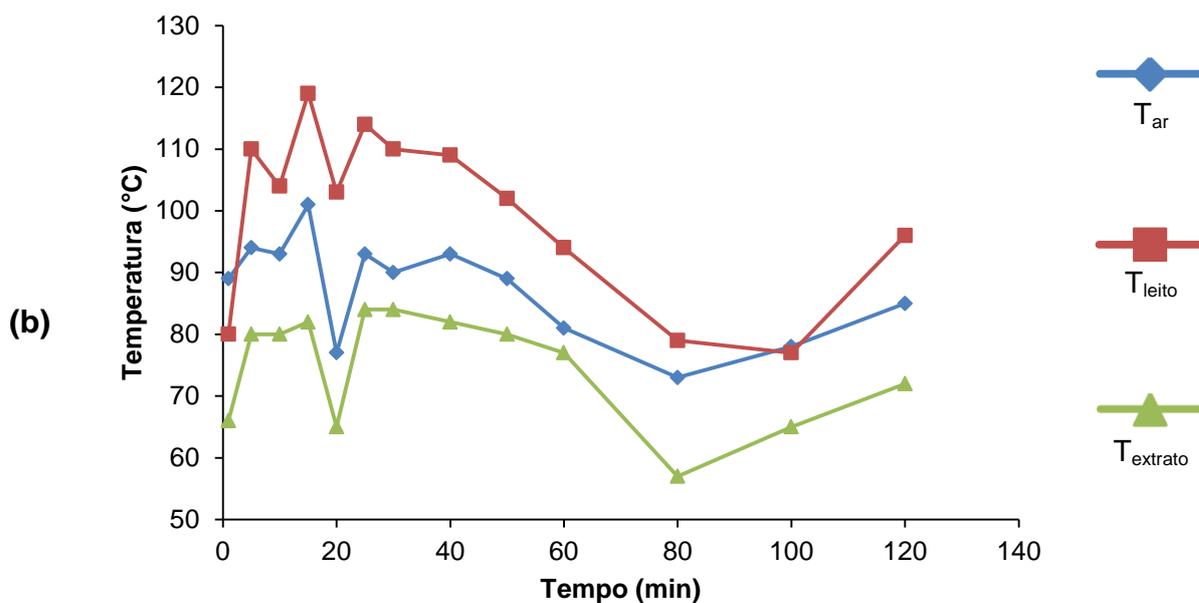
**Figura 31** – Temperaturas registradas no experimento de granulometria 0,69 mm. para as vazões: **(a)** 15 mL/min; **(b)** 25 mL/min; **(c)** 35 mL/min.





**Figura 32** – Temperaturas registradas no experimento de granulometria 1,77 mm. para as vazões: (a) 15 mL/min; (b) 25 mL/min; (c) 35 mL/min.





Mesmo realizando os experimentos em dias de baixa nebulosidade, pode-se observar, analisando as **Figuras 31** e **32**, que as temperaturas registradas caem abruptamente. Tal fato decorre do surgimento de nuvens passageiras que interferem na incidência de radiação solar.

As maiores temperaturas de saída do extrato continuaram sendo registradas para as menores vazões, contudo, a vazão por si só, não corresponde ao único parâmetro que regula a temperatura, fatores como, surgimento de nuvens

passageiras, velocidade de vento intensa ou mesmo um posicionamento incorreto na inclinação do concentrador não favorecendo um foco desejável.

Após a realização de cada experimento, o extrato foi submetido à refrigeração, e a torta remanescente foi levada para estufa a uma temperatura de 100 °C por 24 h para a etapa de dessolventização. A torta seca foi pesada para o cálculo do teor de óleo extraído (**Tabela 15**) e do rendimento do processo comparado ao método Soxhlet (**Tabela 16**).

**Tabela 15** – Teor de óleo de coco obtido em cada experimento

<b>Experimento</b>	<b>Vazão (mL/min)</b>	<b>Granulometria (mm)</b>	<b>M<sub>amostra</sub> (g)</b>	<b>M<sub>torta</sub> (g)</b>	<b>M<sub>óleo</sub> (g)</b>	<b>Teor de óleo (%)</b>
1	15	0,69	90	49,51	40,49	44,99
<b>2</b>	<b>25</b>	<b>0,69</b>		<b>42,44</b>	<b>47,56</b>	<b>52,85</b>
3	35	0,69		60,81	29,19	32,43
4	15	1,77		52,52	37,48	41,64
5	25	1,77		45,22	44,78	49,75
6	35	1,77		62,52	27,48	30,54

(FONTE: DO AUTOR (2018))

Pelos valores encontrados na **Tabela 15**, pode-se observar que, mesmo a vazão de 15 mL/min tendo alcançado uma boa temperatura para a operação, obteve-se um menor teor de óleo extraído quando comparada a taxa de 25 mL/min. Tal fato é causado pela baixa velocidade relativa fluido/partícula que prejudica o processo de extração. Não só nesta baixa taxa de alimentação, a maior vazão estudada, de 35 mL/min, também desfavoreceu o processo, uma alta velocidade do solvente diminui o tempo de residência dentro do leito, o que diminui a temperatura de operação e, conseqüentemente, a solubilidade do óleo no etanol.

FRANÇA (1999) e SOUSA (2001) explicam que na etapa de extração a solubilidade deve ser entendida como a quantidade de soluto que pode ser

solubilizado nas condições de operação. Com o solvente passando através de um leito contendo o soluto, o tempo de permanência deve ser suficiente para o mesmo se saturar. Um aumento da vazão de solvente empregado é, geralmente, acompanhado por um gradativo aumento nos valores de rendimento total até um determinado valor máximo, e que, ultrapassado este valor máximo, observa-se uma tendência de queda nos valores de rendimento. Isto se explica através da predominância do efeito difusional sobre o convectivo quando se empregam baixos valores de vazão, pois nestes casos o solvente não atinge a completa saturação, deixando o leito ainda insaturado. No caso do emprego de vazões muito elevadas, o que dificulta a saturação do solvente é a redução no tempo de contato entre a matriz sólida e o solvente.

Quanto à granulometria das duas amostras estudadas, o tamanho médio das partículas influenciou diretamente no rendimento do processo. Na menor granulometria avaliada, 0,69 mm, obteve-se o maior rendimento de óleo. Tal fato é explicado pela maior superfície de contato entre o soluto e o solvente. Cabe ressaltar que esta variável nem sempre acompanha este parâmetro, alguns estudos (SA JR., 2015; BARBOSA, 2011; CHAVES, 2012) concluíram que diâmetros muito pequenos de partículas causavam a compactação da matriz sólida, dificultando a percolação do fluido. Tal efeito é descrito como formação de canais preferenciais do solvente, sendo uma das maiores preocupações quando se trabalha com leito fixo, o que ressalta a importância do estudo deste parâmetro em processos de extração.

Concluiu-se que, assim como na extração do óleo de amendoim, a vazão que mais favoreceu o processo, foi a de 25 mL/min, que proporcionou uma hidrodinâmica favorável e uma boa temperatura de operação. Tal velocidade de alimentação aliada ao tamanho médio de partícula de 0,69 mm resultou no maior teor de óleo extraído nestes testes, cujo resultado está destacado na **Tabela 15**. Os rendimentos de cada experimento comparados ao método Soxhlet permite obter a eficiência do processo (**Tabela 16**), calculada através da razão entre os teores obtidos no concentrador solar e este método convencional.

**Tabela 16** – Eficiências obtidas para cada experimento.

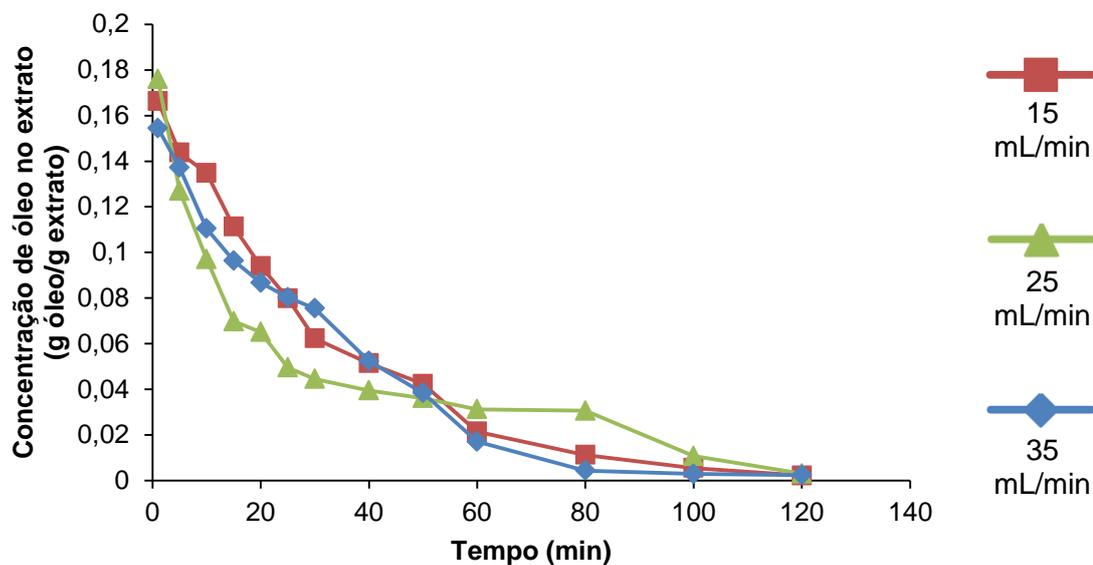
Experimento	Teor de óleo (%)		$\eta$ (%)
	Concentrador Solar	Método convencional	
1	44,99		60,34
2	<b>52,85</b>		70,88
3	32,43		43,5
4	41,64	74,56	55,85
5	49,75		66,72
6	30,54		40,96

(FONTE: DO AUTOR (2018))

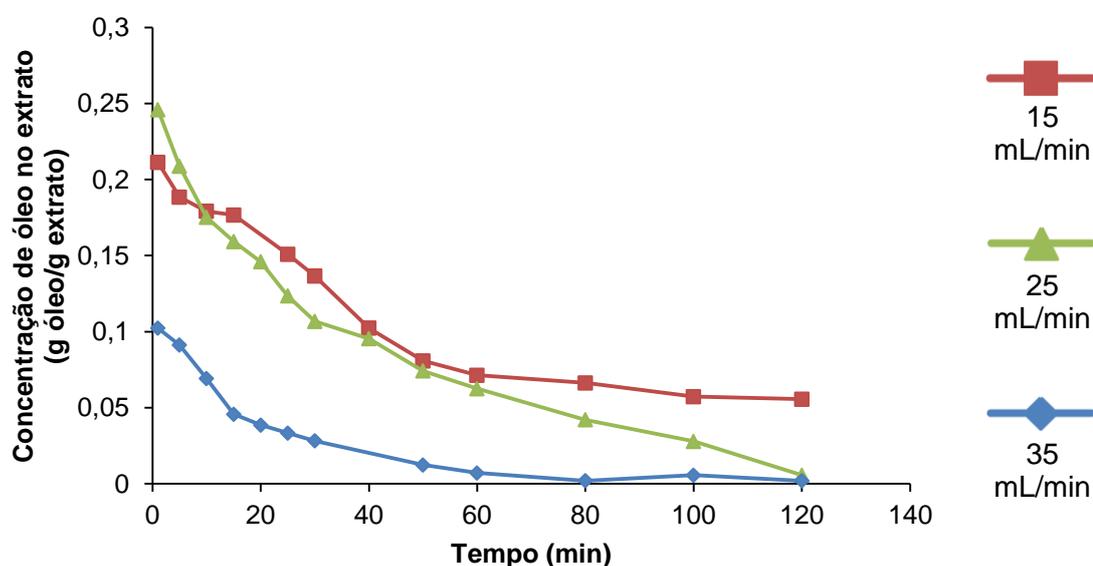
Como concluído através dos dados da **Tabela 16**, o Experimento 2, onde obteve-se o maior rendimento no processo de extração, chegou a um índice de eficiência de 70,88%. Este valor e os demais detalhados na **Tabela 15**, não apresentaram-se suficientemente satisfatórios quando comparados ao método Soxhlet. Os fatores que podem explicar as diferenças nesses resultados estão correlatamente ligados ao processo de extração convencional, uma vez que, no método Soxhlet, empregou-se o hexano como solvente, este é conhecido por possuir um alto poder extrativo de óleos e gorduras frente ao etanol. Além disso, no extrator Soxhlet, os problemas com transferência de massa externa são minimizados, devido ao tamanho e diâmetro reduzido do leito. Sabe-se que, o aumento do diâmetro da coluna de extração pode reduzir a eficiência da transferência de massa devido a problemas de dispersão do fluido na direção radial, ocasionando gradientes de concentrações de óleo diferentes.

Por fim, como último estudo sugerido para o processo de extração desta oleaginosa, realizou-se a curva de cinética de extração com base nos dados experimentais (massa de óleo vs. tempo de extração). Foram construídos os gráficos apresentados nas **Figuras 33 e 34**, onde é possível avaliar o comportamento de transferência de massa de acordo com a granulometria e a vazão.

**Figura 33** – Cinética de extração para as três vazões com a granulometria 0,69 mm.



**Figura 34** – Cinética de extração para as três vazões com a granulometria 1,77 mm.



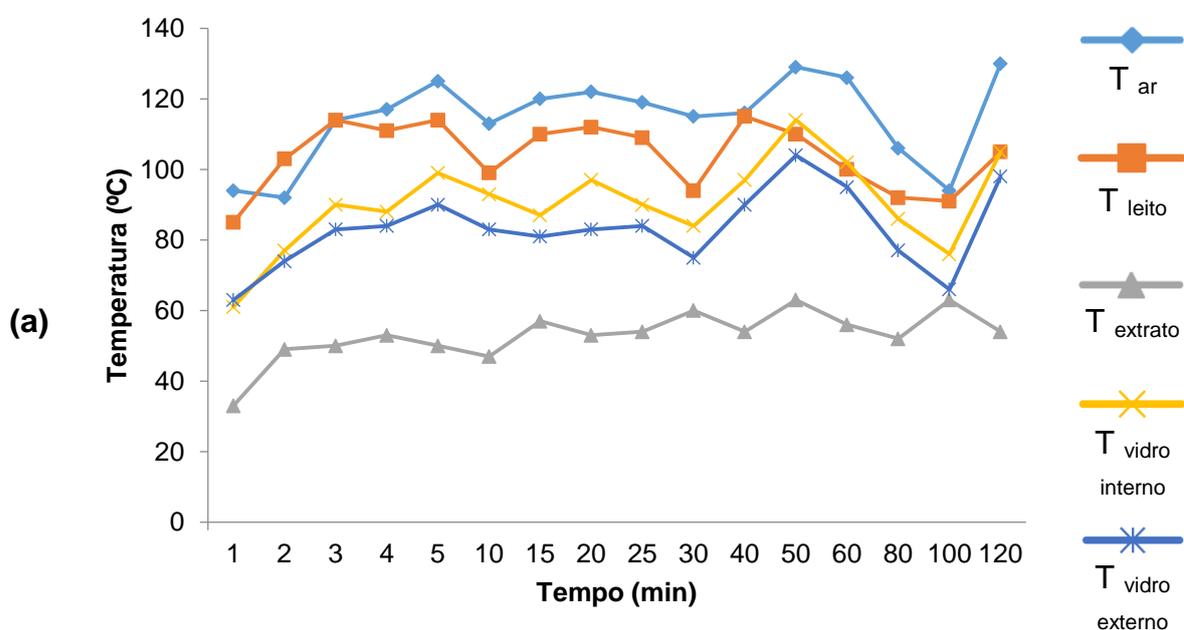
Com base nos dados dos gráficos é possível concluir que a maior taxa de extração de óleo ocorre nos primeiros 30 minutos do processo. NAVARRO (2002) descreve que a maior extração experimental se consegue realmente no início do processo, em que o solvente puro extrai o óleo livre obtido das células quebradas no processo de pré-tratamento da matéria-prima. No final da extração, o processo se torna mais lento em função da difusão através das paredes das células e da

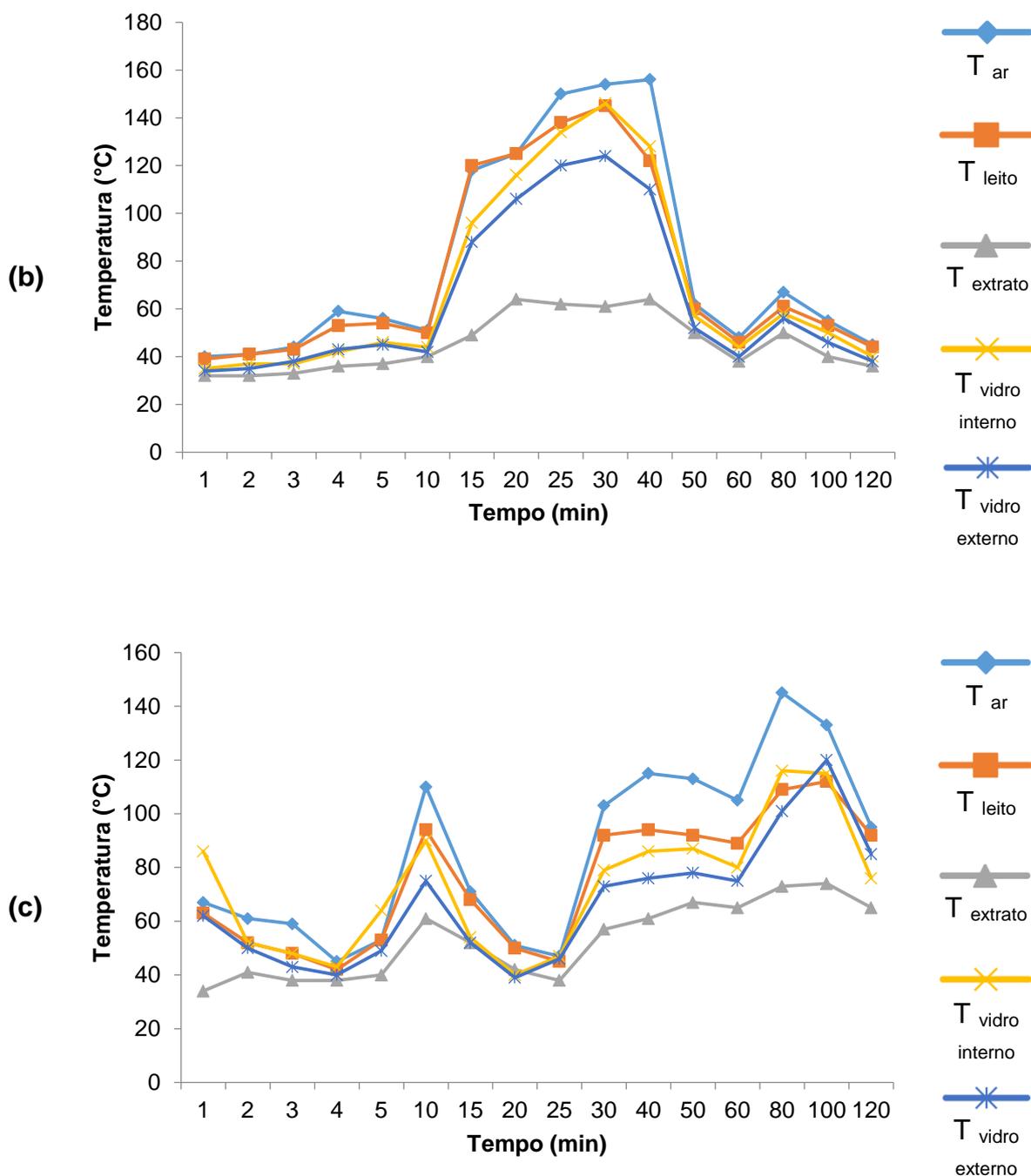
diminuição da solubilidade das últimas porções de óleo, e, portanto, a quantidade de óleo encontra-se em declínio.

#### 4.2.2.3 Baru

Para a extração do óleo do baru empregou-se o CSBDL como unidade experimental. Os gráficos dispostos nas figuras a seguir apresentam as temperaturas registradas para o ar dentro da estufa ( $T_{ar}$ ); parede do leito ( $T_{leito}$ ); temperatura de saída do extrato ( $T_{extrato}$ ); temperaturas externa e interna do vidro estufa ( $T_{vidro\ interno}$  e  $T_{vidro\ externo}$ ) nos intervalos de tempo de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100 e 120 min. A **Figura 35** apresenta as temperaturas relacionadas para o processo com 1,59 mm de granulometria:

**Figura 35** – Temperaturas registradas no experimento de granulometria 1,59 mm. para as vazões: **(a)** 15 mL/min; **(b)** 25 mL/min; **(c)** 35 mL/min.



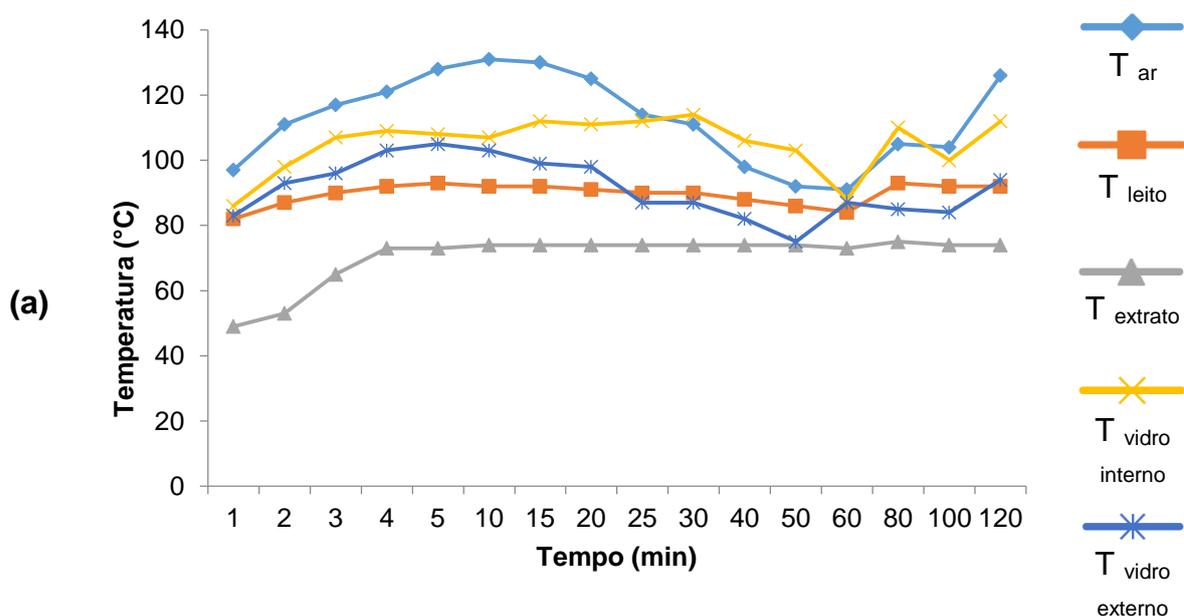


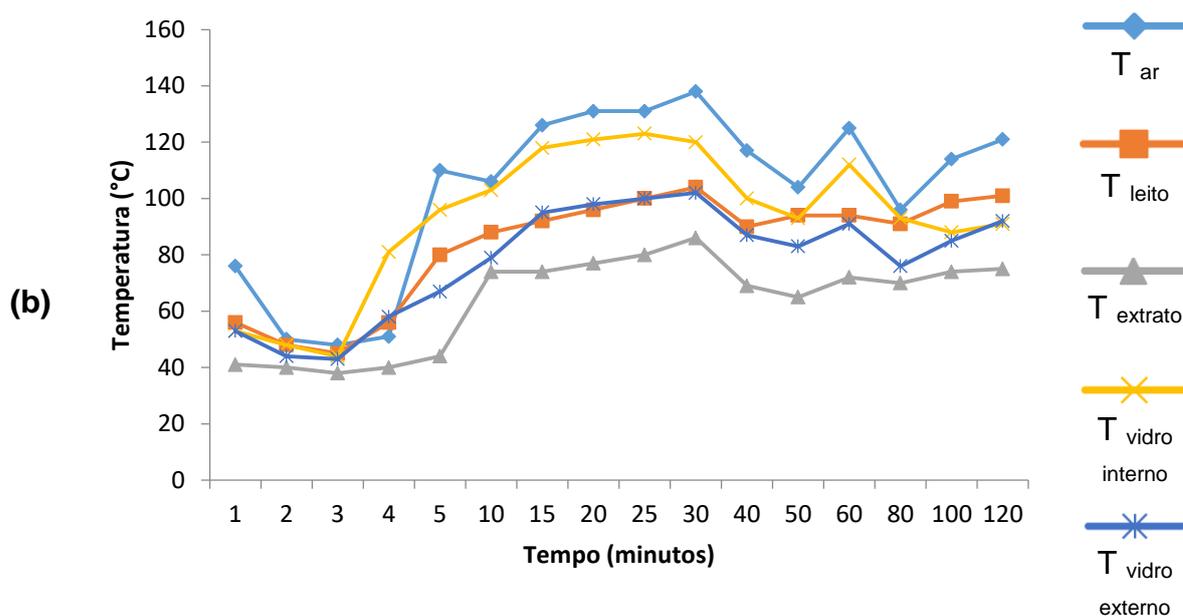
As análises dos gráficos permitiram concluir uma observação preliminar pertinente durante a execução dos experimentos. Primeiro, quanto a inclusão da cobertura de vidro, as temperaturas do ar dentro da estufa aumentaram substancialmente em relação ao experimento anterior (coco). A maior temperatura atingida para este ponto foi de 156 °C no experimento de 25 mL/min, enquanto que, nos experimentos anteriores, a máxima temperatura alcançada foi de 145 °C, para a extração com o coco a 25 mL/min (**Figura 31 (b)**). Isto se dá em função do material

vidro ser mais eficiente na produção do efeito estufa. Em segundo, as temperaturas se mantiveram em mais conformidade umas com as outras, indicando que todo o sistema da câmara extratora (leito + cobertura) mantivesse em maior equilíbrio, reduzindo variações substanciais de calor.

As temperaturas registradas para os experimentos com a granulometria de 2,18 mm, são apresentadas nos gráficos da **Figura 36 (a)** para a vazão de 25 mL/min e **Figura 36 (b)** para a vazão de 35 mL/min, realizados somente nestas duas vazões em função da disponibilidade do material.

**Figura 36** – Temperaturas registradas no experimento de granulometria 2,18 mm. para as vazões: **(a)** 25 mL/min; **(b)** 35 mL/min.





Posterior as extrações, a torta remanescente foi encaminhada para a estufa em 100 °C por 24 h para a etapa de dessolventização e determinação da massa seca e massa removida pelo processo de lixiviação. Os valores encontrados são apresentados na **Tabela 17** para a granulometria de 1,59 mm e na **Tabela 18** para a de 2,18 mm.

**Tabela 17** – Teor de óleo de baru para o experimento de 1,59 mm de granulometria.

Vazão (mL/min)	M <sub>amostra</sub> (g)	M <sub>torta</sub> (g)	M <sub>óleo</sub> (g)	Teor de óleo (%)
15		85,67	34,33	28,608
25	120	83,01	36,99	30,825
35		89,2	30,8	25,667

(FONTE: DO AUTOR (2018))

**Tabela 18** – Teor de óleo de baru para o experimento de 2,18 mm de granulometria.

Vazão (mL/min)	M <sub>amostra</sub> (g)	M <sub>torta</sub> (g)	M <sub>óleo</sub> (g)	Teor de óleo (%)
25		97,486	22,51	18,762
35	120	98,490	21,51	17,925

(FONTE: DO AUTOR (2018))

Pelos valores encontrados nas duas tabelas corrobora-se, mais uma vez, que a granulometria menor (1,59 mm) garantiu melhores resultados de extração e que a melhor vazão foi novamente a de 25 mL/min. Com relação ao rendimento comparado ao método Soxhlet, os valores em termos de eficiência do processo são apresentados na **Tabelas 19 e 20**.

**Tabela 19** – Eficiência o teor de óleo de baru com granulometria 1,59 mm.

Vazão (mL/min)	Teor de óleo (%)		$\eta$ (%)
	Concentrador Solar	Método Soxhlet	
15	28,608		82,829
25	30,825	34,539	89,247
35	25,667		74,312

(FONTE: DO AUTOR (2018))

**Tabela 20** – Eficiência para o teor de óleo de baru com granulometria 2,18 mm.

Vazão (mL/min)	Teor de óleo (%)		$\eta$ (%)
	Concentrador Solar	Método Soxhlet	
25	18,762	34,539	54,32
35	17,925		51,90

(FONTE: DO AUTOR (2018))

Os resultados obtidos para o método Soxhlet vão de encontro aos observados na literatura (ALMEIDA, 1998; TAKEMOTO *et al.*, 200; VALLILO; TAVARES; AUED, 1990; LIMA, 2012; VERA *et al.*, 2009;) e representaram uma eficiência de 89,24% para o experimento com tamanho de partícula de 1,59 mm e vazão de 25 mL/min. Tal eficiência mostrou-se como maior valor encontrado por este trabalho. É importante ressaltar que para este experimento, a metodologia utilizada na extração com o Soxhlet empregou o mesmo solvente que as extrações realizadas no concentrador solar. Embora a eficiências tenha se apresentado com o valor de 89,24% é importante enfatizar as circunstâncias outrora mencionadas, como, tamanho do leito e coluna de partículas reduzida, o que minimizam os problemas de transferência para a extração com o Soxhlet.

Os últimos experimentos realizados com o baru foram feitos utilizando o farelo resultante do processo de trituração, neste experimento utilizaram-se seis amostras de 50 gramas em cada extração a taxa de 25 mL/min. As massas de óleo encontradas em cada experimento estão relacionadas na **Tabela 21**.

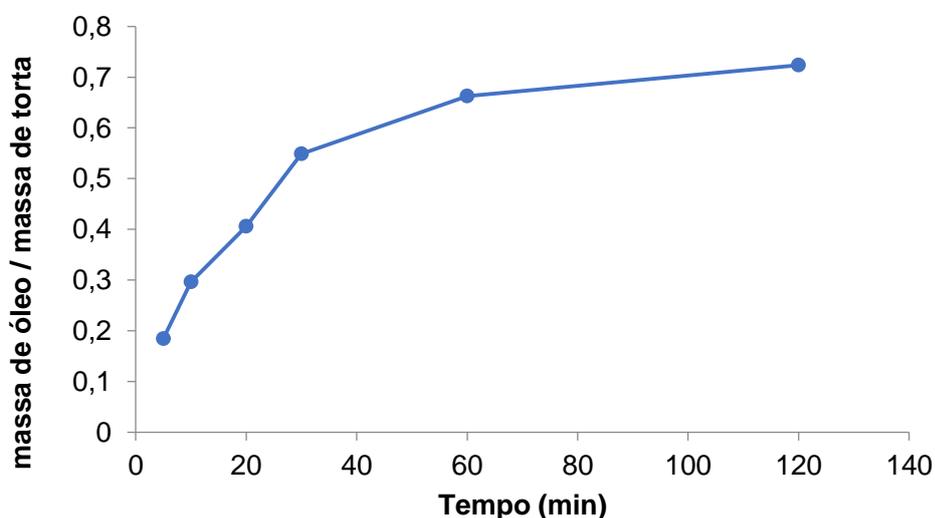
**Tabela 21** – Massa de óleo de baru obtido em cada experimento cinético.

Tempo (min)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Massa de óleo (g)	Fração mássica óleo / torta
5	50	42,216	7,784	0,184
10		38,568	11,432	0,296
20		35,561	14,439	0,406
30		32,284	17,716	0,549
60		30,07	19,93	0,663
120		29,005	20,995	0,724

(FONTE: DO AUTOR (2018))

A partir dos valores encontrados na **Tabela 21** foi plotado o gráfico apresentado na **Figura 37**, em que é demonstrada a variação do teor de óleo encontrado em cada experimento de acordo com o tempo de extração. É possível verificar que, assim como no experimento cinético realizado com o coco, a maior taxa de extração de óleo ocorreu nos 30 primeiros minutos, dada a linha de crescimento exponencial e posterior estabilização da taxa de extração.

**Figura 37** – Gráfico da variação cinética do teor de óleo do farelo de baru.



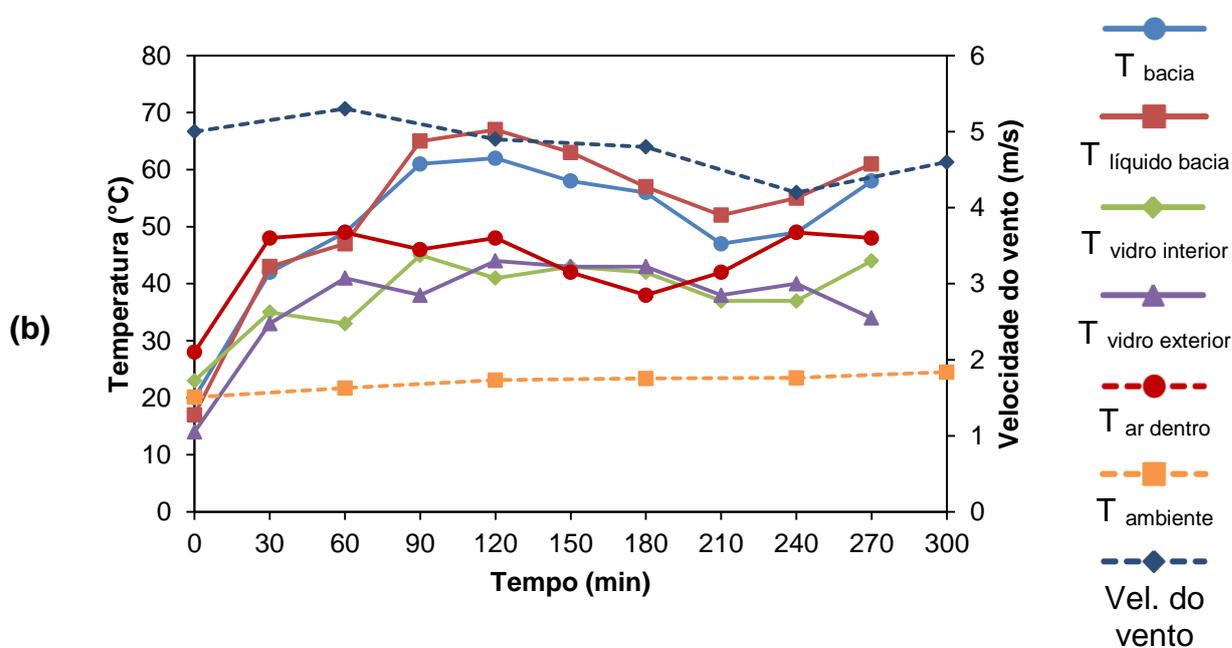
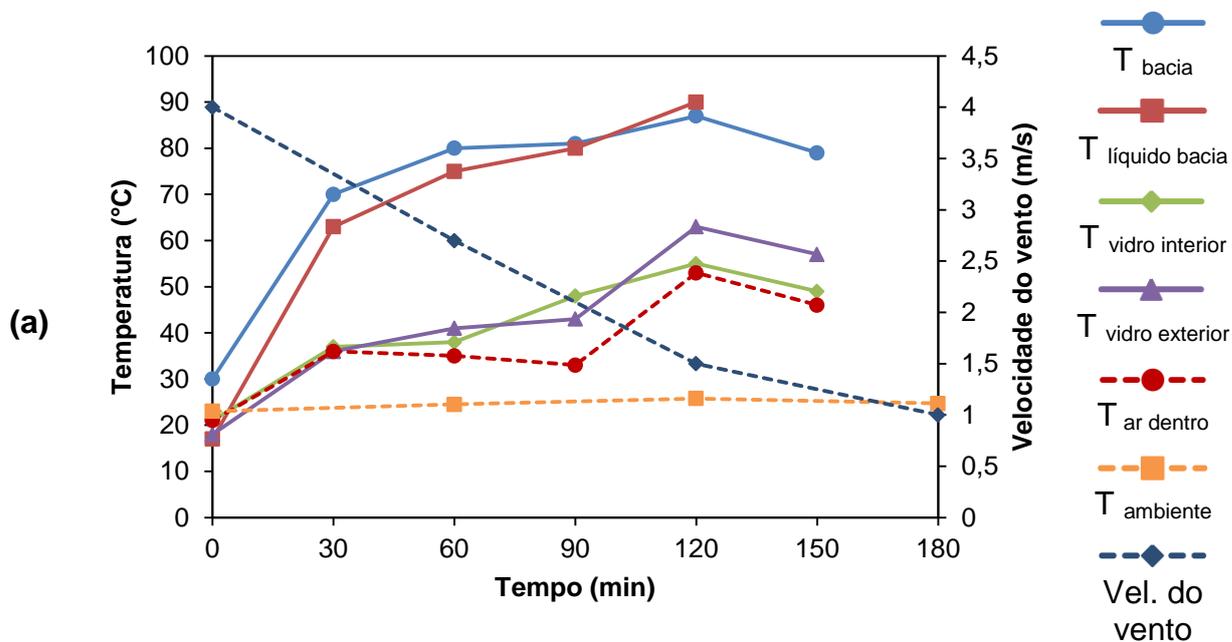
### 4.3 DESTILAÇÃO SOLAR

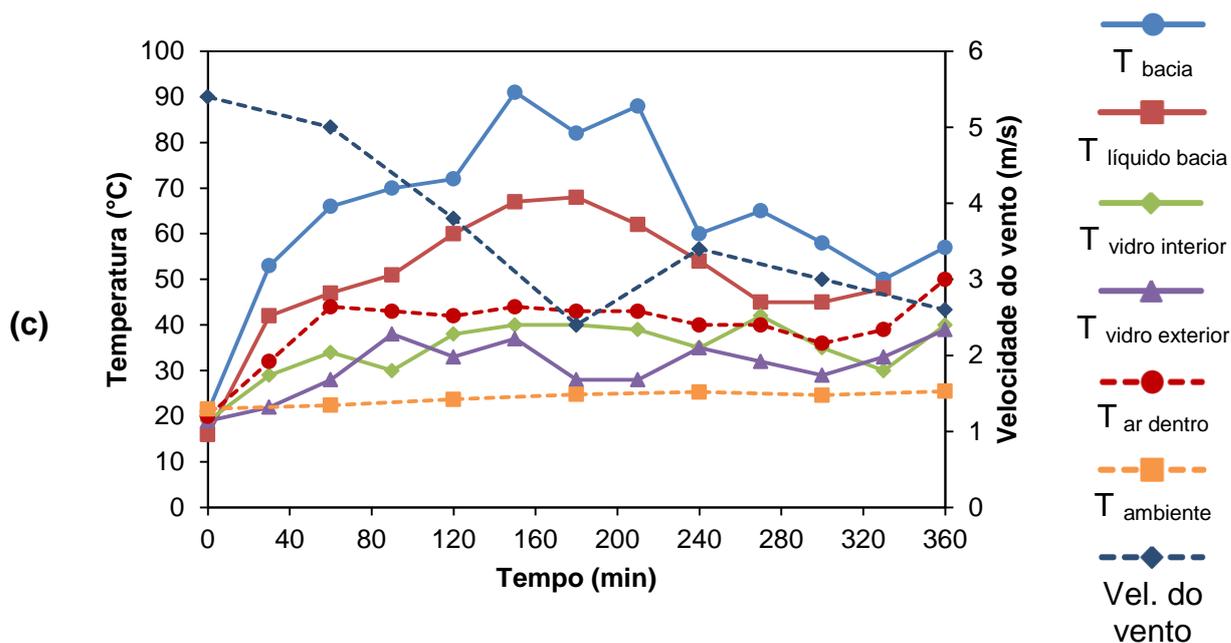
Sabe-se que a variação dos processos de transferência de calor depende de vários parâmetros atmosféricos, como a variação da intensidade de radiação e a variação da temperatura ao longo de um dia, da latitude e da longitude do lugar onde a unidade se encontra montada, da velocidade do vento e dos parâmetros da própria unidade, como a espessura da cobertura, orientação e inclinação, espessura do líquido na bacia e das propriedades dos materiais usados na unidade. Os itens a seguir, descrevem os resultados de alguns levantamentos realizados sobre o processo.

#### 4.3.1 Influência das Condições Meteorológicas no Processo de Destilação

As temperaturas mais relevantes deste processo foram mensuradas utilizando termopares tipo K instalados em cinco pontos distintos da unidade destiladora, sendo eles: líquido do interior e parede interna da bacia; ar dentro do destilador e temperaturas das paredes interna e externa da cobertura. A coleta destas informações relativas às temperaturas nas diferentes partes do equipamento foi contrastada com os valores obtidos para a velocidade do vento (m/s) e com a temperatura ambiente. Todos os testes foram realizados tendo início as 10 h da manhã e fim quando o líquido da bacia se esgotasse. Nos experimentos, realizados em batelada, alternou-se os volumes do interior da bacia em 500; 750 e 1000 mL. Os resultados relativos às temperaturas registradas e obtidas pelo INMET estão relacionados nos gráficos da **Figura 38**:

**Figura 38** – Temperaturas registradas e dados do INMET para os experimento de:  
**(a)** 500 mL; **(b)** 750 mL; **(c)** 1000 mL.

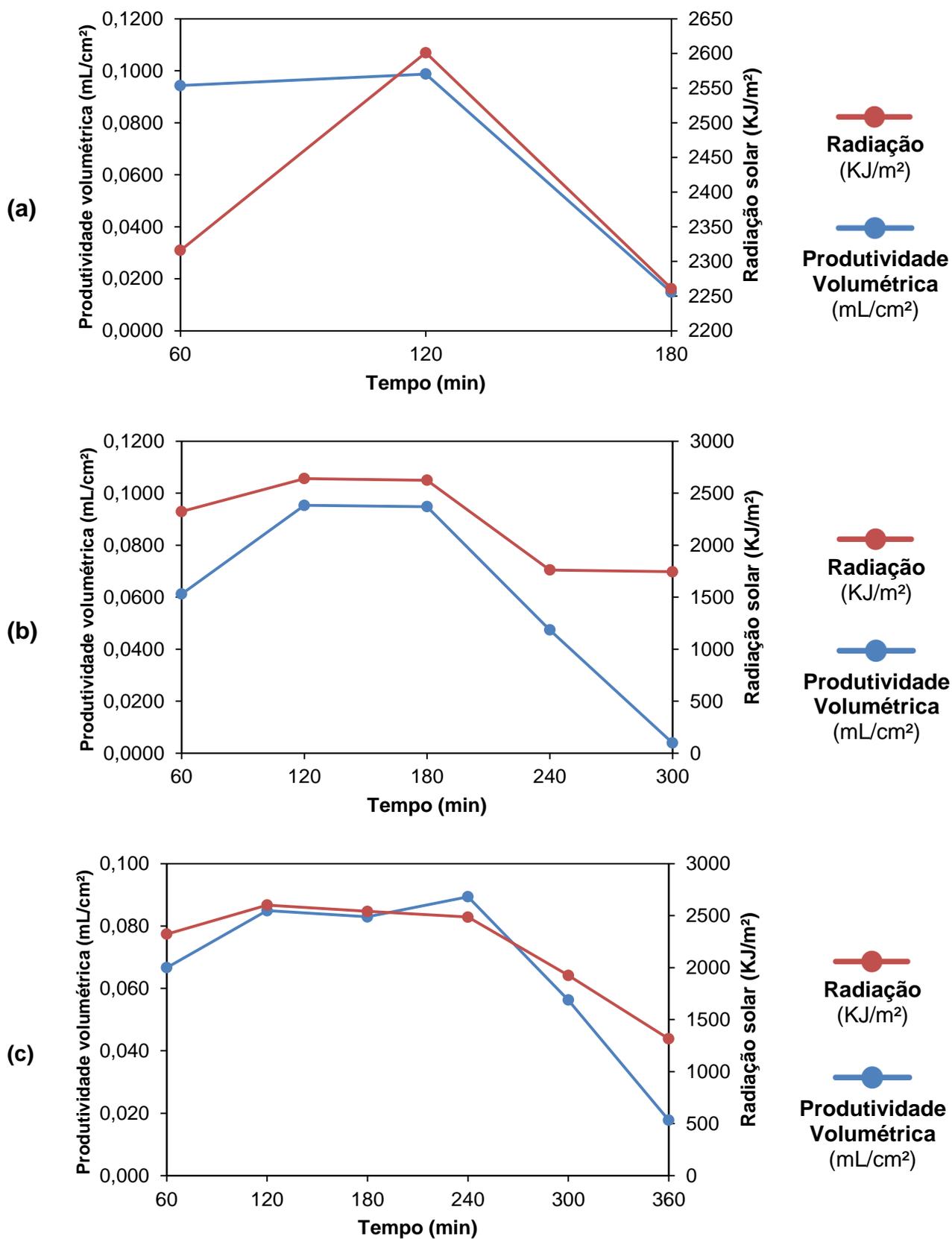




Pela análise dos gráficos anteriores é possível observar que, primeiramente, o tempo de evaporação total do líquido no interior do destilador é diretamente proporcional ao volume de líquido na bandeja. Quanto à velocidade do vento, observa-se que, com o seu aumento, as temperaturas dos componentes do sistema em geral diminuem. Isto ocorre devido ao efeito Bernoulli, em que o vento, ao passar por uma superfície, troca calor com a mesma por meio do processo de convecção. Se por um lado, uma maior velocidade do vento ocasiona um melhor arrefecimento da cobertura de vidro, favorecendo o processo de condensação do destilado, por outro, o processo também pode ser desfavorecido caso o sistema não esteja bem isolado.

Nos processos de destilação solar, os três modos de transferência de energia (condução, a convecção e a radiação) estão fortemente envolvidos, sendo que nos fenômenos que envolvem energia solar a principal forma de troca energética é a radiação. A radiação solar atua como fonte energética para o processo, fazendo com que as temperaturas de operação se elevem, e, com isso, a produtividade. Nesse sentido, estudou-se também, através dos dados obtidos pelo INMET e com dados coletados no experimento, como a radiação solar interfere na produtividade do processo. Os gráficos de produtividade volumétrica *versus* radiação solar podem ser observados na **Figura 39**.

**Figura 39** – Produtividade volumétrica *versus* radiação solar para os experimentos de: **(a)** 500 mL; **(b)** 750 mL; **(c)** 1000 mL.



Pelos gráficos da **Figura 39**, conclui-se que o a radiação solar afeta diretamente na produtividade do destilador, sendo que, quanto maior a taxa de radiação disponível, maior a produtividade volumétrica do equipamento. Essa radiação corresponde à energia incidente que é convertida em radiação infravermelha (efeito estufa), favorecendo um aumento na taxa de evaporação do líquido contido na bandeja.

#### 4.3.2 Estudo da Espessura de Líquido Ótima para o Processo

Outro parâmetro também avaliado em processos de destilação *basin type* discute a influência da espessura da lâmina de líquido no interior da bacia. Para este piloto, foi determinada a melhor espessura de líquido dentro da bandeja a partir dos volumes de destilado coletados em cada intervalo de tempo. Os valores obtidos são apresentados na **Tabela 22**.

**Tabela 22** - Espessura de líquido no tempo para cada experimento

Tempo (min)	1000 mL		750 mL		500 mL	
	Volume coletado (mL)	Espessura (cm)	Volume coletado (mL)	Espessura (cm)	Volume coletado (mL)	Espessura (cm)
0	0	0,494	0	0,37	0	0,247
30	46	0,471	43	0,349	70	0,212
60	89	0,427	81	0,309	<b>121</b>	<b>0,153</b>
90	85	0,385	108	0,256	87	0,11
120	87	0,342	85	0,214	113	0,054
150	64	0,311	<b>112</b>	<b>0,159</b>	30	0,039
180	104	0,259	80	0,119		
210	71	0,224	63	0,088		
240	<b>110</b>	<b>0,17</b>	33	0,072		
270	77	0,132	8	0,068		
300	37	0,114				
330	23	0,102				
360	13	0,096				

(FONTE: DO AUTOR (2018))

Os valores em negrito expressam o momento onde houve maior coleta de destilado, por estes dados pode-se analisar que, para os três experimentos, as espessuras de líquido contido na bacia são bem próximos entre si, numa média de 0,16 cm, sendo esta espessura equivalente a 324 mL de líquido no interior da bacia. Entretanto, para o experimento descrito neste trabalho, os testes realizados foram feitos em batelada, portanto, presumisse que uma maior eficiência do processo pode ser adquirida com a operação sendo alimentada de forma contínua, de maneira que, a espessura do líquido possa ser mantida constante.

Na unidade destiladora utilizada por SOARES (2004) foi determinada a espessura de 1,0 cm como sendo a altura lâmina mais eficiente para a destilação da água. Nos estudos de Al-HAYEK e BADRAN (2004), foi levantada como sendo a profundidade eficiente uma lâmina entre 1,5 a 2,5 cm. Para este piloto, onde o líquido a ser destilado foi o etanol, pode-se concluir que a espessura de líquido na bacia que promove a maior taxa de evaporação é por volta de 0,16 cm. Todavia, em todas as bibliografias visitadas, assim como descrito por MALIK *et al.* (1982) é de maior conformidade que uma menor espessura de líquido garante uma penetração de radiação solar mais eficiente.

#### 4.3.3 Análise da Eficiência do Destilador

Utilizando a Eq. (19) (eficiência), calculou-se a eficiência em cada intervalo de tempo durante a operação do destilador.

$$\eta = \frac{m_p \times h_{vap}}{A \times I} \times 100 = \frac{P_m \times h_{vap}}{I} \times 100 \quad (Eq. 19)$$

Em que, relacionou-se a radiação solar recebida durante a operação com a taxa de volume do destilado produzido. Esses valores podem ser observados na **Tabela 23**. O rendimento global do processo foi calculado pela diferença entre os volumes dos líquidos iniciais da mistura com o líquido final coletado, para este resultado apresentado na **Tabela 24**. Considerou-se desprezível a quantidade de óleo da mistura inicial por ser baixa.

**Tabela 23** – Eficiência térmica para o experimento com  $V_0 = 500, 750$  e  $1000$  mL.

<b><math>V_0 = 500</math> mL</b>				
<b>Tempo</b> (min)	<b>Radiação</b> (kJ·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	<b>Produtividade volumétrica</b> (mL·cm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	<b>Taxa</b> (mL·min <sup>-1</sup> )	<b>Eficiência</b> (%)
60	2316	0,0943	3,183	26,86
120	2601	0,0988	3,33	25,05
180	2261	0,0148	0,5	4,32
<b><math>V_0 = 750</math> mL</b>				
<b>Tempo</b> (min)	<b>Radiação</b> (kJ·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	<b>Produtividade volumétrica</b> (mL·cm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	<b>Taxa</b> (mL·min <sup>-1</sup> )	<b>Eficiência</b> (%)
60	2324	0,0612	2,07	17,38
120	2641	0,0953	3,22	23,8
180	2624	0,0948	3,2	23,83
240	1762	0,0474	1,6	17,75
300	1745	0,004	0,13	1,49
<b><math>V_0 = 1000</math> mL</b>				
<b>Tempo</b> (min)	<b>Radiação</b> (kJ·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	<b>Produtividade volumétrica</b> (mL·cm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	<b>Taxa</b> (mL·min <sup>-1</sup> )	<b>Eficiência</b> (%)
60	2322	0,067	2,25	18,94
120	2602	0,085	2,87	21,53
180	2541	0,083	2,8	21,54
240	2486	0,089	3,02	23,72
300	1925	0,056	1,9	19,29
360	1316	0,018	0,6	8,91

(FONTE: DO AUTOR (2018))

**Tabela 24** – Rendimento global nos processos de separação obtidos nos experimentos.

	<b>Volume Inicial</b> (mL)	<b>Volume Final</b> (mL)	<b>Rendimento</b> (%)
Experimento 1	500	421	84,2
Experimento 2	750	613	81,73
Experimento 3	1000	806	80,6

(FONTE: DO AUTOR (2018))

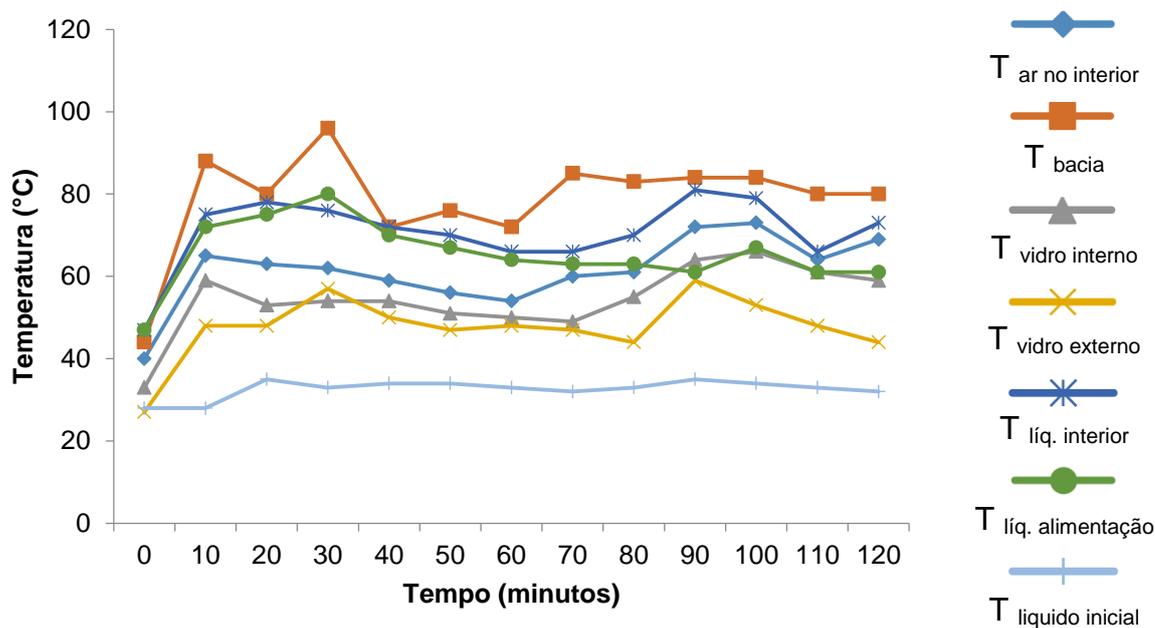
Analisando os valores encontrados na **Tabela 23**, a eficiência máxima atingida pelo destilador solar foi a de 26,86% no Experimento 1. Embora a eficiência tenha se mostrada baixa, McCracken (1985) *apud* Maluf (2005) relata que baixas eficiências térmicas são esperadas em destiladores do tipo tanque raso em função de perdas energéticas como: reflexão da radiação incidente na cobertura (10%); absorção no vidro (10%); radiação da cobertura de vidro para o céu (3,7%); convecção do vidro para o ambiente (12,2%); condução da base do reservatório para o recipiente (16%); outras perdas menores devido a menores perdas de calor (16%). Tais perdas demonstraram que a soma destes percentuais resultam em uma eficiência média na faixa de 38% a 43%.

Entretanto, apesar da baixa eficiência térmica, a unidade experimental do destilador solar construída apresentou ótimos valores para volume total de destilado coletado (**Tabela 24**) e eficiência de separação, fornecendo valores de rendimento acima de 80%. Um dos fatores que poderia explicar os resultados de eficiência térmica encontrados é o fato da cobertura de vidro possuir o formato de um telhado de duas faces. Tal configuração difere de outras propostas encontradas na literatura, como a de FARIA *et al.* (2015), onde a geometria da cobertura idealizada possuía o formato de uma pirâmide de quatro faces, na qual a cobertura piramidal recebe radiação independente do posicionamento do sol e do próprio aparelho, garantindo maior exposição solar ao longo do processo, já a cobertura considerada para este estudo, a incidência solar ocorre, em sua maior parte, em somente uma das laterais.

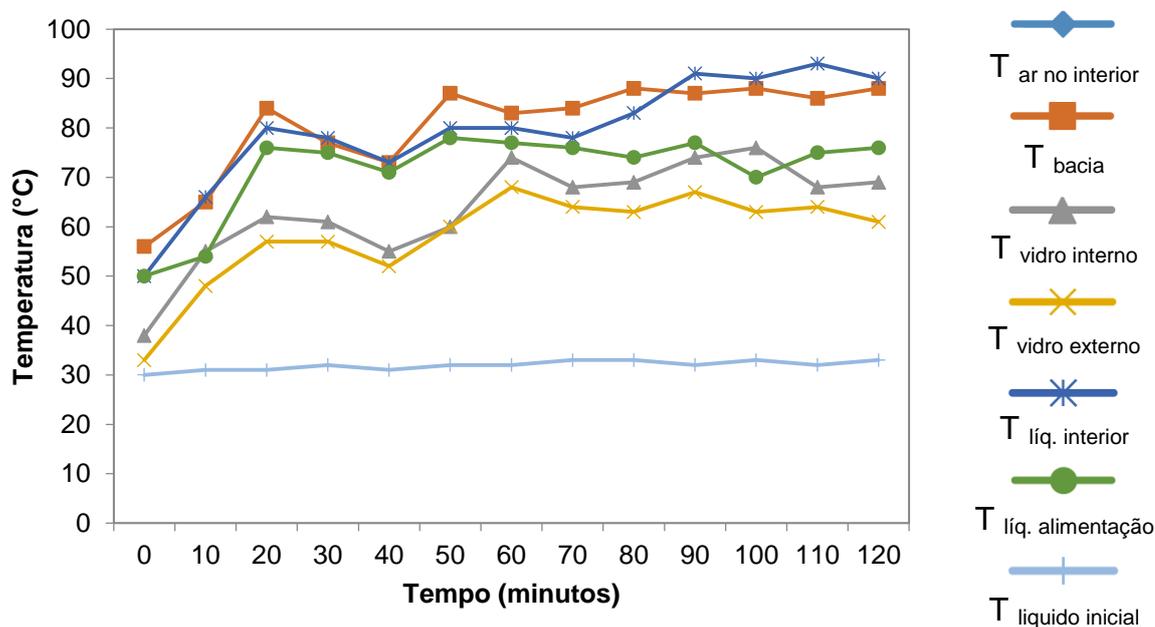
#### 4.3.4 Destilação por alimentação contínua

Os testes de destilação foram feitos nos dias 18 (Experimento 1) e 19 (Experimento 2) de dezembro de 2017, ambos tiveram início às 13:00 do horário de verão. As temperaturas relacionadas ao processo de destilação de modo contínuo são apresentadas nos gráficos das **Figuras 40 e 41**.

**Figura 40** – Temperaturas registradas para o Experimento 1.



**Figura 41** – Temperaturas registradas para o Experimento 2.



As leituras do volume de coleta de destilado realizadas nos mesmos intervalos de tempo das medidas de temperatura estão expostas na **Tabela 25** juntamente com as informações da taxa de escoamento ou vazão de destilado e da produtividade volumétrica em função do volume de destilado coletado por área útil da bacia.

**Tabela 25** – Volumes de destilado coletado nos experimentos.

Tempo (min)	Experimento 1			Experimento 2		
	Volume coletado (mL)	Taxa (mL·min <sup>-1</sup> )	Produtividade volumétrica (mL·cm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	Volume coletado (mL)	Taxa (mL·min <sup>-1</sup> )	Produtividade volumétrica (mL·cm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )
10	15	1,5	0,0444	32	3,2	0,0948
20	50	3,5	0,108	64	3,2	0,0948
30	76	2,6	0,0770	107	4,3	0,127
40	134	5,8	0,171	148	4,1	0,121
50	154	2	0,0592	171	2,3	0,0678
60	180	2,6	0,0768	218	3,9	0,139
70	214	3,4	0,101	260	5	0,124
80	249	3,5	0,104	316	4,6	0,165
90	312	6,3	0,186	348	4,2	0,0948
100	340	2,8	0,0828	370	2,2	0,0654
110	385	4,5	0,133	422	3,7	0,154
120	421	3,6	0,107	455	4,8	0,0978

(FONTE: DO AUTOR (2018))

A **Tabela 26** correlaciona as informações da **Tabela 25** com os dados das condições meteorológicas nos instantes em que as medidas foram realizadas. Os dados foram obtidos pelo *website* do INMET para a data e hora do experimento.

**Tabela 26** – Condições meteorológicas e volumes de destilado obtidos.

<b>Experimento 1</b>				
<b>Tempo</b> (min)	<b>Velocidade do vento</b> (m·s <sup>-1</sup> )	<b>Radiação</b> (kJ·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	<b>Taxa</b> (mL·min <sup>-1</sup> )	<b>Produtividade volumétrica</b> (mL·cm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )
10	3,4	3044	1,5	0,0444
60	3,4	3360	2,6	0,0768
120	4	3977	3,6	0,107
<b>Experimento 2</b>				
<b>Tempo</b> (min)	<b>Velocidade do vento</b> (m·s <sup>-1</sup> )	<b>Radiação</b> (kJ·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	<b>Taxa</b> (mL·min <sup>-1</sup> )	<b>Produtividade volumétrica</b> (mL·cm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )
10	4,4	3087	3,2	0,0948
60	3,5	3305	3,9	0,139
120	2,7	3209	4,8	0,0978

(FONTE: DO AUTOR (2018))

A taxa média de coleta encontrada para o Experimento 1 foi de 3,50 mL/min e para o Experimento 2 de 3,79 mL/min. Embora as médias das velocidades do vento e da radiação tenham-se mostrado menores para o experimento 2, cuja produtividade mostrou-se maior, este não deve ser considerado como único parâmetro determinante, uma vez que os dados meteorológicos podem ser obtidos a cada uma hora. Entretanto, por uma análise direta da **Tabela 26**, é possível observar uma congruência entre os valores obtidos, pois à medida que a taxa de radiação aumenta, há um aumento na produtividade, conforme também observado nos experimentos em batelada, relatadas nas **Figuras 38 e 39**.

#### 4.3.4.1 Rendimento global da destilação contínua

A **Tabela 27** apresenta o volume total de destilado obtido nos dois experimentos. Embora os valores obtidos tenham-se mostrado menores do que o experimento em batelada, cujo rendimento alcançou um máximo de 84,2% de coleta, é importante ressaltar que os testes em regime contínuo foram realizados em tempo de operação bem menores do que o processo em batelada, na qual a duração chegou a uma média de 4h para destilar uma mesma quantidade aproximada de líquido.

**Tabela 27** – Rendimento global da destilação contínua.

	Volume inicial (mL)	Volume adicionado (mL)	Volume final (mL)	Rendimento (%)
Experimento 1	324	360	486	71,052
Experimento 2	324	360	517	75,585

(FONTE: DO AUTOR (2018))

#### 4.3.3.2 Eficiência do destilador com operação contínua

Os valores apresentados pela **Tabela 28** mostram que a eficiência térmica do destilador, operando com alimentação contínua, aumentou consideravelmente quando comparados aos valores obtidos para a destilação em batelada, cuja eficiência máxima alcançou 26,86%, o que permite interpretar que o controle da espessura de líquido ideal para o processo favorece a taxa de evaporação.

**Tabela 28** – Eficiência térmica do destilador operando em regime contínuo.

	Taxa (mL·m <sup>-1</sup> )	Radiação média (kJ·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	Produtividade volumétrica média (mL·cm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	Eficiência (%)
Experimento 1	3,508	3460	0,104	34,530
Experimento 2	3,79	3200	0,112	44,226

(FONTE: DO AUTOR (2018))

A produtividade média encontrada para o experimento em regime contínuo foi de  $0,108 \text{ mL}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , enquanto para o experimento em batelada alcançou uma média de  $0,0654 \text{ mL}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . Quanto às eficiências, embora os valores tenham alcançado números diferentes, os resultados encontrados ainda estão previstos de acordo com as literaturas visitadas (MCCRACKEN, 1985, apud MALUF, 2005; BEZERRA, 1998).

## 5 CONCLUSÃO

Sobre os concentradores solares e o processo de extração, foi possível concluir que:

- O uso de dispositivos solares para o aquecimento de fluidos já se configuram como um modelo amplamente difundido, estudado e consolidado, dentro e fora das universidades. Os protótipos desenvolvidos pelas instituições de ensino e centros de pesquisa abrem uma gama das mais diversas possíveis aplicações, sobretudo, utilizando equipamentos construídos de maneira alternativa, que instigam a pesquisa e obstam os altos custos para aquisição de equipamentos como esses já prontos e comercializados;
- Entre os concentradores, na extração do amendoim, o CSBDL apresentou um rendimento 15,34% maior quando comparado ao CSCP para a vazão de 25 mL/min. Tal valor deve-se ao fato do matriz-graxa estar contida dentro do próprio leito absorvedor, desta maneira, as partículas do amendoim também receberam calor enquanto eram submetidos ao processo de extração.
- Com um rendimento de 88,38% para a extração do óleo de amendoim no CSBDL, o processo de extração de óleos vegetais utilizando concentradores solares, configurou-se como uma alternativa sustentável a outros métodos por fornecer energia a um processo de extração, cuja fonte é limpa, barata, renovável e abundante;
- A unidade experimental empregada na extração do óleo de coco obteve uma eficiência de 70,88% para a menor granulometria avaliada. Embora o resultado não represente uma eficiência suficientemente elevada, é preciso salientar que o processo de extração é realizado de maneira alternativa, e o gasto energético envolvido é mínimo. Além disso, a eficiência do processo utilizando o concentrador solar foi contrastada com o método Soxhlet, em que se utilizou o hexano.

- Nos testes de extração com o baru, a melhor eficiência alcançada atingiu 89,24% para a menor granulometria avaliada. O valor foi calculado a partir do rendimento do teor de óleo obtido no Soxhlet empregando o mesmo solvente utilizado no concentrador solar. O valor atingido é no mínimo satisfatoriamente significativo, uma vez que, embora não seja uma eficiência absoluta, é preciso destacar as diferenças de transferência de massa e gasto energético entre os dois processos.
- A substituição do polímero plástico PET pelo vidro, utilizado como invólucro do leito na unidade do CSBDL, garantiu não só maior durabilidade do material, retirando a necessidade de constantes trocas do mesmo, como também incrementou maiores taxas de temperatura, uma vez que o vidro retém mais calor, e, por fim, permitiu a adição de novos registros de temperatura para as superfícies interna e externa do material estufa, possibilitando um melhor monitoramento do perfil destas temperaturas.
- Dentro das condições experimentais analisadas, o álcool etílico, configurou-se como uma alternativa a outros solventes extratores de óleos e gorduras. Além de sua disponibilidade ser maior, sua utilização para esse fim já é bem difundida na literatura e os dois concentradores solares registraram as temperaturas devidas para operar este solvente.
- Com relação às variáveis analisadas, pode-se concluir que a vazão que obteve um melhor rendimento foi a vazão de 25 mL/min. Mostrando-se como um bom coeficiente convectivo de transferência de massa, por fornecer a hidrodinâmica necessária ao processo e manter uma boa temperatura de operação que favorecesse uma solubilização do solvente no óleo. A respeito dos diâmetros médios de partícula analisados, os que obtiveram melhores rendimentos foram os menores diâmetros, de 0,69 mm para o coco e 1,59 mm para o baru, em função da maior superfície de contato, que favorece a extração do óleo pelo solvente;

- A aplicação dos conceitos explorados neste trabalho podem beneficiar cooperativas ou comunidades que retiram da natureza sua fonte de renda, implantando tecnologias que incrementem suas rendas através da comercialização de produtos de maior valor agregado, desde que, os preceitos para a tecnificação do processo acompanhem um baixo custo de implementação e seja acessível quanto à execução.
- Destaca-se também que os custos com a construção de ambos os concentradores podem ser ainda reduzidos se utilizados materiais mais simples, como por exemplo: a estrutura concentradora do CSBDL pode ser feita em papelão e na superfície refletora pode ser utilizado papel laminado prata, comercializados em papelaria; a bomba peristáltica empregada também pode ser substituída por um equipo macrogotas de infusão gravitacional adquirido em farmácias.
- Apesar de ter como desvantagem a necessidade de alta incidência de raios solares e um longo tempo de baixa nebulosidade, assim como qualquer outro processo utilizando energia solar, os concentradores solares considerados no trabalho possuem uma alta versatilidade, podendo ser empregados, na secagem de alimentos, como forno solar, no aquecimento de água (se acoplado a um reservatório térmico) e na extração de inúmeras outras oleaginosas;

Sobre o processo de destilação solar e o destilador solar construído, foi possível concluir que:

- A tecnologia de construção de destiladores do tipo tanque raso mostra-se acessível quanto à elaboração, o custo e a operação. Apesar de esse sistema ser bem difundido para processos relacionados à destilação da água, o destilador solar apresentou-se suficientemente operativo para se trabalhar com a separação da mistura óleo-álcool. Na literatura é possível verificar que

está técnica já foi testada por LONGHIN *et al.* (2009) para tratamento de resíduos químicos laboratoriais em pequena escala.

- A proposta de construção do destilador solar de duas vertentes atendeu aos requisitos quanto à recuperação do solvente empregado na extração dos óleos vegetais apresentando um rendimento global máximo de 84,2% para o processo em batelada. Neste sentido, ambos os processos, de extração e destilação, caracterizam-se por utilizarem o sol como fonte de energia denotando processos limpos, sustentáveis e baratos.
- Dentre os experimentos realizados em batelada, concluiu-se que, a melhor espessura de líquido de solvente dentro da bacia foi em torno de 0,16 cm, esta espessura garantiu a melhor taxa de evaporação a partir dos dados experimentais obtidos pela coleta do destilado.
- A incorporação do sistema de destilação solar por alimentação contínua aumentou substancialmente a eficiência energética do processo, que passou de 26,86%, em batelada, para 44,22% por alimentação contínua devido ao controle da espessura de líquido no interior da bacia, tal condição favorece a melhores taxas de evaporação e, portanto, menores tempos de operação.
- Visto como um todo, o processo de destilação solar, além de aproveitar as condições naturais de energia, minimiza os efeitos de geração de resíduos pela possibilidade do reaproveitamento do solvente aumentando ainda mais o viés sustentável do processo.

## 6 REFERÊNCIAS

ALDABÓ, R. **Energia Eólica**. São Paulo: Artliber, 2002.

AL-HAYEK, I.; BADRAN, O. O. The effect of using different designs of solar stills on water distillation. **Desalination**. v.169, n.2, p.121-127, 2004.

ALMEIDA, G. S. M. **Pesquisa e Desenvolvimento de um Sistema Termoelétrico do tipo Linear Fresnel Reflector**. 2013. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis – Conversão Elétrica e Utilização Sustentável) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

ALMEIDA, S. P. Frutas nativas do Cerrado: caracterização físico-química e fonte potencial de nutrientes. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (Ed.). **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina: Embrapa-CPAC, p. 247-281, 1998.

ALMEIDA, S. P.; SILVA, J. A.; RIBEIRO, J. F. Aproveitamento alimentar de espécies nativas dos cerrados: araticum, baru, cagaita e jatoba. **Embrapa Cerrados-Documentos (INFOTECA-E)**, 1987.

AMRI, I. N. The lauric (coconut and palm kernel) oils. **Vegetable oils in food technology: composition, properties and uses, 2nd edn**. Wiley-Blackwell, Oxford, p. 169-198, 2011.

ANDRADE, L. A. **Aproveitamento do caroço de manga: um estudo de viabilidade da pirólise usando energia solar**. 2015. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

ANDRADE, M. H. C.; VIEIRA, A. S.; AGUIAR, H. F.; CHAVES, J. F. N.; NEVES, R. M. P. S.; MIRANDA, T. L. S.; SALUM, A. Óleo do fruto da palmeira macaúba parte I: uma aplicação potencial para indústrias de alimentos, fármacos e cosméticos. **Anais do II ENBTEQ-Encontro Brasileiro sobre Tecnologia na Indústria Química**, p. 17-19, 2006.

ANDRADE, P. M. M., CARMO, M. G. T. Ácidos graxos n-3: um link entre eicosanóides, inflamação e imunidade. **MN-metabolic**, v. 8, n. 3, p. 32-35, 2006.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2 ed. Brasília: ANEEL, 2005.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3 ed. Brasília: ANEEL, 2008.

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução RDC nº 482**, de 23 de setembro de 1999.

ARAGÃO, W. M.; OLIVEIRA, A. A.; LEAL, E. C.; DONALD, E. R. C.; FONTES, H. R.; LEAL, M. L. S.; MELO, M. F. Cocos nucifera L. **EMBRAPA Tabuleiros Costeiros**, Aracaju - SE, 1993, 44p. EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, Circular Técnica n.1.

ARAÚJO, G. S. **Produção de biodiesel a partir de óleo de coco (Cocos nucifera L.)**. 2008. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

ARAÚJO, W. G.; SOBREIRA, G. F. Farelo de amendoim na alimentação de não ruminantes. **Eletrônicanutime**, v. 5, n. 2, p. 546-557, 2008.

ARORA, R.; CHAWLA, R.; MARWAH, R.; ARORA, P.; SHARMA, R. K.; KAUSHIK, V.; BHARDWAJ, J. R. Potential of complementary and alternative medicine in preventive management of novel H1N1 flu (Swine flu) pandemic: thwarting potential disasters in the Bud. **Evidence-Based complementary and alternative medicine**. 2011.

ARSLAN, M. Experimental investigation of still performance for different active solar still designs under closed cycle mode. **Desalination**. v. 307, p. 9-19, 2012.

BALACHANDRAN, F. M.; ARUMUGHAN, C.; MATHEW, A. G. Distribution of major chemical constituents and fatty acids in different regions of coconut endosperm. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 62, n. 11, p. 1583-1586, 1985.

BARBOSA, A. **Avaliação de um sistema de colunas de leito fixo utilizando xisto retornado e pó da casca de coco para remoção de óleos e graxas e arsênio de efluente industrial**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BARREIROS, A. L. B. S.; BARREIROS M. L. **Química de biomoléculas**. São Cristóvão: CESAD, 2012.

BARROS, M. A. G. Flora medicinal do Distrito Federal. **Brasil Florestal**, Brasília, DF, v. 12, n. 50, p. 35-45, 1982.

BEZERRA, A. M. **Aplicações Térmicas da Energia Solar**. Editora Universitária. Terceira Edição, João Pessoa, 1998.

BEZERRA, A. M. dos S. **Desenvolvimento de um destilador solar para tratamento de águas de produção de petróleo com vistas a sua utilização na agricultura e geração de vapor**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Centro Tecnológico, Departamento Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

BIANCHINI, H. M. **Avaliação Comparativa de Sistemas de Energia Solar Térmica**. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2013.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

BONTEMPO, M. **O poder medicinal do coco e óleo de coco extra virgem**. 1.ed. São Paulo: Alaúde Editorial, 2008.

BOSS, E. A. **Análise do desempenho de plantas de extração de óleos convencionais e de processos supercríticos**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BRUM, A. A. S.; ARRUDA, L. F.; REGITANO-D'ARCE, M. A. B. Métodos de extração e qualidade da fração lipídica de matérias-primas de origem vegetal e animal. **Química Nova**, v. 32, n. 4, p.849-854, 2009.

CAMPOS, I. Biodiesel e Biomassa: duas fontes para o Brasil. **Revista Eco 21**. a. 8, 80. ed., 2003.

CANAPI, E. C.; AUGUSTIN, Y. T. V.; MORO, E. A.; PEDROSA JR, E.; BENDAÑO, M. L., 2005. Coconut Oil. In: **Bailey's industrial oil products**. 6th Edition, Volume 1 - Edible Oil and Fat Products: Chemistry, Properties, and Health Effects. Shahidi, F. (Ed). Wiley-Interscience

CANAVARRO, D. C. S. **Modelização de campos de colectores solares lineares do tipo Fresnel: aplicação a um concentrador inovador do tipo CLFR**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física Tecnológica) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

CAPELLINI, M. C. **Extração de Óleo de Farelo de Arroz utilizando Solventes Alcoólicos: Avaliação de Alterações na Fração Proteica e na Composição do Óleo**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga.

CARBONO Brasil. **Revista Primeiro Plano**. v. 2, n.9, p.28-37, 2008.

CARNEIRO, M. S. **Influência do espaçamento no desenvolvimento do amendoim, cultivar Runner IAC 886**. 2006. Dissertação. (Graduação em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

CARPO, B. G.; VERALLO-ROWELL, V. M.; KABARA, J. Novel antibacterial activity of monolaurin compared with conventional antibiotics against organisms from skin infections: an in vitro study. **Journal of drugs in dermatology: JDD**, v. 6, n. 10, p. 991-998, 2007.

CARVALHO, L. C. C. Álcool do Brasil: energia limpa e renovável. **Agroanalysis**, São Paulo, FGV, v. 21, n. 9, set, 2001.

CASTRO, M. D. L.; GARCÍA-AYUSO, L. E. Soxhlet extraction of solid materials: an outdated technique with a promising innovative future. **Analytica Chimica Acta**. v. 369, n. 1-2, p.1-10, 1998.

CAVALCANTE, A. K.; SOUZA, L. B.; HAMAWAKI, Osvaldo T. Determinação e Avaliação do Teor de Óleo em Sementes de Soja pelos Métodos de Ressonância Magnética Nuclear e Soxhlet. **Bioscience Journal**. v. 27, n. 1, p. 8-15, 2011.

CHACÓN, J. M.; LEAL, M. T.; SÁNCHEZ, M.; BANDALA, E. R. Solar photocatalytic degradation of azo-dyes by photo-Fenton process. **Dyes and pigments**, v. 69, n. 3, p. 144-150, 2006.

CHAN, E.; ELEVITCH, C. R. Cocos nucifera (coconut). **Species profiles for Pacific Island agroforestry**, v. 2, p. 1-27, 2006.

CHAVES, L. I. **Microgeração de energia elétrica com gás de síntese de um gaseificador concorrente utilizando Mazilaurus Itaúba**. 2012. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura). Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná.

CORRÊA, G. C.; NAVES, R. V.; ROCHA, M. R. D.; ZICA, L. F. Caracterização física de frutos de baru (*Dipteryx alata* Vog.) em três populações nos cerrados do Estado de Goiás. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 30, n. 2, p. 5-11, 2000.

CORRÊA, M. P. **Dicionário de plantas úteis do Brasil e das exóticas cultivadas**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura. v. 1. 1931.

CORREIA, I. M. S. **Extração e pirólise do óleo de girassol (*Helianthus annuus* L.) visando a produção de biocombustíveis**. 2009. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

COSTA, B. J.; ZAGONEL, G. F. Potencial do óleo do amendoim como fonte de biodiesel. In: SANTOS, R. C.; FREIRE, R. M. M.; SUASSUNA, T. M. F. **Amendoim: o produtor pergunta, a EMBRAPA responde**. Brasília: EMBRAPA, 2009, p. 211-220.

COSTA, C. G. **Destilação solar: aplicação no tratamento de efluentes líquidos de laboratórios**. 2008. 63 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

CRUZ, C. E. M. **Dessalinização da água do mar através da energia solar – Caso de estudo: Salamansa-Cabo Verde**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade do Algarve, Faro.

CUNHA, P. C. R.; SANTOS, K. G.; URIAS, P. M.; ARAÚJO, K. S. Projeto e construção de um concentrador cilíndrico parabólico para aquecimento de fluidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 5., 2014, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: IBEAS, 2014, p. 24-27.

DAGOSTIN, J. L. A. **Estudo da extração etanólica de óleo de soja utilizando ésteres como co-solventes**. 2015. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

DAHLSTROM, D. A.; BENNETT, R. C.; EMMETT, R. C.; HARRIOTT, P.; LAROS, T.; LEUNG, W.; MCCLEARY, C.; MILLER, S. A.; MOREY, B.; OLDSHUE, J. Y.; PRIDAY, G.; SILVERBLATT, C. E.; SLOTTEE, J. S.; SMITH, J. C.; TODD, D. B. Liquid-solids operation and equipment. In: PENY, R. H.; GREEN, D. W. (eds) **Perry's Chemical Engineer's Handbook**. 7. ed. Nova York: McGraw Hill, p. 1-59, 1997.

DANIELS, F. **Uso Directo de la Energia Solar**. Madrid: H. Blume Ediciones, 1982. 306 p.

DAUTEL, H.; HILKER, M.; KAHL, O.; SIEMS, K. Verwendung von Dodecansäureals Zeckenrepellent. **Patentschrift DE**, v. 199, n. 25, p. 838, 2001.

DE OLIVEIRA, A. G. S.; FERNANDES, D. C.; ALVES, A. M.; FREITAS, J. B.; NAVES, M. M. V. Nutritional quality and protein value of exotic almonds and nut from the Brazilian Savanna compared to peanut. **Food Research International**, Barking, v. 44, n. 7, p. 2319-2325, 2011.

DEBMANDAL, M.; MANDAL, S. Coconut (Cocos nucifera L.: Arecaceae): in health promotion and disease prevention. **Asian Pacific Journal of Tropical Medicine**, v. 4, n. 3, p. 241-247, 2011.

DIB, E. A. **Projeto e Construção de um Concentrador Solar de Foco Fixo Utilizado para o Aquecimento de um Forno**. 2009. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, Aracaju, 2009.

DIENSTMANN, G. **Energia solar – uma comparação de tecnologias**. 2009. 92 p. Projeto de diplomação – Departamento de Engenharia elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2009

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 3. ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2006.

DURSUN, D.; SENGUL, F. Waste minimization study in a solvent-based paint manufacturing plant. **Resources Conservation & Recycling**. v.47, n. 4, p. 316-331, 2006.

FARIA, E. V.; ALVES, I. F. B.; ARAÚJO, B. S. A.; BONTEMPO, L. H. S.; LIMA, M. N.; OLIVEIRA, L. C. C. B. Desenvolvimento e construção de um destilador solar para dessalinização de água salgada em diferentes concentrações de sais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 37., 2015, São Carlos. **Anais...** 2015, São Carlos: UFSCAR, 2015.

FERREIRA, J. L. S. **Cobertura vegetal, teor de óleo e produtividade de linhagens interespecíficas de amendoim no sudoeste de Goiás**. 2015. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Produção Vegetal) - Universidade Federal de Goiás, Jataí.

FERREIRA, J. M. S.; WAREICK, D. R. N.; SIQUEIRA, L. A. **Cultura do coqueiro no Brasil**. Aracaju: EMBRAPA-SPI, 1994.

FERREIRA, M. B. Plantas portadoras de substâncias medicamentosas, de uso popular, nos cerrados de Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 6, n. 61, p. 19-23, 1980.

FIEDLER, N. C.; SOARES, T. S.; SILVA, G. F. Produtos florestais não madeireiros: importância e manejo sustentável da floresta. **RECEN-Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 10, n. 2, p. 263-278, 2008.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Year book. 2013**. Disponível em: <[fao.org/docrep/018/i3107e/i3107e.PDF](http://fao.org/docrep/018/i3107e/i3107e.PDF)>. Acesso em: 3 ago 2017.

FOOD INGREDIENTS BRASIL. Os lipídios e suas principais funções. **Revista Food Ingredients Brasil**, n. 37, p. 55-61, 2016.

FRANÇA, L. F. **Estudo do Aproveitamento dos Carotenos das Fibras Resultantes da Prensagem na Indústria de Óleo de Palma, pela Extração com CO<sub>2</sub> Supercrítico**. 1999. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

FREITAS, J. B. **Qualidade nutricional e valor protéico da amêndoa de baru em relação ao amendoim, castanha-de-caju e castanha-do-pará.** 2009. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

GANDHI, A. P.; JOSHI, K. C.; JHA, K.; PARIHAR, V. S.; SRIVASTAV, D. C.; RAGHUNADH, P.; KAWALKAR, J.; JAIN, S. K.; TRIPATHI, R. N. Studies on alternative solvents for the extraction of oil-I soybean. **International journal of food science & technology**, v. 38, n. 3, p. 369-375, 2003.

GARG, H.P.; MANN H.S. Effect of climatic, operational and design parameters on the year round performance of single-sloped and double-sloped solar still under Indian arid zone conditions. **Solar Energy**. v. 18, n. 2, p. 159-163, 1976.

GHINI, R. Desinfestação do solo com o uso de energia solar: solarização e coletor solar. **Embrapa Meio Ambiente-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 1997.

GIOIELLI, L. A. Óleos e Gorduras Vegetais: Composição e Tecnologia. **Revista Brasileira de Farmacognosia**. v. 5, n. 2, p.212-232, 1996.

GODOY, I. J.; MINOTTI, D.; RESENDE, P. L. **Produção de amendoim de qualidade.** Viçosa: Centro de Produções Técnicas, 2005.

GODOY, I. J.; MORAES, S. A.; KASAI, F. S.; MARTINS, A. L. M.; PEREIRA, J. C. V. N. A.; MORAES, A. R. A.; TEIXEIRA, J. P. F. Cultivares IAC de amendoim. **O Agrônômico**. v. 55, n. 1, p. 26-29, 2003.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento.** 3. ed. São Paulo: USP, 2012.

GOSWAMI, D. Y. Recent developments in photocatalytic detoxification and disinfection of water and air. In: **Proceedings of ISES Solar World Congress on CD-ROM**, Jerusalem, Israel. 1999.

GUMY, D.; RINCON, A. G.; HAJDU, R.; PULGARIN, C. Solar photocatalysis for detoxification and disinfection of water: Different types of suspended and fixed TiO<sub>2</sub> catalysts study. **Solar Energy**, v. 80, n. 10, p. 1376-1381, 2006.

GUNSTONE, F. D.; HARWOOD, J. L. Occurrence and characterisation of oils and fats. **The lipid handbook**, v. 3, p. 37-141, 2007.

HEMWIMOL, S.; PAVASANT, P.; SHOTIPRUK, A. Ultrasound-assisted extraction of anthraquinones from roots of *Morinda citrifolia*. **Ultrasonics Sonochemistry**, v.13, n. 6, p. 543-548,2006.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. **Energia e meio ambiente**. 3. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

HO, D. A.; ITO, E. A. **Projeto e Construção de Aquecedor Solar com Concentrador**. 2007. 102 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

INCROPERA, F.; DEWITT, D. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

ISMAIL, K. A. R.; LIU, C. Y. PIMENTEL, J. R. Destilador solar de álcool. In: III CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UNICAMP, vol. 2, p. 593-601, 1984.

JACOB, P. F. **Estudo do rendimento térmico de um aquecedor solar parabólico redondo para viabilidade de uso comercial e residencial**. 2016. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

JENKINS, D. J. A.; KENDALL, C. W. C.; MARCHIE, A.; PARKER, T. L.; CONNELLY, P. W.; QIAN, W.; HAIGHT, J. S.; FAULKNER, D.; VIDGEN, E.; LAPSLEY, K. G.; SPILLER, G. A. Dose response of almonds on coronary heart disease risk factors: blood lipids, oxidized low-density lipoproteins, lipoprotein(a), homocysteine, and pulmonary nitric oxide A randomized, controlled, crossover trial. **Circulation**. v. 106, n. 11, p. 1327-1332, 2002.

JOAS, L. F. K. **DROP: um destilador solar de baixa temperatura para uso doméstico**. 2014. 119 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Design – Habilitação em *Design* de Produto) - Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2014.

JOHNSON L. A.; LUSAS E. W. Comparison of alternative solvents for oil extraction. **Journal of American Oil Chemists' Society**, v. 60, n. 2, p. 229-242, 1983.

JORGE, B. M. J. **Simulação de Processos de Destilação Solar de Água Salgada**, 2011. 103 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Técnica de Lisboa – Portugal, 2011.

JORGE, N. **Química e tecnologia de óleos vegetais**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009.

KALOGIROU, S. A. **Solar energy engineering: processes and systems**. 1. ed. Estados Unidos: Academic Press, 2009.

KEMPER, T. G. Oil Extraction. In: SHAHIDI, F. (ed) **Bailey's Industrial Oil and Fat Products**. 6. ed. Nova York: Wiley-Interscience, v. 5, 2005. p. 57-98.

KODOMA, T. High-temperature solar chemistry for converting solar heat to chemical fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**. v.29, n. 6, p. 567–597, 2003.

KREIDER, J. F.; KREITH, F. **Solar energy handbook**. 1981.

LIAU, K. M.; LEE, Y. Y.; CHEN C. K.; RASOOL, A. H. An open-label pilot study to assess the efficacy and safety of virgin coconut oil in reducing visceral adiposity. **Pharmacology**. vol. 2011, p. 1-7, 2011.

LIMA, A. C.; DELPUPO, A. M.; PONTES DA SILVA, B. F.; SACRAMENTO, B. F.; MADUREIRA, C. C.; ALVARENGA, H. M.; RAMOS, H. E. A.; SILVA, J. G. F.; SCARPATTI, M. P.; ALMEIDA, P. V. D. **A energia solar no Espírito santo: tecnologias, Aplicações e oportunidades**. 1. ed. Vitória: Agência de Serviços Públicos de energia do Estado do Espírito Santo, 2013.

LIMA, J. C. R. **Efeitos dos parâmetros da extração e avaliação da qualidade física e química dos óleos de baru e amendoim**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2012.

LONGHIN, R. S.; OLIVEIRA, A. S.; MARINHO, A. R. M.; SANTOS, J. F.; NOBREGA, L. N. N.; MATA, S. J. R. Construção de destilador solar: uma proposta alternativa para separação de substâncias e aprendizagem de conceitos. In: Reunião Anual da

Sociedade Brasileira de Química, 32. 2009, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: EBQ, 2009.

LUIZ, A. M. **Como aproveitar a energia solar**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1985.

LUQUE DE CASTRO, M. D.; PRIEGO-CAPOTE, F. Soxhlet extraction: Past and present panacea. **Journal of Chromatography A**. v. 1217, n. 16, p. 2383-2389 2010.

MALATO, S.; FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, P.; MALDONADO, M. I.; BLANCO, J.; GERNJAK, W. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends. **Catalysis Today**, v. 147, n. 1, p. 1-59, 2009.

MALIK, M. A. S.; TIWARI, G. N.; KUMAR, A.; SODHA, M. S. **Solar distillation: a practical study of a wide range of stills and their optimum design, construction, and performance**. Pergamon Press, 1982.

MALUF, A. P. **Destiladores solares no Brasil**. 2005. 38 f. Monografia. (Especialização em Fontes Alternativas de Energia) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2005.

MARIN, A. M.; SIQUEIRA, E. M. A.; ARRUDA, S. F. Minerals, phytic acid and tannin contents of Eighteen fruits from the Brazilian Savanna. **International Journal of Food Science and Nutrition**, Oxford, v. 60, n.7, p.180–190, 2009.

MARINHO, F. J. L.; ROCHA, E. N.; SOUTO, E. A.; CRUZ, M. P.; TAVARES, A. C.; SANTOS, S. A.; MARCOVICZ, F. Destilador solar destinado a fornecer água potável para as famílias de agricultores de base familiar. **Revista Brasileira de Agroecologia**. v. 7, n. 3, p. 53-60, 2012.

MARTIM, A.; ASSUNÇÃO, H. F.; LIMA, T. M. Ensaio de competição para avaliar o desempenho produtivo de quatro variedades de amendoim, no sudoeste de Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODIESEL, 6., 2009, Montes Claro. **Anais...** Montes Claros, 2009.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário: O Projeto Swera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 26, n. 2, p.145-159, 2004.

MARTINS, G. A. S.; PELUZIO, J. M. Optimisation of the liquid-liquid extraction of soybean oil using a binary mixture<sup>1</sup>. **Rev. Ciênc. Agron.** v. 46, n. 1, p. 64-71, 2015.

MATTHÄUS, B. Oil Technology. In: GUPTA S. K. (ed.), **Technological Innovations in Major World Oil Crops**, Volume 2: Perspectives. Nova York (NY): Springer Science + Business Media, LLC, 2012, p. 23-92.

MAZZANI, B. **Plantas Oleaginosas**. Barcelona: Ed. Salvat. 1963.

MEIER, A.; BONALDI, E.; CELLA, G. M.; LIPINSKI, W.; WUILLEMIN, D. Solar chemical reactor technology for industrial production of lime. **Solar Energy**, v. 80, n. 10, p. 1355-1362, 2006.

MELHEM, T. S. A entrada de água na semente e de Dipteryx alata Vog. **Hoehnea**, São Paulo, v. 4, p. 33-48, 1974.

MENDES, M. F; PESSOA, F. L. P; ULLER, A. M. C. An economic evaluation based on an experimental study of the vitamin E concentration present in deodorizer distillate of soybean oil using supercritical CO<sub>2</sub>. **The Journal of Supercritical Fluids**. v. 23, n, 3, p. 257-265, 2002.

MENEZES, E. G. T. **Obtenção de óleos de sementes de frutos do cerrado utilizando diferentes processos de extração**. 2016. 318 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

MEUKAM, P.; NJOMO, D.; GBANE, A.; TOURE, S. Experimental optimization of a solar still: application to alcohol distillation. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 43, n. 12, p. 1569-1577, 2004.

MIRANDA, S. A.; SILVA, R. N.; SANTOS, K. G.; ALMEIDA, N. P. (2015). Desidratação de cebola utilizando um secador solar convectivo do tipo bandeja. In: Anais do XXXVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, Volume 2, 2015, Pages 1656-1665, ISSN 2359-1757.

Available from: <<http://dx.doi.org/10.1016/ENEMP2015-SE-560>> Accessed: 09 mar 2018.

MME – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Caracterização das oleaginosas para produção de biodiesel. In: **ESTUDO referente aos impactos ambientais na cadeia produtiva, distribuição e uso do biodiesel (2006)**. STCP Engenharia de Projetos Ltda. Disponível em: <[mma.gov.br/estruturas/sqa\\_pnla/\\_arquivos/item\\_5.pdf](http://mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/item_5.pdf)> Acesso em: 3 ago 2017.

MORALES, S.; MIRANDA, R.; BUSTOS, D.; CAZARES, T.; HONGHI, T. Solar biomass pyrolysis for the production of bio-fuels and chemical commodities. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 109, p. 65-78, 2014.

MURRAY, J. P. Aluminum production using high-temperature solar process heat. **Solar Energy**, v. 66, n. 2, p. 133-142, 1999.

NAKAGAWA, J.; ROSOLEM, C. **O amendoim: tecnologia de produção**. Botucatu: FEPAF, 2011.

NAUDÉ, Y.; DE BEER, W. H. J.; JOOSTEL, S.; VAN DER MERWEL, L.; VAN RENSBURG, S. J. Comparison of Supercritical Fluid Extraction and Soxhlet Extraction for the Determination of DDT, DDD and DDE in Sediment. **Water S.A.** v. 24, n. 3, p. 205-214, 1998.

NAVARRO, M. L. M. **Estudo da Transferência de Massa no Processo de Extração com Solvente de Óleos Vegetais em Colunas de Leito Fixo**. 2002. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2002.

NEGREIROS, I. S. **Desenvolvimento do sistema de rastreamento de um protótipo de concentrador solar fresnel linear**. 2015. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2015.

NEVIN, K. G.; RAJAMOHAN, T. Influence of virgin coconut oil on blood coagulation factors, lipid levels and LDL oxidation in cholesterol fed Sprague–Dawley rats. **European e-Journal of Clinical Nutrition and Metabolism**, v. 3, n. 1, p. e1-e8, 2008.

NEVIN, K. G.; RAJAMOHAN, T. Virgin coconut oil supplemented diet increases the antioxidant status in rats. **Food chemistry**, v. 99, n. 2, p. 260-266, 2006.

OGBOLU, D. O.; ONI, A. A.; DAINI, O. A.; OLOKO, A. P. In vitro antimicrobial properties of coconut oil on *Candida* species in Ibadan, Nigeria. **Journal of medicinal food**, v. 10, n. 2, p. 384-387, 2007.

OLIVEIRA, T. U. M. **Análise da viabilidade econômica de um sistema de aquecimento solar de água para uma empresa do setor hoteleiro**. 2011. 79 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

OYI, A. R.; ONAOLAPO, J. A.; OBI, R. C. Formulation and antimicrobial studies of coconut (*Cocos nucifera* Linne) oil. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 2, n. 2, p. 133-137, 2010.

PANTZARIS, T. P.; BASIRON, Y. The lauric (coconut and palm kernel) oils. **Vegetable oils in food technology: Composition, properties and uses**, p. 157, 2002.

PEIXOTO, A. R. **Plantas oleaginosas herbáceas**. São Paulo: Nobel, 1972.

PELKMAN, C. L.; FISHELL, V. K.; MADDOX, D. H.; PEARSON, T.A.; MANGER, D.T.; KRIS-ETHERTON, P.M. Effects of moderate-fat (from monounsaturated fat) and low-fat weight-loss diets on the serum lipid profile in overweight and obese man and women. **American Journal of Clinical Nutrition**. v. 79, n. 2, p. 204-212, 2004.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, INPE, ISBN: 978- 85-17-00030-0. São José dos Campos: PNUMA, 2006.

PEREIRA, R. W. L. **Economia de Energia na Perspectiva do Plano Nacional de Energia 2030: O papel do aquecimento solar**. 2010. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) – Universidade de Brasília, Brasília.

PETROBRAS. Hexano BR. Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos. **Nº FISPQ: BR608**. Versão: 8. 2017.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (Org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel - Cresesb, 2014.

PRADO, G. O. **Concentrador solar para dessalinização de água : projeto e construção**. 2011. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

PRETTI, T. **Tecnologia para produção de extrato aquoso de amendoim e elaboração de produto fermentado**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Estadual Paulista, Araraquara.

RABL, A. **Active Solar Collectors and Their Application**. Oxford University Press, 1. ed. 1985.

RAMALHO, H. F.; SUAREZ, P. A. Z. A Química dos Óleos e Gorduras e seus Processos de Extração e Refino. **Revista Virtual de Química**. v. 5, n. 1, p.2-15, 2012.

RAMOS, R. E. M. **Desenvolvimento de um sistema híbrido de destilação solar para tratamento de água produzida**. 2009. Dissertação (Graduação em Engenharia Química) Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

REDA, S. Y.; CARNEIRO, P. I. B. Óleos e Gorduras: Aplicações e implicações. **Revista Analytica**. n. 27, p. 60-67, 2007.

REGITANO-D'ARCE, M. A. B. Extração e refino de óleos vegetais. In: OETTERER, M.; REGITANO-D'ARCE, M. A. B.; SPOTO, M. H. F. **Fundamentos de ciência e tecnologia de alimentos**. São Paulo: Manole, 2006, p. 300-351.

REGITANO-D'ARCE, M. A. B. **Ensaio de Extração de Óleo de Girassol (*Helianthus annuus L.*) com Álcool Etílico**. 1985. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Escola Superior e Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

REGITANO-D'ARCE, M. A. B. **Extração de óleo de girassol com etanol: cinética, ácido clorogênico, fração insaponificáveis**. 1991. Dissertação (Doutorado em

Ciências dos Alimentos) - Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ŘIHÁKOVÁ, Z.; FILIP, V.; PLOCKOVÁ, M.; ŠMIDRKAL, J.; ČERVENKOVÁ, R. Inhibition of *Aspergillus niger* DMF 0801 by monoacylglycerols prepared from coconut oil. **Czech J. Food Sci**, v. 20, p. 48-52, 2002.

ROBEERTO, C. A. Cocobiodiesel. Coconut methyl ester (CME) as petrodiesel quality enhancer. **Dept. Agr. Philippine Coconut Authority**, p. 1-37, 2001.

RODRIGUES, A. Óleo de coco – milagre para emagrecer ou mais um modismo. **Abeso**, v. 56, p. 5-7, 2012.

RODRIGUES, C. E. C. **Utilização de solvente biorenovável nos processos de extração e desacidificação de óleos vegetais**. 2011. Dissertação (Livre Docência em Equilíbrio de Fases e Processos de Separação na Indústria de Alimentos) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga.

ROS, E.; NÚÑEZ, I.; PÉREZ-HERAS, A.; SERRA, M.; GILABERT, R.; CASALS, E.; DEULOFEU, R. A walnut diet improves endothelial function in hypercholesterolemic subjects: a randomized crossover trial. **Circulation**, Baltimore, v. 109, n. 13, p. 1609-1614, 2004.

SA JR, G. P. de; SANTOS, K. A.; BORBA, C. E.; SCHADECK,; RAIZER, E.; REINEHR, T. O.; Estudo da influência da granulometria na extração de óleo de nabo forrageiro (*raphanus sativus* L.) Empregando CO<sub>2</sub> supercrítico .In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA. 20. 2014, Florianópolis, **Anais...** Florianópolis: COBEQ, 2014, p. 14783-14788.

SAHENA, F.; ZAIDUL, I. S. M.; JINAP, S.; KARIM, A. A.; ABBAS, K. A.; NORULAINI, N. A. N.; OMAR, A. K. M. Application of supercritical CO<sub>2</sub> in lipid extraction – A review. **Journal of Food Engineering**. v. 95, n. 2, p 240-253, 2009.

SAMARAM, S., MERHSSEINI, H., TAN, C. P., GHAZALI, H. M., BORDBAR, S., SERJOUUIE. Optimization of ultrasound-assisted extraction of oil from papaya seed by response surface methodology: Oil recovery, radical scavenging antioxidant activity, and oxidation stability. **Food Chemistry**. v. 172, p. 7-17, 2015.

SANO, S. M.; RIBEIRO, J. F.; BRITO, M. A. Baru: biologia e uso. **Embrapa Cerrados-Documentos (INFOTECA-E)**, 2004.

SANTOS, E. R. M. **Extração, caracterização e avaliação bioativa do extrato de Rumex acetosa**. 2013. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SANTOS, R. C.; MELO FILHO, P. A.; BRITO, S. F. M.; MORAES, J. S. Fenologia de genótipos de amendoim dos tipos botânicos Valência e Virgínia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 32, n. 6, p. 607-612, 1997.

SANTOS, R. P. **Evaporação solar de água produzida de petróleo**. 2008. Dissertação (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

SARAIVA, S. A. **Caracterização de matérias-primas e produtos derivados de origem graxa por espectrometria de massas**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SAWADA, M. M. **Estudo da viabilidade técnica da substituição de hexano por etanol no processo de extração de óleo de soja: cinética de extração e índices de qualidade**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga.

SCHARLACK, N. K. **Estudo do efeito do tipo e grau de hidratação de solventes alcoólicos na extração simultânea de óleo e de ácidos clorogênicos de torta de sementes de girassol**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga.

SKOOG, D. A.; HOLLER, J.; NIEMAN, T. A. **Princípios da Análise Instrumental**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

SOARES C. **Tratamento de Água Unifamiliar através da Destilação Solar Natural Utilizando Água Salgada, Salobra e Doce Contaminada**. 2004. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2004.

SOBRAL, J. P. **Composição química e digestibilidade do farelo de coco**. 1976. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1976.

SOLOMONS, T.W.; FRYHLE, C.B. **Química Orgânica I**. 8. ed., v. 1. Rio de Janeiro: LTC. 2005.

SOUSA, E. M. B. D. **Construção e utilização de um dispositivo de extração com fluido pressurizado, aplicado a produtos naturais**. 2001. 195 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2001.

SOUSA, M. A. S. B. **Study of solar distillation feasibility for treating of oilfield produced water**. 2010. 149 f. Tese (Doutorado em Pesquisa e Desenvolvimento de Tecnologias Regionais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

SOUZA, P. A. F. **Recuperação do solvente dos resíduos do processo de pintura na indústria moveleira**. 2009. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

TAKEMOTO, E.; OKADA, I. A.; GARBELOTTI, M. L.; TAVARES, M.; AUED-PIMENTEL, S. Composição química da semente e do óleo de baru (*Dipteryx alata* Vog.) nativo do município de Pirenópolis, Estado de Goiás. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**. v. 60, n. 2, p. 113–117, 2001.

TALBERT, S. G.; EIBLING, J. A.; LOF, G. O. G. **Manual on solar distillation of saline water**. Battelle Columbus Labs., Ohio (USA), 1970.

TASSO JUNIOR, L. C.; MARQUES, M. O.; NOGUEIRA, G. A. **A Cultura do Amendoim**. Jaboticabal: UNESP, 2004.

TAVARES, F. P.; SANTOS, K. G. Projeto e construção de um Concentrador Solar Biangular de Doze Lados aplicado à extração sólido-líquido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 6., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: CBENS, 2016a.

TAVARES, F. P.; SANTOS, K. G. Extração sustentável de óleo de pinhão manso com solvente aquecido por radiação solar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 6., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: CBENS, 2016b.

TAVARES, F. P.; SANTOS, K. G. Extração por solvente de óleo de amendoim empregando energia solar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 21., 2016, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: CBEQ, 2016c.

TAVARES, M. Aprendendo sobre o Sol. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 22, n. 1, p. 78-82, 2000.

THOMAS, G. C. **Análise Teórico-Experimental da Extração de Óleo de Soja em Instalação Industrial do Tipo Rotocell**. 2003. 139 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.

TIWARI, A. K., TIWARI, G. N. Thermal Modeling Based on Solar Fraction and Experimental Study of the Annual and Seasonal Performance of a Single Slope Passive Solar Still: The Effect of Water Depths. **Desalination**. v. 207, n. 1-3, p. 184-204, 2007.

TOGASHI, M.; SGARBIERI, V. C. Caracterização química parcial do fruto do baru (*Dipteryx alata*, Vog.). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 14, n. 1, p. 85-95, 1994.

TOMAZIN JUNIOR, C. **Extração de óleo de soja com etanol e transesterificação etílica na miscela**. 2008. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2008.

TORRI, J. B. **Dessalinização de água salobra e/ou salgada: métodos, custos e aplicações**. 2015. 43 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2015.

URIAS, P. M.; ARAÚJO, K. S.; CUNHA, P. C. R.; SANTOS, K. G. Concentrador solar biangular de doze lados: método alternativo para extração de óleo a partir da semente de Pinhão Manso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO

AMBIENTAL, 5., 2014, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: IBEAS, 2014, p. 1-22.

VALLILO, M. I.; TAVARES, M.; AUED, S. Composição química da polpa e da semente do fruto do cumbaru (*Dipteryx alata* Vog.) - caracterização do óleo da semente. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v.2, n.2, p.115-125, dez. 1990.

VASCONCELLOS, L. E. M.; LIMBERGER, M. A. C. **Energia Solar para aquecimento de água no Brasil**. Rio de Janeiro: Eletrobrás Procel, 2012.

VERA, R.; SOARES JR, M. S.; NAVES, R. V.; SOUZA, E. D.; FERNANDES, E. P.; CALIARI, M.; LEANDRO, W. M. Características químicas de amêndoas de barueiros (*Dipteryx alata* Vog.) de ocorrência natural no Cerrado do Estado de Goiás, Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 31, n. 1, p. 118-112, 2009.

VERA, R.; SOUZA, E. R. B. Barú. **Rev. Bras. Frutic.** v. 31, n. 1, p. 001-295, 2009.

WUNDER, S. **Value determinants of plant extractivism in Brazil**. Rio de Janeiro: IPEA, 1998.

YALDÝZ, O.; ERTEKÝN, C. Thin layer solar drying of some vegetables. **Drying Technology**, v. 19, n. 3-4, p. 583-597, 2001.

YOUNG, F. V. K. Palm kernel and coconut oils: analytical characteristics, process technology and uses. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 60, n. 2, p. 374-379, 1983.

ZENG, K.; MINH, D. P.; GAUTHIER, D., WEISS-HORTALA, E.; NZIHOU, A.; FLAMANT, G. The effect of temperature and heating rate on char properties obtained from solar pyrolysis of beech wood. **Bioresource technology**, v. 182, p. 114-119, 2015.

ZULLO, M. A. T.; GODOY, I. J.; MORAES, S. A.; PEREIRA, J. C. V. N. A. Produtividade e qualidade do óleo de linhagens do amendoim. **Bragantia**. v. 2, n. 52, p.105-112, 1993.