



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**



**MARIA MAYARA DE SOUZA GRILO**

**ANÁLISES TERMODINÂMICA, AMBIENTAL E ECONÔMICA DE  
UMA BOMBA DE CALOR PARA SECAGEM DE ALIMENTOS**

**JOÃO PESSOA - PB**  
**2017**

**PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / N° 18**

**MARIA MAYARA DE SOUZA GRILO**

**ANÁLISES TERMODINÂMICA, AMBIENTAL E ECONÔMICA DE UMA  
BOMBA DE CALOR PARA SECAGEM DE ALIMENTOS**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal da Paraíba, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Energias Renováveis  
do Centro de Energias Alternativas e  
Renováveis, área de concentração  
energias renováveis, para a obtenção do  
título de Mestre.

Orientadora  
Prof.<sup>a</sup> Monica Carvalho, PhD

Coorientador  
Prof. Dr. Júlio Augusto Mendes da Silva

**JOÃO PESSOA - PB  
2017**

G858a Grilo, Maria Mayara de Souza.

Análises termodinâmica, ambiental e econômica de uma bomba de calor para secagem de alimentos/ Maria Mayara de Souza Grilo – João Pessoa, 2017.

111 f. : il.-

Orientador: Prof.<sup>a</sup> Monica Carvalho.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Energias Renováveis. 2. Secagem de alimentos. 3. Bomba de Calor. 4. Termodinâmica. I. Título.

UFPB/BC

CDU – 620.91(043)

MARIA MAYARA DE SOUZA GRILO

**ANÁLISES TERMODINÂMICA, AMBIENTAL E ECONÔMICA DE UMA  
BOMBA DE CALOR PARA SECAGEM DE ALIMENTOS**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal da Paraíba, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Energias Renováveis  
do Centro de Energias Alternativas e  
Renováveis, área de concentração em  
energias renováveis para a obtenção do  
título de Mestre.

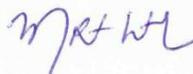
APROVADA em 23 de Fevereiro de 2017.

Membros da Banca

Prof. Dr. Romberg Rodrigues Gondim

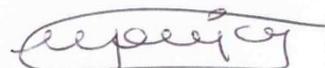
UFPB

Prof. Dr. Marçal Rosas Florentino Lima Filho



UFPB

Orientadora  
Prof.<sup>a</sup>. Monica Carvalho, PhD



Coorientador  
Prof. Dr. Júlio Augusto Mendes da Silva

**JOÃO PESSOA - PB  
2017**

Dedico aos meus filhos, Davi, Arthur e  
Maria Clara.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ser o condutor da minha vida, sempre me fortalecendo e mostrando os caminhos a seguir.

Ao meu esposo Fernando Lázaro e meus filhos Davi, Arthur e Maria Clara pelo amor, carinho, incentivo, paciência, colaboração e compreensão em todos os momentos.

Aos meus pais Antônio Carlos e Maria da Glória e minha Tia Oneide, pelo amor, paciência, inspiração, compreensão, incentivo e por cuidarem tão bem dos meus filhos.

Ao meu irmão Claver Miller, pelo amor, apoio, incentivo, conselhos e companheirismo.

A Prof.<sup>a</sup> Dra. Monica Carvalho, pela orientação, amizade, conhecimento semeado e todo incentivo para que este trabalho fosse realizado.

Ao Prof. Dr. Julio pela colaboração e contribuição.

Ao Prof. Dr. José Maurício por disponibilizar o equipamento para este estudo.

Aos membros da pré-banca Prof. Dr. João Alves e Prof. Dr. Romberg pelas contribuições e ensinamentos.

Ao Prof. Dr. Marçal pelas suas correções e contribuições para este trabalho.

A Cíntia pela amizade e todos os conselhos e sugestões sempre construtivas.

Aos meus amigos de curso Dayse e Susane pelo companheirismo, amizade em todos os momentos de alegria e sofrimento que passamos juntos.

A Anderson pela amizade, contribuição e pela parceria neste trabalho.

Aos colegas Lucilho e Allyson pela colaboração no trabalho experimental.

E a todos familiares e amigos que de alguma forma contribuíram para que eu pudesse concluir esta etapa da minha vida, muito obrigada!

## RESUMO

A maioria dos alimentos são materiais termossensíveis que quando submetidos a altas temperaturas têm suas qualidades físico químicas e sensoriais afetadas. Para obter um produto final de boa qualidade é necessário o controle preciso das condições de secagem, além da utilização de sistemas que requeiram baixo consumo de energia, possuam alto coeficiente de desempenho e eficiência térmica, e que utilizem energia limpa. A bomba de calor tem como objetivo promover a desumidificação e aquecimento do ar, por meio da transferência da energia disponível no ar de exaustão para o ar de secagem. Assim se obtém ar com baixa umidade, garantindo a qualidade do alimento por longos períodos de armazenamento. Recentemente a energia solar está sendo incorporada a bombas de calor para melhorar a eficiência térmica e reduzir os impactos ambientais associados a sua operação. Esta dissertação realizou uma revisão bibliográfica detalhada sobre bombas de calor assistidas por energia solar aplicada a secagem de alimentos, e desenvolveu análises termodinâmica, econômica e ambiental para uma configuração experimental localizada no Centro de Energias Alternativas e Renováveis da Universidade Federal da Paraíba. A análise termodinâmica foi modelada na plataforma *Engineering Equation Solver* (EES) para a bomba de calor existente, permitindo quantificar os fluxos de calor e massa que cruzam o sistema assim como determinar os coeficientes de desempenho. As análises econômica e ambiental incorporaram painéis solares para a produção de eletricidade, em comparação ao fornecimento tradicional de eletricidade pela rede elétrica. A análise de investimento econômico utilizou os parâmetros de Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL) e Período de Retorno de Capital (PRC) para comprovar a viabilidade econômica do sistema no cenário estabelecido. A análise ambiental foi desenvolvida por meio da aplicação da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), determinando a pegada de carbono. Verificou-se uma possibilidade de mitigação de mudanças climáticas com a incorporação de energia solar fotovoltaica no sistema da bomba de calor.

**Palavras chave:** bomba de calor, secagem de alimentos, termodinâmica, análise de investimentos, avaliação de ciclo de vida, energia solar.

## ABSTRACT

Most foods are thermosensitive materials that suffer modifications in physical and chemical qualities when submitted to high temperatures. It is necessary to control drying conditions to obtain a final product with high quality as well as utilize systems with low consumption of energy, high coefficient of performance and thermal efficiency, and based on clean energy sources. A heat pump promotes dehumidification and heating of air by transferring the available energy in exhaust gases to the drying/input air. Low humidity air is obtained, guaranteeing the quality of dried food products for longer periods of time. Recently, solar energy has been incorporated to heat pumps to improve thermal efficiency and reduce the environmental impacts associated with its operation. This MSc. thesis carried out a detailed literature review on heat pumps assisted by solar energy, and developed thermodynamic, economic and environmental analyses for an experimental setup located at the Center of Alternative and Renewable Energy of the Federal University of Paraíba. The thermodynamic analysis was modeled within the *Engineering Equation Solver* (EES) platform, allowing for the quantification of heat and mass flows of the system as well as the determination of performance coefficients. The economic and environmental analyses studied the effects of incorporating solar panels for the production of electricity, in comparison to the traditional electricity supply (electric grid). Economic investment analysis utilized the Internal Rate of Return (IRR), Net Present value (NPV), and Payback time to verify the economic viability of the system within the established scenario. The environmental analysis was developed through the application of the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, and determined the carbon footprint. It was verified that there is potential for mitigating climate change with the incorporation of solar photovoltaic energy to the heat pump.

**Keywords:** heat pump, food drying, thermodynamics, investment analysis, life cycle assessment, solar energy.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	15
1.1	INTRODUÇÃO .....	16
1.2	OBJETIVOS .....	17
1.2.1	Objetivo geral.....	17
1.2.2	Objetivos específicos .....	18
1.3	REFERENCIAL TEÓRICO .....	18
1.3.1	Bomba de Calor.....	19
1.3.1.1	Secagem por refrigeração .....	22
1.3.1.2	Ciclo de Refrigeração por compressão de vapor .....	23
1.3.2	Energia Solar.....	28
1.3.2.1	Energia solar fotovoltaica.....	28
1.3.3	Bomba de calor assistida por energia solar .....	30
1.3.4	Análise Termodinâmica .....	30
1.3.4.1	Análise energética.....	32
1.3.4.2	Análise exergética.....	32
1.3.5	Análise Econômica.....	33
1.3.5.1	Valor Presente Líquido (VPL).....	33
1.3.5.2	Taxa Interna de Retorno (TIR) .....	34
1.3.5.3	Período de Retorno de Capital (PRC) .....	34
1.3.6	Análise Ambiental: Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) .....	35
<b>2</b>	<b>ARTIGO 1 - BOMBA DE CALOR ASSISTIDA POR ENERGIA SOLAR APLICADA A SECAGEM DE ALIMENTOS: UMA REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>37</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	37
2.2	METODOLOGIA .....	41
2.2.1	Critérios de inclusão.....	41
2.2.2	Critérios de exclusão.....	41
2.2.3	Análise.....	41
2.3	RESULTADOS.....	42
2.4	DISCUSSÃO .....	49
2.5	CONCLUSÃO .....	51

2.6	REFERÊNCIAS .....	52
3	<b>ARTIGO 2 - ANÁLISE TERMODINÂMICA DE UMA BOMBA DE CALOR PARA DESUMIDIFICAÇÃO E AQUECIMENTO DE AR</b>	<b>55</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	55
3.2	METODOLOGIA .....	58
3.2.1	Análise termodinâmica.....	59
3.2.1.1	Análise Energética.....	61
3.2.1.2	Análise Exergética.....	62
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	63
3.3.1	Sugestões para melhorias.....	68
3.4	CONCLUSÃO .....	69
3.5	REFERÊNCIAS .....	69
4	<b>ARTIGO 3 - INCORPORAÇÃO DE ENERGIA SOLAR A UMA BOMBA DE CALOR PARA DESUMIDIFICAÇÃO E AQUECIMENTO DO AR</b>	<b>71</b>
4.1	INTRODUÇÃO .....	71
4.2	METODOLOGIA .....	72
4.2.1	A bomba de calor .....	72
4.2.2	Sistema fotovoltaico.....	73
4.2.2.1	Resolução Normativa nº482/2012 .....	74
4.2.3	Análise econômica .....	75
4.2.3.1	Valor Presente Líquido (VPL).....	75
4.2.3.2	Taxa Interna de Retorno (TIR) .....	78
4.2.3.3	Período de Retorno de Capital (PRC) .....	78
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	78
4.4	COMENTÁRIOS FINAIS .....	82
4.5	REFERÊNCIAS .....	83
5	<b>ARTIGO 4 - PEGADA DE CARBONO COMPARATIVA DO FORNECIMENTO DE ELETRICIDADE A UMA BOMBA DE CALOR PARA AS CONDIÇÕES SOLARIMÉTRICAS DE JP-PB</b>	<b>87</b>
5.1	INTRODUÇÃO .....	87
5.2	METODOLOGIA .....	89
5.2.1	Avaliação do Ciclo de Vida .....	89
5.2.2	Cenários de fornecimento de eletricidade para a bomba de calor.....	91

5.2.2.1	Mix elétrico brasileiro 2015 .....	91
5.2.2.2	Energia solar fotovoltaica.....	92
5.2.2.3	Sistema fotovoltaico vs sistema elétrico.....	92
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	93
5.4	COMENTÁRIOS FINAIS .....	96
5.5	REFERÊNCIAS.....	96
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>99</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>101</b>
<b>8</b>	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>108</b>

## LISTA DE FIGURAS

### INTRODUÇÃO GERAL

<b>Figura 1.1-</b> Esquema da bomba de calor considerando dois fluxos de massa: ar e refrigerante (R-22)	19
<b>Figura 1.2-</b> Carta psicométrica do processo de secagem	21
<b>Figura 1.3 -</b> Esboço do processo de desumidificação	23
<b>Figura 1.4 -</b> Trocador de calor do tipo aletado com as principais dimensões	24
<b>Figura 1.5 -</b> Representação do ciclo teórico de refrigeração por compressão de vapor	25
<b>Figura 1.6 -</b> Esquema da diferença entre o ciclo teórico e o ciclo real de refrigeração por compressão de vapor	27
<b>ARTIGO 1</b>	
<b>Figura 2.1 -</b> Esquema de um sistema de Bomba de Calor Assistida por Energia Solar com armazenamento de energia térmica	39
<b>Figura 2.2 -</b> Esquema de um BCAES, 1. coletor solar, 2. bomba de calor, 3. evaporador, 4. condensador, 5. diafragma móvel, 6. ventilador, 7.duto de ar, 8. duto de recirculação de ar, 9. agitador de grãos, 10. Celeiro	43
<b>Figura 2.3 -</b> Esquema de Bomba de Calor assistida por Fotovoltaico-Térmico Solar	44
<b>Figura 2.4 -</b> Programa de monitoramento de sistema de secagem BCAES	45
<b>Figura 2.5 -</b> Esquema de BCAES	46
<b>Figura 2.6 -</b> Esquema de BCAES	47
<b>Figura 2.7 -</b> Esquema de BCAES acoplado a um Forno de Biomassa	48
<b>ARTIGO 2</b>	
<b>Figura 3.1 -</b> Esquema geral da bomba de calor (ciclo aberto ou fechado)	56
<b>Figura 3.2 -</b> Gráfico do processo de secagem representado na carta psicrométrica	57
<b>Figura 3.3 -</b> Vista superior da bomba de calor e seus componentes: ventilador (1), condensador (2), compressor (3), evaporador (4) e dispositivo de expansão (5)	58
<b>Figura 3.4 -</b> Imagem lateral da bomba de calor em ciclo aberto	59
<b>Figura 3.5 -</b> Esquema da bomba de calor com os quatro volumes de controle e os estados para o R22 (A, B, C, D) e para o ar (1, 2, 3)	60
<b>Figura 3.6 -</b> Exergia destruída por volume de controle	65
<b>Figura 3.7 -</b> Formação de gelo na superfície da válvula de expansão encontrada durante o experimento de Maia (2014)	66
<b>Figura 3.8 -</b> Formação de gelo na superfície do compressor e evaporador encontrados por Leite (2015)	67
<b>ARTIGO 3</b>	
<b>Figura 4.1 -</b> Bomba de calor utilizada nos experimentos	73
<b>ARTIGO 4</b>	
<b>Figura 5.1 -</b> Percentual de geração de eletricidade, por fontes, no Brasil	92

## LISTA DE TABELAS

### ARTIGO 1

**Tabela 2.1** -Parâmetros Avaliados em BCAES Aplicados à Secagem de Alimentos 49

### ARTIGO 2

**Tabela 3.1** - Dados obtidos na bomba de calor em ciclo aberto 63

**Tabela 3.2** -Propriedades do ar e do refrigerante em diferentes localizações do sistema 63

**Tabela 3.3** - Resultado do balanço energético 64

**Tabela 3.4** - Exergias destruídas para cada volume de controle 64

### ARTIGO 3

**Tabela 4.1** - Componentes do sistema fotovoltaico para bomba de calor 74

**Tabela 4.2** - Economia anual descontada mês a mês na fatura 79

**Tabela 4.3** - Vida útil e depreciação de componentes do sistema fotovoltaico 80

**Tabela 4.4** - Fluxos de caixa descontados ao tempo zero 81

### ARTIGO 4

**Tabela 5.1** - Material e equipamento necessários para o sistema solar fotovoltaico 93

**Tabela 5.2** - Pegada de carbono associada à instalação do sistema solar fotovoltaico 94

**Tabela 5.3** - Composição percentual da pegada de carbono associada aos painéis fotovoltaicos 95

**Tabela 5.4** - Pegadas de carbono para cada cenário de fornecimento de energia a bomba de calor 95

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ACV - Avaliação de Ciclo de Vida  
BCAES - Bomba de Calor Assistida por Energia Solar  
BEN – Balanço Energético Nacional  
COP – Coeficiente de Performance  
CUF - Conteúdo de Umidade Final  
CUI - Conteúdo de Umidade Inicial  
EES - *Engineering Equation System*  
ETCS - Eficiência Térmica do Coletor Solar  
EUR - Taxa de Utilização de Energia  
GEE – Gases de Efeito Estufa  
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change  
OCDE – Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico.  
PRC - Período de Retorno de Capital  
RD - Taxa de Secagem  
SMER - Taxa Específica de Evaporação de Umidade  
TIR - Taxa Interna de Retorno  
TMA - Taxa Mínima de Atratividade  
TS - Tempo de Secagem  
VPL - Valor Presente Líquido

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

Esta dissertação será apresentada em forma de compêndio de artigos e foi organizada seguindo a seguinte estrutura:

Na introdução geral será apresentado o embasamento teórico necessário para o entendimento do tema estudado, com definições e esclarecimentos a respeito da bomba de calor, de energia solar, e das análises termodinâmica, ambiental e econômica realizadas para o dispositivo bomba de calor aplicada a secagem de alimentos.

No capítulo 2 será apresentado o primeiro artigo referente a revisão de literatura intitulado “Bomba de calor assistida por energia solar aplicada a secagem de alimentos: uma revisão de literatura”, este artigo apresenta uma síntese das principais pesquisas realizadas com temas similares e no período de 2011 a 2016 destacando a configuração das bombas de calor construídas por diversos autores e os parâmetros utilizados para medir a eficiência do sistema.

O capítulo 3 apresenta o segundo artigo “Análise termodinâmica de uma bomba de calor para desumidificação e aquecimento de ar” este artigo compreende as análises energética e exergética da bomba de calor operando em ciclo aberto construída no laboratório de energia solar do CEAR/UFPB e calcula os fluxos de energia e massa determinados e apresenta sugestões de modificação do experimento para obter uma maior eficiência energética.

O terceiro artigo, capítulo 4, tem como tema “Incorporação de energia solar a uma bomba de calor para desumidificação e aquecimento do ar”. Este artigo desenvolve uma análise de viabilidade econômica para um sistema de energia solar fotovoltaica que fornece energia elétrica para a bomba de calor. Uma empresa especializada em energias renováveis foi consultada para o dimensionamento do sistema e obtenção de valores de investimento para um sistema de energia solar fotovoltaico conectado a rede de distribuição de energia elétrica.

No capítulo 5, o quarto artigo, “Pegada de carbono comparativa do fornecimento de eletricidade a uma bomba de calor para as condições solarimétricas de JP-PB” teve como objetivo realizar a análise ambiental por meio da Avaliação do Ciclo de Vida, do sistema fotovoltaico incorporado a bomba de calor a fim de comparar a pegada de carbono deste cenário com o cenário da bomba de calor utilizando a eletricidade da rede, mix brasileiro, e verificar o potencial de mudanças climáticas.

A conclusão geral desta dissertação é apresentada do capítulo 6 e as referências bibliográficas no capítulo 7. Para finalizar, o Apêndice 1 (Capítulo 8) apresenta o código computacional desenvolvido no software *Engineering Equation Solver* (EES).

## 1.1 INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento populacional e a globalização têm contribuído para o aumento do consumo de energia no Brasil e no mundo. O Brasil é o país com maior participação de energias renováveis na sua matriz energética comparado com o mundo e os países da OCDE, esta alta participação se dá pelo fato do Brasil utilizar as hidrelétricas como principal fornecedor de energia elétrica (BRASIL, 2015). Entretanto, o Brasil tem passado por períodos de secas extensos fazendo o uso de termoelétricas para suprir a demanda de energia. O Balanço Nacional de Energia (BEN) do ano de 2015 mostrou que o uso de carvão mineral representou 13,5% do consumo de energia (BRASIL, 2015). O uso elevado destes combustíveis fósseis tem contribuído para o aumento de emissões de gases do efeito estufa, e, conseqüentemente, para a degradação do meio ambiente. A sociedade já sofre as conseqüências dos impactos ambientais e passa a buscar alternativas de diminuir esta dependência com as fontes não renováveis aumentando a utilização de outros tipos de fontes, como as que utilizam recursos inesgotáveis e não poluentes e também a investir em sistemas com alta eficiência energética (SILVA, 2008).

A utilização de energia solar é uma alternativa para combater a dependência do país a utilização de petróleo e outros combustíveis poluentes, porém, mesmo com esse pensamento, ainda encontra-se no Brasil pouco uso destas energias para processos de secagem ou mesmo uso de energias convencionais de forma mais eficiente que é o caso das bombas de calor por compressão (DAGHIGH et al, 2010). A secagem de alimentos é responsável por grande consumo de energia em atividades industriais, comerciais e residenciais (OLIVEIRA; MATA, 1999). Também é importante em regiões rurais para estocagem de alimentos perecíveis e para agregar valor a certos produtos agrícolas (FIOREZE, 2003). Em muitos casos, sistemas de secagem a temperaturas relativamente baixas representam uma solução viável ao dilema da produção agrícola e da indústria de alimentos (ROSSI, 1993).

O uso de bomba de calor para secagem de alimentos vem sendo cada vez mais estudado, este tipo de equipamento apresenta as vantagens dos sistemas de secagem a

baixas temperaturas, manifesta as mesmas características desejáveis das fontes de calor resistivas ou obtidas pela queima de gases, além de ser consideravelmente mais eficiente do ponto de vista termodinâmico (CHUA; CHOU; YANG, 2010).

Neste sentido, este trabalho tem como proposta construir e estudar termodinamicamente a configuração experimental existente e desenvolver análises econômica e ambiental para incorporação de energia solar fotovoltaica para fornecer energia elétrica ao compressor. A ideia é promover assim, uma redução nas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e uma melhoria na eficiência térmica e energética, garantindo um sistema mais sustentável comparado aos equipamentos convencionais de secagem industrial. Com a análise de viabilidade econômica é possível verificar o tempo de retorno do investimento do sistema fotovoltaico.

Para mensurar os impactos ambientais associados a emissões atmosféricas será utilizada uma metodologia para quantificação de impactos ambientais, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), que é regida pela série ABNT NBR ISO 14040 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2014). A partir da Avaliação do Ciclo de Vida será determinada a pegada de carbono associada a utilização de energia elétrica como fonte de energia para o equipamento possibilitando a comparação com outras fontes, como a energia solar fotovoltaica.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é analisar termodinamicamente uma bomba de calor para secagem de alimentos em circuito aberto e analisar sua modificação (incorporação de contribuição solar via painéis solares fotovoltaicos) desde perspectivas econômica e ambiental.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Desenvolver uma análise termodinâmica (energia e exergia) da configuração experimental existente da bomba de calor, modelando os processos termodinâmicos ocorridos durante o aquecimento e desumidificação do ar;
- Verificar a viabilidade econômica de um sistema de energia solar fotovoltaica incorporado a bomba de calor com base nos indicadores econômicos Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL) e Período de Retorno de Capital (PRC).
- Utilizar a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para quantificar as emissões de gases do efeito estufa (GEE) associadas a utilização de energia solar fotovoltaica como fonte de eletricidade para a bomba de calor, e compará-las ao processo tradicional, que utiliza energia elétrica da rede de distribuição de energia, verificando o potencial de mitigação de mudanças climáticas;
- Contribuir para a base de conhecimentos sobre eficiência energética e a bomba de calor assistida por energia solar.

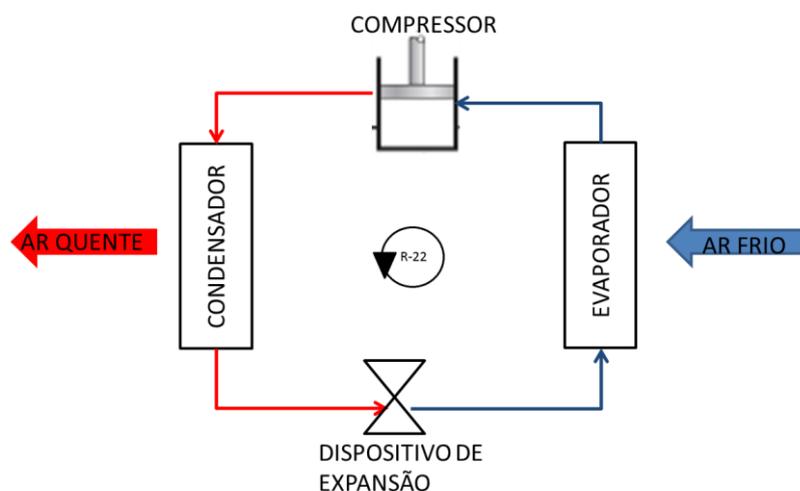
### **1.3 REFERENCIAL TEÓRICO**

O referencial teórico foi dividido em tópicos relacionados a bomba de calor e que são necessários para o entendimento e realização das análises envolvidas neste trabalho. Apresenta-se o princípio de funcionamento do dispositivo bomba de calor, assim como a utilização de energia solar por meio do efeito fotovoltaico e uma descrição da normalização da ANEEL (BRASIL, 2012) para regulamentação da geração distribuída conectada a rede. Outro tema da dissertação foi a análise termodinâmica, onde foram definidas as variáveis utilizadas no cálculo de fluxos de energia e exergia. Em seguida, foram definidas as variáveis utilizadas na análise de viabilidade econômica para a incorporação de um sistema de energia solar fotovoltaico fornecendo energia elétrica à bomba de calor. Para finalizar, foi descrita a metodologia utilizada na análise ambiental, a Avaliação do Ciclo de Vida, destacando o método de análise de inventário utilizado para quantificar a pegada de carbono.

### 1.3.1 Bomba de calor

Os problemas ambientais e energéticos levam cada vez mais a conscientização da utilização de fontes renováveis de energia ou mesmo uso mais eficiente de energias convencionais, como é o caso das bombas de calor por compressão de vapor. Essas bombas de calor são sistemas de reaproveitamento de energia capazes de utilizar o calor dissipado nos circuitos de refrigeração para aquecimento, com diversas aplicações industriais, residenciais e comerciais, com isto contribuindo para a redução da poluição global (YANG; CHUA; CHOU, 2010).

A bomba de calor opera em um ciclo termodinâmico inverso cuja energia em potencial é disponibilizada na forma de calor, ou seja, transfere a energia térmica de uma fonte fria, reservatório de baixa temperatura, para uma fonte quente, reservatório de alta temperatura, através do trabalho de compressão realizado com um fluido, um gás refrigerante, que circula num circuito de refrigeração (GUILHERMETTE, 2007). Este sistema é composto de um compressor, um condensador, um dispositivo de expansão e um evaporador, seu esquema é mostrado na Figura 1.1.



**Figura 1.1** Esquema da bomba de calor considerando **dois** fluxos de massa: ar e refrigerante (R-22).

**Fonte:** Autor (2016).

A bomba de calor promove a passagem de dois fluidos distintos, o ar, que passa na parte externa dos equipamentos e o fluido refrigerante, que está contido no interior dos equipamentos. A passagem do fluido refrigerante ocorre através de um ciclo de

refrigeração por compressão de vapor, que pode ser representado no diagrama de Mollier. No ciclo real de refrigeração, o refrigerante encontra-se num reservatório no compressor, onde é comprimido aumentando sua pressão e temperatura até o estado de vapor superaquecido, em seguida, passa pelo condensador, trocando calor com as paredes do dispositivo e condensando. No final do condensador, o refrigerante encontra-se no estado de líquido saturado, em seguida, o dispositivo de expansão faz a passagem do fluido para uma região de baixa pressão, o evaporador, que promove a evaporação do fluido. O processo de evaporação requer uma grande quantidade de energia, portanto, absorve calor da vizinhança, provocando o frio nesta região, no final deste dispositivo, o refrigerante encontra-se no estado de vapor saturado e à baixa pressão, retornando ao compressor onde reinicia o ciclo. Diferente dos refrigeradores, o objetivo da bomba de calor é utilizar o calor da fonte quente como energia disponível, promovendo o aquecimento do ar (LUIZ, 2012).

A passagem do ar através da bomba de calor promove a sua desumidificação e seu aquecimento. Primeiramente o ar passa no evaporador e, em seguida, no condensador. O ar ao passar pelo evaporador é resfriado pelas paredes do dispositivo e parte da água contida no ar atinge uma temperatura abaixo da temperatura de orvalho e é condensada. O ar resfriado e desumidificado segue para o condensador onde absorve o calor cedido pelo refrigerante no processo de condensação e é aquecido. Na bomba de calor a passagem do ar pode ser classificada em ciclo aberto ou fechado. No ciclo aberto, o ar ao sair do condensador, é lançado para fora no sistema, ou seja, para o meio externo. Se o circuito do ar operar em ciclo fechado, o ar ao sair do condensador retorna ao evaporador para que seja novamente desumidificado. Segundo Rossi (1993), este tipo de sistema de bomba de calor em circuito fechado de ar promove um aumento na eficiência energética do sistema e promove uma secagem de produtos biológicos mais segura e livre de contaminação.

A Figura 1.2 mostra, numa carta psicrométrica, os processos de resfriamento com desumidificação e aquecimento sensível que ocorre no ar no sistema de bomba de calor em circuito fechado.



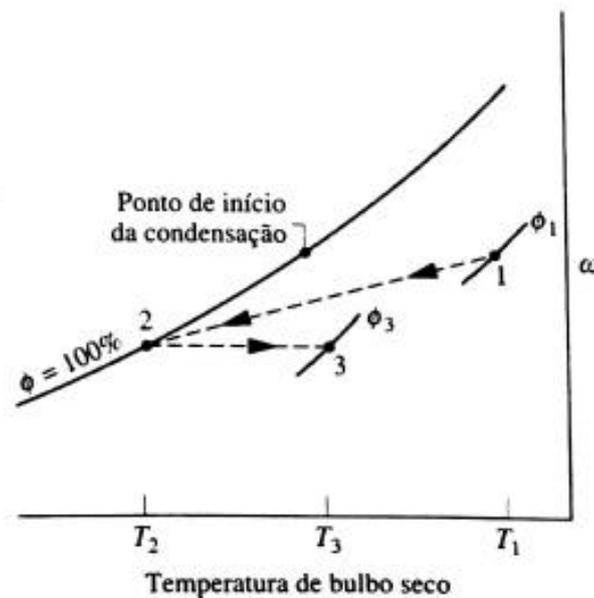
umidade absoluta garantindo produtos com baixos valores de atividade de água e mantendo-se a qualidade destes por longos períodos de armazenamento (ADAPA, 2011).

Segundo Colak e Hepbasli (2009) a secagem é uma das operações industriais que mais consome energia, nos países desenvolvidos 10% dos combustíveis são utilizados para esta operação. Vários estudos vem sendo realizados (SOPIAN; ZAIDI; OTHMAN, 2012) para substituir os sistemas convencionais de secagem por sistemas que consumam menos energia e possuam alta eficiência energética, possibilitando menores impactos ambientais, e as bombas de calor mostram-se eficientes no processo de secagem de alimentos.

### **1.3.1.1 Secagem por refrigeração**

A refrigeração é um poderoso auxiliar na secagem industrial, sobretudo, porque a refrigeração permite efetuar o processo de secagem a temperaturas bastante baixas, o que ajuda a manter as propriedades mais sensíveis dos materiais destinados à alimentação humana, como o sabor e o aroma que dependem de materiais voláteis, os quais são perdidos com a elevação da temperatura. A refrigeração pode auxiliar nos processos de secagem de diversas maneiras, uma delas é reduzindo o conteúdo de umidade do ar ambiente através, por exemplo, da técnica de secagem com estabilização da umidade (COSTA, 2007).

Quando um escoamento de ar úmido é resfriado a uma pressão constante até uma temperatura inferior à do ponto de orvalho, ocorre alguma condensação do vapor de água inicialmente presente. A Figura 1.3 mostra o esboço deste processo na carta psicrométrica. Ar úmido entra em um estado 1, onde a temperatura é  $T_1$  e a umidade absoluta é  $\omega_1$ , e escoa através de uma serpentina de resfriamento no interior da qual refrigerante circula. Uma parcela do vapor d'água inicialmente presente na mistura condensa e ar úmido saturado deixa a seção de desumidificação no estado 2 (umidade relativa  $\phi_2 = 100\%$ ), temperatura  $T_2 < T_1$  e umidade  $\omega_2 < \omega_1$ . Uma vez que o ar deixando o desumidificador esteja saturado, realizando a passagem deste escoamento através de uma seção de aquecimento posterior a umidade permaneceria constante  $\omega_2 = \omega_3$ , e a temperatura aumentaria para  $T_3$  (MORAN; SHAPIRO, 2002).



**Figura 1.3** Esboço do processo de desumidificação

**Fonte:** MORAN; SHAPIRO, 2002.

### *Secagem com estabilização da umidade*

Segundo Costa (2007), na secagem por estabilização da umidade, o ar de secagem deve levar o material às condições de equilíbrio de sua umidade com as condições do ambiente. Para isto, o ar é primeiramente resfriado para retirar a sua umidade e a seguir é reaquecido. Isto é possível com um simples sistema de refrigeração, onde o ar passa inicialmente pelo evaporador, sendo esfriado até uma temperatura bastante inferior à sua temperatura de orvalho, perdendo grande parte de seu calor latente, para, a seguir, passar pelo condensador, onde recebe todo o calor perdido no evaporador. O calor liberado no condensador  $Q_c$  (kJ/kg) é igual a todo calor retirado no evaporador,  $Q_e$  (kJ/kg), acrescido do calor de compressão,  $W_{cp}$  (kJ/kg) correspondente ao trabalho mecânico do compressor.

#### **1.3.1.2 Ciclo de refrigeração por compressão de vapor**

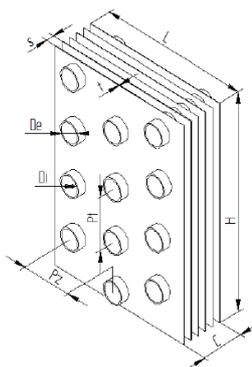
Entende-se por refrigeração a manutenção de uma temperatura abaixo da temperatura das vizinhanças. Uma vez que se deve manter a temperatura baixa, é necessário absorver continuamente o calor, e isto é possível mediante a evaporação de um líquido cuja temperatura de ebulição seja baixa na pressão de evaporação. Para que a

operação seja contínua, o fluido evaporado deve retornar ao seu estado líquido inicial, de modo que possa absorver uma outra vez o calor. A série completa de etapas, através das quais o fluido passa, constitui o ciclo de refrigeração (PIRANI, 2014).

Um sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor é constituído de quatro componentes básicos, quais sejam: condensador, dispositivo de expansão, evaporador e compressor.

O evaporador constitui-se basicamente de um trocador de calor. Sua função é permitir a evaporação do fluido refrigerante, a baixa pressão e temperatura, com o objetivo de retirar calor do meio externo. O condensador é um trocador de calor com características semelhantes às do evaporador. Promove a condensação do fluido refrigerante evaporado. Neste, o fluido refrigerante cede calor para o meio externo. O dispositivo de expansão tem como papel fundamental controlar o fluxo de refrigerante no sistema. O compressor tem a finalidade de recircular o fluido refrigerante proporcionando uma diferença de pressão entre o evaporador e o condensador. Isto é feito succionando o fluido em uma determinada condição de pressão e temperatura e descarregando-o a uma pressão mais alta (SANTOS, 2007).

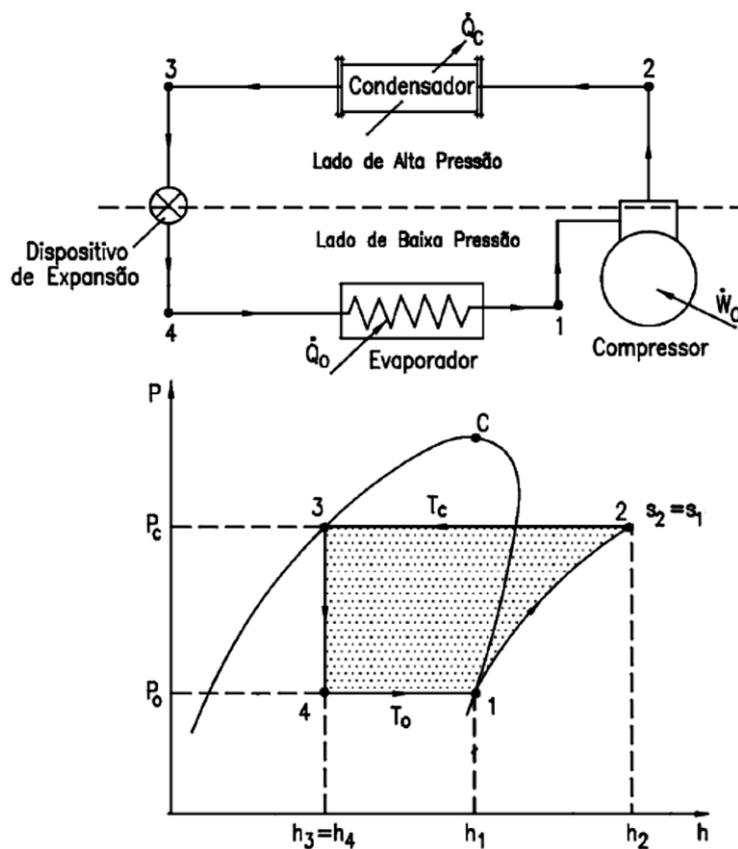
O evaporador e o condensador utilizados neste trabalho são do tipo aletado; estes possuem como característica a baixa temperatura de operação e a extensa área de troca térmica. A Figura 1.4 ilustra um trocador de calor desse tipo.



**Figura 1.4** Trocador de calor do tipo aletado com as principais dimensões.

**Fonte:** GRAHL, 2010.

A Figura 1.5 descreve o funcionamento de um ciclo de refrigeração por compressão mecânica de vapor de simples estágio. O trabalho de compressão e as taxas de transferência de calor encontram-se definidos na figura.



**Figura 1.5** Representação do ciclo teórico de refrigeração por compressão de vapor.

Fonte: PIRANI, 2014.

A Figura 1.5 também mostra um esquema do ciclo teórico ilustrado em um diagrama de Mollier, no plano P-h.

Pirani (2014) descreve os processos termodinâmicos que constituem o ciclo teórico em seus respectivos equipamentos como:

a) Processo 1→2. Ocorre no compressor, sendo um processo adiabático reversível e, portanto, isentrópico, como mostra a Figura 1.5. O refrigerante entra no compressor à pressão do evaporador ( $P_o$ ) e com título igual a 1 ( $x = 1$ ). O refrigerante é então comprimido até atingir a pressão de condensação ( $P_c$ ) e, ao sair do compressor está superaquecido à temperatura  $T_2$ , que é maior que a temperatura de condensação  $T_c$ .

Admitindo-se que não exista transferência de calor do compressor, os balanços de massa e de energia para um volume de controle correspondente ao compressor fornecem:

$$\dot{W}_{cp} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (1.1)$$

b) Processo 2→3. Ocorre no condensador, sendo um processo de rejeição de calor, do refrigerante para o meio de resfriamento, à pressão constante. Neste processo o fluido frigorífico é resfriado da temperatura  $T_2$  até a temperatura de condensação  $T_C$  e, a seguir, condensado até se tornar líquido saturado na temperatura  $T_3$ , que é igual à temperatura  $T_C$ .

Para um volume de controle correspondente ao condensador, a taxa de transferência de calor é:

$$\dot{Q}_{cd} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (1.2)$$

c) Processo 3→4. Ocorre no dispositivo de expansão, sendo uma expansão irreversível, à entalpia constante (processo isentálpico), desde a pressão  $P_C$  e líquido saturado ( $x=0$ ) até a pressão de vaporização ( $P_0$ ). O processo é irreversível e, portanto, a entropia do refrigerante na saída do dispositivo de expansão ( $s_4$ ) será maior que a entropia do refrigerante na sua entrada ( $s_3$ ).

d) Processo 4→1. Ocorre no evaporador, sendo um processo de transferência de calor a pressão constante ( $P_0$ ), conseqüentemente a temperatura constante ( $T_0$ ), desde vapor úmido (estado 4) até atingir o estado de vapor saturado seco ( $x=1$ ). O calor transferido ao refrigerante no evaporador não modifica a temperatura do refrigerante, mas somente muda sua qualidade (título).

Para um volume de controle que engloba o lado do refrigerante no evaporador, os balanços de massa e de energia simplificam-se para fornecer a seguinte taxa de transferência de calor:

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (1.3)$$

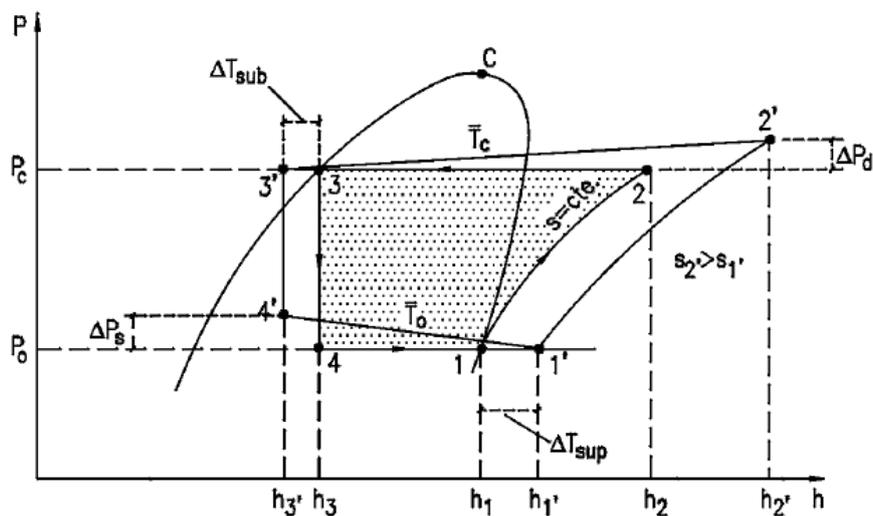
No sistema de compressão de vapor, o fornecimento de potência líquida é igual à potência do compressor, já que a válvula de expansão não admite entrada e saída de

potência. O coeficiente de performance do sistema é dado pela seguinte relação:

$$COP = \left( \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \right) \quad (1.4)$$

Sistemas de refrigeração reais desviam-se significativamente do ciclo teórico e possuem coeficientes de desempenho menores àqueles calculados para o ciclo teórico. Uma das causas dessa diferença está relacionada às transferências de calor entre o refrigerante e as duas regiões fria e quente. Em sistemas reais essas transferências não são realizadas reversivelmente (MORAN; SHAPIRO, 2002).

Outro fator que causa a diferença entre o ciclo real e o teórico é a queda de pressão nas linhas de descarga, de líquido e de sucção, assim como no condensador e no evaporador. Estas perdas de carga  $\Delta P_d$  e  $\Delta P_s$  encontram-se ilustradas na Figura 1.6. Também pode ocorrer o subresfriamento do refrigerante na saída do condensador, e o superaquecimento na sucção do compressor, sendo este um processo importante, tendo a finalidade de evitar a entrada de umidade no compressor (PIRANI, 2014).



**Figura 1.6** Esquema da diferença entre o ciclo teórico e o ciclo real de refrigeração por compressão de vapor.

**Fonte:** PIRANI, 2014.

### **1.3.2 Energia Solar**

O aproveitamento da energia solar para conservação e processamento de alimentos é utilizado há muitos anos pelo homem. A radiação solar pode ser convertida em energia através da conversão direta e conversão térmica. A primeira, a energia radiante é convertida diretamente em energia elétrica, por meio do efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais na presença da luz solar, o mais comum é o silício (PINHO; GALDINO, 2014).

A segunda tem início com a transformação da energia solar radiante em calor. O calor é em seguida convertido em energia interna de um fluido de trabalho ou então é mudado em outras formas de energia, ou trabalho mecânico (KLUPPEL, 1985). O aproveitamento térmico para aquecimento de fluidos é feito com o uso de coletores ou concentradores solares. Os coletores solares são aquecedores de fluidos e são classificados em coletores concentradores e coletores planos (PINHO; GALDINO, 2014).

Os sistemas de secagem utilizando energia solar são utilizados tanto pela simples implementação como também por possibilitar uma economia de energia e serem sistemas provenientes de fontes de energia renovável. Eles podem ser utilizados diretamente ou indiretamente para secagem e podem ser utilizados juntamente com um sistema de bomba de calor promovendo um sistema de energia autônomo e sustentável (SEVIK, 2014).

#### **1.3.2.1 Energia Solar Fotovoltaica**

Os dispositivos fotovoltaicos tem como base do funcionamento o efeito fotovoltaico, este consiste no surgimento de uma diferença de potencial entre dois materiais semicondutores de propriedades elétricas diferentes provocada pela incidência de luz na região de junção entre eles (BUHLER, 2011).

Os painéis solares são compostos por células fotovoltaicas que são constituídas de materiais semicondutores. Estas células são compostas por duas bandas. Os átomos que se encontram na banda de valência são excitados pela incidência de uma onda eletromagnética seguindo para um nível de energia superior, a banda de condução, como elétrons livres. A energia necessária para que um elétron salte da banda de valência para a banda de condução é chamada de energia de gap, que é determinante para que um material seja um condutor, semicondutor ou isolante elétrico (KLUPPEL, 1985).

Quando a energia solar incide em uma célula fotovoltaica, boa parte dos fótons não é aproveitada para geração de pares de elétron-lacuna. A energia dos fótons pode ser inferior a do gap e dessa forma estes não são absorvidos pelo semicondutor. Se a energia dos fótons for superior a do gap, cada fóton gera apenas um par de elétron-lacuna e o excesso de energia é perdido. Essa perda é percebida pela resposta espectral que compõe a célula (BUHLER, 2011).

A grande maioria das células solares é feita pelo agrupamento de duas camadas finas de silício cristalino, que passaram por um tratamento especial. Normalmente não existem elétrons livres no silício, por isto ele é considerado um bom isolante. Para aumentar o fluxo de elétrons usa-se nas suas confecções a dopagem, que é a inclusão de substâncias na estrutura cristalina do semicondutor de tal forma que o mesmo apresente mais elétrons livre que o cristal puro semicondutor tipo N (negativo), ou mais lacunas para os elétrons que o cristal puro semicondutor tipo P (positivo). Quando estes dois tipos de semicondutores são colocados juntos formam uma junção P-N. A junção introduz no cristal uma distribuição de cargas que cria um campo elétrico o qual obriga a corrente a fluir numa determinada direção. É a exposição a luz que dá origem a corrente elétrica através da junção e por sua vez a uma diferença de potencial entre as superfícies das regiões P e N (GUENA, 2007).

Sistemas fotovoltaicos estão em crescente aplicação no mundo nos últimos anos. Apesar das crises financeiras e econômicas sofridas no Brasil nos últimos anos, a tecnologia fotovoltaica cresce constantemente, este fato pode ser atribuído às novas tecnologias, ao potencial climático da região e à incentivos governamentais.

O sistema fotovoltaico pode ser caracterizado como microgeração distribuída, onde representa uma usina geradora de energia elétrica que está instalada diretamente na empresa. A empresa passa a ter sua própria fonte de eletricidade utilizando apenas a rede das distribuidoras como um *backup*. Consequentemente, toda a energia produzida pelo sistema, é convertida em créditos que são abatidos mensalmente no valor da conta de energia elétrica das companhias distribuidoras, gerando uma economia de renda (COELHO et al., 2016). No Brasil, os sistemas conectados a rede seguem a regulamentação normativa Nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que permite a utilização dos excedentes produzidos pela microgeração distribuída gerados por uma fonte de energia renovável (Brasil 2012).

Os sistemas solar fotovoltaicos podem ser classificados em sistemas conectados a

rede elétrica, que também são conhecidos por sistemas Grid-Tie, ou sistemas isolados, conhecidos por sistemas off-Grid, que necessitam de baterias para armazenar a energia produzida pelos painéis, permitindo a utilização mesmo na ausência de luz solar. Este tipo de sistema isolado é mais utilizado nas áreas remotas onde não há uma rede de distribuição de energia elétrica. Os componentes básicos de um sistema fotovoltaico são: Painéis solares, inversores, controladores de carga e baterias (PINHO; GALDINO, 2014). Para dimensionamento de um sistema fotovoltaico é necessário obter a irradiação solar ao longo do tempo na região onde será instalado, existem programas computacionais que dispõem de dados históricos de irradiação e auxiliam na obtenção destes dados (EPE, 2014).

### **1.3.3 Bomba de calor assistida por energia solar**

Os sistemas de secagem utilizando energia solar são utilizados tanto pela simples implementação como também por possibilitar uma economia de energia e serem sistemas provenientes de fontes de energia renovável. Eles podem ser utilizados diretamente ou indiretamente para secagem e podem ser utilizados juntamente com um sistema de bomba de calor promovendo um sistema de energia autônomo e sustentável (SEVIK, 2014).

Dentre as vantagens apresentadas pelos secadores por bomba de calor e secadores solares muitos trabalhos tem sido desenvolvidos com relação à Bomba de Calor Assistida por Energia Solar (BCAES). De acordo com Kaygusuz e Ayhan (1999) a combinação da bomba de calor com a energia solar reduz as desvantagens de cada um operando isoladamente. Em condições onde a energia solar não é suficiente para promover a secagem, pode-se acoplar a bomba de calor como fonte de calor.

### **1.3.4 Análise Termodinâmica**

A análise termodinâmica, no geral, consiste na determinação da quantidade e qualidade da energia envolvida num sistema. Para realizar a análise termodinâmica de um equipamento que envolve escoamento de massa é necessário, primeiramente, definir o volume de controle (VAN WYLEN, 2006). Pode-se realizar a análise termodinâmica através das análises energética e exergetica, possibilitando o estudo dos fluxos de energia envolvidos no sistema e a determinação das perdas de energia. Através da análise energética é possível quantificar a energia que cruza as fronteiras de um sistema, baseado

na Primeira Lei da Termodinâmica, também conhecida como Lei da Conservação da Energia (Eq. 1.5), que tem como princípio que energia não pode ser criada ou destruída, apenas transformada de uma forma para outra, transportada ou transferida de um sistema a outro.

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{O.E.} = \dot{Q}_{1,2} - \dot{W}_{1,2} + \sum \dot{m}_e h_e^T - \sum \dot{m}_s h_s^T \quad (1.5)$$

Na Equação 1.5,  $(dE/dt)_{O.E.}$  é a taxa de variação da quantidade de energia do objeto de estudo (O. E.) com o tempo,  $\dot{Q}_{1,2}$  e  $\dot{W}_{1,2}$  são, respectivamente, a quantidade de calor e trabalho trocados durante o processo,  $\dot{m}_e$  e  $\dot{m}_s$  são a vazão mássica de entrada e saída do O. E., respectivamente,  $h_e^T$  é a entalpia total de entrada e  $h_s^T$  a entalpia total de saída do O. E.

A análise exergética utiliza a Primeira Lei para quantificar as taxas de energia, porém é fundamental a aplicação da Segunda Lei da Termodinâmica, envolvendo a qualidade da energia, sua capacidade de conversão, e sua capacidade de ser transformada em energia útil e causar mudanças. A exergia é a energia útil do O. E., quando um O. E. perde energia devido às irreversibilidades, sua capacidade de realizar trabalho diminui, ou seja, parte de sua exergia é destruída (MAIA, 2015).

A equação geral para a Segunda Lei da Termodinâmica é dada pela Eq. 1.6:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{O.E.} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \sum \frac{\dot{Q}_{O.E.}}{T} + \dot{S}_{ger} \quad (1.6)$$

Onde  $(dS/dt)_{O.E.}$  é a taxa de variação de entropia com o tempo,  $s_e$  e  $s_s$  são as entropias de entrada e saída do O. E. e  $\dot{S}_{ger}$  é a taxa de geração de entropia, existente devidos às irreversibilidade ocorridas no interior do O. E.

Para determinar a taxa de destruição de exergia em cada volume de controle a partir da taxa de geração de entropia aplica-se a Eq. (1.7).

$$\dot{E}_{des,O.E.} = T_0 \dot{S}_{ger,O.E.} \quad (1.7)$$

Onde  $\dot{E}_{des,O.E.}$  é a taxa de exergia em cada volume de controle,  $T_0$  é a temperatura

ambiente e  $\dot{S}_{ger,O.E.}$  é a taxa de geração de entropia, existente devidos às irreversibilidade ocorridas no interior do sistema.

#### 1.3.4.1 Análise Energética

Para realizar a análise energética de um volume de controle utiliza-se inicialmente a lei da conservação de massa. A equação da Conservação da Massa é dada por:

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{O.E.} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (1.8)$$

Onde  $(dm/dt)_{O.E.}$  é a variação da massa com o tempo no objeto de estudo, e  $\dot{m}_e$  e  $\dot{m}_s$  são as taxas de fluxo de entrada e saída do volume de controle, respectivamente. O processo se encontra em regime estacionário quanto à massa:

Quanto maior o aproveitamento energético, maior a eficiência do sistema. A eficiência medida pela Primeira Lei da Termodinâmica é calculada através do coeficiente de performance, para a Bomba de Calor, pode-se definir que o calor pretendido é o calor liberado pelo condensador para aquecer o ar ( $Q_H$ ) e a energia consumida é o trabalho realizado pelo compressor ( $W_{comp}$ ) e ventilador ( $W_{vent}$ ) com base na Eq. (1.9):

$$COP = \frac{\text{Energia pretendida}}{\text{Energia consumida}} = \frac{\dot{Q}_H}{W_{comp} + W_{vent}} \quad (1.9)$$

#### 1.3.4.2 Análise Exérgica

Através da realização da análise exérgica determina-se a taxa de destruição de exergia em cada volume de controle. Inicialmente utiliza-se o balanço de entropia para cada volume de controle para determinar a taxa de geração de entropia. A partir da taxa de geração de entropia determina-se a taxa de destruição de exergia de cada volume de controle aplicando a Eq. (1.7).

A eficiência pela Segunda Lei da Termodinâmica ou eficiência racional exérgica faz referência ao melhor desempenho possível de um O. E., para o caso específico da bomba de calor, a eficiência termodinâmica pela Segunda Lei pode ser escrita em função do COP:

$$\beta_2 = \frac{COP_{\text{real}}}{COP_{\text{ideal}}} \quad (1.10)$$

Onde  $COP_{\text{real}} = \beta$  e  $COP_{\text{ideal}} = \beta_{\text{Carnot}}$ . O rendimento de Carnot representa o desempenho da bomba de calor operando sob condições ideais:

$$\beta_2 = \frac{\beta}{\beta_{\text{Carnot}}} \quad (1.11)$$

$$\beta = \frac{\dot{Q}_H}{W_{\text{comp}} + W_{\text{vent}}} \quad (1.12)$$

$$\beta_{\text{Carnot}} = \frac{T_3}{T_3 - T_2} \quad (1.13)$$

### 1.3.5 Análise Econômica

A análise de viabilidade econômica permite a tomada de decisão de investimento em relação a realização de um projeto. No processo de análise econômica são avaliados os indicadores econômicos como o Período de Retorno de Capital (PRC), Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR).

#### 1.3.5.1 Valor Presente Líquido (VPL)

Segundo Pindyck e Rubinfeld (2006), o critério do VPL corresponde a uma comparação entre o investimento realizado e o valor presente dos fluxos de caixa líquidos futuros que se espera obter pelo investimento. O VPL pode ser calculado pela Eq. 1.14:

$$VPL = -C + \sum_{n=1}^i \left[ \frac{L_n}{(1+R)^n} \right] \quad (1.14)$$

Onde  $C$  representa o investimento inicial,  $i$  representa a quantidade de períodos de análise de viabilidade do investimento (normalmente a vida útil do equipamento),  $L_n$  o lucro obtido no tempo  $n$ , e  $R$  representa a taxa de desconto, também denominada taxa

mínima de atratividade (TMA) ou custo de oportunidade do capital a investir.

Segundo Kopittke e Casarotto Filho (2000), a TMA é a taxa a partir da qual o investidor considera que está obtendo ganhos com o investimento. Em geral a definição da TMA se baseia em taxas de investimentos de baixo risco como poupança, taxas de títulos públicos, taxa SELIC, etc. (HOCHHEIM, 2002).

O VPL leva em conta todos os fluxos de caixa, e não apenas o instante no tempo em que o saldo acumulado se torna positivo. Assim, pode nos dar uma medida de riqueza adicionada (VPL maior que zero) ou destruída (VPL menor que zero) (COELHO, R. M. et al., 2016). Quanto maior o VPL mais atrativo será o projeto.

### **1.3.5.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)**

Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de juros que determina o ponto de equilíbrio em um investimento; é então a taxa de juros que faz  $VPL = 0$  (*i.e.*, não existe nem prejuízo, nem lucro: ponto de equilíbrio) (ELETROBRÁS et al., 2008).

Caso a TIR seja menor que o valor unitário o projeto deverá ser recusado, uma vez que os custos para financiar o projeto serão consumidos e não haverá sobra. Esta sobra de recursos é que irá remunerar o investidor, portanto a TIR maior que um, garantirá este retorno do investimento.

### **1.3.5.3 Período de Retorno de Capital (PRC)**

O Período de Retorno de Capital (PRC), também conhecido por *payback* é, o critério mais aplicado e difundido em análises de viabilidade econômica, devido a facilidade de sua aplicação (ELETROBRÁS et al., 2008). O PRC é interpretado como um importante indicador do nível de risco de um projeto de investimento (ASSAF NETO, 2009). O PRC não permite comparar o retorno entre dois investimentos, mas é um método bastante utilizado como um limite para determinadas tipos de projetos (COSTA, 2012).

O PRC simples corresponde ao tempo no qual o somatório dos fluxos de caixa se torna igual ao investimento inicial. Teoricamente, o investimento é aceitável se o *payback* for menor do que o período de vida útil do investimento. No entanto, segundo Ross *et al.* (2013), se interpretado de maneira literal a análise por *payback* simples pode levar erros de decisão na hora de investir. Isso ocorre principalmente pelo fato de o *payback* simples não

levar em conta a variação do valor do dinheiro com o tempo, o custo de oportunidade de capital e os fluxos de caixa obtidos após o período de *payback*.

### **1.3.6 Análise Ambiental: Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)**

A partir dos movimentos ambientalistas e da conscientização da sociedade na preservação do meio ambiente foram surgindo as leis de gerenciamento ambiental. No Brasil, em meados de 1980, o instrumento de Avaliação dos Impactos Ambientais começou a ser utilizado pelas empresas para selecionar a melhor alternativa sob o ponto de vista ambiental, econômico e ético. A Avaliação de Impactos ambientais rastreia toda ação, desde o início do processo, sendo possível identificar, prever, interpretar e prevenir os efeitos ambientais causados ao meio ambiente ao homem (SILVA, 1999).

Existem diversos métodos de Avaliação de Impactos ambientais, através deles é possível coletar, analisar, avaliar, comparar e organizar informações quantitativas e qualitativas de determinada ação que causa efeitos para o meio ambiente (SILVA, 1999). Um dos métodos mais utilizados e que foi escolhido para este estudo é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), normalizada pela série ISO 14040 e ISO 14044 (ABNT, 2014a, 2014b) que está voltada para interpretação de dados ambientais em todas as fases da cadeia produtiva, que envolve desde a extração dos recursos naturais, passando pela produção, utilização até a disposição final (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2014a; ABNT, 2014b).

Na metodologia da ACV são definidos quatro componentes básicos (ABNT, 2014a; ABNT, 2014b): definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação. Isto engloba desde a construção do processo, onde são detalhados os materiais e os resíduos, passando pela etapa de montagem, que inclui toda operação como o transporte e energia até chegar à análise do ciclo de vida que junta o tratamento do resíduo à montagem, possibilitando determinar e avaliar as causas dos impactos ambientais associadas ao processo em estudo (HINZ; VALENTINA; FRANCO, 2006).

A definição de objetivo e escopo é a etapa que define e descreve o processo ou produto, estabelecendo o contexto no qual a avaliação será realizada e identificando os limites e efeitos ambientais a serem revistos para a avaliação. A análise do inventário identifica e quantifica as entradas e saídas do sistema. A avaliação de impacto analisa os efeitos humanos e ecológicos da utilização de energia, água, materiais e descargas

ambientais identificadas na análise do inventário. Por fim, a interpretação avalia os resultados da análise do inventário. Dos resultados dessa etapa podem ser tiradas as conclusões e recomendações às tomadas de decisão (BARBOSA et al., 2008).

Existem diversos métodos de avaliação de impacto ambiental, cada uma com suas particularidades. O método mais difundido para calcular a pegada de carbono é o IPCC 2013 GWP 100a (IPCC, 2013).

Devido à preocupação com as mudanças climáticas provocadas pelo aquecimento global o IPCC desenvolveu um método para contabilizar as emissões atmosféricas de GEE. O potencial de aquecimento global, GWP (Global Warming Potential), contabiliza o total de emissões de CO<sub>2</sub> e de GEE, expressando o resultado em termos de carbono equivalente de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>-eq) para um sistema definido ou atividade (INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2014).

## 2 ARTIGO 1

### **BOMBA DE CALOR ASSISTIDA POR ENERGIA SOLAR APLICADA A SECAGEM DE ALIMENTOS: UMA REVISÃO DE LITERATURA**

**RESUMO:** Grande parte da energia consumida na indústria alimentícia é usada para secagem. Os secadores convencionais apresentam desvantagens como baixa eficiência de secagem, menores taxas específicas de extração de umidade (SMER), altas temperaturas de operação (60°C à 90°C) e alto custo de operação. A utilização de bombas de calor para a secagem de alimentos tem se destacado por apresentar melhores eficiências de secagem, maiores SMER, e temperaturas de operação mais baixas (10°C a 65° C) do que sistemas convencionais garantindo produtos com maior qualidade, e redução nas emissões de gases de efeito estufa. Pesquisas tem demonstrado a viabilidade do aproveitamento da energia solar de maneira acoplada aos sistemas de secagem com uso de bomba de calor, garantindo melhor eficiência energética e um processo mais sustentável. Este trabalho apresenta uma revisão da aplicação de bombas de calor assistidas por energia solar para a secagem de produtos alimentícios. A revisão foi realizada com base em artigos publicados em periódicos científicos (Google acadêmico e Periódicos CAPES), no período de 2011 à 2016. Verificou se a necessidade da padronização de parâmetros de performance, o elevado potencial de P&D para a aplicação de Bomba de Calor Assistida por Energia Solar aplicada a Secagem de Alimentos.

**Palavras-Chave:** Secagem de Alimentos, Bomba de Calor, Energia Solar, Bomba de Calor Assistida por Energia Solar

#### 2.1 INTRODUÇÃO

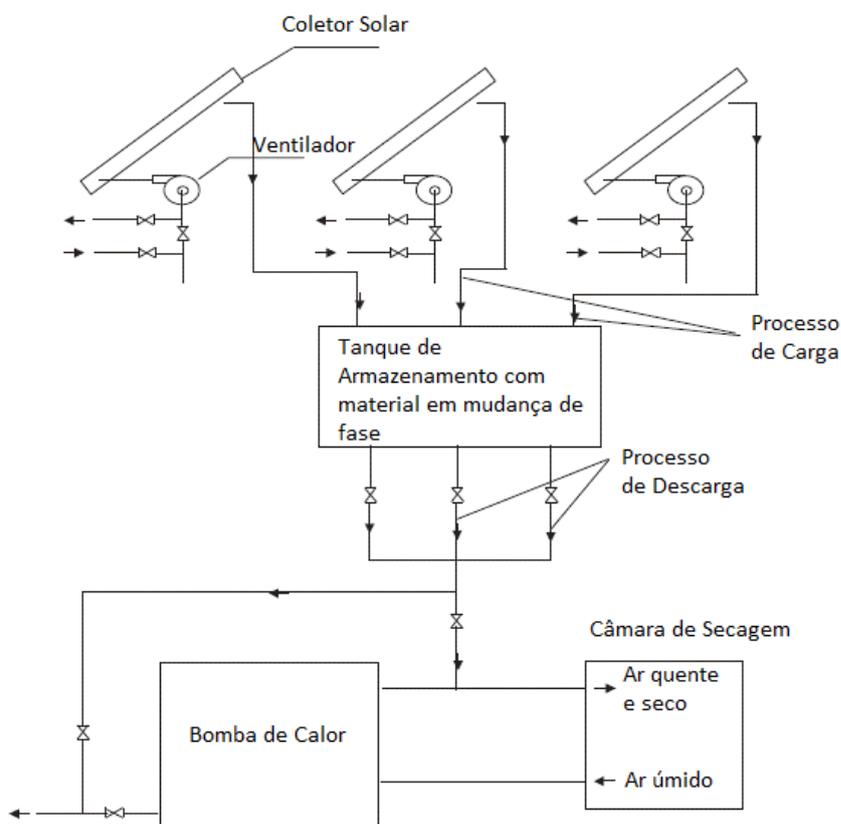
Mujumdar (2014) define secagem como um processo térmico de remoção de substâncias voláteis (umidade) para a fabricação de um produto sólido, sendo este processo composto por dois sub-processos: transferência de calor para o produto a fim de evaporar a umidade da superfície e transferência da umidade interna do corpo para a superfície devido ao primeiro sub-processo descrito.

Chou e Chua (2001) consideram que o processo de secagem é indispensável na indústria alimentícia, bem como na agricultura e que, grandes quantidades dos produtos alimentícios passam pelo processo de secagem a fim de aumentar sua vida útil, reduzir o custo de armazenamento, transporte, garantindo uma boa aparência e mantendo o conteúdo nutritivo. Chong *et al.* (2014) afirma que uma das maiores preocupações do processo de

secagem é com relação à qualidade dos produtos desidratados. Apesar de sua necessidade, o processo de secagem apresenta um elevado consumo energético e segundo Kemp (2011) o processo de secagem consome entre 10% e 20% de toda a energia utilizada no setor industrial dos países desenvolvidos. Segundo Fayose e Huan (2016) o aumento do preço dos combustíveis fósseis e da energia elétrica e emissão de gases nocivos à camada de ozônio, associada aos secadores convencionais fez com que métodos secagem sustentáveis e com recuperação de calor tenham se tornado importantes. De acordo com Daghigh *et al.* (2010) o uso de energia solar é uma alternativa para combater a dependência dos países a utilização de petróleo e outros combustíveis poluentes ou mesmo uso de energias convencionais de forma mais eficiente.

Dentre as alternativas aos secadores convencionais destacam-se os secadores solares e as bombas de calor aplicadas a secagem. Jangam (2011) afirma que a aplicação de energia solar para a secagem de alimentos é promissora, contudo de acordo com Mumjumdar (2014) os secadores solares apresentam dificuldades de controle dos parâmetros do processo de secagem, a dependência das condições do tempo e clima, necessidade de coletores grandes, tais problemas podem ser contornados com estratégias de controle do processo, uso de técnicas de armazenamento de energia ou de aquecedores auxiliares. A aplicação de bomba de calor na secagem de alimentos também tem se mostrado promissora, Rahman *et al.* (2013) afirma que a Bomba de Calor tem se destacado como um método de recuperação de energia que seria desperdiçada, Best (1997) e também Chua *et al.* (2010) afirmam que a aplicação de bomba de calor no processo de secagem apresenta grandes vantagens como uma temperatura de secagem mais baixa, o que garante menos danos às propriedades do alimento, e um melhor controle sobre as condições do processo. Diante das vantagens apresentadas pelos secadores por bomba de calor e secadores solares muitos trabalhos têm sido desenvolvidos com relação à Bomba de Calor Assistida por Energia Solar (BCAES), Zangh *et al.* (2014) afirma que a proposta de integração de bomba de calor com coletores solares tem sido proposta e desenvolvida por muitos pesquisadores em todo mundo. De acordo com Kaygusuz e Ayhan (1999), a combinação da bomba de calor com a energia solar reduz as desvantagens de cada um operando só. Em condições de onde a energia solar apresenta condições insuficientes de promover a secagem só, ela pode ser assistida pela bomba de calor ou atuar como fonte de calor da bomba. A bomba de calor operando juntamente com a energia solar apresentará menor consumo de energia e conseqüentemente melhor eficiência energética. Segundo Sopian *et al.* (2012) a aplicação

de energia solar térmica e fotovoltaica na bomba de calor é uma inovação que pode tornar o sistema totalmente independente. A Fig. 2.1 apresenta o esquema de uma bomba de calor assistida por energia solar com armazenamento de energia térmica onde ar é aquecido em coletores solares e passa por um reservatório térmico onde adiciona a energia à um fluido em mudança de fase, logo após, dependendo das condições da operação de secagem este ar poderá ser misturado ao ar que foi desumidificado no evaporador e aquecido no condensador da bomba de calor para então ser direcionado para a câmara de secagem. Em uma condição de insuficiência de energia solar e necessidade de aquecimento auxiliar do ar que sai da bomba de calor a energia armazenada no reservatório será utilizada para suprir a necessidade de aquecimento auxiliar.



**Figura 2.1** - Esquema de um sistema de Bomba de Calor Assistida por Energia Solar com armazenamento de energia térmica. Traduzido de Chou e Chua (2006).

Definir a viabilidade de implementação de um sistema BCAES para a secagem de alimentos requer a caracterização dos parâmetros de performance dos equipamentos em termos de eficiência de secagem, gasto energético e qualidade dos produtos obtidos. Para

tanto foram definidos alguns parâmetros para quantificar a performance do sistema operando em diversas situações, dentre estes parâmetros podemos destacar a Taxa Específica de Evaporação de Umidade (SMER), a Taxa de Secagem (RD), o Coeficiente de Performance da Bomba de Calor (COP) e Taxa de Utilização de Energia (EUR). O SMER representa a taxa de condensação de vapor d'água, pois fornece uma indicação da energia requerida para remover umidade do material a ser secado expressa em kg/kJ, conforme Eq. (2.1). Li *et al.* 2011 define que um importante parâmetro para avaliação do desempenho de um sistema de secagem é a redução da umidade do produto analisado, este parâmetro é denominado Taxa de Secagem, conforme Eq. (2.2).

Segundo Van Wylen (2003) o COP representa um indicador de eficiência de uma bomba de calor dado pela relação entre a energia pretendida e a energia gasta, conforme Eq. (2.3). Segundo Sevik *et al.* (2013) a taxa de utilização de energia (EUR) na cabine de secagem, sendo representada pela Eq. (2.4).

$$SMER = \frac{m_{H_2O}}{W_{comp}} \quad (2.1)$$

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (2.2)$$

$$COP = \frac{Q_h}{W_{comp}} \quad (2.3)$$

$$EUR = \frac{Q_{dc}}{Q_d} \quad (2.4)$$

Onde  $m_{H_2O}$  é a massa de vapor d'água condensada do ar,  $W_{comp}$  é o trabalho do compressor,  $Q_h$  é o calor rejeitado pelo condensador,  $M_t$  e  $M_{t+\Delta t}$  são o teores de umidade inicial e final, respectivamente,  $\Delta t$  é o tempo de secagem,  $Q_{dc}$  é o calor utilizado na retirada de umidade do alimento dentro da cabine de secagem e  $Q_d$  é o fluxo líquido de calor do secador.

O objetivo deste artigo foi o de realizar uma revisão sistemática de literatura com relação à pesquisa e novas técnicas desenvolvidas para aplicação de bomba de calor assistida por energia solar para secagem de alimentos, apresentando um comparativo entre os parâmetros de performance de novos sistemas que tem sido desenvolvidos ao longo dos últimos cinco anos, avaliando as modificações no projeto do sistema e melhorias que vem sendo implementadas.

## **2.2 METODOLOGIA**

Uma busca sistemática de artigos científicos publicados entre janeiro de 2011 a junho de 2016 foi executada nas bases de dados Periódicos CAPES, por meio dos descritores: Solar Assisted Heat Pump, Solar Assisted Heat Pump Dryer, assim como seus sinônimos e correspondentes na língua portuguesa, em combinações variadas. Foi utilizado, nas bases de dados possíveis, o operador booleano OR.

### **2.2.1 Critérios de Inclusão**

Incluíram-se estudos experimentais que tiveram como objetivos: avaliar a performance do sistema BCAES aplicado à secagem de alimentos em diversas condições de operação, desenvolver novas técnicas de aplicação, implementar e avaliar modificações no projeto do sistema, verificar as propriedades dos produtos após o processo de secagem. Foram selecionados estudos publicados em língua inglesa ou portuguesa.

### **2.2.2 Critérios de Exclusão**

Foram excluídos da revisão artigos que avaliaram BCAES para aplicações distintas da secagem de alimentos, se limitavam a análise das propriedades dos produtos após a secagem, que analisavam sistemas que funcionavam apenas por bomba de calor ou que funcionavam apenas por secadores solares, e que promoveram apenas análise teórica.

### **2.2.3 Análise**

Inicialmente, foi realizada uma triagem a partir da análise dos títulos e resumos localizados na busca. Posteriormente, todos os estudos que se apresentaram pertinentes ao tema foram obtidos na íntegra e analisados separadamente por três avaliadores. Por fim, os artigos analisados e selecionados pelos avaliadores, seguindo os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos, foram incluídos na sistematização dos dados após reunião de consenso. As listas de referências de todos os artigos elegíveis foram consultadas, na tentativa de encontrar novos estudos para esta revisão.

## 2.3 RESULTADOS

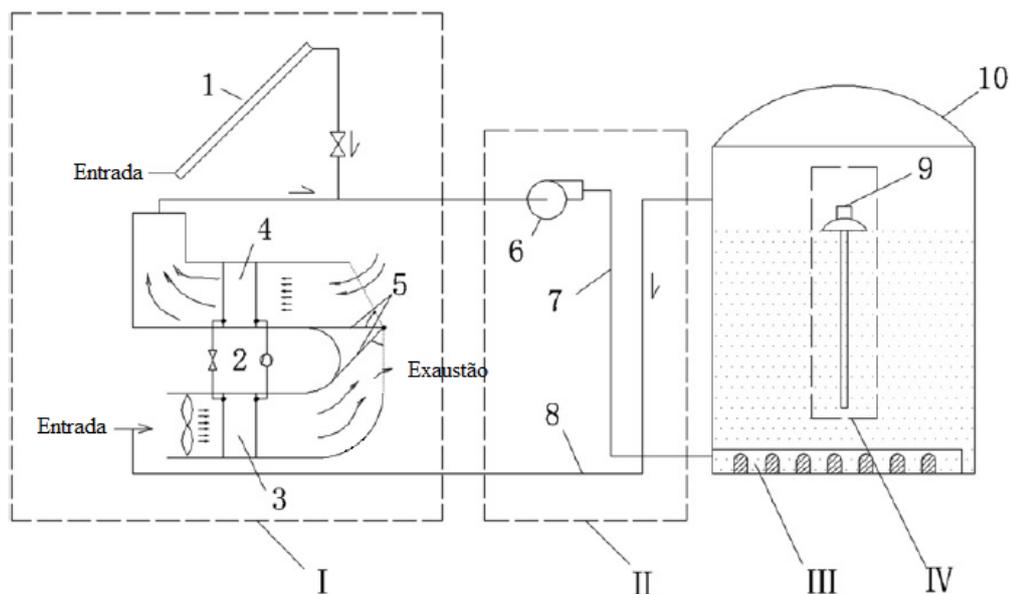
A estratégia de busca elaborada forneceu um total de 97 estudos. Após a triagem pela leitura dos títulos e resumos, 22 estudos foram considerados potencialmente elegíveis e lidos na íntegra pelos avaliadores. Ao término das análises, 6 artigos preencheram todos os critérios de inclusão para o estudo: Li(2011), Mortezapour (2012), Sevik (2013), Sevik (2014), Mohanraj (2014) e Yahia (2016). Os estudos selecionados foram publicados entre os anos de 2011 e 2016.

Dentre os estudos selecionados, todos foram realizados em países em desenvolvimento (China, Iran, Turquia (2), Índia, Indonésia). Os objetivos dos autores tiveram em comum avaliar a performance do sistema implementado.

Neste estudo serão apresentados brevemente cada artigo, juntamente com as particularidades de cada estrutura, e os parâmetros de desempenho.

### **Investigação Experimental de um Sistema de Secagem em Armazém por BCAES**

Li *et al.* (2011) desenvolveu e analisou a performance de um protótipo de bomba de calor assistida por energia solar para a secagem de alimentos em celeiro conforme Fig. 2.2 composto por quatro unidades: (I) bomba de calor assistida por energia solar, (II) sistema de fornecimento e recirculação de ar, (III) unidade de distribuição de ar, e (IV) agitador automático de grãos. O sistema apresenta ainda um diafragma móvel com a finalidade de possibilitar a entrada de ar fresco e controlar a temperatura do ar no processo de secagem. O sistema pode operar em quatro modos de acordo com as condições climáticas: aquecimento por energia solar, aquecimento por bomba solar, aquecimento por bomba de calor assistido por energia solar ou desumidificação bomba de calor. O agitador de grãos tem por finalidade garantir uma homogeneidade no nível de umidade dos grãos ao longo do celeiro.

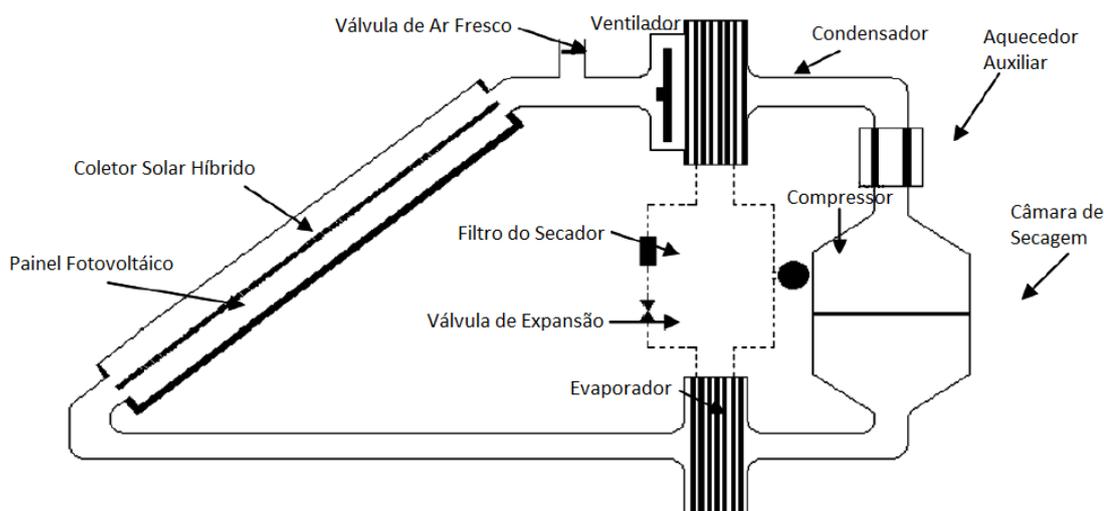


**Figura 2.2** - Esquema de um BCAES, 1. coletor solar, 2. bomba de calor, 3. evaporador, 4. condensador, 5. diafragma móvel, 6. ventilador, 7. duto de ar, 8. duto de recirculação de ar, 9. agitador de grãos, 10. Celeiro. Traduzido de Li (2011).

Foram analisados o nível de consumo de potência e a qualidade do grão. A diferença média de temperatura entre o ambiente e ar de secagem foi de 8.9 °C, a umidade relativa dentro do celeiro variou de 13.6 à 37.7 % durante um processo de 42 horas, devido à baixa temperatura de operação e o alto tempo de secagem a qualidade dos grãos não foi comprometida, o nível de consumo de potência foi de 1.24 kWh. a diferença máxima de umidade entre grãos dentro do celeiro foi de 4.2% garantindo uma nível de umidade uniforme nos produtos.

### **Secagem de Açafão com um Secador por Bomba de Calor Assistida por um Híbrido Fotovoltaico-Térmico Solar**

Mortezapour (2012) propôs a análise de um secador híbrido fotovoltaico-térmico (PVT) solar equipado com uma bomba de calor para a secagem de açafão conforme Fig. 2.3. O ar passa pelo evaporador onde é resfriado e desumidificado, segue para o coletor solar onde é aquecido e resfria o painel fotovoltaico, depois sofre aquecimento no condensador e em um aquecedor elétrico auxiliar antes de entrar na câmara de secagem. Existe ainda uma válvula de ar fresco controlada eletronicamente a fim de reduzir temperatura e umidade relativa do ar que passa no coletor solar.



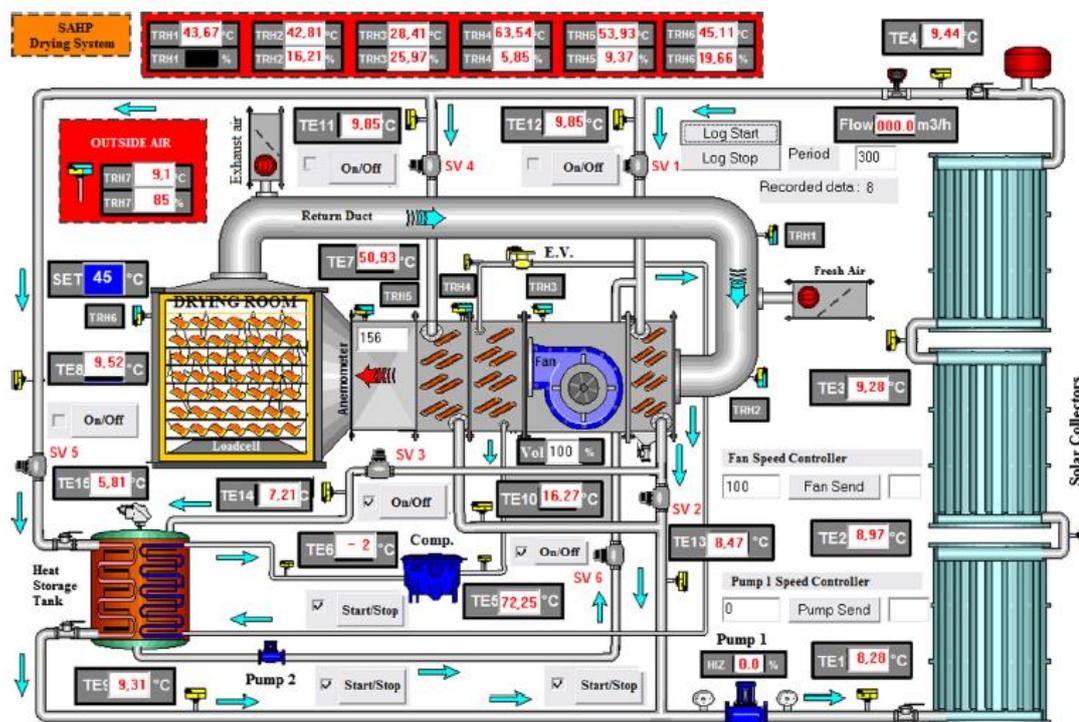
**Figura 2.3** -Esquema de Bomba de Calor Assistida por Fotovoltaico-Térmico Solar. Traduzido de Mortezapour (2012).

O sistema operou em três níveis de vazão mássica de ar (0.008, 0.012 e 0.016 kg/s) e três níveis de temperatura (40, 50 e 60 °C), em dois modos (com e sem o uso da bomba de calor). Verificou-se que a taxa de secagem aumenta com a temperatura do ar de secagem, maior fluxo de ar promove aumento da eficiência térmica (28%) e elétrica (10.2%) do sistema. A presença da bomba de calor promove desumidificação e redução da umidade relativa do ar de secagem de forma a intensificar a taxa de secagem, além de resfriar o painel fotovoltaico o que melhora sua eficiência elétrica (redução média de 33% no consumo de energia elétrica). O secador apresentou eficiência máxima de 72% com SMER de 1.16 obtida com fluxo de ar de 0.016 kg/s e temperatura de 60°C.

### Secagem de Cogumelo com BCAES

Sevik *et al.* (2013) examinou experimentalmente a secagem de cogumelos utilizando de um sistema de secagem por bomba de calor assistida por energia solar. Foi desenvolvido um programa de computador para monitoramento do sistema a fim de controlar temperatura de secagem, umidade relativa, peso dos produtos, velocidade do ar, dentre outros, usando de Controlador Logico Programável (CLP). O sistema é composto basicamente de câmara de secagem, bomba de calor, sistema de energia solar, dutos de ar, tubulações de água e instrumentação, conforme Fig. 2.4. O sistema é configurado para operar em três modos: apenas com energia solar, apenas com a bomba de calor ou bomba de calor assistida por energia solar, sendo o modo de operação definido em função de

condições climáticas. O sistema apresenta ainda armazenamento de energia térmica com função de suprimento auxiliar em condições de ausência de energia solar e aquecimento da bomba de calor insuficiente.

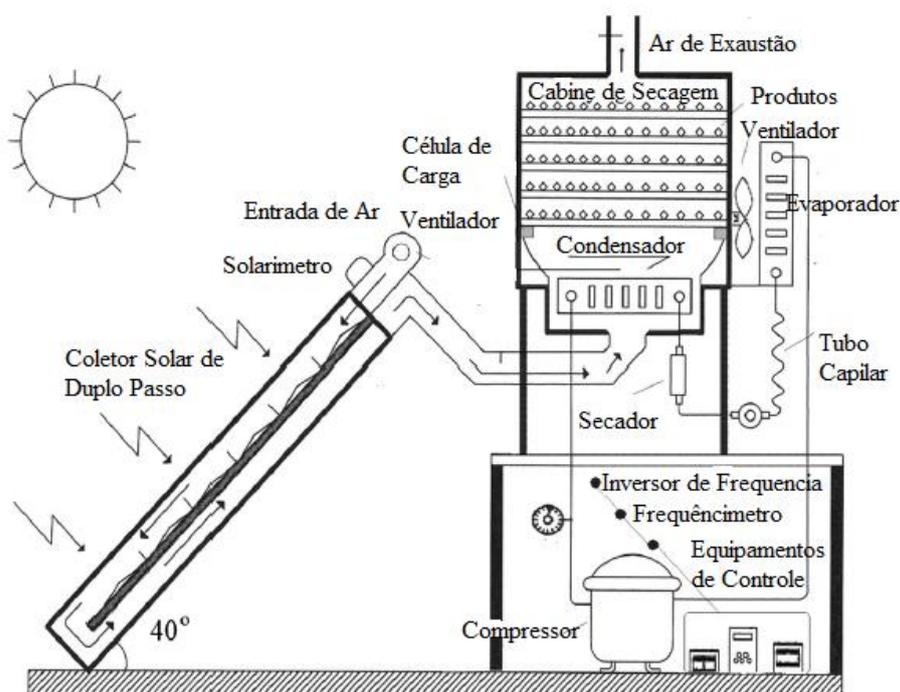


**Figura 2.4** - Programa de monitoramento de sistema de secagem BCAES (SEVIK, 2013).

Foram obtidos COP entre 2.1 e 3.1, a taxa de utilização de energia variou entre 0.42 e 0.66, SMER variou entre 0.26 e 0.92 kg/kWh. Verificou-se que a energia solar é melhor em termos de consumo de energia, pois foi na situação de uso apenas de energia solar que se obteve o SMER máximo, com uma temperatura de secagem de 55 °C. Devido ao sistema de controle e instrumentação robusto o secador reduziu os erros de operação por interferência humana. A aplicação de energia solar melhorou a eficiência térmica da bomba de calor. O processo de secagem pode ser contínuo, com utilização de energia solar se disponível e funcionamento por bomba de calor na ausência de energia solar. A melhor qualidade do cogumelo seco foi alcançada com temperatura de secagem de 45°C, no entanto nas demais temperaturas a qualidade não foi comprometida.

### Investigação Experimental de um Novo Projeto de Secador Solar-Bomba de Calor sobre Diferentes Condições Climáticas e Comportamento de Secagem dos Produtos Seleccionados

Sevik (2014) propôs um novo projeto de secador com bomba de calor assistida por energia solar para analisar experimentalmente a secagem de quatro produtos agrícolas (tomate, morango, hortelã e salsa). Através da utilização de um controlador (PID) a secagem foi realizada a uma temperatura constante de 50°C e o comportamento da secagem, bem como os efeitos do controlador no sistema, foram analisados. Constituído por unidade fotovoltaica (PV), um coletor de ar com passe duplo (DPSAC), bomba de calor (HP) e o sistema de controle automático, o secador, Fig. 2.5, pode operar em três modos de trabalho: aquecimento por energia solar, aquecimento por bomba solar e aquecimento por bomba de calor assistido por energia solar.



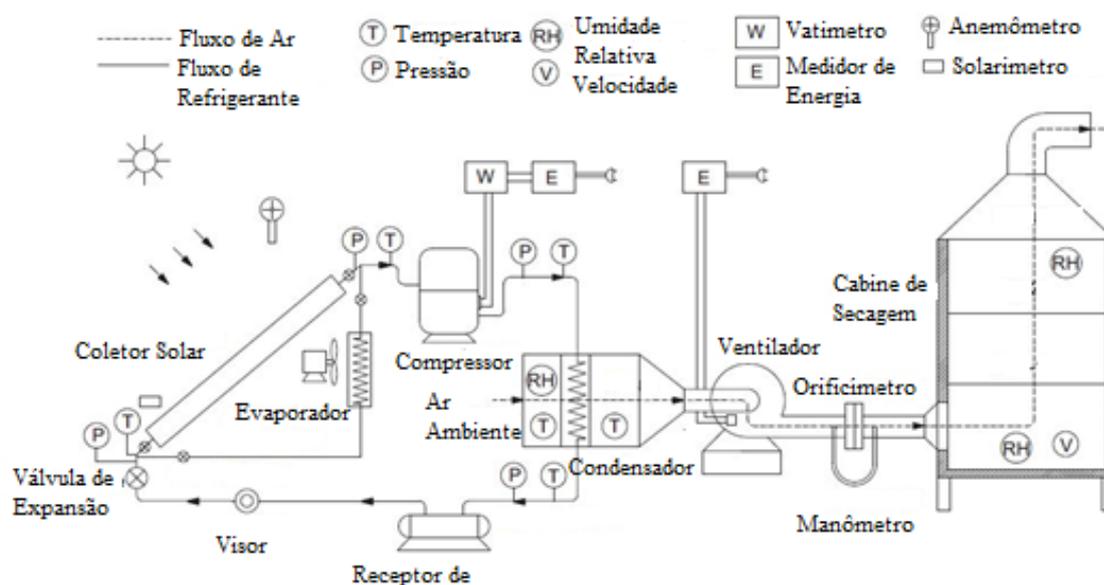
**Figura 2.5** -Esquema de BCAES. Traduzido de Sevik (2014).

Após as experiências foram obtidos como resultados os coeficientes de desempenho de todo o sistema (COP) de 1.96, 2.27, 2.28 e 2.17 para o tomate, morango, menta e salsa respectivamente. A média da eficiência térmica da (DPSAC) foi entre 16% e 79%. Uma

taxa de extração de umidade específica (SMER) de todo o sistema variando entre 0,03 kg/kW h e 0,46 kg/kW h para os produtos e uma taxa de utilização de energia (EUR) entre 0,19 e 0,48.

### Performance de um Híbrido Solar-Ambiente fonte de um Secador por Bomba de Calor para Secagem de Côco sobre condições climáticas quente e úmida

Mohanraj (2014) avaliou parâmetros para verificar o desempenho energético de um sistema híbrido solar ambiente de uma bomba de calor para a secagem de coco no clima quente e úmido da Índia. A Fig. 2.6 mostra a configuração dos dois circuitos que compõem o sistema. O circuito da bomba de calor é composto por um compressor alternativo com entrada nominal de 1020 W, um condensador, um receptor líquido, um visor de vidro, um secador de refrigerante, um dispositivo de expansão termostática e um coletor solar. O circuito de secagem de ar consiste em um condensador, um ventilador com potência de 735 W, um medidor de orifício, uma válvula de controle, e uma câmara de secagem.



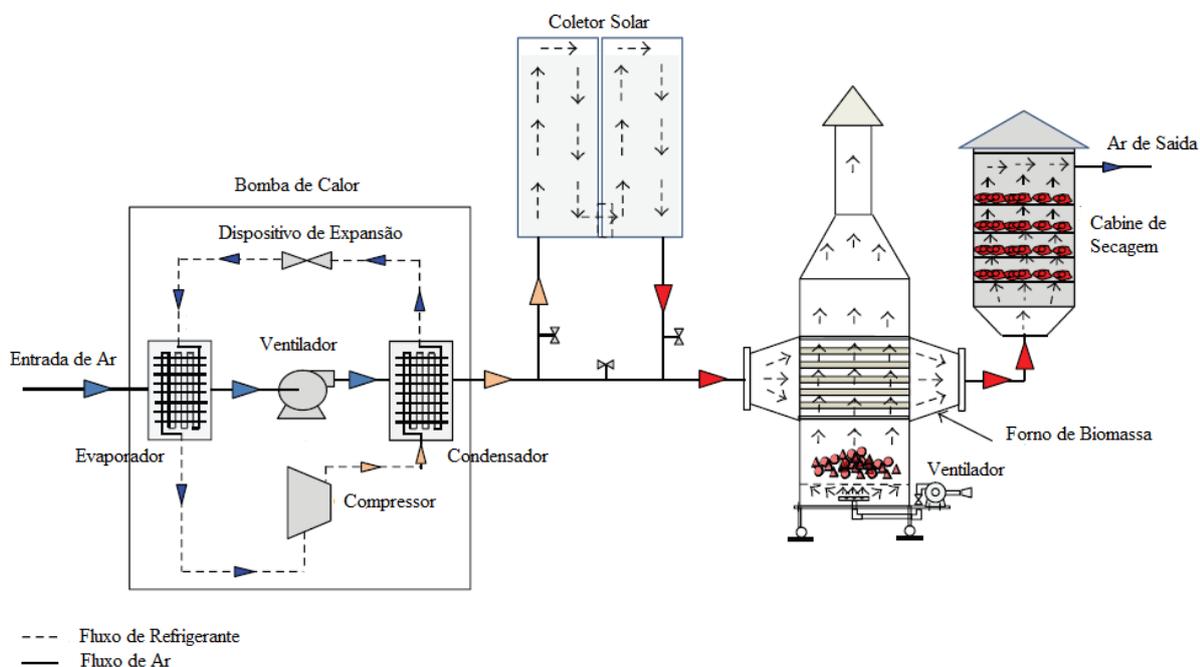
**Figura 2.6** - Esquema de BCAES. Traduzido de Monrahaj (2014).

Obeve-se como resultados um COP (coeficiente de desempenho) variando entre 2,31 e 2,77 com um valor médio de 2,54; um SMER (taxa de extração de umidade específica) de 0,79 e uma redução significativa no teor de umidade do coco de 52% para 9,2% e 9,8%

nas bandejas inferior e superior colocadas na câmara de secagem em um período de 40 horas.

### Projeto e Avaliação de Performance de um Secador BCAES Integrado com um Forno de Biomassa para Pimenta Vermelha

Yahya (2016) investigou o desempenho de uma bomba de calor assistida por energia solar integrada com um forno de biomassa para a secagem de pimenta vermelha. A implementação do forno busca revolver desvantagens das técnicas atuais de secagem, pois proporciona uma baixa umidade relativa do ar e possibilita a realização de processos de secagem em dias nublados, chuvosos e à noite. O sistema é constituído de bomba de calor, coletor solar, forno de biomassa, câmara de secagem e ventilador, conforme Fig. 2.7.



**Figura 2.7** -Esquema de BCAES acoplado à Forno de Biomassa. Traduzido de Yahia (2016).

Comparou-se a secagem com bomba de calor com a secagem ao sol aberto e obteve-se uma economia de tempo de secagem de 82% em uma amostra de 22 kg. Foram obtidos em média uma taxa de secagem de 1,57 kg/h, uma taxa de extração de umidade específica (SMER) de 0,14 kg/kWh e uma eficiência térmica do secador de 9.03%. O desempenho de três modelos matemáticos (Newton, Henderson-Pabis e Page) foi avaliado, para verificar

qual modelo descreve melhor a cinética da secagem das pimentas vermelhas, a partir da comparação entre o coeficiente de desempenho (COP) da bomba de calor obtido de 3.84.

## 2.4 DISCUSSÃO

Nesta seção foram feitas comparações entre os parâmetros de performance dos artigos apresentados bem como as estruturas. Além dos parâmetros de performance previamente definidos na tabela estão apresentados a Eficiência Térmica do Coletor Solar (ETCS), Conteúdo de Umidade Inicial (CUI) e Conteúdo de Umidade Final (CUF) e Tempo de Secagem (TS).

**Tabela 2.1 - Parâmetros Avaliados em BCAES Aplicados à Secagem de Alimentos.**

	<b>SMER (kg/kWh)</b>	<b>EUR</b>	<b>COP</b>	<b>ETCS(%)</b>	<b>CUI (%)</b>	<b>CUF(%)</b>	<b>TS (h)</b>
Li (2011)					12.90	12.50	42.0
Mortezapour (2012)	1.16			10.8 a 28			
Sevik (2013)	0.26 a 0.92	0.42 a 0.66	2.10 a 3.10	50 a 75	92.98	6.50	2.8 a 4.5
Sevik (2014)	0.03 a 0.46	0.19 a 0.48	1.96 a 2.28				
Monrahaj (2014)	0.79		2.31 a 2.77		52.00	9.80	40.0
Yahia (2016)	0.14				80.99	7.41	11.0

### **Análise de Parâmetros de Desempenho Térmico: COP e ETCS**

Com relação ao COP três trabalhos apresentaram a análise deste parâmetro, onde os melhores resultados foram obtidos em Sevik (2013) e Monrahaj (2014). No entanto vale ressaltar que Monrahaj (2014) calculou o COP especificamente da Bomba de Calor considerando apenas o trabalho do compressor e o calor do condensador, não apresentando as influências do coletor solar e do consumo de energia dos demais componentes do sistema, enquanto que Sevik (2013) definiu o COP da Bomba de Calor e também o COP do sistema como um todo levando em conta os consumos de energia de equipamentos

auxiliares do sistema, mas também não levou em conta o efeito do aquecimento do coletor solar, conseqüentemente se Monrahaj (2014) considerasse a energia consumida por demais equipamentos do sistema poderia apresentar um COP ainda menor. Seria interessante a implementação de uma eficiência exergética pois esta leva em conta as condições do meio que apresentam importância significativa no processo de secagem.

Montezapour (2012) e Sevik (2013) apresentam a eficiência térmica de seus coletores solares, o que deveria também ser um padrão tendo em vista que a energia solar é um dos princípios de funcionamento de BCAES, no entanto este parâmetro também sofre influência do meio e de disponibilidade que depende das condições climáticas de cada região.

### **Parâmetros de Performance de Desempenho Elétrico: EUR e SMER**

Com relação à desempenho elétrico existe a necessidade de padronização de um parâmetro para este critério de desempenho. Os trabalhos de Sevik (2013) e Sevik (2014) apresentaram este critério de desempenho, Li (2011) apresentou a energia total consumida durante o seu procedimento de secagem e a energia consumida para reduzir em 1% o conteúdo de umidade de 1 tonelada de grão. Montezapour (2012) apresentou também a energia total consumida para os processos de secagem que analisou.

Com relação ao SMER os trabalhos de Monrahaj (2014) e Sevik (2013) apresentaram melhores resultados. Existe uma dificuldade na comparação destes resultados tendo em vista que alimentos diferentes apresentam comportamentos diferentes durante o processo de secagem, e que indiretamente as condições climáticas afetam as condições do ar de secagem, principalmente em sistemas abertos e sistemas que não possuem implementação de controle e instrumentação robustos. O parâmetro SMER tem se apresentado como um padrão de análise, tendo sido apresentado em 5 dos 6 trabalhos analisados, no entanto seria importante a criação de um parâmetro que levasse em conta as propriedades de secagem de para diferentes tipos de alimento.

### **Parâmetro de Secagem: DR**

A Taxa de Secagem apresenta a relação entre a massa da umidade retirada e o tempo aplicado para a retirada desta massa, apenas Yahia (2016) apresentou um valor médio este parâmetro em seu procedimento. DR se apresenta como um importante parâmetro a ser acompanhado durante o processo de secagem a fim de caracterizar o

comportamento dos alimentos a medida que o processo de secagem se desenvolve.

### **Parâmetros de Operação**

Um dos principais parâmetros de operação pode ser destacado é a temperatura do ar de secagem que variou de 40 à 60 °C, percebe-se que maiores temperaturas levam à um menor tempo de secagem e a maiores danos nas propriedades nutritivas e estéticas dos produtos, no entanto para os trabalhos analisados os danos provocados pelas temperaturas mais elevadas não comprometeram a qualidade dos produtos.

### **Melhorias de Projeto**

Li (2011) teve como principal contribuição propor uma secagem continua de produtos já armazenados, apesar de conteúdo de umidade retirado ter sido baixo houve uma grande contribuição pela garantia de uma melhor uniformidade do conteúdo de umidade de todo produto armazenado, apresentando uma padronização desta característica dos produtos. Montezapour (2012) implementou um coletor solar termo-fotovoltaico que aproveitou a energia solar tanto para aquecimento de ar como produção de energia elétrica, fazendo ainda com que o evaporador da bomba de calor resfriasse a placa fotovoltaica aumentando sua elétrica. Sevik (2013) apresentou um sistema de instrumentação e controle robusto garantindo um melhor controle sobre os parâmetros de operação, propriedades do produto seco e reduzindo a possibilidade de erro humano além de também utilizar o coletor solar como fonte de calor para a Bomba de Calor. Sevik (2014) implementou um controle PID estratégico que garantia a temperatura de secagem independente das condições ambientais, o sistema alterava seus modos de operação automaticamente em função das condições climáticas. Monrahaj (2014) apresentou um sistema eficiente aproveitando de melhores condições climáticas. Yahia (2016) apresentou a queima de biomassa como uma alternativa para aquecimento auxiliar do ar de secagem, podendo se aproveitar de resíduos orgânicos para complementar o fornecimento de calor ao ar e consequentemente reduzir o consumo de energia da bomba de calor.

## **2.5 CONCLUSÃO**

A principal vantagem da secagem por meio de bomba de calor emerge da habilidade destes dispositivos de recuperar energia dos gases de exaustão, e também de controlar a

temperatura e umidade das condições de secagem. Existe vasta literatura científica sobre a importância de condições precisas de secagem para melhorar a qualidade dos produtos. A revisão sistemática e detalhada desenvolvida neste trabalho teve o objetivo de consultar o Google Acadêmico e o Periódicos CAPES, restringindo a busca para artigos publicados entre 2011 e 2016, com as seguintes palavras-chave Bomba de Calor Assistida por Energia Solar, Secagem de Alimentos, *Heat Pump Dryer*, *Solar Energy*.

Esta revisão mostrou que sistemas BCAES aplicados a secagem apresentam um grande potencial em pesquisa em desenvolvimento, observa-se a necessidade de padronização dos parâmetros de performance e criação de novos que levem em conta as condições ambientais de cada região e as propriedades dos tipos de alimento que estão sendo secados. Observa-se também que o sistema apresenta diversas vantagens com relação aos secadores convencionais, e que a implementação de controle e instrumentação adequados podem promover ainda mais melhorias nos sistemas bem como nos produtos. Inovações tem sido implementadas e associação deste sistema a outros sistemas térmicos vem sendo avaliadas. É essencial para os países que apresentam uma indústria alimentícia forte o desenvolvimento de pesquisa no sentido de aprimorar os sistemas de secagem e promover o desenvolvimento de equipamentos sustentáveis e eficientes e neste contexto se encaixa o Brasil e a Pesquisa & Desenvolvimento de Bombas de Calor Assistidas por Energia Solar para a Secagem de Alimentos.

## 2.6 REFERÊNCIAS

- BEST, R. et al. Experimental results of a solar assisted heat pump rice drying system, **Renewable energy**, v.9, n.1, p. 690-694, 1996.
- CHONG, C. H.; FIGIEL, A.; LAW, C. L.; WOJDYŁO, A. Combined drying of apple cubes by using of heat pump, vacuum-microwave, and intermittent techniques. **Food and Bioprocess Technology**, v.7, n.4, p. 975-989, 2014.
- CHOU, S. K.; CHUA, K. J. New hybrid drying technologies for heat sensitive food stuffs. **Trends in Food Science & Technology**, v. 12, n.10, p. 359-369, 2001.
- CHOU, S. K.; CHUA, K. J. **Heat pump drying systems**, Handbook of industrial drying. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis Inc, p.1122-1123, 2006.
- CHUA, K. J.; CHOU, S. K.; YANG, W. M. Advances in heat pump systems: A review. **Applied Energy**, v.87, p.3611-3624, 2010.

- DAGHIGH, R. et al. Review of solar assisted heat pump drying systems for agricultural and marine products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.14, p.2564-2579, 2010.
- FAYOSE, F.; HUAN, Z. Heat Pump Drying of Fruits and Vegetables: Principles and Potentials for Sub-Saharan Africa. **International journal of food science**, 2016.
- JANGAM, S. V. An overview of recent developments and some R&D challenges related to drying of foods. **Drying Technology**, v.29, n.12, p.1343-1357, 2011.
- KAYGUSUZ, K.; AYHAN, T. Experimental and theoretical investigation of combined solar heat pump system for residential heating. **Energy Conversion and Management**, v. 40, n. 13, p. 1377-1396, 1999.
- KEMP, I. C. Fundamentals of energy analysis of dryers. **Modern Drying Technology**, v. 4, p.1-46, 2011.
- LI, Y. et al. Experimental investigation on a solar assisted heat pump in-store drying system. **Applied Thermal Engineering**, v.31, n.10, p.1718-1724,2011.
- MUJUMDAR, A. S. (Ed.), **Handbook of industrial drying**, CRC Press, 2014.
- MOHANRAJ, M. Performance of a solar-ambient hybrid source heat pump drier for copra drying under hot-humid weather conditions. **Energy for Sustainable Development**, v.23, p.165-169, 2014.
- MORTEZAPOUR, H. et al. Saffron drying with a heat pump–assisted hybrid photovoltaic–thermal solar dryer. **Drying Technology**, v.30, n.6, p.560-566, 2012.
- RAHMAN, S. M. A., SAIDUR, R., HAWLADER, M. N. A. An economic optimization of evaporator and air collector area in a solar assisted heat pump drying system. **Energy Conversion and Management**, v. 76, p. 377-384, 2013.
- ŞEVIK, Seyfi et al. Mushroom drying with solar assisted heat pump system. **Energy Conversion and Management**, v.72, p. 171-178, 2013.
- ŞEVIK, S. Experimental investigation of a new design solar-heat pump dryer under the different climatic conditions and drying behavior of selected products. **Solar Energy**, v.105, p. 190-205, 2014.
- SOPIAN, K.; OTHMAN, M. Y.; ZAIDI, S. H. **Advances in solar assisted drying system for marine and agricultural products**, p. 1-6, 2012.
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E., BORGNAKKE, C., 2003. *Fundamentos da Termodinâmica*. Ed. Edgard Blücher. Paulo, Brasil, 577 p.
- YAHYA, M. Design and Performance Evaluation of a Solar Assisted Heat Pump Dryer

Integrated with Biomass Furnace for Red Chilli. **International Journal of Photoenergy**, ID 8763947, 14 p., 2016.

ZHANG, D.; WU, Q. B.; LI, J. P.; KONG, X. Q. Effects of refrigerant charge and structural parameters on the performance of a direct-expansion solar-assisted heat pump system. **Applied Thermal Engineering**, v.73, n.1, p. 522-528, 2014.

### 3 ARTIGO 2

## ANÁLISE TERMODINÂMICA DE UMA BOMBA DE CALOR PARA DESUMIDIFICAÇÃO E AQUECIMENTO DE AR

**RESUMO:** As Bombas de calor utilizadas para secagem apresentam melhor controle de temperatura e umidade do ar e são excelentes alternativas para substituir secadores tradicionais por proporcionarem uma economia de energia, maior eficiência e menores emissões de dióxido de carbono. Este artigo discute a configuração experimental localizada no Centro de Energias Alternativas e Renováveis, da Universidade Federal da Paraíba. A bomba de calor utiliza o fluido refrigerante R22 e é utilizada para fins de aquecimento e desumidificação do ar, este sistema é constituído por dois permutadores de calor, compressor, dispositivo de expansão e ventilador. O desempenho do dispositivo é analisado através da análise energo-exérgica, apontando onde ocorrem as perdas de energia e irreversibilidades e permitindo recomendações e sugestões de melhorias. O modelo termodinâmico foi construído dentro da plataforma Engineering Equation System. A temperatura e umidade relativa do ar de entrada foram, respectivamente, 28.65°C e 77,7%. O ar de saída do sistema apresentou 22,3% de umidade relativa e 51.3°C, e os equipamentos apresentaram no geral bom desempenho energético, apesar de problemas identificados na instrumentação dificultando a modelagem do ciclo termodinâmico do refrigerante R22. Os resultados incluem a configuração preliminar, e as alterações implementadas e em curso bem como sugestões de modificações futuras.

**Palavras-Chave:** Sustentabilidade, Bomba de calor, Energia solar, Eficiência energética, análise do ciclo de vida.

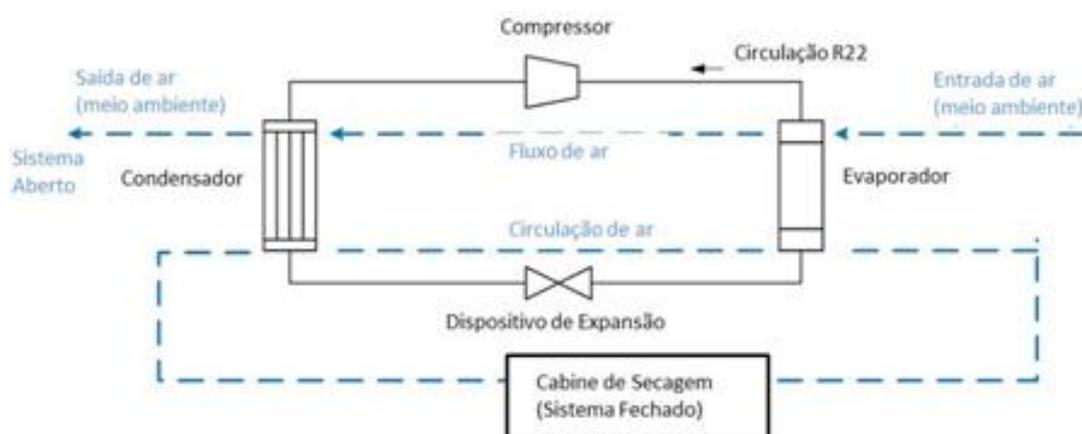
### 3.1 INTRODUÇÃO

A secagem de produtos agrícolas é responsável por grande consumo de energia em atividades industriais, comerciais e residenciais. Também é um dos processos mais antigos utilizado para conservação de alimentos. A secagem remove a umidade do produto, e impede o desenvolvimento de microrganismos que necessitam de água para sobreviver e, portanto, é um processo importante para estocagem de alimentos perecíveis e para agregar valor a certos produtos agrícolas (OLIVEIRA; MATA, 1999). Vários níveis de temperatura e princípios de secagem estão disponíveis em secadores industriais. Em muitos casos, sistemas de secagem a temperaturas relativamente baixas representam uma solução viável por evitar a deterioração dos nutrientes termosensíveis do alimento (ROSSI, 1993).

A bomba de calor utilizada para secagem pode ser um tipo de sistema híbrido ou combinado de secagem, que inclui a aplicação de diferentes modos de transferência de

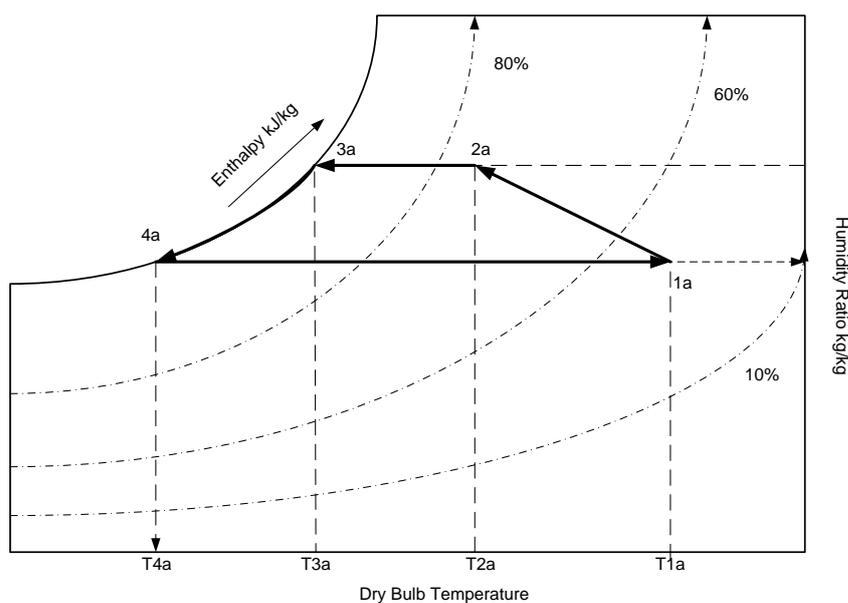
calor, duas ou mais fases de um mesmo ou diferente tipo de secador (PATTEL; KAR, 2012). De acordo com Adapa (2001), nos secadores convencionais o ar de exaustão é descarregado no meio ambiente e energia é perdida. No entanto, nas bombas de calor utilizadas para secagem, tanto calor sensível como calor latente podem ser recuperados e assim melhorar o desempenho térmico global.

O calor latente é recuperado por desumidificação do ar no evaporador: a mistura de vapor-ar é resfriada abaixo da temperatura do ponto de orvalho. A bomba de calor opera utilizando os mesmo componentes de um sistema básico de refrigeração com quatro componentes principais: dois permutadores de calor (evaporador e condensador), dispositivo de expansão e compressor (Fig. 3.1).



**Figura 3.1** - Esquema geral da bomba de calor (ciclo aberto ou fechado)  
(Traduzido de ADAPA, 2001).

Na Fig. 3.2, o processo de secagem segundo Adapa (2001) foi considerado isentálpico/adiabático (não houve transferência de calor e massa entre o material e o ambiente); esta condição ocorre quando a umidade removida é principalmente a umidade da superfície do material. A temperatura do ar no evaporador (ponto 4a) foi estabelecida em 5°C para evitar formação de gelo. O ponto 1a corresponde ao ar na entrada do secador, ponto 2a é a entrada do evaporador, e no ponto 4a é a entrada do condensador.



**Figura 3.2** - Gráfico do processo de secagem representado na carta psicrométrica (ADAPA, 2001).

As bombas de calor utilizadas em processos de secagem, além de proporcionar melhores condições operacionais, permitem um melhor controle da temperatura e umidade do ar, sendo excelentes alternativas para substituir secadores convencionais. Seu uso promove uma redução de energia, uma melhor eficiência energética e menor impacto ambiental. O uso de bombas de calor pode resultar em economias de energia primária entre 20 e 40% quando comparado com secadores convencionais que operam entre as mesmas temperaturas (COLAK; HEPBASLI, 2009). As economias de energia alcançadas com o uso de bombas de calor já tinham sido pesquisadas por Smith (1949), que apresentou vários gráficos e estudos em que as bombas de calor apresentam forte potencial de economia de energia ao longo do seu tempo de vida, mesmo considerando o custo relativamente elevado de capital.

Este trabalho apresenta uma explicação detalhada sobre uma bomba de calor utilizada para fins de aquecimento e desumidificação do ar. Dentro deste quadro, foram identificadas as irregularidades encontradas e foram formuladas recomendações técnicas para se obter uma maior eficiência energética, visando reduzir o desperdício e melhorar a utilização dos recursos naturais.

### 3.2 METODOLOGIA

A Bomba de Calor utilizada foi desenvolvida no Laboratório de Sistemas de Refrigeração e Adsorção da Universidade Federal da Paraíba (cidade de João Pessoa), onde também foram realizados os experimentos, a Fig. 3.3 mostra os componentes do sistema enumerados. Esta bomba de calor foi construída para promover a secagem de produtos agrícolas e opera em ciclo aberto. É constituída de um ventilador (1), um condensador (2), um compressor (3), um evaporador (4) e um dispositivo de expansão (5). Ao contrário dos sistemas de refrigeração, a bomba de calor utiliza o calor de dissipação do circuito de refrigeração com duas finalidades: desumidificar e aquecer o ar. O objetivo básico de uma bomba de calor num sistema de secagem é, portanto, fornecer ar quente e desumidificado para uma câmara de secagem (ADAPA, 2001), podendo operar em ciclo aberto ou fechado. Quando o sistema é acionado, o ventilador succiona o ar ambiente fazendo-o passar primeiramente pelo evaporador, onde é resfriado e desumidificado e, em seguida, pelo compressor e condensador, onde é aquecido, e no final do condensador será acoplado uma bandeja com o produto a ser seco. O ar de saída após secar o alimento, em ciclo aberto, como encontra-se a configuração atual, é lançado na atmosfera.

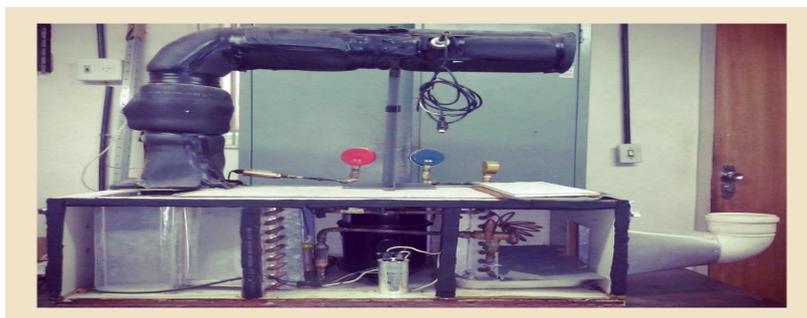


**Figura 3.3** - Vista superior da bomba de calor e seus componentes: ventilador (1), condensador (2), compressor (3), evaporador (4) e dispositivo de expansão (5).

(LUIZ, 2012).

O sistema foi vedado utilizando espuma de poliestireno e silicone com a intenção de diminuir a troca de calor com o ar ambiente evitando perdas energéticas e os equipamentos ficam acoplados em uma caixa de MDF. A Fig. 3.4 mostra a vista lateral da bomba de calor com a caixa de isolamento de MDF aberta para visualização de todos os

componentes.

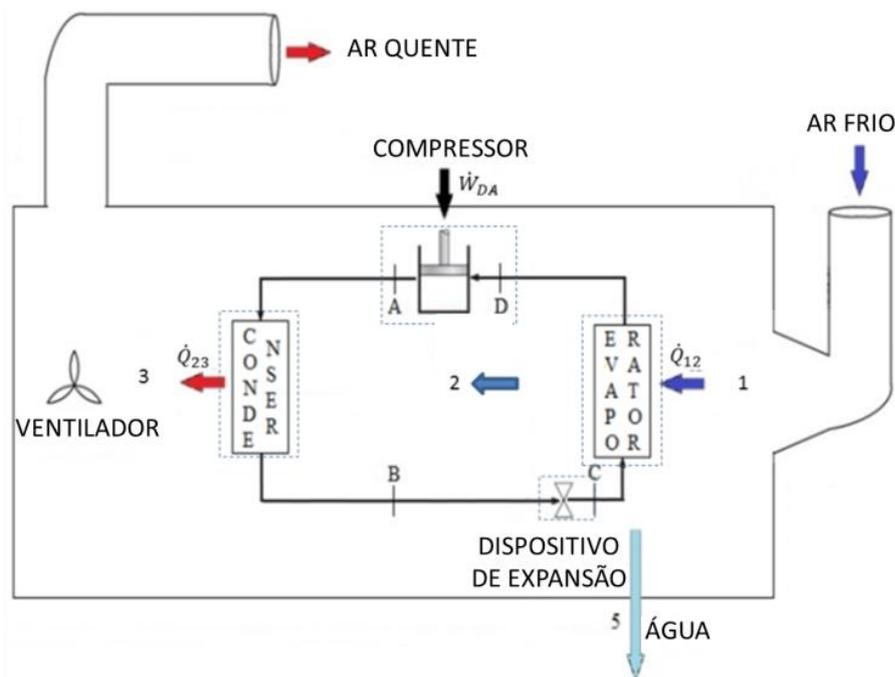


**Figura 3.4** - Imagem lateral da bomba de calor em ciclo aberto.  
(LUIZ, 2012).

Para realizar as medições de temperatura foram utilizados três termopares tipo K, sendo dois aplicados para monitorar o comportamento térmico do fluido refrigerante na entrada (pontos D) e saída do compressor (ponto A) e um termopar aplicado para monitorar o comportamento do ar localizado na saída do evaporador (Ponto 2). Para obter os parâmetros de temperatura e umidade relativa do ar na entrada (Ponto 1) e saída (Ponto 2) do sistema, foi utilizado um termohigrômetro. A umidade absoluta foi calculada a partir da umidade relativa. As medições de pressão foram realizadas na saída do evaporador, utilizando o transmissor de pressão PS-100. Os sensores de temperatura utilizados foram termistores de platina (tipo PT-100) com software LabVIEW® de 2009 para registro de dados. A água condensada a partir do evaporador foi recolhida e medida num béquer. Um amperímetro tipo alicate foi utilizado para medir a corrente elétrica no compressor e ventilador.

### 3.2.1 Análise Termodinâmica

Um esquema do sistema de bomba de calor é mostrado na Fig. 3.5, com a localização dos volumes de controle. As letras A, B, C e D representam o ciclo do fluido refrigerante, enquanto que os números (1, 2, 3) representam o processo de ar. Todos os processos são considerados estacionários e as variações de energia cinética e potencial foram nulas.



**Figura 3.5** -Esquema da bomba de calor com os quatro volumes de controle e os estados para o R22 (A, B, C, D) e para o ar (1, 2, 3).Adaptado de Maia (2015).

Foi necessário realizar algumas considerações para definir os estados termodinâmicos que não tiveram como ser medidos devido a limitações das instrumentações disponíveis.

O Estado A foi definido considerando que o processo de compressão ocorreu com uma eficiência isentrópica ( $N_{iso}$ ) de 90%, utilizando da Eq.(3.1) para a determinação da entalpia do estado A ( $h_A$ ), que foi complementada com a temperatura medida na saída do compressor para a definição deste estado. O Estado B foi determinado considerando que o condensador funciona a pressão constante e que o refrigerante sai do condensador como um líquido saturado (título = 0). Para o Estado C foi considerado um processo de expansão isentálpica e que o evaporador opera a uma pressão constante. O Estado D foi definido pelas medições de pressão e de temperatura na saída do evaporador.

$$h_A = \frac{[h_{A_{iso}} + h_D(N_{iso} - 1)]}{N_{iso}} \quad (3.1)$$

A definição dos estados termodinâmicos para o fluxo de ar foi realizado com base nas temperaturas médias nos pontos 1, 2 e 3, e umidades relativas em 1 e 3, o que permitiu o cálculo da umidade absoluta. Considerou-se que não houve variação de umidade absoluta

nos pontos 2 e 3 e a pressão do ar no interior da bomba de calor foi igual a pressão atmosférica. O estado da água condensada (ponto 5) foi definido com base na pressão atmosférica e temperatura.

### 3.2.1.1 Análise Energética

Foi considerado que o compressor opera num processo adiabático, com uma única entrada e uma única saída em regime permanente e aplicando a lei da conservação da massa e energia é obtida a Eq. (3.2):

$$\dot{W}_{AD} = \dot{m}_{R22}(h_A - h_D) \quad (3.2)$$

A Eq. (3.2) permite a determinação do fluxo de refrigerante ( $\dot{m}_{R-22}$ ), sabendo que a potência consumida pelo compressor foi medida e os estados de A e D são definidos. A análise energética do condensador foi realizada levando em consideração que o calor dissipado pelo refrigerante foi completamente absorvido pelo fluxo de ar conforme Eq. (3.3) que permite a determinação do fluxo de ar no ponto 2 ( $\dot{m}_2$ ). Pela aplicação de conservação da massa para os fluxos de ar foi obtida a Eq. (3.4).

$$\dot{m}_{R-22}(h_B - h_A) = \dot{m}_2(h_2 - h_3) \quad (3.3)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_2 = \dot{m}_1 - \dot{m}_5 \quad (3.4)$$

Onde  $\dot{m}_5$  é a massa de água condensada no evaporador e  $\dot{m}_3$  é o fluxo de ar seco, definido pela consideração de gás ideal na posição 3. O processo de evaporação tem o objetivo de desumidificação do ar, e a análise deste volume de controle determina a quantidade de calor que foi utilizado na desumidificação do ar entre 1 e 2.

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_5 h_5 - \dot{m}_1 h_1 \quad (3.5)$$

O coeficiente de desempenho ( $\beta$ ) da bomba de calor foi definido pela Eq. (3.6), foi considerado a energia pretendida é fornecida pelo calor liberado pelo condensador para aquecer o ar. Na secagem a baixa temperatura, pode-se levar em consideração a energia

consumida pelos ventiladores, e neste caso, a definição inclui este consumo no denominador (KUDRA; MUJAMDAR, 2009).

$$\beta = \frac{\dot{Q}_{23}}{\dot{W}_{comp} + \dot{W}_{vent}} \quad (3.6)$$

### 3.2.1.2 Análise Exergética

O objetivo da análise de exergia foi determinar a taxa de destruição de exergia em cada volume de controle. Inicialmente, os valores de entropia foram definidos para cada volume de controle para, em seguida, a taxa de geração de entropia ser determinada. A partir da taxa de geração de entropia, a taxa de destruição de exergia foi calculada para cada volume de controle Eq. (3.7).

$$\dot{E}_{des,O.E} = T_0 \dot{S}_{ger,O.E} \quad (3.7)$$

O coeficiente de performance ( $\beta$ ) para a bomba de calor foi estabelecido pela Eq. (3.8). A eficiência de segunda lei do dispositivo foi definida pela Eq. (3.9), onde o coeficiente de performance de Carnot ( $\beta_{carnot}$ ) foi determinado pela Eq. (3.10).

$$\beta = \frac{(-\dot{Q}_{23})}{-\dot{W}_{AD} - \dot{W}_{vent}} \quad (3.8)$$

$$\beta_2 = \frac{\beta}{\beta_{carnot}} \quad (3.9)$$

$$\beta_{carnot} = \frac{T_3}{T_3 - T_2} \quad (3.10)$$

## 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Vários experimentos foram realizados na bomba de calor em ciclo aberto nos meses de Novembro/2015 a Março/2016, e a Tabela 3.1 mostra os dados medidos experimentalmente mais representativos.

**Tabela 3.1** - Dados obtidos na bomba de calor em ciclo aberto.

<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>R (kJ/Kg·K)</b>		<b><math>\dot{W}_{\text{comp}} = \dot{W}_{\text{DA}}</math> (kJ/s)</b>		<b><math>\dot{W}_{\text{vent}}</math> (kJ/s)</b>
0.00785	0.287055		1.25		0.22917
<b>Pressões</b>					
<b>P<sub>0</sub> (kPa)</b>			<b>P<sub>D</sub> (kPa)</b>		
101.325			419		
<b>Temperaturas do Sistema</b>					
<b>T<sub>0</sub> (K) = T<sub>1</sub> (K)</b>	<b>T<sub>2</sub> (K)</b>	<b>T<sub>3</sub> (K)</b>	<b>T<sub>5</sub> (K)</b>	<b>T<sub>A</sub> (K)</b>	<b>T<sub>D</sub> (K)</b>
301.7	295.9	324.5	292.2	372.7	280.8
<b>Umidades absolutas do ar</b>			<b>Umidades relativas do ar</b>		
<b><math>\omega_1</math> (kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>ar seco</sub>)</b>	<b><math>\omega_3</math> (kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>ar seco</sub>)</b>		<b><math>\phi_1</math> (%)</b>	<b><math>\phi_3</math> (%)</b>	
0.01916	0.01858		77.7	22.3	

A área medida em m<sup>2</sup> representa a área dos tubos em PVC por onde o ar entra e sai do sistema, R (kJ/Kg·K) é a constante dos gases e  $\dot{W}_{\text{vent}}$  (kJ/s) é potência consumida do ventilador. P<sub>0</sub> (kPa) é a pressão atmosférica, P<sub>A</sub> (kPa) é a pressão na saída do compressor, P<sub>D</sub> (kPa) é a pressão na entrada do compressor, T<sub>0</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> são diferentes temperaturas para o ar (em K) para cada localização (T<sub>5</sub> representa a temperatura da água condensada), T<sub>A</sub> e T<sub>D</sub> são as temperaturas do R-22 (em K) na entrada do condensador e saída do evaporador,  $\omega_1$  e  $\omega_3$  são as umidades absolutas do ar (kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>ar seco</sub>) de entrada e saída, as umidades relativas do ar são dadas por  $\phi_1$  (%) e  $\phi_3$  (%). As umidades absolutas foram calculadas a partir da umidade relativa utilizando o software EES.

As entalpias do refrigerante e do ar para os estados termodinâmicos do sistema são mostradas na Tabela 3.2. Estes valores foram calculados pelo EES a partir dos dados de pressão e temperatura medidos.

**Tabela 3.2** - Propriedades do ar e do refrigerante em diferentes localizações do sistema.

<b>Posição</b>	<b>h (kJ/kg)</b>	<b>Posição</b>	<b>h (kJ/kg)</b>
<b>1</b>	77.55	<b>A</b>	464.7
<b>2</b>	70.04	<b>B</b>	261.9
<b>3</b>	99.78	<b>C</b>	261.9
<b>5*</b>	79.65	<b>D</b>	412.2

\*Água condensada

A análise energética permitiu quantificar os fluxos de energia em todos os volumes de controle. As considerações feitas atenderam a primeira e segunda lei da termodinâmica. Os trocadores de calor não possuíam um isolamento adequado, isto influenciou a análise

termodinâmica, principalmente no evaporador, onde a proximidade entre os volumes de controle e a ausência de uma instrumentação adequada para medir os fluxos de ar e de refrigerante, resultaram numa diferença entre os valores calculados como mostra a Tabela 3.3. A Tabela 3.3 apresenta os resultados de balanço de energia calculados para cada volume de controle.

**Tabela 3.3** -Resultado do balanço energético.

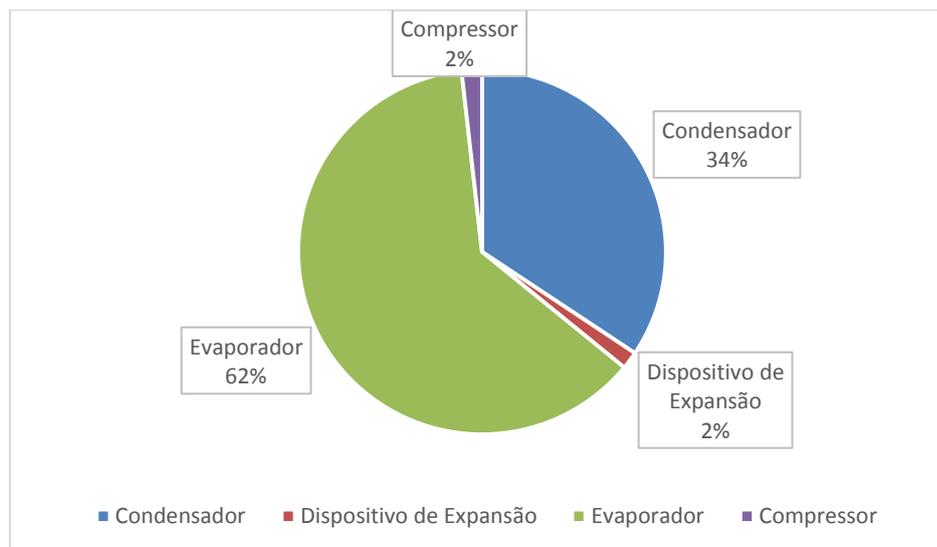
$\dot{Q}_{cond} (kW)$	$\dot{Q}_{evap} (kW)$	$\dot{W}_{comp} (kW)$
-4.825	3.575	1.25
$\dot{Q}_{23} (kW)$	$\dot{Q}_{12} (kW)$	$\dot{W}_{vent} (kW)$
4.825	-1.282	0.2292

Em relação ao balanço de entropia observou-se que os valores obtidos para a entropia gerada e a exergia destruída respeitam os princípios da termodinâmica que estabelece que a entropia gerada deve ser crescente e a exergia destruída reduzida. A Tabela 3.4 apresenta os resultados para as taxas de destruição de exergia para cada volume de controle.

**Tabela 3.4** -Exergias destruídas para cada volume de controle.

$\dot{X}_{des,cond} (kW)$	$\dot{X}_{des,exp} (kW)$	$\dot{X}_{des,evap} (kW)$	$\dot{X}_{des,comp} (kW)$
4.42	0.20	8.01	0.23

A Figura 3.6 apresenta as porcentagens de exergia destruída para cada volume de controle. Pode-se observar que os processos de expansão e compressão contribuem muito pouco para a destruição da exergia do equipamento, enquanto que a transferência de calor é responsável pela maior destruição de exergia.



**Figura 3.6** -Exergia destruída por volume de controle.

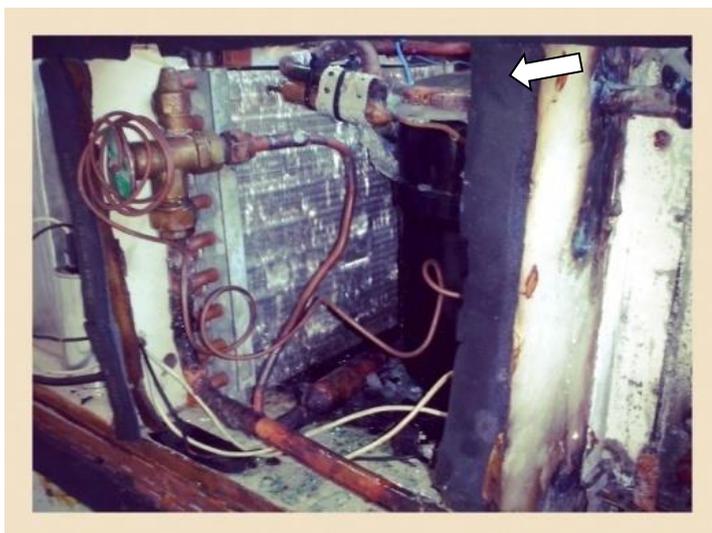
O Coeficiente de Performance da bomba de calor foi definido em 3.262, o coeficiente de performance para uma bomba de calor operando sob ciclo de Carnot entre os mesmos reservatórios é de 11.34.

Uma modelagem termodinâmica requer uma instrumentação confiável, com vários locais de medição. A bomba de calor é um equipamento que possui duas correntes de massa, uma é o ar e outra o fluido refrigerante, na qual ambas estão interagindo uma com a outra. A maior dificuldade encontrada nesta configuração experimental foi devido à ausência de medições para algumas propriedades termodinâmicas, necessárias para estabelecer os estados termodinâmicos dos fluidos (refrigerante e ar) antes e após cada volume de controle. Como não havia nenhuma medição de pressão, após o condensador, foi necessário considerar uma eficiência isentrópica para definir o estado de A. Foi considerado que os processos de condensação e de evaporação ocorreram a uma pressão constante, devido à falta de medição da pressão do fluido refrigerante na saída do condensador e na saída do dispositivo de expansão.

Como a temperatura do fluido refrigerante não foi medida na entrada e na saída do dispositivo de expansão, foi considerado um processo adiabático. Outra consideração feita para determinar o fluxo de ar foi que o calor dissipado pelo refrigerante foi completamente absorvido pelo fluxo de ar, devido a ausência de medição do fluxo de massa de ar. Além disso, nenhuma instrumentação estava disponível para medir o fluxo de massa de refrigerante e, portanto, o compressor foi considerado adiabático.

É necessário reavaliar o dimensionamento dos equipamentos. A presença de vapor superaquecido após o condensador pode ser associada com um fluxo de ar baixo, ou a temperatura alta do ar ao passar no condensador. A formação de gelo no dispositivo de expansão pode estar relacionada com vazamentos de gás, o que destaca a necessidade de um sistema de detecção de vazamentos. Outra alternativa é isolar termicamente o dispositivo de expansão, devido a umidade do ar ambiente poder condensar e congelar o dispositivo que funciona, por vezes, abaixo da temperatura de fusão da água.

A configuração experimental sofreu uma série de mudanças ao longo do processo de coleta de dados. Um dos problemas encontrados por Maia (2014) foi a formação de gelo na superfície do dispositivo de expansão (Figura 3.7). A Figura 3.8 mostra a formação de gelo no evaporador e no compressor, verificada por Leite (2015).



**Figura 3.7** - Formação de gelo na superfície da válvula de expansão encontrada durante o experimento de Maia (2014).



**Figura 3.8** - Formação de gelo na superfície do compressor e evaporador encontrados por Leite (2015).

Para a bomba de calor estudada, o objetivo foi identificar todos os componentes energéticos envolvidos. O coeficiente de desempenho obtido ( $\beta = 3.26$ ) considera tanto a potência do compressor como a potência do ventilador.

Para esta bomba de calor, os pontos de 1 a 3 representam as localizações da corrente de ar, sendo os pontos 1 e 2, respectivamente, antes e depois do evaporador (processo de desumidificação). Observou-se que a partir deste ponto, a umidade absoluta permanece constante durante todo o processo de aquecimento (até localização 3). Entre os pontos 2 e 3, o ar absorve o calor rejeitado pelo condensador.

Na análise da bomba de calor verifica-se que o dispositivo é tecnicamente viável e proporciona condições operacionais satisfatórias para a secagem de produtos biológicos: o ar é aquecido a  $51.5^{\circ}\text{C}$  e desumidificado até uma umidade relativa de 22.3%. Não foram realizados testes envolvendo a secagem de produtos biológicos nesta fase, mas os números operacionais coincidem com os dados obtidos de acordo com vários estudos sobre secadores utilizando bomba de calor (PERERA, RAHMAN, 1997; SOSLE, 2002; PATEL, KAR, 2012; KIVEVELE, HUAN, 2014).

### 3.3.1 Sugestões para melhorias

O sistema de bomba de calor aqui estudado será modificado com o objetivo de se obter propriedades termodinâmicas que mais se aproximem do que ocorre no sistema real, também com o objetivo de melhorar a eficiência energética.

As modificações sugeridas estão sendo implementadas e incluem a instalação de um segundo condensador, para melhorar a transferência de calor com o ar. Serão instalados termopares no interior dos tubos, onde passa o fluxo de R-22 (melhoria da precisão de medição de temperatura).

Outras melhorias devem ser implementadas em médio prazo (seis meses), estas incluem a melhoria das medições de fluxo de ar, calibração de sensores de pressão e temperatura.

Além disso, uma câmara de secagem maior será construída e será utilizada uma balança de precisão para avaliar a umidade removida do produto durante o processo de secagem. Para melhorar os resultados também será feito um melhor isolamento na câmara de secagem, bem como no dispositivo de expansão. Outras sugestões incluem utilizar o software LabVIEW® (2015) para supervisão e aquisição de dados, a utilização de um medidor de massa de R-22 no ciclo, e a avaliação da carga térmica do evaporador (a sua influência sobre a temperatura do condensador). Também será verificado a possibilidade de aumentar a pressão de vapor para se obter uma temperatura mais elevada no ponto de orvalho e permitir que o evaporador opere a temperaturas mais elevadas. Será realizada em médio prazo uma análise termoeconômica do sistema.

Em longo prazo, as seguintes modificações estão programadas: i) controle do sistema (rotação do compressor, trocar o dispositivo de expansão por uma válvula de controle) para um melhor controle da secagem e condições do ar; ii) introduzir a energia solar para o pré-aquecimento do ar; iii) introduzir a energia solar fotovoltaica para fornecer eletricidade para o compressor / ventilador; e iv) a verificação da eficiência térmica de trocadores de calor.

Para a melhoria do processo de instrumentação, estão sendo incluídos termistores de platina 3 fios (PT-100) para melhorar a precisão e estabilidade de medições de temperatura, será utilizada uma balança de precisão para determinar a massa das amostras e o teor de umidade do produto durante todo o processo de secagem. Além disso, uma plataforma de instrumentação virtual baseada em microcontroladores será desenvolvida para aquisição de dados juntamente com o LabVIEW® (para processamento, armazenamento e supervisão de dados, permitindo o monitoramento do processo e controle

centralizados).

### 3.4 CONCLUSÕES

Um programa computacional foi escrito no *Engineering Equation System* (EES, 2014), este modelo foi escrito a partir dos dados medidos experimentalmente, assim como as transferências de energia que ocorreram em todo sistema e que foram determinadas com as equações e volumes de controles mencionados no decorrer deste trabalho. Os valores medidos experimentalmente e utilizados no modelo foram as temperaturas do ar (ar ambiente, pontos 1, 2, 3), a energia consumida pelo compressor e ventilador, a pressão atmosférica no ponto D, a temperatura do R22 (nos pontos A e D), e as umidades relativas do ar ( $\phi_1$  e  $\phi_2$ ). As propriedades internas do EES permitiram o cálculo da entropia e entalpia para o ar e o fluido R22 em cada ponto, bem como dos valores de umidades absolutas ( $\omega_1$  e  $\omega_2$ ).

Os resultados obtidos através do EES, foram os fluxos de massas (ar, água condensada), as taxas de transferência de calor, e o coeficiente de desempenho. Verificou-se que o sistema de bomba de calor é tecnicamente viável e proporciona resultados muito satisfatórios: o ar foi aquecido a uma temperatura de 51.5°C e desumidificado a uma umidade relativa de 22.3%.

### 3.5 REFERÊNCIAS

- ADAPA, P. K. **Performance study of a heat pump assisted dryer system for specialty crops**. 2001.
- COLAK, N., HEPBASLI, A. A review of heat pump drying: Part 1 - Systems, models and studies. **Energy conversion and management**, v. 50, n. 9, p. 2180-2186, 2009.
- Engineering Equation Solver – EES. **Version V9.705-3D**, 2014. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/applications/instrument-control/pt/>>. Acesso em: 02 out. 2014.
- KIVEVELE, T.; HUAN, Z. A review on opportunities for the development of heat pump drying systems in South Africa. **SAfr J Sci.**, v.110, n.5/6, p.11-11, 2014.
- KOTAS, T. **The exergy method of thermal plant analysis**. Butterworths, Florida, U.S.A, 1985.

- KIANG, C.S., JON, C.K. Heat Pump Drying Systems. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of industrial drying**. Boca Raton: CRC Press, 2014. Cap. 47, p. 1130-1158.
- KUDRA, T.; MUJUMDAR, S. **Advanced Drying Technologies**. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- LABVIEW - Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, 2009. Disponível em: <<http://www.fchart.com/ees/>>. Acesso em: 23 abr. 2014.
- LABVIEWsoftware.NationalInstruments. 2015. Disponível em: <<http://www.ni.com/en-us.html>> Acesso em: 17 maio 2016.
- LEITE, D.F.Q. Analysis of a heat pump for dehumidification and heating of air.Final graduate project in Mechanical Engineering, Mechanical Engineering Department, Federal University of Paraíba.João Pessoa, Brazil: UFPB, 2015.
- LUIZ, M.R. Heat pump for air desumidification and heating (In Portuguese).M.Sc. thesis, Federal University of Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brazil, 2007.
- MAIA, N. L. Energy and exergy analyses of a heat pump for air dehumidification and heating. M.Sc. thesis, Mechanical Engineering Department, Federal University of Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brazil 2014.
- OLIVEIRA, J. R.; MATA, M. E. R. M. C. Desenvolvimento experimental de uma bomba de calor: simulação de secagem de sementes de feijão (*Phaseolusvulgaris L.*), variedade ‘carioca’.**Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.1, p.75-79, 1999.
- PATEL, Krishna Kumar; KAR, Abhijit. Heat pump assisted drying of agricultural produce—an overview. **Journaloffood Science andtechnology**, v. 49, n. 2, p. 142-160, 2012.
- ROSSI, S. **Desenvolvimento e apresentação de uma bomba de calor usada no condicionamento de ar para secagem de alimentos**. 1993. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas.
- TSAROS, T. L.; GAGGIOLI, R.A.; DOMANSKI, P.A. **Exergy analysis of heat pumps**.ASHRAE Transactions, part2. , 1987. Disponível em: <<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build87/PDF/b87005.pdf>>. Acesso em: 06 mar. 2014.

#### 4 ARTIGO 3

### INCORPORAÇÃO DE ENERGIA SOLAR A UMA BOMBA DE CALOR PARA DESUMIDIFICAÇÃO E AQUECIMENTO DO AR

### Resumo

Este trabalho tem o objetivo de realizar uma análise econômica inicial da incorporação de painéis fotovoltaicos para suprir a eletricidade consumida pelo compressor de uma bomba de calor. Com base no dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico para alimentação do compressor (1.25 kW) de uma bomba de calor usada para desumidificação e aquecimento do ar, realizou-se a análise econômica baseada em Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL) e Período de Retorno de Capital (PRC). Observou-se que sistemas fotovoltaicos apresentam em geral baixos custos de manutenção e operação, vida útil estimada em 25 anos, no entanto ainda são caracterizados pelo elevado custo de investimento inicial. Ficou claro que cada análise de viabilidade deve contar com seu cenário técnico (localização geográfica do sistema, conexão à rede elétrica ou não), econômico (custo do sistema, taxas de juros praticadas, valor e tipo da tarifa de eletricidade) e legal (normativa em vigor, sistema de compensação).

**Palavras-chave:** Bomba de calor; Análise econômica; Energia solar; Pannel fotovoltaico.

## 4.1 INTRODUÇÃO

Continuando o trabalho desenvolvido em Grilo *et al.* (2016) e Fortes *et al.* (2016), que realizaram análises termodinâmicas de uma bomba de calor, este trabalho oferece uma perspectiva econômica às análises existentes. Partindo do princípio de que a instalação de painéis fotovoltaicos oferece menores custos mensais e menores emissões de gases de efeito estufa, este trabalho destaca aspectos ambientais e econômicos para proporcionar outro ponto de vista às tradicionais análises.

Segundo Fortes *et al.* (2016), as bombas de calor utilizadas em processos de secagem de alimentos (por meio do aquecimento e desumidificação do ar circulante) proporcionam melhores condições de operação, permitem um melhor controle da temperatura e umidade do ar, e são ótimas alternativas para substituir secadores convencionais, promovendo redução no consumo de energia, melhor eficiência energética e menor impacto ambiental.

As bombas de calor utilizadas para secagem apresentam melhor controle de temperatura e umidade do ar e são excelentes alternativas para substituir secadores tradicionais por proporcionarem uma economia de energia, maior eficiência e menores emissões de dióxido de carbono. A configuração experimental está localizada no Centro de Energias Alternativas Renováveis (CEAR), da Universidade Federal da Paraíba (UFPB, João Pessoa). A bomba de calor opera com fluido refrigerante R22 e é utilizada para fins de aquecimento e desumidificação do ar. O sistema é constituído por dois trocadores de

calor, compressor, dispositivo de expansão e ventilador. Os estudos de Grilo *et al.* (2016) e Fortes *et al.* (2016) incluem a configuração preliminar (que já sofreu alterações), as alterações implementadas e em curso, bem como sugestões de modificações futuras.

Tradicionalmente, as análises de viabilidade concentram-se nas avaliações econômicas. Dentre os vários métodos utilizados para a realização da análise de investimentos, este estudo inclui a Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Presente Líquido (VPL) e Período de Retorno de Capital (também conhecido pelo termo em Inglês, *Payback*). O objetivo deste trabalho é realizar uma análise econômica da incorporação de painéis fotovoltaicos para suprir a eletricidade consumida pelo compressor de uma bomba de calor, a partir de uma configuração fornecida por uma empresa de energias renováveis.

## **4.2 METODOLOGIA**

### **4.2.1 A Bomba de Calor**

A bomba de calor utilizada foi desenvolvida no Laboratório de Sistemas de Refrigeração e Adsorção da Universidade Federal da Paraíba (João Pessoa-PB), onde também foram realizados os experimentos. A Fig. 4.1 mostra a bomba de calor.

A bomba de calor utilizada para este estudo foi construída para promover a secagem de produtos agrícolas por meio da circulação de ar quente e seco, e opera em ciclo aberto de ar, onde o ar passa através dos trocadores de calor e, em seguida, é liberado para o meio ambiente. Os componentes da bomba de calor são: ventilador, condensador, compressor, evaporador e dispositivo de expansão.

Operando em sistema aberto de ar o sistema succiona ar ambiente que atravessa o evaporador onde passa por um processo de desumidificação, em seguida o ar com menor teor de umidade atravessa o condensador onde é aquecido. O sistema tem por objetivo obter ar em condições de temperatura, umidade e vazão necessárias para promover secagem de produtos alimentícios.

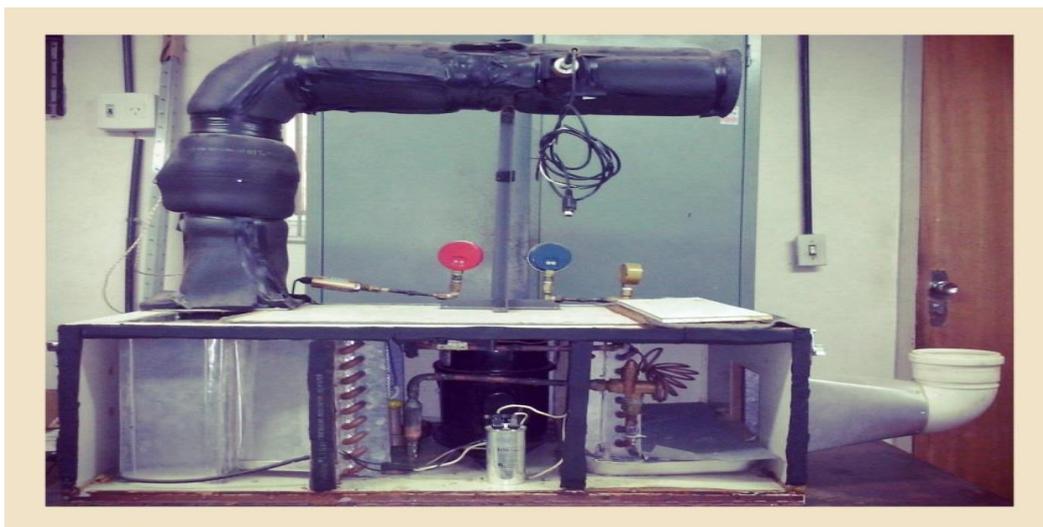


Figura 4.1 - Bomba de calor utilizada nos experimentos. Fonte: LUIZ, 2007.

#### 4.2.2 Sistema Fotovoltaico

Considerou-se a bomba de calor operando 8 horas diárias, 30 dias por mês, totalizando 2920 horas anuais de operação com potência de 1.25 kW e uma estimativa de consumo energético anual de 3600 kWh.

O dimensionamento do sistema fotovoltaico foi realizado em consulta a uma empresa especializada. O sistema fotovoltaico a ser instalado corresponde a uma planta solar de 1.82 kWp, que deve gerar aproximadamente 327.6 kWh/mês (3931.2 kWh/ano), considerando-se um período solarimétrico de 6 horas/dia para a cidade de João Pessoa/PB.

Painéis solares Axitec AC-260P/156-60S foram selecionados, estes apresentam eficiência de conversão de 16.0%, potência nominal de 260 Wp e área de 1.63 m<sup>2</sup> (AXITEC, [201-]). O sistema fotovoltaico é caracterizado por microgeração distribuída, pois apresenta potência instalada menor ou igual a 75 kW, operando mediante sistema de compensação regulamentado por pela resolução 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (BRASIL, 2012). A fim de se converter corrente contínua produzida pelo sistema em corrente alternada sincronizada com a rede foi selecionado inversor de frequência Fronius Galvo com potência nominal de 2.0 kWp (FRONIUS, 2011). A Tabela 4.1 apresenta os componentes do sistema e serviço de instalação com seus respectivos custos.

**Tabela 4.1** -Componentes do sistema fotovoltaico para bomba de calor.

Equipamento	Nº	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (R\$)
Painel Solar Axitec AC-260P/156-60S	7	760,00	5320,00
Inversor FroniusGalvo 2.0	1	5905,00	5905,00
Estrutura de fixação dos painéis no telhado	7	99,00	693,00
Cabo Solar Flexível 6mm com isolamento de 1kVa	30	4,20	126,00
Par de conector MC4 com proteção IP67	2	27,90	55,80
Caixa de proteção AC e CC com dispositivo anti-furto	1	780,00	780,00
Sistema de Monitoramento	1	980,00	980,00
Aterramento triangular	1	130,00	130,00
Serviço de Instalação	1	1800,00	1800,00
<b>CUSTO TOTAL DO SISTEMA (R\$)</b>			<b>15789,80</b>

#### 4.2.2.1 Resolução Normativa nº482/2012

Publicada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 17 de abril de 2012, a Resolução Normativa nº482/2012 estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e define o sistema de compensação de energia elétrica (BRASIL, 2012).

Segundo Delgado (2015), a Resolução Normativa nº482/2012 regulamentou a implantação do sistema de compensação de energia elétrica, onde o montante de energia gerado pela unidade pode ser injetado na rede de fornecimento convencional, cuja responsabilidade é da empresa distribuidora de energia.

Em 2015, a ANEEL ampliou as possibilidades para mini e microgeração distribuída, que começaram sua vigência em março de 2016, e será permitido o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada (BRASIL, 2015a). Quando a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior à energia consumida naquele período, os créditos podem ser utilizados nos 60 meses seguintes (BRASIL, 2015b).

Mais detalhes podem ser consultados diretamente na normativa (BRASIL, 2012; BRASIL, 2015a), e em Delgado (2015), que compara o instituto do modelo regulatório brasileiro com o da Espanha, onde a geração distribuída está mais consolidada, sendo uma ferramenta útil para a compreensão e tentativa de aperfeiçoamento do modelo regulatório brasileiro.

### 4.2.3 Análise econômica

A análise de viabilidade econômica foi realizada com base nos indicadores econômicos Período de Retorno de Capital (PRC), Valor Presente Líquido (VPL), e Taxa Interna de Retorno (TIR).

#### 4.2.3.1 Valor Presente Líquido (VPL)

Segundo Pindyck e Rubinfeld (2006), o critério do VPL corresponde a uma comparação entre o investimento realizado e o valor presente dos fluxos de caixa líquidos futuros que se espera obter pelo investimento. O VPL pode ser calculado pela Eq. 4.1:

$$VPL = -C + \sum_{n=1}^i \left[ \frac{L_n}{(1+R)^n} \right] \quad (4.1)$$

Onde  $C$  representa o investimento inicial,  $i$  representa a quantidade de períodos de análise de viabilidade do investimento (normalmente a vida útil do equipamento),  $L_n$  o lucro obtido no tempo  $n$ , e  $R$  representa a taxa de desconto, também denominada taxa mínima de atratividade (TMA) ou custo de oportunidade do capital a investir.

Segundo Kopittke e Casarotto Filho (2000), a TMA é a taxa a partir da qual o investidor considera que está obtendo ganhos com o investimento. Em geral a definição da TMA se baseia em taxas de investimentos de baixo risco como poupança, taxas de títulos públicos, taxa SELIC, etc. (HOCHHEIM, 2002). Segundo Mishan e Quah (2007) a taxa mínima de atratividade foi definida como a Selic que é uma taxa nominal ( $N$ ). Deve se observar a necessidade de se trabalhar com uma taxa de desconto real ( $R$ ) levando em conta os efeitos da inflação ( $I$ ). Petters e Dong (2016) definem a taxa de desconto real conforme Eq. 4.2.

$$R = \frac{N-I}{1+I} \quad (4.2)$$

A taxa Selic e o índice de inflação foram definidos com base em dados históricos obtidos respectivamente no site da Receita Federal do Brasil (BRASIL, 2016a) e no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (BRASIL, 2016b) para o período de janeiro de 1995 a setembro de 2016. Resultando em uma taxa Selic equalizada anual de 17.5175%, um índice de inflação equalizado anual de 7,3364%. O fluxo líquido/lucro para

um dado ano  $n$  é definido conforme Eq. 4.3.

$$L_n = Ec_n + Res_n - Rei_n - Man_n - Dep_n \quad (4.3)$$

Onde  $Ec_n$  representa a economia anual devido à geração de energia elétrica pelo sistema fotovoltaico para o ano  $n$ ,  $Res$  representa o valor residual de algum equipamento que venha a ser substituído no ano  $n$ ,  $Rei_n$  o custo associado a um reinvestimento caso haja necessidade de troca no ano  $n$ ,  $Man_n$  representa o custo de manutenção anual associado ao sistema fotovoltaico,  $Dep_n$  representa a depreciação anual do sistema fotovoltaico.

Para o cálculo de  $Ec_n$  considera-se um usuário enquadrado na modalidade tarifária convencional de baixa tensão, classe B3 (Comercial Serviços e Outros) cuja tarifa sem encargos praticada atualmente pela concessionária é de 0,379596 R\$/kWh (BRASIL, 2015c), submetido ainda a uma alíquota de 25% de ICMS (ENERGISA, 2016), e uma estimativa de 7% de incidência relativa à PIS e COFINS, a tarifa é corrigida conforme Eq. 4.4 (BRASIL, 2013), que aplicada na Eq. 4.5 permite a determinação de  $Ec_n$ .

$$T_c = \frac{T}{1-(ICMS+PIS+COFINS)} \quad (4.4)$$

$$Ec_n = T_{c_n} \cdot E_{g_n} \quad (4.5)$$

Onde  $E_{g_n}$  corresponde à energia gerada pelo sistema fotovoltaico no tempo  $n$  em kWh. Partindo do princípio de que as faturas de energia elétrica são mensais as economias devido à geração de energia elétrica deverão também ser mensais. Observe que para o início do primeiro ano o valor presente descontado das receitas associadas a economia em faturas de energia dos meses subsequentes pode ser definido pela Eq. 4.6.

$$Ec_{ano=1} = \sum_{n=1}^{12} \frac{Ec_n}{(1+r)^n} \quad (4.6)$$

Onde  $r$  representa a taxa mínima de atratividade real ao mês podendo ser definida conforme Eq. 4.7.

$$r = (1 + R)^{\frac{1}{12}} - 1 \quad (4.7)$$

Logo  $Ec_{anual}$  representa o somatório dos fluxos associados à economia nas faturas de energia do primeiro ano, devido à geração do sistema fotovoltaico, em valor presente descontado para início do ano. Considerando que esta análise levará em conta 25 anos ou 300 meses se torna mais simples realizá-la anualmente. A título de exemplo, o valor presente da receita anual associada a geração do sistema no segundo ano poderá ser calculado como  $Ec_{ano=1}$  descontado um ano à taxa R. Considerando ainda um aumento anual de 5% na tarifa energética. O fabricante sugere ainda uma redução de eficiência dos módulos fotovoltaicos linear de 12% em 25 anos, equivalente à uma perda de eficiência de 0.48%/ano ( $P_{ef}$ ) (AXITEC, 2016) o somatório dos valores presentes das receitas anuais devido à geração de energia do sistema para o período de 25 anos é calculado conforme Eq. 4.8.

$$Ec_{25} = \sum_{n=1}^{25} \frac{Ec_{ano=1} \cdot [(1+IRT)^{n-1}] [(1-P_{ef})^{n-1}]}{[(1+R)^{n-1}]} = Ec_{ano=1} \cdot \sum_{n=1}^{25} \left[ \frac{(1+IRT)(1-P_{ef})}{(1+R)} \right]^{n-1} \quad (4.8)$$

A análise econômica considerou a depreciação anual ( $Dep$ ) de cada componente do sistema ao longo de sua vida útil ( $V_{util}$ ). Para tanto foi admitido um valor residual ( $V_{res}$ ) de 0% até 15% do valor de aquisição ( $V_{aq}$ ) para cada componente. A Eq. 4.9 define a depreciação anual.

$$Dep = \frac{V_{aq} - V_{res}}{V_{util}} \quad (4.9)$$

Com relação ao custo de manutenção, empresas consultadas sugerem que para o sistema conectado à rede o custo de manutenção é mínimo, envolvendo apenas limpeza dos painéis e verificação de cabeamento. Ainda assim, para este trabalho, optou-se por admitir um custo anual de manutenção de R\$ 300.00 referentes a duas visitas de um técnico para a realização de manutenção preventiva.

#### 4.2.3.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

Taxa Interna de Retorno (TIR) e a taxa de juros que determina o ponto de equilíbrio em um investimento; é então a taxa de juros que faz  $VPL = 0$  (*i.e.*, não existe nem prejuízo, nem lucro: ponto de equilíbrio) (ELETROBRÁS et al., 2008).

#### 4.2.3.3 Período de Retorno de Capital (PRC)

O Período de Retorno de Capital (PRC), também conhecido por *payback* é, o critério mais aplicado e difundido em análises de viabilidade econômica, devido a facilidade de sua aplicação (ELETROBRÁS et al., 2008). O PRC é interpretado como um importante indicador do nível de risco de um projeto de investimento (ASSAF NETO, 2009). O PRC não permite comparar o retorno entre dois investimentos, mas é um método bastante utilizado como um limite para determinados tipos de projetos (COSTA, 2012).

O PRC simples corresponde ao tempo no qual o somatório dos fluxos de caixa se torna igual ao investimento inicial. Teoricamente, o investimento é aceitável se o *payback* for menor do que o período de vida útil do investimento. No entanto, segundo Ross et al (2013), se interpretado de maneira literal a análise por *payback* simples pode levar erros de decisão na hora de investir. Isso ocorre principalmente pelo fato de o *payback* simples não levar em conta a variação do valor do dinheiro com o tempo, o custo de oportunidade de capital e os fluxos de caixa obtidos após o período de *payback*.

Uma alternativa ao PRC simples é o PRC descontado, que corresponde ao *payback* simples com fluxos de caixa descontados até o tempo zero. Para este trabalho será utilizado o PRC descontado na análise do investimento.

### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de viabilidade econômica deve considerar diversos fatores, *e.g.*, capacidade do sistema a ser instalado, custos de instalação (equipamentos, instalação, projetos), tarifa de energia local, previsibilidade do aumento desta fatura de energia, consumo energético da edificação, custos com manutenção que, embora sejam baixos, influenciam no tempo de retorno, impostos cobrados pela energia solar gerada, tempo de depreciação dos materiais.

Estima-se que o sistema produza 327.6 kWh/mês. A estimativa de consumo da bomba de calor é de 300 kWh/mês, no entanto serão contabilizados os 327.6 kWh/mês pois

o excedente pode ser convertido em créditos a serem utilizados no abatimento de consumo de outros equipamentos do local onde o sistema fotovoltaico esteja instalado, ou em local diverso de onde o sistema fotovoltaico esteja instalado desde que se enquadre como empreendimento com múltiplas unidades consumidoras, geração compartilhada ou autoconsumo remoto ou ainda ser convertido em créditos que podem ser utilizados para abatimento de fatura de até 60 meses subsequentes conforme Resolução Normativa N° 687/15 (BRASIL, 2015a).

A inclusão dos tributos na tarifa energética resultou em uma tarifa corrigida de 0.558229 R\$/kWh. Com base na estimativa de energia produzida mensalmente pelo sistema estima-se uma economia mensal de R\$ 182.88 na fatura de energia do proprietário.

Para um dado ano base, a economia mensal na fatura foi descontada ao início do ano com base na taxa real mensal, conforme mostra Tabela 4.2, resultando em um valor presente de economia anual de R\$ 2090.10.

**Tabela 4.2** Economias mensais na fatura descontadas ao início do ano.

Valor Presente da Receita Mensal (R\$)											
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
181,5	180,13	178,78	177,43	176,1	174,77	173,46	172,15	170,86	169,57	168,3	167,03
Valor Presente Anual (R\$)										2090,1	

O valor de R\$ 2090,10 será corrigido anualmente por uma estimativa de reajuste de tarifa energética de 5% ao ano e uma perda de eficiência na geração do sistema de 0,48% a ano. A Tabela 4.3 apresenta a estimativa de vida útil e valor residual considerados para cada componente, resultando em uma depreciação anual de R\$ 955,26.

Observa-se a partir da tabela 4.3 com base na vida útil dos componentes observa-se que no décimo e vigésimo ano existe a necessidade de um re-investimento, bem como a geração de receita por valor residual. No décimo ano o re-investimento é avaliado em R\$ 7846.8 e a receita por valor residual é de R\$ 392.32, que devem ser descontados até o tempo zero resultando respectivamente em R\$ 3170.58 e R\$ 158.53. No vigésimo ano, de forma análoga, existirá um re-investimento avaliado em R\$ 7846.8 e receita devido à valor residual de R\$ 392.32, que descontadas ao tempo zero resultam respectivamente em R\$ 1281.10 e R\$ 64.06. No vigésimo quinto ano existirá receita devido à valor residual de equipamentos que ainda se encontram no meio de sua vida útil, avaliados em R\$ 4952.22,

que descontados ao tempo zero representam uma receita de R\$ 513.94. A Tabela 4.4 apresenta os fluxos de caixa descontados ao tempo zero.

**Tabela 4.3** Vida útil e depreciação de componentes do sistema fotovoltaico.

Equipamento	QTD	Preço Unitário (R\$)	Preço Total (R\$)	Valor Residual (%)	Valor Residual (R\$)	Vida Útil (Anos)	Depreciação Anual (R\$)
Painéis Solares Axitec	7	760	5320	15	798	25	180,88
Inversor Fronius	1	5905	5905	5	295,25	10	560,975
Estrutura de fixação	7	99	693	5	34,65	25	26,334
Cabos Solares Flexíveis	30	4,2	126	5	6,3	10	11,97
Pares de conectores	2	27,9	55,8	5	2,79	10	5,301
Caixa de proteção AC e CC	1	780	780	5	39	10	74,1
Sistema de Monitoramento	1	980	980	5	49	10	93,1
Aterramento triangular	1	130	130	0	0	50	2,6
Depreciação Anual do Sistema (R\$)							955,26

O somatório dos fluxos líquidos descontados ao tempo zero para um período de 25 anos gera um VPL positivo de R\$ 208.52 o que torna o investimento aceitável. A TIR foi avaliada em 9.6297% a.a. O PRC descontado resultou em 24.8 anos, que é um tempo um pouco abaixo do período de análise do investimento. Com relação à taxa de desconto (TMA) foi utilizada uma taxa real em função da taxa nominal Selic e índice de inflação IPCA, que foram definidos com base em taxas efetivas equalizadas aplicadas no Brasil do período de 1995 a 2016. Observa-se que a taxa Selic atual é de 13.9% a.a. (Banco Central do Brasil, 2016), que é menor do que a taxa Selic considerada (17.51%) o que tornaria o investimento mais viável.

Utilizando painéis de 245 Wp no Rio de Janeiro, o trabalho de Miranda (2014) utilizou 16 painéis e obteve TIR de 12.3%. De acordo com Reis, Valverde e Mendonça (2015), os aumentos recentes das tarifas de energia elétrica no Brasil ainda não tornaram a micro geração distribuída através de tecnologia fotovoltaica instalada em uma residência viável economicamente. A isenção do ICMS seria considerada como fundamental para tornar esse tipo de projeto viável atualmente (REIS, VALVERDE, MENDONÇA, 2015). No estudo de Amaral (2011), todas as unidades de microgeração analisadas inseridas no regime geral apresentam indicadores financeiros desfavoráveis, evidenciando a falta de viabilidade econômica neste regime remuneratório em Portugal.

**Tabela 4.4** -Fluxos de caixa descontados ao tempo zero.

Tempo (anos)	Fluxos de Caixa Presentes (R\$)					
	Investimento	Receita Energia	Receita Residual	Manutenção	Depreciação	Fluxo Líquido
0	-15790					-15790
1		2090,1		-274,01	-872,5	943,59
2		1994,86		-250,27	-796,91	947,67
3		1903,95		-228,59	-727,87	947,49
4		1817,19		-208,79	-664,81	943,59
5		1734,38		-190,7	-607,22	936,47
6		1655,35		-174,18	-554,61	926,56
7		1579,91		-159,09	-506,56	914,26
8		1507,92		-145,3	-462,68	899,93
9		1439,2		-132,72	-422,59	883,89
10	-3170,6	1373,62	158,53	-121,22	-385,98	-2145,6
11		1311,02		-110,72	-352,54	847,76
12		1251,28		-101,12	-322	828,15
13		1194,26		-92,36	-294,1	807,79
14		1139,84		-84,36	-268,62	786,85
15		1087,89		-77,05	-245,35	765,49
16		1038,32		-70,38	-224,1	743,85
17		991		-64,28	-204,68	722,04
18		945,84		-58,71	-186,95	700,18
19		902,74		-53,63	-170,75	678,36
20	-1281,1	861,6	64,06	-48,98	-155,96	-560,38
21		822,34		-44,74	-142,45	635,16
22		784,87		-40,86	-130,11	613,9
23		749,1		-37,32	-118,84	592,95
24		714,96		-34,09	-108,54	572,34
25		682,38	513,94	-31,13	-99,14	1066,05

Apesar das oportunidades, há obstáculos institucionais e tributários para o desenvolvimento dessa fonte de energia. Tiwari e Dubei (2010) afirmam que a análise técnico-econômica de sistemas fotovoltaicos depende principalmente do investimento inicial, custo operacional e de manutenção, vida útil do sistema e seu valor residual. Observa-se que sistemas fotovoltaicos apresentam em geral baixos custos de manutenção e operação, vida útil estimada em 25 anos, no entanto ainda são caracterizados pelo elevado custo de investimento inicial.

O custo inicial do investimento em painéis fotovoltaicos ainda é bastante elevado, no entanto nos últimos anos tem se observado uma queda exponencial no custo dos módulos fotovoltaicos o que pode fazer com que em breve o investimento em sistemas fotovoltaicos tenha grande aceitação. É importante que se considere nas análises a necessidade de re-investimentos. Para este momento, observa-se ainda uma necessidade de políticas governamentais de incentivo a implementação de microgeração e minigeração de energia elétrica com base em energia solar fotovoltaica. A redução de impostos incidentes sobre a aquisição de componentes do sistema pode tornar o sistema mais viável e será de grande valia ao país, tendo em vista que pode reduzir a carga de demanda sobre o sistema nacional de energia elétrica, permite uma diversificação matriz energética nacional com uma maior representatividade da energia solar fotovoltaica, redução da emissão de gases nocivos ao meio ambiente, principalmente com a redução da atuação de termoeletricas, redução de perdas no transporte de energia elétrica, etc.

Ao investidor (comercial, industrial), vale a pena observar que a implementação de energia solar fotovoltaica não trará apenas benefícios associados às faturas de energia elétrica. O sistema pode ser utilizado em estratégias de marketing e criação de uma imagem sustentável em relação ao seu mercado consumidor. Fica clara a necessidade de se enfatizar que cada análise de viabilidade deve contar com seu cenário técnico (localização geográfica do sistema, conexão à rede elétrica ou não), econômico (custo do sistema, taxas de juros praticadas, valor e tipo da tarifa de eletricidade) e legal (normativa em vigor, sistema de compensação).

#### **4.4 COMENTÁRIOS FINAIS**

Este trabalho apoiou-se no dimensionamento de um sistema solar fotovoltaico para alimentação do compressor (1.25 kW) de uma bomba de calor usada para desumidificação e aquecimento do ar, para realizar sua análise econômica.

Com relação à tarifação de energia elétrica observa-se que para clientes operando com tarifas energéticas mais baratas do que o proposto o sistema tenderá a deixar de ser viável economicamente. Considerar a influência das bandeiras tarifárias pode gerar resultados melhores com relação à viabilidade do investimento. O índice de reajuste tarifário considerado (5%) pode estar subvalorizado no país, principalmente com o aumento da participação de geração termoeletrica no Brasil. Uma perspectiva de maior

IRT torna o projeto mais viável.

Com relação à eficiência do sistema, deve se observar que só foi considerada a perda de eficiência dos módulos fotovoltaicos. Observa-se ainda a necessidade de se considerar dados mais precisos e detalhados sobre a irradiação solar do local onde será implantado o sistema, principalmente para um investidor adepto de uma estrutura tarifária não-convencional, onde haverá compensação de energia em horário fora de ponta e horário de ponta, sendo necessário estimar a produção diária para cada um destes períodos.

Trabalhos futuros deverão incluir a consideração das perdas associadas a temperatura de operação dos módulos, sujeira, erros de fabricação, transporte de energia no cabeamento do sistema e eficiência máxima do inversor de frequência para dimensionamento do sistema. Análises de sensibilidade serão realizadas a fim de se definir a influência da estrutura tarifária do investidor e do sistema de bandeiras tarifárias. Também se considerará a pegada de carbono associada ao sistema fotovoltaico, em trabalhos voltados a inclusão da Avaliação de Ciclo de Vida como critério de análise ambiental.

#### 4.5 REFERÊNCIAS

- ADAPA, P. K. **Performance study of a heat pump assisted dryer system for specialty crops**. 2001.
- AMARAL, A.N. **Estudo da viabilidade económica da instalação de sistemas de colectores solares fotovoltaicos em edifícios residenciais**. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2011.
- ANEEL. **Micro e minigeração distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. 2. ed., Brasília, DF, Brasil 2016.
- ANEEL. **Por dentro da conta pública de energia: informação de utilidade pública**. 6. ed. Brasília, DF, 2013.
- ASSAF NETO, A. **Finanças Corporativas e Valor**. São Paulo: Atlas, 2009.
- AXITEC. AXI power. 60 células / policristalino. [201-]. Módulos fotovoltaicos de alto rendimento Disponível em:  
<[http://www.axitecsolar.com/data/document\\_files/DB\\_60zlg\\_poly\\_power\\_MiA\\_BR.pdf](http://www.axitecsolar.com/data/document_files/DB_60zlg_poly_power_MiA_BR.pdf)>. Acesso em 09/11/2016.
- BEST, R. et al. Experimental results of a solar assisted heat pump rice drying system. **Renewable energy**, v. 9, n. 1, p. 690-694, 1996.

BCB - Banco Central Do Brasil. **Taxa Selic – Dados Diários**. Disponível em:

<<http://www.bcb.gov.br/htms/selic/selicdiarios.asp>>. Acesso em: 11 nov. 2016.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. 2012.

BRASIL. ANEEL. **Resolução normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. 2015a.

BRASIL. ANEEL. **ANEEL amplia possibilidades para micro e minigeração distribuída**. 2015b. Disponível em:

<[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output\\_Noticias.cfm?Identidade=8955&id\\_area=90](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8955&id_area=90)>. Acesso em 20/05/2016.

BRASIL. ANEEL. Resolução homologatória nº 1858, de 27 de fevereiro de 2015. **ANEXO\_%20EPB\_reh20151858.pdf**. 2015c. Disponível em:

<[http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ANEXO\\_%20EPB\\_reh20151858.pdf](http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ANEXO_%20EPB_reh20151858.pdf)>. Acesso em: 09 nov. 2016.

BRASIL. ANEEL. **Submódulo 6.8 do Programa de Regulação Tarifária (PRORET)**.

Disponível em:

<[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Resolucao\\_Homologatoria.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Resolucao_Homologatoria.pdf)>. Acesso em: 09 nov. 2016. 2015d.

BRASIL. **Receita Federal do Brasil: Taxa de Juros Selic**. 2016a. Disponível em:

<<http://idg.receita.fazenda.gov.br/orientacao/tributaria/pagamentos-e-parcelamentos/taxa-de-juros-selic>>. Acesso em: 12 out. 2016.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Series Históricas IPCA. 2016b. Disponível em:

<[ftp://ftp.ibge.gov.br/Precos\\_Indices\\_de\\_Precos\\_ao\\_Consumidor/IPCA/Serie\\_Historica/ipca\\_SerieHist.zip](ftp://ftp.ibge.gov.br/Precos_Indices_de_Precos_ao_Consumidor/IPCA/Serie_Historica/ipca_SerieHist.zip)>. Acesso em: 12 out. 2016.

CHONG, C.H. et al. Combined drying of apple cubes by using of heat pump, vacuum-microwave, and intermittent techniques. **Food and Bioprocess Technology**, v. 7, n. 4, p. 975-989, 2014.

COSTA, D.J.A.V. **Aplicação de conceitos da análise econômica financeira de investimentos em uma cafeteria**. Maceió: Fundação Getulio Vargas, 2012.

OLIVEIRA, J. R.; MATA, M. E. R. M. C. Desenvolvimento experimental de uma bomba de calor: simulação de secagem de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*), variedade

- ‘carioca’. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.1, p.75-79, 1999.
- ELETOBRÁS et al. **Análise econômica de investimento: guia básico**. Brasília, DF: IEL/NC, 2008.
- ENERGISA. **Taxas Prazos e Normas: Tipos de Tarifas**. 2015.  
<<http://www.energisa.com.br/empresa/Paginas/poder-publico/taxas-prazos-e-normas/tributos-impostos-encargos.aspx>>. Acessoem: 09nov.2016.
- EVANS, D. L. Simplified method for predicting photovoltaic array output. **Solar energy**, v. 27, n.6, p.555-560, 1981.
- FATOUH, M. et al. Herbs drying using a heat pump dryer. **Energy Conversion and Management**, v.47, n.15, p.2629-2643, 2006.
- FORTES, A. F. F. et al. Análise termodinâmica de uma bomba de calor para desumidificação e aquecimento de ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE, 2016, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: UFPB, 2016.
- FRONIUS GALVO. **Tecnologia de soldagem: energia solar**. 2011. Disponível em:  
<[http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-C212C700-3F740C22/fronius\\_brasil/\\_Galvos\\_\\_772962\\_snapshot.pdf](http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-C212C700-3F740C22/fronius_brasil/_Galvos__772962_snapshot.pdf)>. Acessoem: 09nov.2016.
- GRILO, M.M.S. et al. Energy efficiency considerations for an experimental heat pump used for air heating and dehumidifying purposes. IN: CONGRESO INTERNACIONAL DE REFRIGERACIÓN, CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍAS RENOVABLES, 10., 2016, La Havana. **Anais...** La Havana: Cuba Industria, 2016.
- KANNENBERG, A.R. Estudo da viabilidade econômica da implantação residencial de painéis fotovoltaicos como opção para a redução do consumo de energia elétrica convencional. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO, TECNOLOGIA E SUSTENTABILIDADE, 1., 2010, Brusque. **Anais...** Brusque: UNIFEBE, 2010.
- KOPITTKE, B. H.; CASAROTTO FILHO, N. **Análise de investimentos**. São Paulo: Atlas, 2000.
- LUIZ, M.R., 2007. Heat pump for air desumidification and heating (In Portuguese). M.Sc. thesis, Federal University of Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brazil.
- MIRANDA, A.B.C.M. **Análise de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- NOLAY, P. **Développement d'une méthode générale d'analyse des systèmes photovoltaïques**. Paris: Ecolenational e Supérieure des Mines, 1987.

- OMAR, A. M. et al. Energy yield calculation of the grid connected photovoltaic power system. In: International Conference on Renewable Energy Sources (RES), 8., 2014. p. 162-167.
- PAATERO, J. V.; LUND, P. D. Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks. **Renewable Energy**, v. 32, n. 2, p. 216-234, 2007.
- RAHMAN, S. M. A. Performance evaluation of a solar assisted heat pump drying system. 2004. Tese de Doutorado.
- ROSS, S. A.; WESTERFIELD, R. W.; JAFFE, J. **Corporate Finance**. 10.ed. McGraw Hill, 2013.
- PETTERS, A. O.; DONG, X. **An Introduction to Mathematical Finance with Applications**. 2016.
- PINDYCK, R.S.; RUBINFELD, D. **Microeconomia**. 6.ed. São Paulo: Pearson, 2006.
- REIS, V.V.; VALVERDE, A.R.; MENDONÇA, R.S.S. Viabilidade econômica de um projeto de micro geração fotovoltaica residencial no ambiente de compensação de energia elétrica. In: CONGRESSO ONLINE - ADMINISTRAÇÃO, 12., 2015, [s.l.]. [s.l.]: Instituto Pantex de Pesquisa, 2015.
- SILVA, R.M. **Energia solar no Brasil: dos incentivos ao desafios**. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas da Consultoria Legislativa, 2015. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td166>> Acesso em: 03 nov. 2016.
- TIWARI, G.N.; DUBEY, S. **Fundamentals of photovoltaic modules and their applications**. Royal Society of Chemistry, 2010.

## 5 ARTIGO 4

### PEGADA DE CARBONO COMPARATIVA DO FORNECIMENTO DE ELETRICIDADE A UMA BOMBA DE CALOR PARA AS CONDIÇÕES SOLARIMÉTRICAS DE JP-PB

#### RESUMO

A pegada de carbono é um dos indicadores ambientais mais utilizados para avaliar os impactos ambientais associados a um processo ou um produto. O setor energético é um dos responsáveis pelas maiores emissões de gases do efeito estufa, o que tem elevado a preocupação com as consequências do alto consumo de recursos não-renováveis e aumentado a procura por fontes de energias renováveis. Isso possibilita uma diversificação na matriz energética mundial, como a utilização da energia solar fotovoltaica. Neste trabalho foi realizada uma análise ambiental comparativa para uma bomba de calor assistida por energia solar, onde foi utilizada a metodologia da ACV aplicada a dois cenários diferentes para fornecimento de eletricidade a bomba. O primeiro cenário utilizou a energia elétrica fornecida pela rede (*mix elétrico brasileiro*) e o segundo cenário utilizou um sistema de energia solar fotovoltaica conectado a rede para fornecimento de eletricidade. A energia solar fotovoltaica apresenta uma vantagem considerável em relação a utilização de eletricidade direto da rede, com uma redução de cerca de -205,68 kg CO<sub>2</sub>-eq/ano. Comprovou-se que a utilização de fontes de energia mais limpa, como a energia solar fotovoltaica, contribui para a redução da pegada de carbono e existe real potencial de mitigação de mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** pegada de carbono, energia solar fotovoltaica, avaliação de ciclo de vida, bomba de calor.

#### 5.1 INTRODUÇÃO

A escassez dos recursos não-renováveis e o aumento contínuo nos preços destes combustíveis são temas amplamente discutidos no Brasil e no mundo (TIWARI; DUBEY, 2010). Segundo o Balanço Nacional de Energia do ano de 2015, no Brasil, cerca de 60% da oferta interna de energia são provenientes de fontes de energias não-renováveis, como o petróleo, gás natural e carvão (BRASIL, 2015). Este cenário tem elevado a preocupação com o meio ambiente e a busca pela redução na quantidade de emissões de gases do efeito estufa (GEE). O aumento na concentração desses gases na atmosfera pode elevar a temperatura do planeta, com consequências negativas (IPCC, 2007).

O conceito de desenvolvimento sustentável se fortifica estabelecendo uma iniciativa global para preservação dos recursos naturais. A criação deste conceito juntamente com os movimentos ambientalistas deu origem a leis de gerenciamento ambiental assim como metodologias para contabilizar os impactos ambientais associados a

utilização dos recursos não renováveis (RIBEIRO; PEIXOTO; XAVIER, 2007). Por meio do Protocolo de Quioto, no ano de 2009, o Brasil assumiu um compromisso internacional (voluntário) com o objetivo de reduzir as emissões de GEE de 36.1% a 38.9%, ou seja, cerca de 1.2 Gt de CO<sub>2</sub>-eq (IPCC, 2007). As empresas passaram então a utilizar um indicador ambiental para mensurar as emissões GEE em termos de CO<sub>2</sub>-eq, o que comprovou que as medidas adotadas pelo país para mitigar a concentração de GEE reduziram a pegada de carbono nos últimos anos, segundo dados do ministério de cultura, tecnologia e inovação (BRASIL, 2012).

Processos de conversão de energia e utilização ineficiente da energia secundária estão entre os principais responsáveis pelas emissões excessivas de GEE. Como solução mitigadora, tem-se elevado a participação de fontes de energia renováveis na matriz energética mundial. A utilização de energia solar, por exemplo, representou 1.4% de participação na matriz energética brasileira, um crescimento de 97% comparada ao ano anterior (BRASIL, 2016). Os sistemas de energia solar fotovoltaicos são umas das soluções mais promissoras para o futuro e apresentam diversas vantagens quando comparados às fontes de energia tradicionais.

No sistema solar fotovoltaico a energia solar é convertida diretamente em energia elétrica, por meio do efeito da radiação solar sob materiais semicondutores. A energia gerada pode ser injetada diretamente na rede de distribuição de energia e ser convertida em créditos que serão abatidos mensalmente segundo a resolução 482/2012 da Agência Reguladora de Energia Elétrica (ANEEL) (BRASIL, 2012).

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) já se consolidou como metodologia validada e consolidada para quantificação de impactos ambientais (GUINÉE, 2001; GUINÉE, 2002), e vem sendo progressivamente aplicada a sistemas energéticos, mais especificamente a sistemas solares fotovoltaicos. Kim *et al.* (2014) utilizou o software SimaPro para realizar ACV em sistemas fotovoltaicos na Coreia e obteve 41.8 gCO<sub>2</sub>-eq/kWh e 31.5 gCO<sub>2</sub>-eq/kWh para sistemas monocristalinos e policristalinos, respectivamente. Fthenakis *et al.* (2012) utilizou o SimaPro para a ACV de painéis de alta eficiência (20.1%), comparando um detalhado inventário com o processo do Ecoinvent. Os dados do Ecoinvent produziram maior impacto ambiental, obtendo-se uma emissão de 138 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh para os painéis de alta eficiência. Beylot *et al.* (2014) realizou uma análise de performance ambiental de sistemas fotovoltaicos de larga escala, avaliando a influência da estrutura de suporte dos painéis, obtendo emissões que variavam de 37.5 à 53.5 g CO<sub>2</sub>-

eq/kWh. Hou *et al.* (2016) utilizou a ACV em sistemas fotovoltaicos conectados à rede na China, com emissões variando de 60.1 a 87.3 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh dependendo do método de instalação. Verificou-se também que 84% da emissão de gases do efeito estufa ao longo do ciclo de vida de sistemas fotovoltaicos foi proveniente do processo de fabricação. Perez-Gallardo *et al.* (2014) utilizou o método IMPACT 2002+ no software SimaPro com a base de dados Ecoinvent, e a tecnologia fotovoltaica CIS apresentou os melhores resultados. Mas muitas publicações científicas não consideram a ACV para cálculo das emissões associadas ao consumo de eletricidade no Brasil (DELGADO, CARVALHO; 2016).

Este trabalho tem como objetivo calcular a pegada de carbono associada ao fornecimento de energia elétrica a uma bomba de calor. A metodologia da Avaliação de Ciclo de Vida será aplicada a dois cenários diferentes para fornecimento de eletricidade a bomba. O primeiro cenário utiliza a energia elétrica fornecida pela rede (*mix*) e o segundo cenário utiliza um sistema de energia solar fotovoltaica conectado a rede, *Grid Tie*, para fornecimento de eletricidade.

## 5.2 METODOLOGIA

### 5.2.1 Avaliação do Ciclo de Vida

A partir dos movimentos ambientalistas e da conscientização da sociedade na preservação do meio ambiente foram surgindo as leis de gerenciamento ambiental. No Brasil, em meados de 1980, o instrumento de Avaliação dos Impactos Ambientais começou a ser utilizado pelas empresas para selecionar a melhor alternativa sob o ponto de vista ambiental, econômico e ético. A Avaliação de Impactos Ambientais rastreia toda ação, desde o início do processo, sendo possível identificar, prever, interpretar e prevenir os efeitos ambientais causados ao meio ambiente ao homem (SILVA, 1999).

Existem diversos métodos de Avaliação de Impactos ambientais, e por meio deles é possível coletar, analisar, avaliar, comparar e organizar informações quantitativas e qualitativas de determinada ação que causa efeitos para o meio ambiente (SILVA, 1999). Um dos métodos mais utilizados e que foi escolhido para este estudo é a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), normalizada internacionalmente pela série ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006) que está voltada para interpretação de dados ambientais em todas as fases da cadeia produtiva, que envolve desde a extração dos recursos naturais, passando pela produção, utilização até a disposição final (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2014).

Na metodologia da ACV são definidos quatro componentes básicos (ABNT, 2014): definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação. Isto engloba desde a construção do processo, onde são detalhados os materiais e os resíduos, passando pela etapa de montagem, que inclui toda operação como o transporte e energia até chegar à análise do ciclo de vida que junta o tratamento do resíduo à montagem, possibilitando determinar e avaliar as causas dos impactos ambientais associadas ao processo em estudo (HINZ; VALENTINA; FRANCO, 2006).

A definição de objetivo e escopo é a etapa que define e descreve o processo ou produto, estabelecendo o contexto no qual a avaliação será realizada e identificando os limites e efeitos ambientais a serem revistos para a avaliação. A análise do inventário identifica e quantifica as entradas e saídas do sistema. A avaliação de impacto analisa os efeitos humanos e ecológicos da utilização de energia, água, materiais e descargas ambientais identificadas na análise do inventário. Por fim, a interpretação avalia os resultados da análise do inventário. Dos resultados dessa etapa podem ser tiradas as conclusões e recomendações às tomadas de decisão (BARBOSA *et al.*, 2008).

O *software* utilizado é o SimaPro 8.2.0.0 (PréConsultants, 2016a), que é uma ferramenta profissional altamente especializada para ACV, para coletar, analisar e monitorar o desempenho ambiental de produtos, processos e serviços. O SimaPro permite modelar e analisar dos mais complexos aos mais simples ciclos de vida de acordo com ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006) (RODRIGUES *et al.*, 2008). A base de dados escolhida para compor o inventário foi a Ecoinvent (ECOINVENT, 2015), que contém dados sobre produção de energia, transporte, materiais de construção, produção de produtos químicos, produção de metais e frutas e legumes. A base de dados consiste de mais de 10.000 conjuntos de dados interligados, cada um dos quais descreve um inventário de ciclo de vida em um nível do processo.

Existem diversos métodos de avaliação de impacto ambiental, cada um com suas particularidades. O método escolhido para calcular a pegada de carbono foi o IPCC 2013 GWP 100a (IPCC, 2013).

Devido à preocupação com as mudanças climáticas provocadas pelo aquecimento global o IPCC desenvolveu um método para contabilizar as emissões atmosféricas de GEE. O potencial de aquecimento global, GWP (*Global Warming Potential*), contabiliza o total de emissões de CO<sub>2</sub> e de GEE, expressando o resultado em termos de carbono equivalente de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>-eq) para um sistema definido ou atividade

(INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2014).

O GWP de uma substância é analisado em horizontes de tempo longos ou curtos. Horizontes de tempo longos (100 e 500 anos) são utilizados para o efeito cumulativo, enquanto horizontes de tempo curtos (20 anos) traduzem uma indicação dos efeitos de curto-prazo das emissões. O aquecimento global é dado pela multiplicação do GWP calculado pela massa (kg) de substância emitida (FERREIRA, 2004).

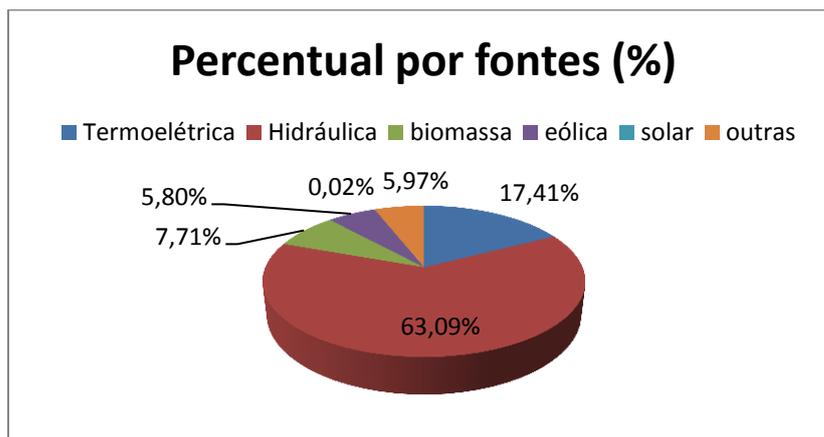
### **5.2.2 Cenários de fornecimento de eletricidade para a bomba de calor**

Seguindo a recomendação da ABNT (2014), para primeira etapa, referente à definição de objetivo e escopo, foram definidos dois cenários distintos de fornecimento de energia para o equipamento bomba de calor afim de verificar a dimensão da diferença entre os impactos ambientais. O primeiro cenário foi definido como a bomba de calor alimentada por energia elétrica da rede, e o segundo cenário foi definido como a utilização de energia solar fotovoltaica para alimentar a bomba.

A partir da definição dos cenários montou-se o inventário utilizando os dados da biblioteca Ecoinvent (2015) disponibilizada no software Simapro (PréConsultants, 2016a).

#### **5.2.2.1 Mix elétrico brasileiro 2015**

A base de dados Ecoinvent (2015) possui vários processos para eletricidade, baseado em diferentes fontes energéticas e tecnologias disponíveis. O processo equivalente ao mix elétrico brasileiro disponível refere-se ao ano de 2008. Porém, devido às mudanças que o mix elétrico vem sofrendo ao longo dos anos, escolheu-se utilizar o estudo de Delgado e Carvalho (2016), que implementou diversas adaptações nas bases de dados existentes para refletir as mudanças temporais, energéticas e tecnológicas no mix elétrico brasileiro. O processo utilizado neste trabalho refere-se ao ano de 2015, e já inclui as etapas de geração, distribuição e transformação. A matriz de geração considerada para o ano de 2015 seguiu a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (BRASIL, 2016). Os percentuais de geração de eletricidade, por fonte, no Brasil em 2015 estão representados na Figura 5.1. Essas porcentagens já incluem as importações da Argentina, Paraguai, Uruguai e Venezuela.



**Figura 5.1** - Percentual de geração de eletricidade, por fontes, no Brasil.

Fonte: Brasil, 2016.

### 5.2.2.2 Energia solar fotovoltaica

Seguindo com o segundo cenário, para utilização de energia solar fotovoltaica foi necessário montar o sistema fotovoltaico contabilizando a quantidade de material necessária para instalação do sistema. Em consulta a uma empresa especializada em energias renováveis, obteve-se a relação de equipamento e material necessário para a instalação solar fotovoltaica (Tabela 5.1).

A Tabela 5.1 mostra o equipamento e material necessário para a instalação solar fotovoltaica proposta pelo instalador.

### 5.2.2.3 Sistema fotovoltaico vs. sistema elétrico

O sistema tradicional, conectado apenas a rede elétrica, consome apenas o necessário para o funcionamento do compressor (1250 W). Considerando-se uma operação diária de 6 horas (2190 por ano), o consumo anual de eletricidade é 2737,5 kWh.

O sistema fotovoltaico está conectado a rede elétrica, seguindo a resolução na ANEEL 482/2012 (BRASIL, 2012) a energia gerada é injetada diretamente na rede sendo compensada através de créditos, o sistema a ser implantado é uma planta solar de 1.82KWp instalado que atingirá aproximadamente 300 kWh/mês, ou seja 3600 kWh/ano. Foi considerado para o cálculo do índice de irradiação um período solarimétrico de 06 horas por dias atingindo 100% da produção. Para este sistema é necessária a implementação de sete painéis fotovoltaicos de 260W, medindo cerca de 0.99 m de largura por 1.69 m de comprimento e portanto ocupando uma área total de aproximadamente

11.9m<sup>2</sup>. Os painéis solares conseguem fornecer 3931.2 kWh/ano.

**Tabela 5.1** - Material e equipamento necessários para o sistema solar fotovoltaico.

Descrição	Composição material principal
07 painéis solares fotovoltaicos, 260Wp (11,90m <sup>2</sup> ) (vida útil 25 anos)	Vidro solar ( <i>low-iron</i> ) 119,93 kg, filme de polivinilfluoreto 1,31 kg, célula fotovoltaica (multi-Si) 11,90 m <sup>2</sup> , Liga de alumínio (AlMg <sub>3</sub> ) 31,28 kg, Cobre 1,33 kg, Etilvinilacetato ( <i>foil</i> ) 11,91 kg, Plástico com reforço de fibra de vidro (PRFV) 2,23 kg
03 inversores 2000Wp (vida útil 10 anos)	Aço (baixa liga) 20,49 kg, alumínio (liga) 2,93 kg, espuma de poliestireno 0,624 kg, Cobre 11,52 kg
07 Estruturas de fixação dos painéis em telhado (vida útil 25 anos)	Alumínio (liga) 18,46 kg, aço (baixa liga) 1,96 kg, polietileno de alta densidade 14,15 kg
30 Cabos solares flexíveis, 6mm, isolamento 1kVa (vida útil 25 anos)	Cada 1m cabo = Cobre 0,49 kg, polietileno de alta densidade 0,55 kg
02 Pares de conectores MC4, proteção IP 67 (vida útil 25 anos)	Latão 0,08 kg, PVC 0,12
01 Sistema de Aterramento triangular (vida útil 25 anos)	Cobre 2,76 kg, polietileno de alta densidade 1,92 kg
01 Caixa de proteção AC e CC com dispositivos anti-furto (vida útil 25 anos)	Latão 0,009 kg, policarbonato 0,09 kg, resina epoxi 0,0012 kg, zinco 0,018 kg, polietileno de alta densidade 6,41 kg, PVC 0,95 kg, aço (baixa liga) 0,382 kg, cobre 6,56 kg, nylon 6 0,103 kg
Material elétrico necessário para instalação (parafusos, miscelâneas) (vida útil 25 anos)	
01 Sistema de Monitoramento (vida útil 25 anos)	Aço (baixa liga) 0,92 kg, polietileno de alta densidade 0,64 kg

### 5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo Delgado e Carvalho (2016), a pegada de carbono associada ao consumo de 1 kWh de eletricidade da rede brasileira em 2015 foi 0.299 kg CO<sub>2</sub>-eq. Com isto, em termos anuais, a pegada de carbono associada ao funcionamento da bomba de calor somente com eletricidade da rede é 818.51 kg CO<sub>2</sub>-eq/ano.

Para o cenário 2, no qual os painéis solares fotovoltaicos fornecem a eletricidade para funcionamento da bomba, existem duas contribuições associadas a pegada de

carbono: a construção do sistema e sua operação. A construção do sistema inclui todos os equipamentos e manutenção necessários ao longo de sua vida útil (*e.g.*, substituição de inversor a cada 10 anos). A pegada de carbono associada à operação do sistema considera que a eletricidade extra (superior à necessária para funcionamento da bomba de calor) é injetada na rede elétrica. Neste caso, aparece o termo "pegada de carbono evitada" já que eletricidade produzida por meio do sistema solar fotovoltaico vai ajudar a compensar a pegada de carbono associada ao consumo de eletricidade da rede elétrica convencional (*mix*). A Tabela 5.2 mostra a pegada de carbono associada ao sistema solar fotovoltaico instalado.

**Tabela 5.2** -Pegada de carbono associada à instalação do sistema solar fotovoltaico.

Descrição	kg CO <sub>2</sub> -eq
07 painéis solares fotovoltaicos, 260Wp (11,90m <sup>2</sup> )	2.440,000
03 inversores 2000Wp	494,000
07 Estruturas de fixação dos painéis em telhado	417,000
30 Cabos solares flexíveis, 6mm, isolamento 1kVa	56,500
02 Pares de conectores MC4, proteção IP 67	0,233
01 Sistema de Aterramento triangular	177,000
01 Caixa de proteção AC e CC com dispositivos anti-furto	
Material elétrico necessário para instalação (parafusos, miscelâneas)	88,300
01 Sistema de Monitoramento	108,000
<b>TOTAL</b>	<b>3781,033</b>

Considerando-se a vida útil do sistema como 25 anos, pode-se expressar os impactos ambientais associados ao sistema fotovoltaico em si como 151,24 kg CO<sub>2</sub>-eq/ano. Ao contabilizar a eletricidade produzida anualmente pelo sistema, obtém-se 0,03847 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh.

Observa-se que a maior contribuição para o impacto ambiental do sistema está associada aos painéis fotovoltaicos (extração de matéria-prima, processamento, fabricação, transporte, descarte final). A Tabela 5.3 mostra a composição percentual da pegada de carbono associada somente aos painéis fotovoltaicos.

75.10% do impacto ambiental associado aos painéis fotovoltaicos é devido a fabricação da célula fotovoltaica (*multi-Siwafer*). Por sua vez, 60% deste impacto ambiental está associado à obtenção do silício. Estes valores corroboram os encontrados por Houet *al.* (2016) onde 84% dos GEE de sistemas fotovoltaicos foi proveniente do processo de fabricação.

**Tabela 5.3** - Composição percentual da pegada de carbono associada aos painéis fotovoltaicos.

	Contribuição
07 painéis solares fotovoltaicos, 260Wp (11,90m <sup>2</sup> )	
Célula fotovoltaica ( <i>multi-Si wafer</i> )	75,10%
Liga de alumínio AlMg <sub>3</sub>	11,20%
Vidro solar ( <i>low-iron</i> )	5,54%
Etilvinilacetato ( <i>foil</i> )	1,41%
Filme de polivinilfluoreto	1,10%
Cobre	0,58%
Plástico com reforço de fibra de vidro	0,53%

O sistema fotovoltaico consegue produzir 3931,2 kWh/ano e a bomba de calor somente necessita de 2737,5 kWh, então 1193,7 kWh/ano serão exportados a rede elétrica. A pegada de carbono associada ao sistema fotovoltaico em si é de  $2737,5 \times 0,03847 = 105,31$  kg CO<sub>2</sub>-eq/ano, que deve ser adicionada à pegada de carbono associada à operação do sistema. A operação do sistema fotovoltaico injeta eletricidade na rede elétrica.

A pegada de carbono *evitada* contabiliza a injeção de eletricidade obtida via solar na rede elétrica, substituindo o consumo de eletricidade do mix:  $1193,7 (0,03847 - 0,299) = -310,99$  kg CO<sub>2</sub>-eq/ano. A pegada de carbono anual associada à utilização do sistema solar fotovoltaico é, portanto  $105,31 + (-310,99) = -205,68$  kg CO<sub>2</sub>-eq/ano. A Tabela 5.4 compara as pegadas de carbono anuais associadas a cada cenário.

**Tabela 5.4** - Pegadas de carbono para cada cenário de fornecimento de energia a bomba de calor.

	Pegada de carbono (kg CO <sub>2</sub> -eq/ano)
Cenário 1: eletricidade da rede	818,51
Cenário 2: sistema solar fotovoltaico	-205,68

Observa-se que, estritamente desde um ponto de vista ambiental, ao avaliarem-se as pegadas de carbono associadas a cada cenário de fornecimento de eletricidade a bomba de calor, existe elevada vantagem ambiental de se utilizar energia solar fotovoltaica. Esta vantagem aumenta ainda mais já que o sistema fotovoltaico é *Grid-Tie*, e permite a injeção de eletricidade auto-gerada na rede elétrica.

A pegada de carbono associada ao consumo de eletricidade da rede apresentou

valor muito distante do apresentado no Balanço Energético Nacional para 2015, 0,1396 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh (BRASIL, 2016); porém, estas emissões parecem estar associadas somente às emissões diretas, além de não incluir distribuição, transformação, transmissão e nem a importação. Existe considerável variação nos resultados de emissões de GEE associados a eletricidade (DELGADO, CARVALHO; 2016): pode-se citar a falta do uso padronizado de uma mesma metodologia na modelagem de cada inventário e a escolha do método de avaliação de impacto ambiental (alguns seguem as recomendações do IPCC a risca enquanto outros incluem o CO<sub>2</sub> de fonte renovável ou usa algum outro critério de inclusão ou exclusão de emissões de GEE que causa diferenças nos resultados).

#### 5.4 COMENTÁRIOS FINAIS

Este trabalho apresentou uma aplicação da Avaliação de Ciclo de Vida ao fornecimento de eletricidade de uma bomba de calor utilizada para aquecer e desumidificar o ar (secagem de alimentos). Duas maneiras de operar a bomba de calor foram analisadas: utilizar simplesmente eletricidade da rede elétrica, e usar um sistema solar fotovoltaico. Estabelecidos os cenários de operação, a pegada de carbono foi calculada por meio do método IPCC 2013 GWP 100, utilizando a base de dados Ecoinvent.

Observou-se que a incorporação de painéis solares fotovoltaicos possui potencial de mitigação de mudanças climáticas, com emissões negativas da ordem de -205.68 kg CO<sub>2</sub>-eq/ano, em comparação a 818.51 kg CO<sub>2</sub>-eq/ano associados a utilização da rede elétrica brasileira (ano 2015).

Trabalhos futuros dos autores incluem a inclusão da bomba na ACV e distribuir a pegada de carbono para os produtos da bomba: ar quente e seco e água, por meio de análise termoeconômica.

#### 5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR ISO 14040**: gestão ambiental, avaliação do ciclo de vida, princípios e estruturas. Rio de Janeiro, 2014a.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR ISO 14044**: gestão ambiental, avaliação do ciclo de vida, requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014b.
- BARBOSA, A. F. et al. Conceitos e aplicações de Análise do Ciclo de Vida (ACV) no

- Brasil. **Revista Gerenciais**, 2008.
- BEYLOT, A. et al. Environmental impacts of large-scale grid-connected ground-mounted PV installations. **Renewable Energy**, v. 61, p. 2-6, 2014.
- BRASIL, ANEEL. **Resolução normativa N° 482, de 17 de Abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para acesso microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em:  
<<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2016.
- BRASIL.Ministério Da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estimativas anuais de emissões de gases do efeito estufa no Brasil**. Brasília, 2014.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balço energético nacional - BEN**. Brasília, DF, 2016.
- COLTRO, L. (Org). **Avaliação do ciclo de vida como ferramenta de gestão**. Campinas: CETEA/ITAL: 2007.
- DELGADO, D. B.M.; CARVALHO, M. Potencial da energia solar fotovoltaica em geração distribuída para manutenção da pegada de carbono do mix elétrico brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE, 1., 2016, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: EcoGestão/UFPB: 2016.
- ECOINVENT. **Database, version 3**, 2015. Disponível em: <<http://www.ecoinvent.ch>>. Acesso em: 21 nov. 2016.
- FERREIRA, J. V. **Análise do ciclo de vida dos produtos**. Viseu: Instituto Politécnico de Viseu, 2004.
- FTHENAKIS, V. et al. Life cycle analysis of high-performance monocrystalline silicon photovoltaic systems: energy payback times and net energy production value. In: European Photovoltaic Solar Energy **Conference and Exhibition**, 27., p.4667-4672, 2012.
- HOU, G. et al. Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China.**Applied Energy**, v. 164, p. 882-890, 2016.
- GUINÉE, J. B. (Ed).**Life Cycle Assessment: An operational guide to the ISO Standards; LCA in Perspective; Guide; Operational Annex to Guide**. Centre for Environmental Science, Leiden University, The Netherlands, 2001.

- GUINÉE, J. B. **Handbook on life cycle assessment**: operational guide to the ISO standards. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002.
- Intergovernmental Panel on Climate Change- IPCC. **Relatório IPCC/ONU Novos cenários climáticos**, 2007. Disponível em: <[www.ecolatina.com.br/pdf/ipcc-completo.pdf](http://www.ecolatina.com.br/pdf/ipcc-completo.pdf)> Acesso em: 21 nov. 2016.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. **Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto protocol**, 2013. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/>>. Acesso em: 21 nov. 2016.
- KIM, Byung-ju et al. Evaluation of the environmental performance of sc-Si and mc-Si PV systems in Korea. **Solar Energy**, v. 99, p. 100-114, 2014.
- RIBEIRO, M. F.; PEIXOTO, J. A. A.; XAVIER, L. S.. Sustentabilidade pegada ecológica: uma abordagem teórico-científica. In: Encontro Nacional de Engenharia e Produção, 27., Foz do Iguaçu, 2007.
- PEREZ-GALLARDO, J. R. et al. Ecodesign of photovoltaic grid-connected systems. **Renewable Energy**, v. 64, p. 82-97, 2014.
- PRÉ-CONSULTANTS. **SimaPro database manual methods library**. PréConsultants. 2016a.
- PRÉ-CONSULTANTS. **Website do SimaPro**. 2016b. Disponível em: <<http://www.pre-sustainability.com/>>. Acesso em: 21 nov. 2016.
- SILVA, E. **Técnicas de Avaliação de Impactos Ambientais**. Viçosa, Minas Gerais: CPT, 1999, p. 182.
- TIWARI, G. N.; DUBEY, S. **Fundamentals of photovoltaic modules and their applications**. Royal Society of Chemistry, 2010.

## 6 CONCLUSÃO GERAL

Este trabalho apresentou os resultados de uma série de análises envolvendo aspectos termodinâmicos, econômicos e ambientais a respeito de uma bomba de calor, desenvolvida no Laboratório de Energia Solar (LES/CEAR) da UFPB. No primeiro tópico deste trabalho foi realizada uma revisão de literatura da bomba de calor assistida por energia solar, foi possível apresentar as vantagens que a bomba de calor oferece comparada aos sistemas convencionais de secagem de alimentos e destacou-se a habilidade do dispositivo em recuperar energia disponibilizada nos gases de exaustão de um circuito de refrigeração, o que proporciona um ar de secagem com baixa umidade e com temperaturas de secagem brandas que não comprometem as propriedades físicas e nutricionais de produtos biológicos. A bomba de calor promove a melhoria de eficiência energética e o controle mais preciso das condições do ar, beneficiando o alimento durante o processo de secagem e reduzindo o tempo de secagem.

Os trabalhos mais recentes publicados no Google Acadêmico e o Periódicos CAPES, entre 2011 e 2016, possibilitaram a determinação de parâmetros para quantificar a performance do sistema operando em diversas situações, dentre estes parâmetros destacam-se a Taxa Específica de Evaporação de Umidade (SMER), a Taxa de Secagem (RD), o Coeficiente de Performance da Bomba de Calor (COP) e Taxa de Utilização de Energia (EUR). Os trabalhos estudados destacam também as diversas modificações que podem aumentar a eficiência deste dispositivo, como o uso de energia solar fotovoltaica, que pode reduzir os impactos ambientais associados ao consumo de energia elétrica, contribuindo a níveis globais para a redução da pegada de carbono, grande vantagem comparada aos secadores convencionais.

No segundo artigo, que diz respeito a análise energética e exergética da bomba de calor desenvolvida no LES/CEAR, foi possível determinar os fluxos de calor em todos os volumes de controle, estabelecidos em: evaporador, condensador, compressor e dispositivo de expansão e foi calculado o coeficiente de performance da bomba de calor, cujo valor foi 3,26. A partir dos resultados da exergia destruída em cada volume de controle concluiu-se que nos trocadores de calor ocorreu maiores desperdícios de energia. Observou-se que para se obter um melhor aproveitamento da energia disponível nos trocadores de calor são necessárias alterações na configuração do dispositivo, muitas delas estão em andamento, as quais destacam-se o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados para obter

todas as propriedades necessárias para a análise termodinâmica, o aumento da área de troca térmica no condensador, a mudança do posicionamento do compressor, sendo este posicionado na parte externa da caixa de MDF que acopla os trocadores de calor, além de melhorias no isolamento dos componentes permitindo uma diminuição de perdas de calor com a vizinhança do sistema.

No terceiro artigo, foi desenvolvida uma análise de viabilidade econômica na incorporação de um sistema de energia solar fotovoltaico para fornecer energia elétrica a bomba de calor. Observou-se que o sistema fotovoltaico é viável economicamente, pois o somatório dos fluxos líquidos descontados ao tempo zero para um período de 25 anos gera um Valor Presente Líquido positivo de R\$ 208.52 o que torna o investimento aceitável. A Taxa Interna de Retorno foi avaliada em 9.6297% a.a. O Período de Retorno de Capital descontado resultou em 24,8 anos, que é um tempo um pouco abaixo do período de análise do investimento. Apesar do custo inicial do investimento em painéis fotovoltaicos ainda ser bastante elevado, nos últimos anos tem se observado uma queda exponencial no custo dos módulos fotovoltaicos o que pode fazer com que em breve o investimento em sistemas fotovoltaicos tenha grande aceitação.

Em relação ao quarto artigo, foi realizada uma Avaliação de Ciclo de Vida da incorporação do sistema de energia solar fotovoltaico para fornecer energia elétrica à bomba de calor. Através da ACV foi possível fazer a comparação da utilização da energia elétrica da rede, considerando o mix elétrico brasileiro, com o sistema de energia solar fotovoltaico. Conclui-se que na utilização de energia solar fotovoltaica existe potencial de mitigação de mudanças climáticas, é possível evitar a emissão de -205,68 kg CO<sub>2</sub>-eq/ano, o que comprova a vantagem ambiental de implementar sistemas de energia solar fotovoltaica, este tipo de sistema além de reduzir as emissões de gases do efeito estufa contribui para a diversificação da matriz energética brasileira.

Esta dissertação contribuiu com uma visão do uso sustentável de dispositivos industriais que consomem anualmente uma quantidade elevada de energia, possibilitando a mitigação dos impactos ambientais que tais equipamentos causam com a implementação da energia solar fotovoltaica. A partir dos resultados das análises econômica e ambiental destacou-se a viabilidade de apostar em eficiência energética e fontes de energia renováveis para contribuir com a redução da pegada de carbono.

## 7 REFERÊNCIAS

- ADAPA, P. K. **Performance study of a heat pump assisted dryer system for specialty crops**. 2001.
- AMARAL, A.N. **Estudo da viabilidade económica da instalação de sistemas de colectores solares fotovoltaicos em edifícios residenciais**. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2011.
- ANEEL. **Micro e minigeração distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. 2. ed., Brasília, DF, Brasil 2016.
- ANEEL. **Por dentro da conta pública de energia: informação de utilidade pública**. 6. ed.
- ASSAF NETO, A. **Finanças Corporativas e Valor**. São Paulo: Atlas, 2009.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR ISO 14040: gestão ambiental, avaliação do ciclo de vida, princípios e estruturas**. Rio de Janeiro, 2014.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR ISO 14044: gestão ambiental, avaliação do ciclo de vida, requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2014.
- AXITEC. AXI power. 60 células / policristalino. [201-]. Módulos fotovoltaicos de alto rendimento Disponível em:  
<[http://www.axitecsolar.com/data/document\\_files/DB\\_60zlg\\_poly\\_power\\_MiA\\_BR.pdf](http://www.axitecsolar.com/data/document_files/DB_60zlg_poly_power_MiA_BR.pdf)>. Acesso em: 09 nov. 2016.
- BARBOSA, A. F. et al. Conceitos e aplicações de Análise do Ciclo de Vida (ACV) no Brasil. **Revista Gerenciais**, 2008.
- BCB - Banco Central Do Brasil. **Taxa Selic – Dados Diários**. Disponível em:  
<<http://www.bcb.gov.br/htms/selic/selicdiarios.asp>>. Acesso em 11/11/2016.
- BEST, R. et al. Experimental results of a solar assisted heat pump rice drying system. **Renewable energy**, v. 9, n.1, p.690-694, 1996.
- BEYLOT, Antoine et al. Environmental impacts of large-scale grid-connected ground-mounted PV installations. **Renewable Energy**, v. 61, p. 2-6, 2014.
- BRASIL, ANEEL. **Resolução normativa N° 482, de 17 de Abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para acesso microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em:  
<<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2016.
- BRASIL. ANEEL. **ANEEL amplia possibilidades para micro e minigeração distribuída**. 2015. Disponível em:  
<[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output\\_Noticias.cfm?Identidade=8955&id\\_area=90](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8955&id_area=90)>. Acesso em: 20 maio 2016.

- BRASIL. ANEEL. **Resolução homologatória nº 1858, de 27 de fevereiro de 2015.** ANEXO\_%20EPB\_reh20151858.pdf.2015c. Disponível em:  
<[http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ANEXO\\_%20EPB\\_reh20151858.pdf](http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ANEXO_%20EPB_reh20151858.pdf)>. Acesso em:  
09 nov. 2016.
- BRASIL. ANEEL. **Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2012.** Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. 2012.
- BRASIL. ANEEL. **Resolução normativa nº 687,** de 24 de novembro de 2015.
- BRASIL. ANEEL. **Submódulo 6.8 do Programa de Regulação Tarifária (PRORET).** 2015. Disponível em:  
<[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Resolucao\\_Homologatoria.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Resolucao_Homologatoria.pdf)>. Acesso em:  
09 nov. 2016.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Series Históricas IPCA.** 2016b. Disponível em:  
<[ftp://ftp.ibge.gov.br/Precos\\_Indices\\_de\\_Precos\\_ao\\_Consumidor/IPCA/Serie\\_Historica/ipca\\_SerieHist.zip](ftp://ftp.ibge.gov.br/Precos_Indices_de_Precos_ao_Consumidor/IPCA/Serie_Historica/ipca_SerieHist.zip)>. Acesso em: 12 nov. 2016.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional - BEN.** Brasília, DF, 2016.
- BRASIL. Receita Federal do Brasil. **Taxa de Juros Selic.** 2016. Disponível em:  
<<http://idg.receita.fazenda.gov.br/orientacao/tributaria/pagamentos-e-parcelamentos/taxa-de-juros-selic>>. Acesso em: 12 out. 2016.
- BRASIL. Ministério Da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estimativas anuais de emissões de gases do efeito estufa no Brasil.** Brasília, 2014.  
Brasília, DF, 2013.
- CHONG, C.H. et al. Combined drying of apple cubes by using of heat pump, vacuum-microwave, and intermittent techniques. **Food and Bioprocess Technology**, v.7, n.4, p.975-989, 2014.
- \_\_\_\_\_. **Heat pump drying systems**, Handbook of industrial drying. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis Inc, p.1122-1123, 2006.
- CHOU, S. K.; CHUA, K. J. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. **Trends in Food Science & Technology**, v. 12, n.10, p. 359-369, 2001.
- CHUA, K. J.; CHOU, S. K.; YANG, W. M. Advances in heat pump systems: A review. **Applied Energy**, v.87, p.3611-3624, 2010.
- COELHO, R. M. et al. Avaliação econômica do uso da madeira de eucalipto para diferentes finalidades, na região do Alto Jequitinhonha, MG. **Floresta**, Curitiba, PR,

- v.46, n.2, p. 155-164, 2016.
- COLAK, N., HEPBASLI, A. A review of heat pump drying: Part 1 - Systems, models and studies. **Energy conversion and management**, v. 50, n. 9, p. 2180-2186, 2009
- COLTRO, L. (Org). **Avaliação do ciclo de vida como ferramenta de gestão**. Campinas: CETEA/ITAL: 2007.
- COSTA, D.J.A.V. **Aplicação de conceitos da análise econômica financeira de investimentos em uma cafeteria**. Maceió: Fundação Getúlio Vargas, 2012.
- DAGHIGH, R. et al. Review of solar assisted heat pump drying systems for agricultural and marine products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.14, p.2564-2579, 2010.
- DELGADO, D.B.M.; CARVALHO, M. Potencial da energia solar fotovoltaica em geração distribuída para manutenção da pegada de carbono do mix elétrico brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE, 1., 2016, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: EcoGestão/UFPB: 2016.
- ECOINVENT. **Database, version 3**, 2015. Disponível em: <<http://www.ecoinvent.ch>>. Acesso em: 21 nov. 2016.
- ELETOBRÁS. **Análise econômica de investimento**: guia básico. Brasília, DF: IEL/NC, 2008.
- ENERGISA. **Taxas Prazos e Normas**: Tipos de Tarifas. 2015. <<http://www.energisa.com.br/empresa/Paginas/poder-publico/taxas-prazos-e-normas/tributos-impostos-encargos.aspx>>. Acesso em: 09 nov. 2016.
- Engineering Equation Solver – EES. **Version V9.705-3D**, 2014. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/applications/instrument-control/pt/>>. Acesso em: 02 out. 2014.
- EVANS, D. L. Simplified method for predicting photovoltaic array output. **Solar energy**, v. 27, n.6, p.555-560, 1981.
- FATOUH, M. et al. Herbs drying using a heat pump dryer. **Energy Conversion and Management**, v.47, n.15, p.2629-2643, 2006.
- FAYOSE, F.; HUAN, Z. Heat Pump Drying of Fruits and Vegetables: Principles and Potentials for Sub-Saharan Africa. **International journal of food science**, 2016.
- FERREIRA, J. V. **Análise do ciclo de vida dos produtos**. Viseu: Instituto Politécnico de Viseu, 2004.
- FORTES, A.F.F. et al. Análise termodinâmica de uma bomba de calor para desumidificação e aquecimento de ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL E SUSTENTABILIDADE, 2016, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa:

UFPB, 2016.

- FRONIUS GALVO. **Tecnologia de soldagem:** energia solar. 2011. Disponível em: <[http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-C212C700-3F740C22/fronius\\_brasil/\\_Galvos\\_\\_772962\\_snapshot.pdf](http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-C212C700-3F740C22/fronius_brasil/_Galvos__772962_snapshot.pdf)>. Acesso em: 09 nov. 2016.
- FTHENAKIS, V. et al. Life cycle analysis of high-performance monocrystalline silicon photovoltaic systems: energy payback times and net energy production value. In: European Photovoltaic Solar Energy **Conference and Exhibition**, 27., p.4667-4672, 2012.
- GRILO, M.M.S. et al. Energy efficiency considerations for an experimental heat pump used for air heating and dehumidifying purposes. IN: CONGRESO INTERNACIONAL DE REFRIGERACIÓN, CLIMATIZACIÓN Y ENERGÍAS RENOVABLES, 10., 2016, La Havana. **Anais...** La Havana: Cuba Industria, 2016.
- GUINÉE, J. B. **Handbook on life cycle assessment:** operational guide to the ISO standards. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002.
- GUINÉE, J.B. (Ed.). **Life Cycle Assessment:** An operational guide to the ISO Standards; LCA in Perspective; Guide; Operational Annex to Guide. The Netherlands, Centre for Environmental Science, Leiden University, 2001.
- HOU, G. et al. Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China. **Applied Energy**, v.164, p.882-890, 2016.
- Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. **Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the kyoto protocol**, 2013. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/>>. Acesso em: 21 nov. 2016.
- Intergovernmental Panel on Climate Change- IPCC. **Relatório IPCC/ONU Novos cenários climáticos**, 2007. Disponível em: <[www.ecolatina.com.br/pdf/ipcc-completo.pdf](http://www.ecolatina.com.br/pdf/ipcc-completo.pdf)> Acesso em: 21 nov. 2016.
- JANGAM, S. V. An overview of recent developments and some R&D challenges related to drying of foods. **Drying Technology**, v.29, n.12, p.1343-1357, 2011.
- KANNENBERG, A.R. Estudo da viabilidade econômica da implantação residencial de painéis fotovoltaicos como opção para a redução do consumo de energia elétrica convencional. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO, TECNOLOGIA E SUSTENTABILIDADE, 1., 2010, Brusque. **Anais...** Brusque: UNIFEBE, 2010.
- KAYGUSUZ, K.; AYHAN, T. Experimental and theoretical investigation of combined solar heat pump system for residential heating. **Energy Conversion and Management**, v. 40, n. 13, p. 1377-1396, 1999.
- KEMP, I. C. Fundamentals of energy analysis of dryers. **Modern Drying Technology**, v. 4, p.1-46, 2011.

- KIANG, C.S., JON, C.K. Heat Pump Drying Systems. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Handbook of industrial drying**. Boca Raton: CRC Press, 2014. Cap. 47, p. 1130-1158.
- KIM, Byung-ju et al. Evaluation of the environmental performance of sc-Si and mc-Si
- KIVEVELE, T.; HUAN, Z. A review on opportunities for the development of heat pump drying systems in South Africa. **S Afr J Sci.**, v.110, n.5/6, p.11-11, 2014.
- KOPITTKE, B. H.; CASAROTTO FILHO, N. **Análise de investimentos**. São Paulo: Atlas, 2000.
- KOTAS, T. **The exergy method of thermal plant analysis**. Butterworths, Florida, U.S.A, 1985.
- KUDRA, T.; MUJUMDAR, S. **Advanced Drying Technologies**. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- LabView - Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, 2009. Disponível em: <<http://www.fchart.com/ees/>>. Acesso em: 23 abr. 2014.
- LI, Y. et al. Experimental investigation on a solar assisted heat pump in-store drying system. **Applied Thermal Engineering**, v.31, n.10, p.1718-1724, 2011.
- LUIZ, M. R. **Estudo Teórico e Experimental de Secagem de Tomate (*Lycopersicon esculentum*)**. 2012. Tese (Doutorado em engenharia mecânica). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB.
- MAIA, N. L. **Análise energética e exérgica de uma bomba de calor para desumidificação e aquecimentos do ar**. 2014. Dissertação (Dissertação em engenharia mecânica). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB.
- MIRANDA, A.B.C.M. **Análise de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.
- MOHANRAJ, M. Performance of a solar-ambient hybrid source heat pump drier for copra drying under hot-humid weather conditions. **Energy for Sustainable Development**, v.23, p.165-169, 2014.
- MORTEZAPOUR, H. et al. Saffron drying with a heat pump-assisted hybrid photovoltaic-thermal solar dryer. **Drying Technology**. v.30, n.6, p.560-566, 2012.
- MUJUMDAR, A.S. (Ed.), **Handbook of industrial drying**, CRC Press, 2014.
- NOLAY, P. **Développement d'une méthode générale d'analyse des systèmes photovoltaïques**. Paris: Ecole nationale Supérieure des Mines, 1987.

- OLIVEIRA, J. R.; MATA, M. E. R. M. C. Desenvolvimento experimental de uma bomba de calor: simulação de secagem de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*), variedade 'carioca'. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.1,p.75-79, 1999.
- OMAR, A. M. et al. Energy yield calculation of the grid connected photovoltaic power system. In: International Conference on Renewable Energy Sources (RES), 8., 2014. p. 162-167.
- PAATERO, J. V.; LUND, P. D. Effects of large-scale photovoltaic power integration on electricity distribution networks. **Renewable Energy**, v. 32, n. 2, p. 216-234, 2007.
- PATEL, Krishna Kumar; KAR, Abhijit. Heat pump assisted drying of agricultural produce—an overview. **Journal of Food Science and Technology**, v. 49, n. 2, p. 142-160, 2012.
- PEREZ-GALLARDO, J. R. et al. Ecodesign of photovoltaic grid-connected systems. **Renewable Energy**, v. 64, p. 82-97, 2014.
- PETTERS, A. O.; DONG, X. **An Introduction to Mathematical Finance with Applications**. 2016.
- PINDYCK, R.S.; RUBINFELD, D. **Microeconomia**. 6.ed. São Paulo: Pearson, 2006.
- PRÉ-CONSULTANTS. **Website do SimaPro**. 2016. Disponível em: <<http://www.pre-sustainability.com/>>. Acesso em: 21 nov. 2016.
- PV systems in Korea. **Solar Energy**, v. 99, p. 100-114, 2014.
- RAHMAN, S. M. A. Performance evaluation of a solar assisted heat pump drying system. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – National University of Singapore.
- RAHMAN, S. M. A., SAIDUR, R., HAWLADER, M. N. A. An economic optimization of evaporator and air collector area in a solar assisted heat pump drying system. **Energy Conversion and Management**, v. 76, p. 377-384, 2013.
- REIS, V.V.; VALVERDE, A.R.; MENDONÇA, R.S.S. Viabilidade econômica de um projeto de micro geração fotovoltaica residencial no ambiente de compensação de energia elétrica. In: CONGRESSO ONLINE - ADMINISTRAÇÃO, 12., 2015, [s.l.]. [s.l.]: Instituto Pantex de Pesquisa, 2015.
- RIBEIRO, M. F.; PEIXOTO, J. A. A.; XAVIER, L. S.. Sustentabilidade pegada ecológica: uma abordagem teórico-científica. In: Encontro Nacional de Engenharia e Produção, 27., Foz do Iguaçu, 2007.
- ROSS, S. A.; WESTERFIELD, R. W.; JAFFE, J. **Corporate Finance**. 10.ed. McGraw Hill, 2013.
- ROSSI, S. **Desenvolvimento e apresentação de uma bomba de calor usada no**

**condicionamento de ar para secagem de alimentos.** 1993. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas.

ŞEVIK, S. Experimental investigation of a new design solar-heat pump dryer under the different climatic conditions and drying behavior of selected products. **Solar Energy**, v.105, p. 190-205, 2014.

ŞEVIK, Seyfi et al. Mushroom drying with solar assisted heat pump system. **Energy Conversion and Management**, v.72, p. 171-178, 2013.

SILVA, E. **Técnicas de Avaliação de Impactos Ambientais.** Viçosa, Minas Gerais: CPT, 1999, p. 182.

SILVA, R.M. **Energia solar no Brasil: dos incentivos aos desafios.** Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas da Consultoria Legislativa, 2015. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td166>> Acesso em: 03 nov. 2016.

SOPIAN, K.; OTHMAN, M. Y.; ZAIDI, S. H. **Advances in solar assisted drying system for marine and agricultural products**, p. 1-6, 2012.

TIWARI, G. N.; DUBEY, S. **Fundamentals of photovoltaic modules and their applications.** Royal Society of Chemistry, 2010.

TSAROS, T.L., GAGGIOLI, R.A., DOMANSKI, P.A. **Exergy analysis of heat pumps.** ASHRAE Transactions, part2. , 1987. Disponível em: <<http://fire.nist.gov/bfrlpubs/build87/PDF/b87005.pdf>>. Acesso em: 06 mar. 2014.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E., BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica.** São Paulo: Edgard Blücher, 2003. 577 p.

YAHYA, M. Design and Performance Evaluation of a Solar Assisted Heat Pump Dryer Integrated with Biomass Furnace for Red Chilli. **International Journal of Photoenergy**, v. 2016, ID 8763947, 14 p., 2016,

ZHANG, D.; WU, Q. B.; LI, J. P.; KONG, X. Q. Effects of refrigerant charge and structural parameters on the performance of a direct-expansion solar-assisted heat pump system. **Applied Thermal Engineering**, v.73, n.1, p. 522-528, 2014.

## APÊNDICE A

### MODELO TERMODINÂMICO EES

{BOMBA DE CALOR}

{1. DADOS DE ENTRADA}

$$T_0 = 27,6 + 273,15$$

$$P_0 = 101,25$$

$$P = 101,325$$

$$A = 0,00785$$

$$R = 0,287055$$

$$R_{\text{agua}} = 0,46152$$

$$T_A = 372,65$$

$$T_B = 337,35$$

$$P_C = 419$$

$$T_D = 280,75$$

$$T_1 = 301,65$$

$$RH1 = 0,777 \quad \{\text{Umidade relativa de entrada}\}$$

$$T_2 = 295,85$$

$$T_3 = 324,45$$

$$RH3 = 0,223 \quad \{\text{Umidade relativa de saída}\}$$

$$T_5 = 292,15$$

$$\text{eta}_{\text{iso\_comp}_2} = 0,90$$

$$W_{\text{dot\_comp}} = -1,25$$

$$W_{\text{dot\_vent}} = -0,229167$$

{2. DEFINIÇÃO DOS ESTADOS TERMODINÂMICOS}

{2.1 CIRCUITO DE REFRIGERANTE - R22}

"2.1.1 ESTADO DE REFERÊNCIA DO REFRIGERANTE"

$$h_{R22_0} = \text{ENTHALPY}(R22; T=T_0; P=P)$$

$$s_{R22_0} = \text{ENTROPY}(R22; T=T_0; P=P)$$

"2.1.2 ESTADO A - ENTRADA DO CONDENSADOR"

$$P_{A\_iso} = \text{PRESSURE}(R22; s=s_D; T=T_A)$$

$$h_{A\_iso} = \text{ENTHALPY}(R22; T=T_A; S=s_D)$$

$$h_{A\_r} = (h_{A\_iso} - h_D + h_D * \text{eta}_{\text{iso\_comp}_2}) / \text{eta}_{\text{iso\_comp}_2}$$

$$s_{A\_r} = \text{ENTROPY}(R22; h=h_{A\_r}; T=T_A)$$

$$P_{A\_r} = \text{PRESSURE}(R22; h=h_{A\_r}; T=T_A)$$

$$T_{A\_sat} = T_{\text{SAT}}(R22; P=P_{A\_r})$$

$$h_A = \text{ENTHALPY}(R22; T=T_A; P=P_{A\_r})$$

$$h_{A\_sat} = \text{ENTHALPY}(R22; x=1; P=P_{A\_r})$$

$$s_A = \text{ENTROPY}(R22; T=T_A; P=P_{A\_r})$$

$$x_A = h_{A\_r} - h_{R22_0} - T_0 * (s_{A\_r} - s_{R22_0})$$

"2.1.3 ESTADO B - ENTRADA DA VALVULA DE EXPANSÃO"

$$P_B = P_{A_r}$$

$$h_B = \text{ENTHALPY}(\text{R22}; x=0; P=P_B)$$

$$s_B = \text{ENTROPY}(\text{R22}; x=0; P=P_B)$$

$$x_B = h_B - h_{\text{R22}_0} - T_0 * (s_B - s_{\text{R22}_0})$$

"2.1.4 ESTADO C - ENTRADA DO EVAPORADOR"

isentálpica}  $T_C = \text{TEMPERATURE}(\text{R22}; h=h_C; P=P_C)$  { Assumindo a válvula

$$h_C = h_B$$

$$s_C = \text{ENTROPY}(\text{R22}; H=h_C; P=P_C)$$

$$x_C = h_C - h_{\text{R22}_0} - T_0 * (s_C - s_{\text{R22}_0})$$

"2.1.5 ESTADO D - ENTRADA DO COMPRESSOR"

$$P_D = P_C$$

$$h_D = \text{ENTHALPY}(\text{R22}; T=T_D; P=P_D)$$

$$T_{D\_sat} = T_{\text{SAT}}(\text{R22}; P=P_D)$$

$$h_{D\_sat} = \text{ENTHALPY}(\text{R22}; x=1; P=P_D)$$

$$s_D = \text{ENTROPY}(\text{R22}; H=h_D; P=P_D)$$

$$x_D = h_D - h_{\text{R22}_0} - T_0 * (s_D - s_{\text{R22}_0})$$

{2.2 CIRCUITO DE AR}

"2.2.1 ESTADO DE REFERÊNCIA DO AR E VAPOR CONDENSADO"

$$h_0 = \text{ENTHALPY}(\text{AirH2O}; T=T_0; P=P; w=w_1)$$

$$s_0 = \text{ENTROPY}(\text{AirH2O}; T=T_0; P=P; w=w_1)$$

$$h_{\text{water}_0} = \text{ENTHALPY}(\text{Water}; T=T_0; P=P_0)$$

$$s_{\text{water}_0} = \text{ENTROPY}(\text{Water}; T=T_0; P=P_0)$$

"2.2.2 ESTADO 1 - ENTRADA DO EVAPORADOR"

$$w_1 = \text{HumRat}(\text{AirH2O}; T=T_1; r=\text{RH1}; P=P_0)$$

$$h_1 = \text{ENTHALPY}(\text{AirH2O}; T=T_1; P=P; w=w_1)$$

$$s_1 = \text{ENTROPY}(\text{AirH2O}; T=T_1; P=P; w=w_1)$$

$$x_1 = h_1 - h_0 - T_0 * (s_1 - s_0)$$

"2.2.3 ESTADO 2 - ENTRADA DO CONDENSADOR"

$$w_2 = w_3$$

$$h_2 = \text{ENTHALPY}(\text{AirH2O}; T=T_2; P=P; w=w_3)$$

$$s_2 = \text{ENTROPY}(\text{AirH2O}; T=T_2; P=P; w=w_3)$$

$$x_2 = h_2 - h_0 - T_0 * (s_2 - s_0)$$

"2.2.4 ESTADO 3 - ENTRADA DO VENTILADOR"

$$\text{Vol}_3 = \text{VOLUME}(\text{AirH2O}; T=T_3; P=P; w=w_3)$$

$$h_3 = \text{ENTHALPY}(\text{AirH2O}; T=T_3; P=P; w=w_3)$$

$$s_3 = \text{ENTROPY}(\text{AirH2O}; T=T_3; P=P; w=w_3)$$

$$P_{S_3} = P_{\text{SAT}}(\text{Water}; T=T_3)$$

$P_{v3} = PS_3 * RH3$  {pressão parcial do vapor no estado 3}  
 $P_{ar3} = P - P_{v3}$  {pressão parcial do ar no estado 3}  
 $w_3 = \text{HumRat}(\text{AirH2O}; T=T_3; r=RH3; P=P_0)$   
 $x_3 = h_3 - h_0 - T_0 * (s_3 - s_0)$

"2.2.5 ESTADO 5 - VAPOR DE AGUA CONDENSADO"

$m_{dot_5} = m_{dot_{ar}} * (w_1 - w_2)$   
 $h_{5_0} = \text{ENTHALPY}(\text{Water}; T=T_0; X=0)$   
 $s_{5_0} = \text{ENTROPY}(\text{Water}; T=T_0; X=0)$   
 $h_5 = \text{ENTHALPY}(\text{Water}; T=T_5; X=0)$   
 $s_5 = \text{ENTROPY}(\text{Water}; T=T_5; X=0)$   
 $x_5 = h_5 - h_{water_0} - T_0 * (s_5 - s_{water_0})$

{3. ANÁLISE DOS VOLUMES DE CONTROLE}

"3.1 ANÁLISE DO COMPRESSOR"

$m_{dot_{ref}} = -W_{dot_{comp}} / (h_{A_r} - h_D)$   
 $S_{dot_{ger_{comp}}} = m_{dot_{ref}} * (s_{A_r} - s_D)$   
 $Ex_{des_{comp}} = T_0 * S_{dot_{ger_{comp}}}$   
 $W_{dot_{rev}} = m_{dot_{ref}} * (x_D - x_A)$   
 $\text{Eta}_{2_{comp}} = W_{dot_{rev}} / W_{dot_{comp}}$

"3.2 ANÁLISE DO CONDENSADOR"

$Q_{dot_{cond}} = m_{dot_{ref}} * (h_B - h_{A_r})$   
 $m_{dot_3} = -Q_{dot_{cond}} / (h_3 - h_2)$   
 $Q_{dot_{23}} = m_{dot_3} * (h_3 - h_2)$   
 $T_{med_{cond}} = (T_{A_{sat}} * (h_{A_{sat}} - h_B) + (h_{A_r} - h_{A_{sat}}) * (T_{A_r} + T_{A_{sat}}) / 2) / (h_{A_r} - h_B)$   
 $V_3 = m_{dot_3} * Vol_3 / A$   
 $m_{dot_{ar}} = (V_3 * A * P_{ar3}) / (R * T_3)$   
 $m_{dot_{vapor}} = (V_3 * A * P_{v3}) / (R_{agua} * T_3)$   
 $S_{dot_{ger_{cond}}} = m_{dot_{ref}} * (s_B - s_A) + m_{dot_3} * (s_3 - s_2)$   
 $S_{dot_{ger_{cond2}}} = Q_{dot_{23}} / T_{med_{cond}}$   
 $Ex_{des_{cond}} = T_0 * S_{dot_{ger_{cond}}}$   
 $Ex_{des_{cond2}} = T_0 * S_{dot_{ger_{cond2}}}$   
 $\text{Eta}_{2_{cond}} = (m_{dot_2} * (x_3 - x_2)) / (m_{dot_{ref}} * (x_A - x_B))$

"3.3 ANÁLISE DO DISPOSITIVO DE EXPANSÃO"

$S_{dot_{ger_{exp}}} = m_{dot_{ref}} * (s_C - s_B)$   
 $Ex_{des_{exp}} = T_0 * S_{dot_{ger_{exp}}}$

"3.4 ANÁLISE DO EVAPORADOR"

$m_{dot_2} = m_{dot_3}$   
 $m_{dot_1} = m_{dot_2} + m_{dot_5}$   
 $Q_{dot_{12}} = m_{dot_2} * h_2 + m_{dot_5} * h_5 - m_{dot_1} * h_1$   
 $Q_{dot_{des}} = m_{dot_5} * (h_5 - h_1)$   
 $Q_{dot_{evap}} = m_{dot_{ref}} * (h_D - h_C)$

$$T_{med\_evap} = (T_{D\_sat} * (h_{D\_sat} - h_C) + (h_D - h_{D\_sat}) * (T_D + T_{D\_sat}) / 2) / (h_D - h_C)$$

$$S_{dot\_ger\_evap} = m_{dot\_ref} * (s_D - s_C) + Q_{dot\_evap} / T_{med\_evap}$$

$$Ex_{des\_evap} = T_0 * S_{dot\_ger\_evap}$$

$$\Delta x_{12} = m_{dot\_2} * (x_2 - x_1)$$

$$\Delta x_{CD} = m_{dot\_ref} * (x_D - x_C)$$

$$\eta_{2\_evap} = \Delta x_{CD} / \Delta x_{12}$$

### "3.5 ANALISE GERAL"

$$COP = (-Q_{dot\_12} + Q_{dot\_23}) / (-W_{dot\_comp} - W_{dot\_vent})$$

$$COP_2 = (-Q_{dot\_des} + Q_{dot\_23}) / (-W_{dot\_comp} - W_{dot\_vent})$$

$$COP_{carnot} = (T_3) / (T_3 - T_2)$$

$$\eta_2 = COP / COP_{carnot}$$

$$\eta_{2\_2} = COP_2 / COP_{carnot}$$