



Universidade Federal da Paraíba

Centro de tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia

Mecânica

- Mestrado - Doutorado

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS EMISSÕES DE
GASES DE EFEITO ESTUFA PARA DOIS SISTEMAS
DE CLIMATIZAÇÃO EM UM EDIFÍCIO
UNIVERSITÁRIO NO RIO GRANDE DO NORTE**

por

Lígia da Costa Garcia

*Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção
do grau de Mestre.*

João Pessoa – Paraíba

fevereiro, 2021

LÍGIA DA COSTA GARCIA

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS EMISSÕES DE
GASES DE EFEITO ESTUFA PARA DOIS SISTEMAS
DE CLIMATIZAÇÃO EM UM EDIFÍCIO
UNIVERSITÁRIO NO RIO GRANDE DO NORTE**

Dissertação apresentada ao
curso de Pós-Graduação em engenharia
mecânica da Universidade Federal da
Paraíba, em cumprimento às exigências
para obtenção do Grau de Mestre.

Orientadora: Professora Monica Carvalho, PhD.

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

G216a Garcia, Lígia da Costa.

Análise comparativa das emissões de gases de efeito estufa para dois sistemas de climatização em um edifício universitário no Rio Grande do Norte / Lígia da Costa Garcia. - João Pessoa, 2021.
72 f. : il.

Orientação: Monica Carvalho.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Climatização - ambiente. 2. Refrigeração. 3. Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). 4. Pegada de carbono.
I. Carvalho, Monica. II. Título.

UFPB/BC

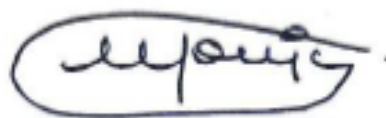
CDU 628.82(043)

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS EMISSÕES DE GASES
DE EFEITO ESTUFA PARA DOIS SISTEMAS DE
CLIMATIZAÇÃO EM UM EDIFÍCIO UNIVERSITÁRIO
NO RIO GRANDE DO NORTE**

por

LÍGIA DA COSTA GARCIA

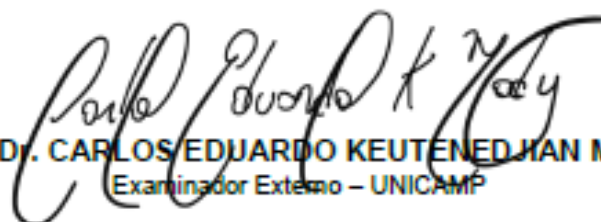
Dissertação aprovada em 10 de fevereiro de 2021



Profa. Dra. MONICA CARVALHO
Orientadora – UFPB



Prof. Dr. LUIZ MOREIRA COELHO JUNIOR
Examinador Interno – UFPB



Prof. Dr. CARLOS EDUARDO KEUTENEDJIAN MADY
Examinador Externo – UNICAMP

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à humanidade, por um mundo novo e melhor e, portanto, a todas as pessoas que amo e às que nem conheço.

Dedico também aos seres da natureza para que um dia vivamos todos em harmonia e mútuo respeito.

AGRADECIMENTOS

A força, magia e amor que permeia tudo, em outras palavras, a Deus.

Aos meus pais pela oportunidade da vida, por sempre respeitarem minhas escolhas e permitirem meu livre voo, porém sempre com a certeza do amparo quando necessário, pela criação maravilhosa que me deram cheia de cuidado, dedicação, esforço, entrega, amor e cheia do melhor deles.

Aos amigos e familiares que me deram amor e suporte, em especial a tia Leidinha (Maria Nineldes) e a Vovó Maria (cada uma representando um lado da árvore genealógica), a Fernanda The Pontes, a Airton Barros, a Laura Branco, e também a muitos outros que prefiro manter nos mágicos bastidores do meu coração.

A minha orientadora Monica Carvalho pelo cuidado, amor, dedicação, paciência, persistência, perspicácia e inspiração.

A todos os professores, colegas e funcionários do PPGEM e PPGER da UFPB.

ANÁLISE COMPARATIVA DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PARA DOIS SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO EM UM EDIFÍCIO UNIVERSITÁRIO NO RIO GRANDE DO NORTE

RESUMO

Este trabalho desenvolve uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para o sistema de climatização existente na Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Dimensiona-se um sistema alternativo, baseado em máquinas de refrigeração por absorção com coletores solares, para comparação. As emissões de gases de efeito estufa são quantificadas para cada sistema e comparadas. Os objetos em análise são um sistema de climatização convencional por compressão de vapor e outro sistema, proposto e modelado, por absorção com aporte solar. Em uma abordagem do berço ao túmulo, os projetos possuem potência de 1.735 kW. Foram contabilizados os equipamentos e materiais utilizados na instalação, manutenção, transporte e descarte. Também se contabilizou a energia elétrica necessária para o funcionamento de ambos os sistemas. Como resultado da ACV, obteve-se 355.712 kg CO₂-eq/ano para o sistema de climatização por compressão de vapor e 131.266 kg CO₂-eq/ano para o sistema de climatização por absorção com apoio solar. Com isso, houve aproximadamente 63 % menos emissões totais do sistema por absorção sugerido. A diferença mais significativa foi em relação à etapa da operação, o que ratifica a necessidade de se utilizar energias que gerem menos emissões, como por exemplo, aquelas oriundas de painéis ou coletores solares. Observou-se que a consideração da degradação do desempenho dos sistemas aumentou as emissões variáveis em 6 % para o sistema existente e 3,8 % para o sistema por absorção solar.

Palavras-chaves - Avaliação de ciclo de vida, pegada de carbono, refrigeração.

COMPARATIVE ANALYSIS OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM TWO AIR CONDITIONING SYSTEMS IN A UNIVERSITY BUILDING IN RIO GRANDE DO NORTE

ABSTRACT

This work develops a Life Cycle Assessment (LCA) for the air-conditioning system currently installed at the School of Science and Technology of the Federal University of Rio Grande do Norte. An alternative system is designed, based on absorption refrigeration with solar collectors. The emissions of greenhouse gases are quantified for both systems and compared. The study objects are a conventional air conditioning system (vapor compression) and another system, proposed and modeled, based on absorption refrigeration with solar input. In a cradle-to-grave approach, the projects have a power of 1735 kW. The equipment and materials used for installation, maintenance, transport, and disposal were accounted for. The electric energy required for the operation of both systems was also counted. As a result of the LCA, 355,712 kg CO₂-eq/year was obtained for the vapor compression air conditioning system and 131,266 kg CO₂-eq/year for the absorption air conditioning system with solar support. Hence, there were approximately 63 % less total emissions from the system by suggested absorption. The most significant difference was in relation to the stage of the operation, which confirms the need to use energies that generate less emissions, such as those coming from solar panels or collectors. Consideration of performance degradation of the air-conditioning systems increased variable emissions by 6 % for the conventional system, and by 3.8 % for the absorption solar system.

Keywords - Life cycle assessment, carbon footprint, refrigeration.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVO.....	3
1.1.1	Objetivo Geral	3
1.1.2	Objetivos específicos	4
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
2.1	CLIMATIZAÇÃO	5
2.1.1	Climatização por Compressão de Vapor	7
2.1.2	Climatização por Absorção.....	9
2.2	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA	12
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.1	REVISÃO SISTEMÁTICA	15
3.2	OBJETO DE ESTUDO	16
3.3	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA	18
3.4	SISTEMA POR COMPRESSÃO DE VAPOR	18
3.5	SISTEMA POR ABSORÇÃO SOLAR	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1	REVISÃO SISTEMÁTICA	23

4.2	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA POR ABSORÇÃO SOLAR E INVENTÁRIO	31
4.3	ACV DO SISTEMA POR COMPRESSÃO DE VAPOR	35
4.4	ACV DO SISTEMA POR ABSORÇÃO SOLAR.....	39
5	CONCLUSÕES	46
6	REFERÊNCIAS	48
7	APÊNDICE I.....	49
8	APÊNDICE II.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Classificação dos ciclos termodinâmicos (baseado em Çengel e Boles, 2013). ...	6
Figura 2.2 Esquema simplificado de um sistema de refrigeração de compressão de vapor (baseado em Çengel e Boles, 2013)	8
Figura 2.3 Diagrama entropia-temperatura de um ciclo termodinâmico ideal fechado de refrigeração por compressão de vapor (baseado em Çengel e Boles, 2013).....	8
Figura 2.4 Sistema de refrigeração por sorção solar de simples efeito (baseado em Kim e Infante, 2008)	10
Figura 2.5 Esquema de um sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito em série (baseado em Mali e Bhagwat, 2017).....	11
Figura 2.6 Esquema de um sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito em paralelo (baseado em Mali e Bhagwat, 2017).....	12
Figura 2.7 Ilustração de um exemplo de arranjo dos indicadores <i>midpont</i> e <i>endpoint</i> (Adaptado de Hauschild, Rosenbaum e Olsen, 2018, p. 182).....	14
Figura 3.1 Condensadoras da Escola de Ciências e Tecnologia da UFRN.	16
Figura 3.2 Gráfico do percentual da demanda de carga térmica dos ambientes da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.....	17
Figura 3.3 Detalhamento da fronteira do sistema de climatização da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.	20
Figura 4.1 Esquema de um arranjo do sistema de climatização por absorção solar.....	31
Figura 4.2 Acionamento dos <i>chillers</i> do sistema de climatização por absorção.	35
Figura 4.3 Composição das emissões associadas ao sistema de climatização da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.....	37
Figura 4.4 Composição das emissões associadas aos subsistemas de climatização da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.	38
Figura 4.5 Gráfico da contribuição em percentual das emissões de poluentes das partes do sistema de climatização por absorção proposto para a Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Classificação do sistema de climatização da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (informações com base em GARCIA, 2018).....	19
Tabela 3.2 Composição material dos sistemas de climatização existentes no edifício da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. (a) Sistemas. (b) Materiais da instalação.....	20
Tabela 4.1 Resumo das principais características dos estudos do estado da arte.....	28
Tabela 4.2 Principais materiais que compõem um coletor solar plano S-81 da Solar Tech (2016a).....	33
Tabela 4.3 Principais materiais que compõem um reservatório de 400 m ³ (adaptado de AWWA, 2013 e Eurotank works, 2020).	33
Tabela 4.4 Principais materiais que compõem uma máquina de refrigeração por absorção de duplo efeito (modelo 5G 3A C, THERMAX, 2017).....	33
Tabela 4.5 Principais materiais que compõem a instalação do sistema de climatização por absorção.....	34
Tabela 4.6 Emissões fixas totais dos sistemas de climatização da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.	35
Tabela 4.7 Emissões fixas de GEE associadas aos subsistemas de climatização da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.....	37
Tabela 4.8 Emissões de gases de efeito estufa associadas ao sistema de climatização por absorção proposto para a Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.	39
Tabela 4.9 Consumo de eletricidade modificado em razão da degradação do sistema de climatização convencional.	43
Tabela 4.10 Consumo de eletricidade modificado em razão da degradação do sistema de climatização por absorção solar.	43
Tabela 4.11 Comparação das emissões considerando a degradação de seu desempenho....	44
Tabela 4.12 Comparação das emissões de todos os sistemas.....	45

LISTA DE SÍMBOLOS

A - Idade do sistema (em anos)

ACV - Avaliação de Ciclo de Vida

AICV - Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida

AVAC - Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado

COP – Coeficiente de Performance

CO₂ – Gás carbônico

ECT - Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do

Norte

E_i - Consumo de energia inicial (kWh/ano)

E_{MD} - Consumo de energia modificado pela degradação (kWh/ano)

Endpoint - indicadores de ponto final

GAT - Gerador de Alta Temperatura

GBT - Gerador de Baixa Temperatura

GEE - Gases de Efeito Estufa

HVAC - em inglês: Aquecimento, Ventilação e Ar-condicionado

ICV - Inventário do Ciclo de Vida

LiBr – Brometo de Lítio

M - Fator de manutenção

Midpont - indicadores de ponto médio

NREL - em inglês: Laboratório Nacional de Energias Renováveis

Q_a - Calor de absorção (kW)

Q_c - Calor de condensação (kW)

Q_e - Calor da carga de resfriamento (kW)

Q_g - Calor do coletor solar (kW)

SEER - em inglês: Índice de Eficiência Energética Sazonal

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A busca por sustentabilidade iniciou gradualmente ao longo dos anos devido às danosas vivências ambientais, tais como deterioração de recursos não-renováveis, mudanças climáticas, extinção de espécies animais, aquecimento global, destruição da camada de ozônio e aumento da desertificação. Com isso, a atenção do mundo começou a voltar-se para o fato de que os recursos naturais precisam ser corretamente gerenciados e que o ser humano é diretamente atingido pela falta de um manejo eficiente desses recursos (GEORGE *et al.*, 2018).

Diante das demandas econômicas e tecnológicas que pressionaram a sociedade no século XVIII, tornou-se indispensável a mecanização da produção manufatureira para uma transição que respondesse ao novo padrão daqueles tempos. Surgindo assim conhecimentos capazes de ampliar drasticamente a produção dos bens de consumo, sendo este recorte histórico denominado de primeira revolução industrial (VAINFAS *et al.*, 2016). Neste prisma, a produção em larga escala trouxe pressão técnica que tornaram valiosos os mecanismos denominados de "máquinas a vapor", utilizando o carvão vegetal e mineral como sua força motriz, gatilhando o embrião do uso dos combustíveis fósseis.

Nesta perspectiva, os grandes impérios da era moderna difundiram com grande capilaridade suas tecnologias, alterando completamente o estilo de vida da sociedade. Após, adveio a segunda revolução industrial, consolidando o uso de petróleo e seus derivados em um novo patamar de produção (VAINFAS *et al.*, 2016). Nesta senda, o desenvolvimento de estudos capazes de dimensionar com maior precisão a emissão de CO₂ partiram de pioneiros como Charles David Keeling, o qual classificou o CO₂ como o maior resíduo da idade moderna, bem como foi capaz de dimensionar o coeficiente de poluentes atmosférico ainda no ano de 1958 como parte do programa do Ano Geofísico Internacional (SALAWITCH *et*

al., 2017). Em suas primeiras análises, verificou-se que o CO₂ atmosférico era de um volume provável de 313 partes por milhão (ppm).

A partir da primeira guerra mundial houve uma ampliação considerável na demanda global de combustíveis e consequente aumento na emissão de CO₂. Durante a crise econômica de 1929, o lançamento total de CO₂ na atmosfera era cerca de 10 Gt CO₂-eq/ano. Com o advento da segunda guerra mundial e o crescimento econômico dos EUA, URSS e Europa essa emissão atingiu níveis de aproximadamente 40 Gt CO₂-eq/ano nos anos 2000, ou seja, um aumento de 30×10^{12} kg CO₂-eq/ano emitidos na atmosfera em apenas 70 anos (SALAWITCH *et al.*, 2017).

A elaboração das análises quantitativas de poluentes dimensionou a carga atmosférica residual, e sistematicamente legitimou teses em que as alterações climáticas se devem à ação humana. Salawitch *et al.* (2017) denomina essa era de antropoceno, já que a ação do homem depositou impressões digitais na história do planeta. Atualmente a sociedade se esforça para a redução dos GEE's, bem como o desenvolvimento de tecnologias limpas. Entretanto, países como EUA e China ainda permanecem emitindo grandes patamares de resíduos, sendo um desafio para as nações manterem suas economias e o pleno fluxo da produção alimentícia e industrial.

A refrigeração para fins de conforto térmico vem se tornando cada vez mais utilizada em todo o mundo, já que há necessidades humanas importantes e até cruciais que requerem o controle de temperatura e umidade. Contudo, o consumo ascendente de energia para fins de climatização causa preocupações com as reservas não-renováveis de combustíveis fósseis, com o aumento da poluição e consequentes mudanças negativas do meio ambiente, dentre elas o aquecimento global (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2018).

Embora o principal meio de abastecimento do mercado energético brasileiro recaia sobre as hidrelétricas, existe o reforço das termelétricas, acionadas em momentos de picos de demanda ou quando é necessário preservar o nível dos reservatórios (CARVALHO e DELGADO, 2017). De acordo com a Resenha Energética Brasileira de 2018 (BRASIL, 2019), o Brasil emitiu 410,6 Mt de CO₂, dos quais 11,5% correspondem ao setor de geração elétrica. Apesar dessa emissão ter reduzido entre 2017 e 2018, o esforço deve-se manter constante para atingir a meta da Agenda 2030, lançada durante a Cúpula de Desenvolvimento Sustentável da Assembleia Geral das Nações Unidas, da Organização das Nações Unidas, de 2015 (IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2019). Soma-se a isso o fato de

contribuições nas emissões serem inconstantes e dependentes de muitos fatores, tais como fenômenos naturais, socioeconômicos e políticos.

A aplicação da energia para climatização de ambientes construídos mais do que dobrou entre 2000 e 2018, e segue crescendo em função não apenas do crescimento populacional e urbanização, mas do próprio acréscimo da temperatura média do planeta (IEA - *International Energy Agency*, 2018). Nesse sentido, há um esforço conjunto da comunidade científica e programas de efficientização energética para frear a demanda de eletricidade para refrigeração de construções até 2040 (IEA, 2018).

A expansão do uso de tecnologias convencionais de climatização tem acentuado os impactos ambientais nos últimos anos, tanto devido ao consumo de energia quanto devido à utilização dos refrigerantes. Mesmo após a substituição gradual dos refrigerantes a base de clorofluorcarbonetos (CFCs) por aqueles baseados em hidrofluorcarbonos (HFCs), estes ainda são gases de efeito estufa, com um potencial desencadeador do aquecimento global da ordem de 1000 vezes superior ao dióxido de carbono (PAULA *et al.*, 2020). Alternativas para diminuir o impacto ambiental associado a sistemas de climatização podem focar em diminuir o consumo de energia (eficiência energética), usar outros refrigerantes, e utilizar fontes de energias renováveis. As análises ambientais surgiram dessa necessidade de quantificação, devido às preocupações atuais com os impactos ambientais e as mudanças climáticas.

Primando pela confiabilidade na tomada de decisões por alternativas que reduzam os danos à natureza, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que pode ser aplicada para quantificar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas aos sistemas de refrigeração. Por meio desse estudo, busca-se dar início a uma contribuição na avaliação de critérios que visem a mitigação dos impactos ambientais considerando todo o ciclo de vida dos produtos.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

Comparar as emissões de GEE associadas a dois sistemas de refrigeração: um convencional por compressão de vapor e outro por absorção com uso de energia solar, para atender às demandas de um edifício universitário no Rio Grande do Norte.

1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Realizar o estado da arte de trabalhos voltados à Avaliação de Ciclo de Vida em sistemas de climatização por absorção;
- ✓ Dimensionar um sistema de refrigeração por absorção com apoio de coletores solares para atender às demandas energéticas da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte;
- ✓ Quantificar as emissões de GEE, por meio da ACV, associadas ao sistema de climatização instalado atualmente no edifício universitário (compressão de vapor);
- ✓ Comparar as emissões de GEE do sistema atual com o sistema dimensionado (absorção e coletores solares), verificando o potencial de mitigação de mudanças climáticas associado à substituição.

CAPÍTULO II

REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CLIMATIZAÇÃO

De um modo geral a vida de praticamente todas as pessoas se passa no interior de edifícios, sejam eles casas, condomínios, escolas, locais de trabalho, ambientes de lazer. No manual da *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - ASHRAE* (2015), o consumo elétrico de uma construção pode ser dividido em dependente ou não do clima. Este último corresponde ao sistema de climatização, enquanto o outro engloba a iluminação, motores, aquecimento de água, eletrodomésticos, sistema de segurança e equipamentos de escritório diversos.

O equilíbrio termofisiológico do corpo humano e o conforto térmico estão intimamente ligados, por isso a temperatura, umidade e velocidade do ar são um dos principais parâmetros que definem a qualidade de um ambiente (GONÇALVES e BODE, 2015). Soma-se a isso, o fato de o conforto térmico depender dos seguintes fatores pessoais: tipo de roupa usada (resistência térmica) e nível de atividade física (metabolismo), de modo que os cálculos são feitos para que 80% ou mais das pessoas de um ambiente tenham sensações térmicas agradáveis (ABNT, 2008).

Na termodinâmica se estuda diversos processos, os quais em muitos casos possuem a mesma essência divergindo apenas quanto ao objetivo almejado. Com isso, os ciclos termodinâmicos podem ser divididos em ciclos de potência, que visam a obtenção de trabalho, e ciclos de refrigeração, cujo alvo é a troca de calor (Figura 2.1).

Muitos sistemas de refrigeração têm o potencial de serem aplicados em edifícios, faz-se necessário avaliar caso a caso. Sistemas e aplicações diversas podem resultar dos

ciclos termodinâmicos e dependendo do parâmetro observado também serão muitas as classificações. Quando o fluido de trabalho permanece constante na fase gasosa é chamado de ciclo a gás, por outro lado se ao longo do ciclo o fluido de trabalho assumir ambas as fases, gasosa e líquida, passa a denominar-se ciclo a vapor. E ainda, dependendo do sistema, o fluido de trabalho pode ser renovado a cada ciclo ou manter-se em looping voltando ao seu estado inicial continuamente, sendo categorizado respectivamente como aberto ou fechado (ÇENGEL, BOLES, 2013).

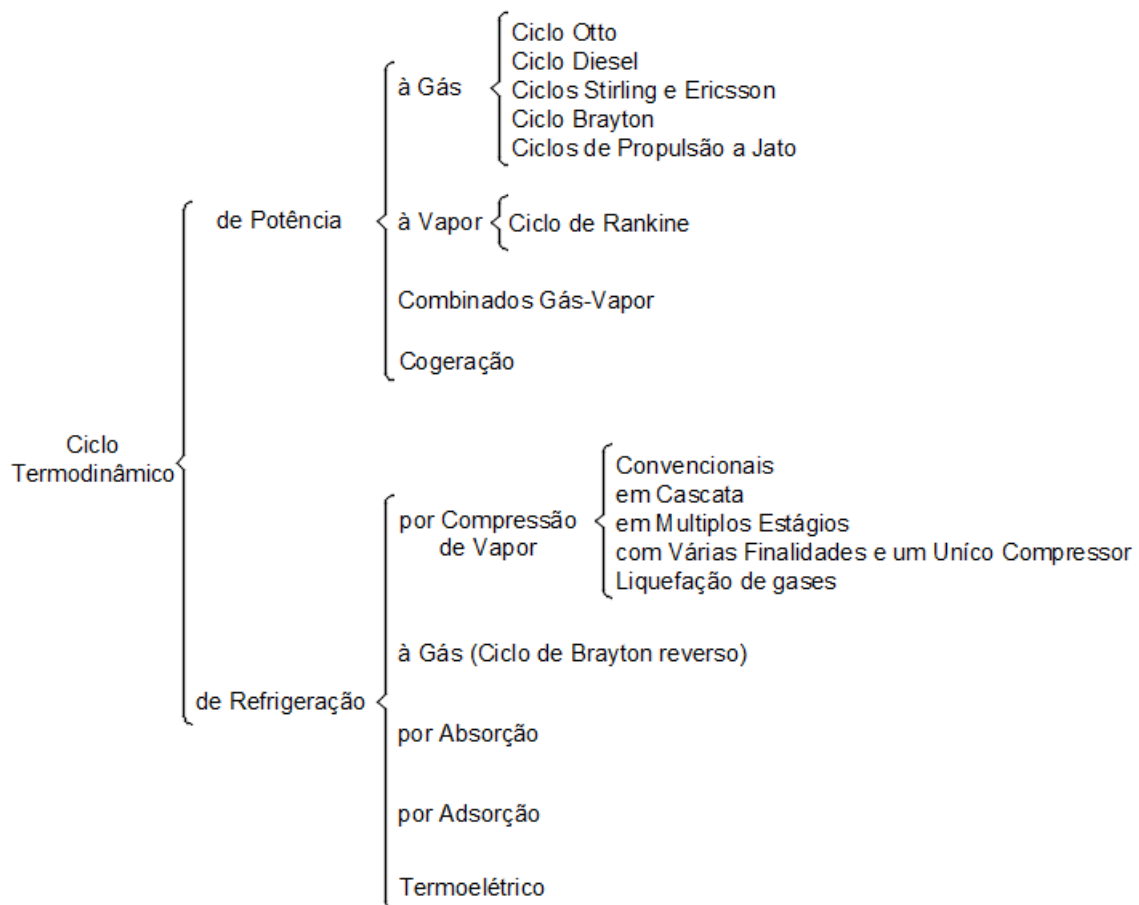


Figura 2.1 Classificação dos ciclos termodinâmicos (baseado em Çengel e Boles, 2013).

Quanto à configuração da troca de calor, os sistemas de refrigeração podem ser classificados em diretos ou indiretos. No primeiro, o que se almeja é alcançado com a comutação de calor direta entre o fluido e o evaporador ou o condensador, enquanto no sistema indireto há uma substância secundária que realiza a interação entre eles. De acordo com a NBR 16069 (2018), os sistemas indiretos são classificados em quatro métodos de

aplicação: *spray* aberto, *spray* aberto duplo, fechado e o fechado com tanque aberto à atmosfera.

Os sistemas de refrigeração têm mostrado potencial para aplicação conjunta às fontes renováveis (SHIRAZI *et al.*, 2018). De acordo com Schmid *et al.* (2019), algumas vantagens da energia solar para climatização incluem o desenvolvimento acelerado experimentado por essa tecnologia, concomitância entre crescimento da demanda de frio em ambientes interiores e a disponibilidade de energia solar, além da não recorrência direta às fontes fósseis como energia primária.

Tais sistemas podem ser enquadrados em duas categorias: eletricamente acionado (com uso de módulos fotovoltaicos acoplados a uma máquina por compressão de vapor) e termicamente acionados (com uso de coletores solares acoplados ao gerador) (WANG, GE, 2016). O primeiro tipo é relativamente simples e aplicável em pequena escala (ZEYGHAMI *et al.*, 2015). O segundo, por sua vez, pode ser ainda subdividido em ciclos por absorção, adsorção, dessecante e ejetor. Os sistemas termicamente acionados por absorção têm mostrado maior confiabilidade e competitividade em relação aos equipamentos convencionais de ar-condicionado.

2.1.1 Climatização por Compressão de Vapor

De acordo com Kushwaha e Tiwari (2016), as tecnologias de refrigeração por compressão de vapor atenderam às necessidades de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC) de forma muito eficaz e têm sido dominantes por quase 100 anos. Além de ser o sistema de refrigeração mais popular e amplamente utilizado, com uma participação de mercado de 80% (LI *et al.*, 2015).

Entretanto o ciclo de refrigeração por compressão de vapor usa para seu acionamento a eletricidade, energia de maior qualidade, enquanto o de refrigeração por absorção utiliza uma energia de baixa qualidade, o calor. Comparando os dois ciclos, o de absorção tem baixos valores de Coeficiente de Performance (COP), mas é atrativo pois possibilita o uso de fontes renováveis de energia, além de utilizar substâncias que não agredem a camada de ozônio e nem provocam o aquecimento global (MALI e BHAGWAT, 2017).

O sistema de refrigeração por compressão de vapor (ver Figura 2.2) é estudado através de um ciclo ideal fechado, conforme gráfico da Figura 2.3, composto pelos processos:

1-2 de compressão isentrópica em um compressor até uma temperatura acima da temperatura externa; posteriormente a perda de calor Q_c a pressão constante em um condensador, em 2-3; em 3-4 o estrangulamento através de um dispositivo de expansão até uma temperatura menor que a do espaço refrigerado e, por fim, em 4-1 a absorção de calor Q_e a pressão constante em um evaporador, para então o ciclo reiniciar (STOECKER, SAINZ JABARDO, 2018).

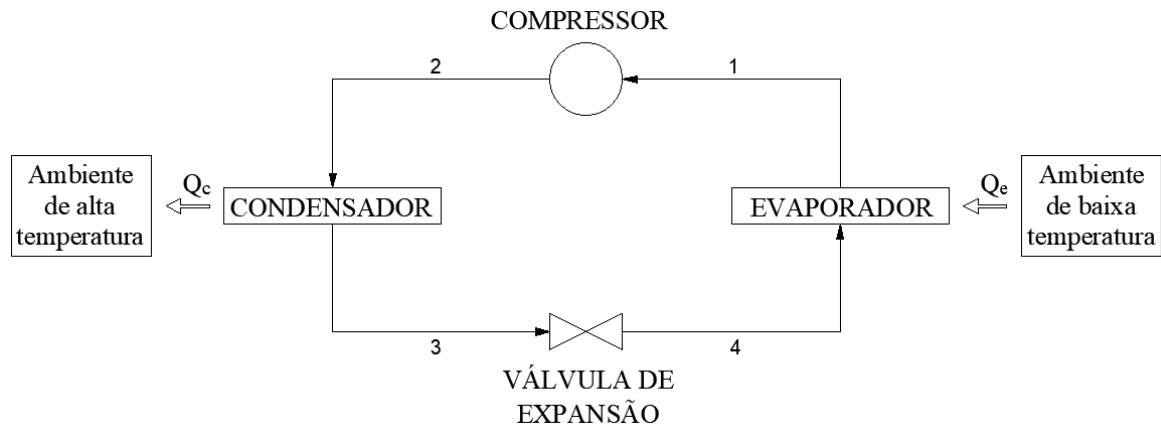


Figura 2.2 Esquema simplificado de um sistema de refrigeração de compressão de vapor (baseado em Çengel e Boles, 2013)

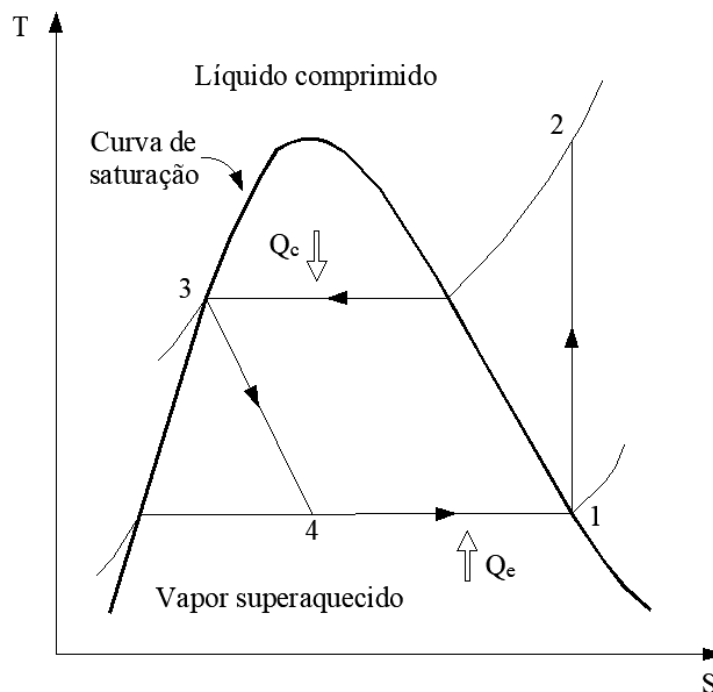


Figura 2.3 Diagrama entropia-temperatura de um ciclo termodinâmico ideal fechado de refrigeração por compressão de vapor (baseado em Çengel e Boles, 2013).

2.1.2 Climatização por Absorção

A energia solar pode ser aproveitada por meio de coletores solares térmicos, nos quais o calor gerado aciona sistemas de refrigeração, como ciclos de absorção e adsorção (AL-ALILI *et al.*, 2012). O resfriamento por absorção movido a energia solar pode ser considerado uma tecnologia emergente, dado que a disponibilidade de energia solar está associada à demanda de resfriamento dos edifícios (JING *et al.*, 2019).

Na refrigeração por sorção, o efeito de resfriamento é gerado por uma atração física ou química entre um par de substâncias (KIM, INFANTE, 2008). A substância com temperatura de ebulição mais baixa é o refrigerante e é referida como sorbato, enquanto a outra substância é chamada sorvente. Entre os ciclos de sorção, a refrigeração por absorção tem sido a mais empregada para aplicações solares devido ao seu baixo consumo de energia e menores dimensões dos equipamentos (BELLOS *et al.*, 2015).

Um diagrama esquemático de um sistema de sorção fechado é mostrado na Figura 2.4. Substituindo o compressor do sistema de refrigeração por compressão de vapor por um mecanismo complexo de absorção, passa-se a ter um sistema de refrigeração por absorção, cujo princípio base é a sorção e a dessorção que ocorrem, respectivamente, no absorvedor e no gerador. O calor do coletor solar, Q_g , é recebido pelo gerador e usado para regenerar o sorvente, que absorveu o refrigerante no absorvedor. Esse processo forma vapor de refrigerante que é condensado no condensador, o qual rejeita o calor de condensação, Q_c , no ambiente. O absorvente regenerado retorna ao absorvedor, absorvendo o vapor de refrigerante do evaporador e rejeitando o calor de absorção, Q_a , para o meio ambiente. Finalmente, o refrigerante liquefeito do condensador evapora no evaporador, removendo o calor Q_e da carga de resfriamento (KIM, INFANTE, 2008).

No *absorvedor* o vapor do refrigerante se dissolve no sorvente ou meio de transporte em uma reação exotérmica, a qual é resfriada (por exemplo, através de um circuito fechado indireto com tanque aberto à atmosfera, ver Figura 4.1 na seção 4.2) para que haja maior absorção; no *gerador* o calor de uma fonte externa (que pode ser a energia solar) evapora a solução; o *retificador* permite que apenas o refrigerante puro a alta pressão siga para o restante do ciclo do sistema devolvendo a solução ao mecanismo de absorção; no *regenerador* o calor é transferido da solução pobre em refrigerante para a rica em refrigerante, a qual irá para o gerador (ÇENGEL, BOLES, 2013).

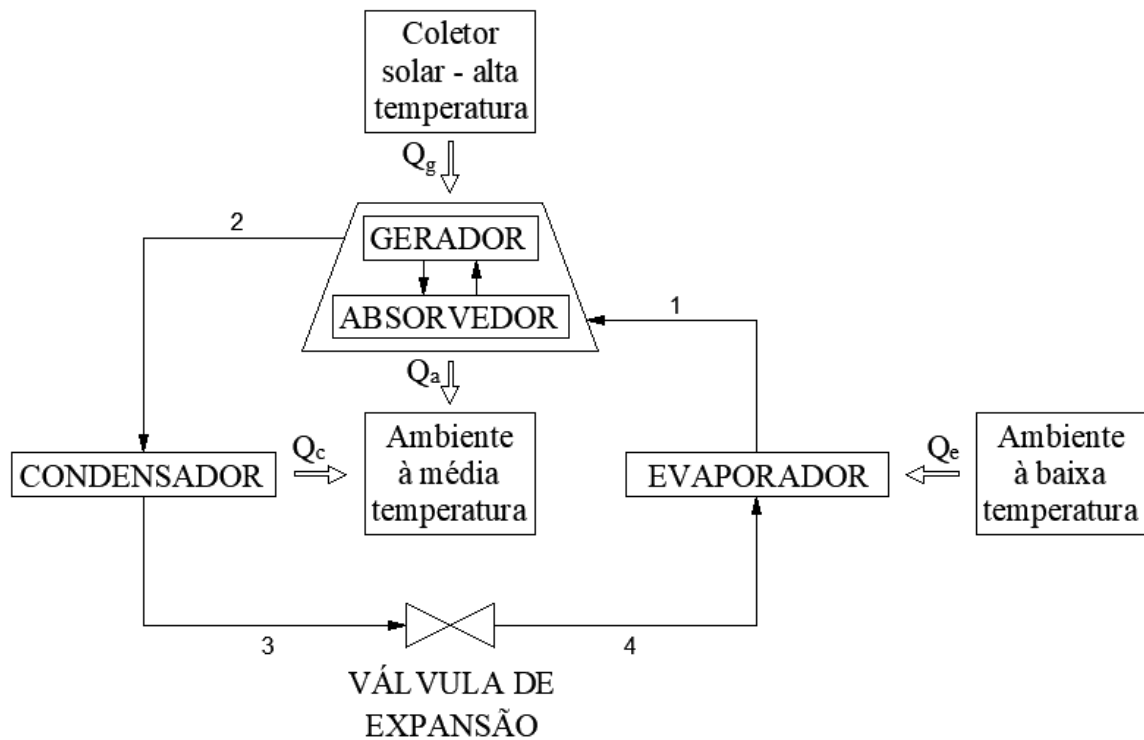


Figura 2.4 Sistema de refrigeração por sorção solar de simples efeito (baseado em Kim e Infante, 2008)

Em um sistema de refrigeração por absorção a configuração de duplo efeito tem o objetivo de melhorar a performance da máquina. Existem diferentes configurações de sistemas de duplo efeito que possuem melhor eficiência energética se comparados com os de simples efeito, por outro lado requerem mais calor. Dessa forma, o COP dos sistemas de duplo efeito são aproximadamente duas vezes maiores que os de simples efeito, mas a eficiência exergética cresce mais lentamente (CIMSIT, 2018).

A Figura 2.5 detalha um ciclo de refrigeração por absorção de água-brometo de lítio de duplo efeito com fluxo em série. O calor Q_g é fornecido ao gerador de alta temperatura (GAT) para produção de valor, o qual serve, por sua vez, como uma fonte de calor para o gerador de baixa temperatura (GBT).

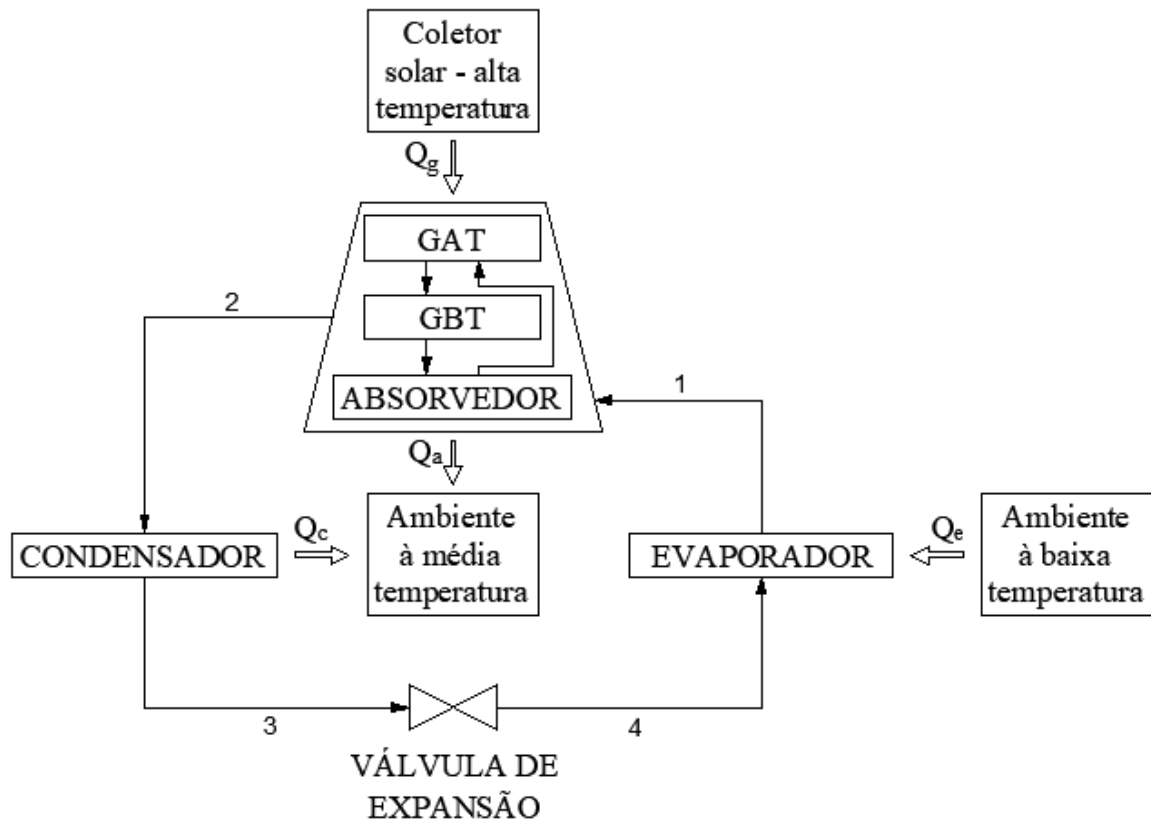


Figura 2.5 Esquema de um sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito em série (baseado em Mali e Bhagwat, 2017)

O vapor produzido no GAT é condensado no GBT para geração de vapor adicional (2), o qual também condensa e, dessa forma, o refrigerante líquido é obtido (3). O refrigerante líquido transforma-se em vapor após absorver calor no evaporador (1) e segue para o absorvedor onde se misturará com a solução forte gerando uma reação exotérmica que é esfriada por um sistema de arrefecimento objetivando maior miscibilidade (MALI e BHAGWAT, 2017).

Já a Figura 2.6 mostra um sistema semelhante ao da Figura 2.5, cuja diferença é na solução circulando entre os dois geradores. Em outras palavras, depois que o refrigerante gasoso (1) é absorvido no absorvedor, a solução fraca formada é bombeada dividindo-se em dois fluxos, um para cada gerador. Enquanto a solução forte formada em ambos os geradores se encontra voltando a formar um fluxo único que retorna ao absorvedor (MALI e BHAGWAT, 2017).

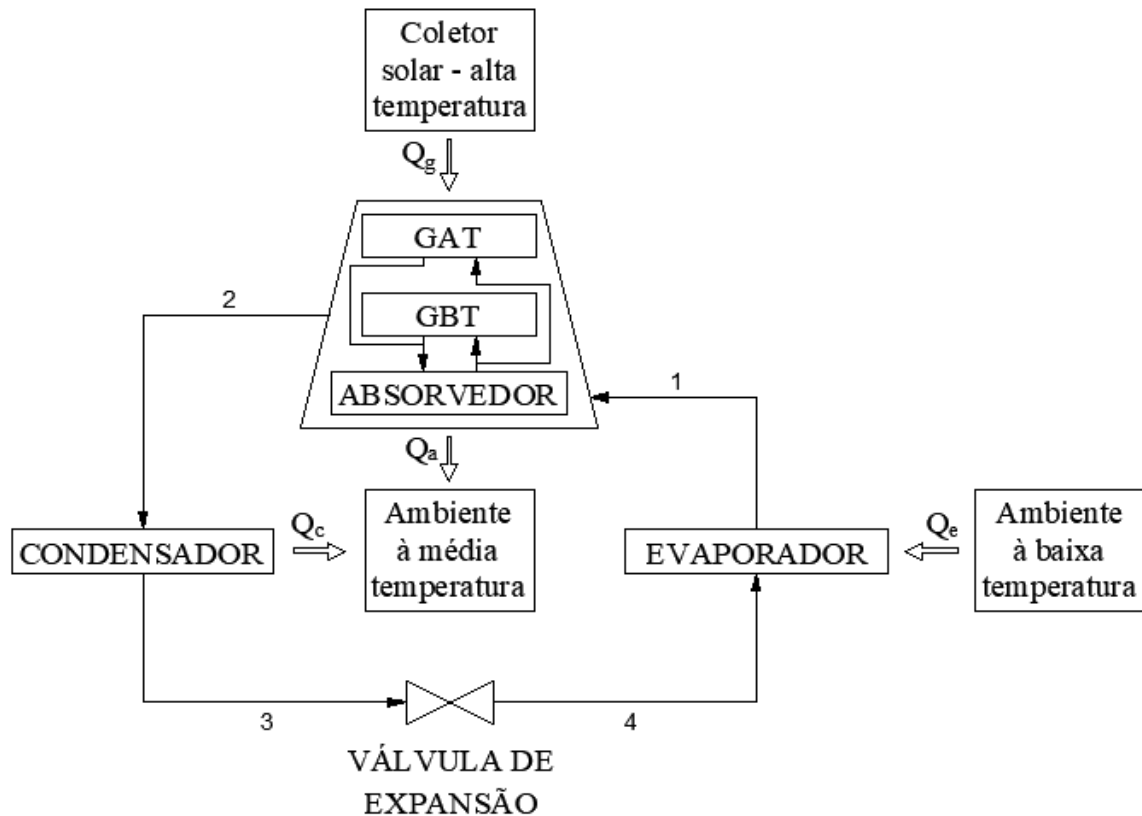


Figura 2.6 Esquema de um sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito em paralelo (baseado em Mali e Bhagwat, 2017)

2.2 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia capaz de qualificar e quantificar potenciais danos à natureza, também conhecida como análise do "berço ao túmulo". Soma-se a isso, a capacidade de calcular impactos ambientais destacando as etapas mais problemáticas de um produto, processo ou serviço (ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014a). A ACV compila as entradas, saídas e impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida ou até mesmo somente durante uma etapa (ABNT, 2014a; ABNT, 2014b). O ciclo de vida inclui a extração da matéria-prima, processamento, manufatura, transporte, uso, manutenção, até o descarte final, que pode dividir-se na possibilidade de reuso, reciclagem e destinação final de resíduos.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas normatiza a abordagem sistêmica da ACV por meio das NBR 14040 (2014a) e 14044 (2014b), que correspondem aos documentos

de mesma numeração elaborados pela Organização Internacional de Normalização (ISO - *International Organization for Standardization* 14040, 2006; ISO 14044, 2006). A ACV está organizada em quatro estágios (HAUSCHILD *et al.*, 2018, p. 67-270): definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos, e interpretação.

A abordagem dos objetos de uma ACV normalmente se baseia em seis parâmetros: aplicações pretendidas dos resultados, limitações devido às escolhas metodológicas, contexto da decisão e razões para a realização do estudo, público-alvo, estudos comparativos a serem divulgados ao público, comissário do estudo e outros atores influentes. Já a definição do escopo contempla a exposição dos seguintes pontos: entrega dos resultados, objeto de avaliação, estrutura de modelagem de Inventário do Ciclo de Vida - ICV, limites do sistema e representatividade dos dados de ICV, preparo da base para a avaliação de impacto, requisitos especiais para comparações de sistemas, necessidades críticas de revisão e planejamento de relatórios de resultados.

A Análise de Inventário pode ser fragmentada nessas etapas: identificação de processos para o modelo do ICV do sistema do produto, planejar e coletar dados, construção e verificação de processos unitários, construção do modelo de ICV e cálculo dos resultados de ICV, preparar a base para gerenciamento de incertezas e análise de sensibilidade, e relatórios. Na Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) as informações do inventário são processadas através de *softwares* e traduzidas numérica e qualitativamente. A fase da Interpretação do Ciclo de Vida é o momento da análise dos resultados tanto da Avaliação de Impactos quanto do Inventário do Ciclo de Vida, deixando clara as incertezas, prevendo recomendações e chegando a conclusões (ABNT, 2014a).

Segundo Hauschild, Rosenbaum e Olsen (2018) os resultados da AICV podem ser apresentados de duas formas diferente, a saber, por indicadores de ponto médio (*midpont*) ou por indicadores de ponto final (*endpoint*), ver Figura 2.7. O resultado *midpoint* é obtido dividindo-se e agrupando-se a composição do inventário em diferentes categorias de agressão ambiental, alguns exemplos, alterações climáticas, destruição da camada de ozônio, acidificação, eutrofização, uso da terra. Então essas categorias são processadas em valores, que entretanto, são pouco significativos para os cálculos ambientais, mas por outro lado os indicadores *midpoint* no geral facilitam a compreensão de como a natureza é afetada.

Os *endpoint* são o resultado de uma normalização, ponderação e agregação das categorias de *midpont*. De modo que as vastas diferenças dos *midpont* se transformam em uma pequena configuração de áreas de proteção, sendo as mais comuns: Saúde humana,

qualidade do ecossistema ou ambiente natural, recursos naturais e serviços ecossistêmicos. Todavia existem métodos de AICV que suportam apenas os *endpoint* combinando tudo em apenas um resultado (HAUSCHILD *et al.*, 2018, p. 179-183).

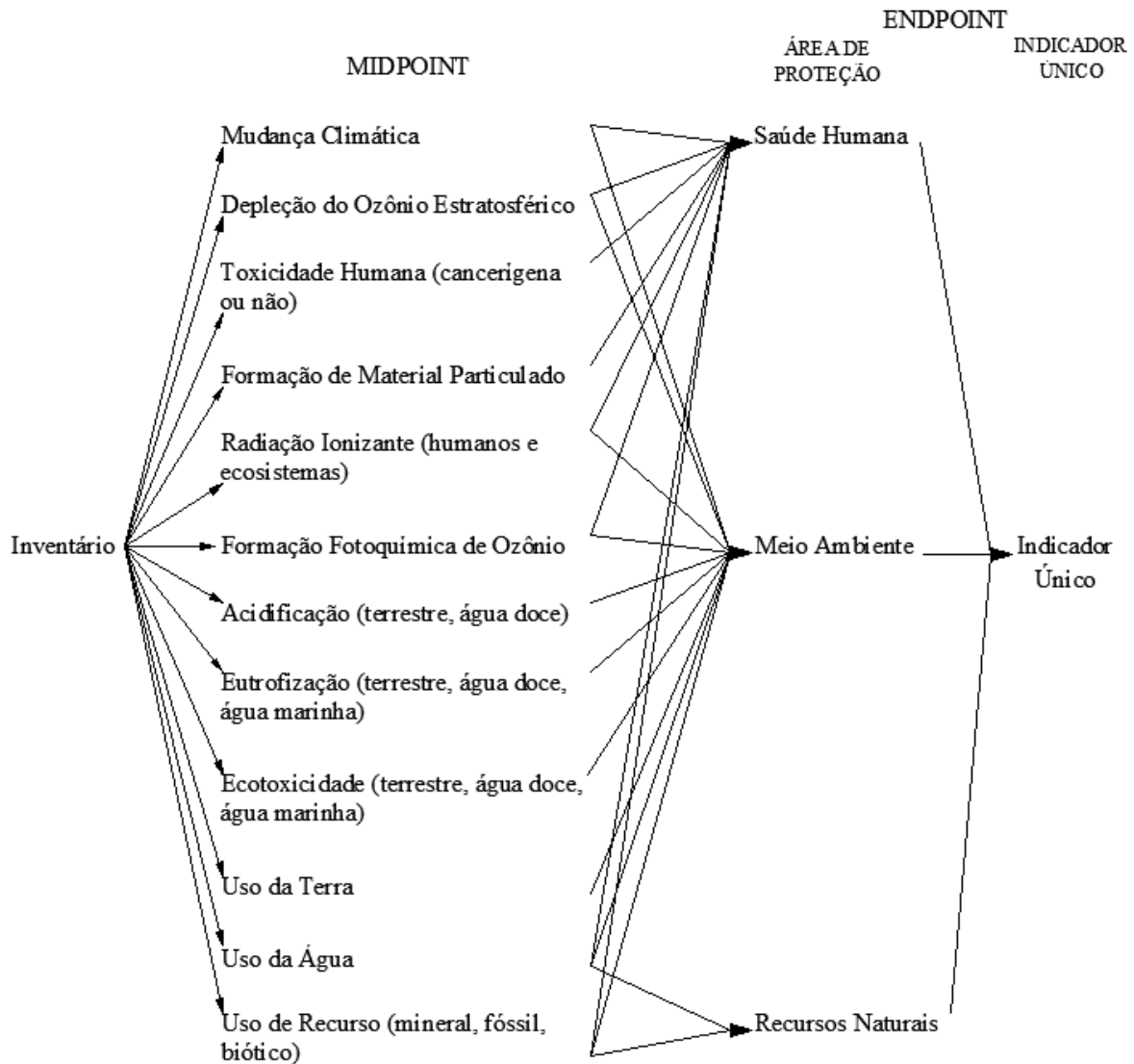


Figura 2.7 Ilustração de um exemplo de arranjo dos indicadores *midpoint* e *endpoint* (Adaptado de Hauschild, Rosenbaum e Olsen, 2018, p. 182)

CAPÍTULO III

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 REVISÃO SISTEMÁTICA

Uma revisão sistemática foi realizada focando em estudos de ACV aplicados em sistemas de refrigeração para climatização. Após identificação da viabilidade dessa revisão e relevância do assunto, foram selecionadas as bases de dados Science Direct e Scopus, levando em consideração a importância de encontrar todos os estudos publicados sobre o assunto e que, além de atender aos critérios de inclusão, apresentassem alta qualidade metodológica. Estudos publicados até 2019 foram incluídos.

Diferentes combinações de palavras-chave e descritores foram utilizados para garantir uma estratégia de busca eficiente dentro das características de cada banco de dados. Foram empregadas as seguintes palavras-chave em inglês: sistema de climatização, sistema de refrigeração, avaliação de ciclo de vida, e absorção.

A revisão incluiu apenas estudos originais indexados nas bases de dados acima mencionadas e focados em aplicações de refrigeração. Não houve restrições quanto ao ano de publicação para maximizar a identificação da literatura relevante. Resultados derivados de livros, anais, e resumos de conferências foram excluídos da análise. Apenas estudos voltados exclusivamente a climatização foram considerados. Os sistemas que produziam refrigeração combinados com outros tipos de energia, como sistemas de cogeração, trigeração e poligeração, não foram incluídos. Além disso, os estudos de revisão não foram levados em consideração.

A primeira etapa compreendeu a leitura dos títulos e resumos de todos os estudos identificados nas buscas (manual e nas bases de dados), sendo selecionados apenas aqueles que estivessem de acordo com o assunto e o tipo de estudo desejado. Os trabalhos duplicados

foram removidos e, em seguida, foram lidos integralmente (segunda etapa), com extração de dados relevantes, como localização do estudo, tipo de sistema de absorção, software de ACV empregado, banco de dados e informações sobre métodos de avaliação de impacto ambiental. A busca manual também foi realizada por meio da leitura das referências listadas nos estudos, para possível inclusão de outros estudos que não tivessem sido identificados na busca eletrônica.

3.2 OBJETO DE ESTUDO

O sistema de climatização em estudo é o da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (ECT/UFRN), com carga térmica de 1.735 kW distribuída por quatro pavimentos. Até meados de 2018, eram utilizados aparelhos de ar-condicionado convencionais por compressão de vapor, 168 evaporadores em 85 sistemas fechados na sua maioria da marca Hitachi da linha utopia, com exceção de apenas quatro, um da marca LG e três da Carrier; todos em ativa desde 2010 de acordo com os relatórios de partida (GARCIA, 2018). As salas são destinadas ao desenvolvimento de atividades acadêmicas de professores e alunos.



Figura 3.1 Condensadoras da Escola de Ciências e Tecnologia da UFRN.

A ECT situa-se na latitude de $5,801^{\circ}$ ao sul e longitude de $35,249^{\circ}$ à oeste, no litoral nordestino brasileiro ao nível do mar, na cidade de Natal/RN. O edifício localiza-se à aproximadamente 2 km da praia à leste, a qual é adjacente a uma reserva da Mata atlântica (visualizada à esquerda da Figura 3.1), com clima tropical e vegetação floresta tropical.

A elaboração do perfil de demanda do uso dos ambientes do edifício associado a sua carga térmica (Figura 3.2), útil nos cálculos do consumo energético, foi realizada com base

na função das salas e na disponibilização dos dados (ECT - Escola de Ciências e Tecnologia, 2019). As salas da ECT foram divididas em quatro grandes grupos, a saber, anfiteatros, salas de aula, laboratórios de informática e demais ambientes (salas de professor e salas administrativas). Para cada um desses agrupamentos, foi calculada a porcentagem de horas de uso dessas salas por dia, tendo como base o uso máximo de 15 h/dia, que foi multiplicada pela porcentagem de suas cargas térmicas. Com esses valores, foi feita uma média ponderada para se encontrar a porcentagem de demanda de cada hora do sistema como um todo. Considerou-se a operação dos sistemas durante 264 dias ao ano, ou seja, 22 dias úteis por mês.

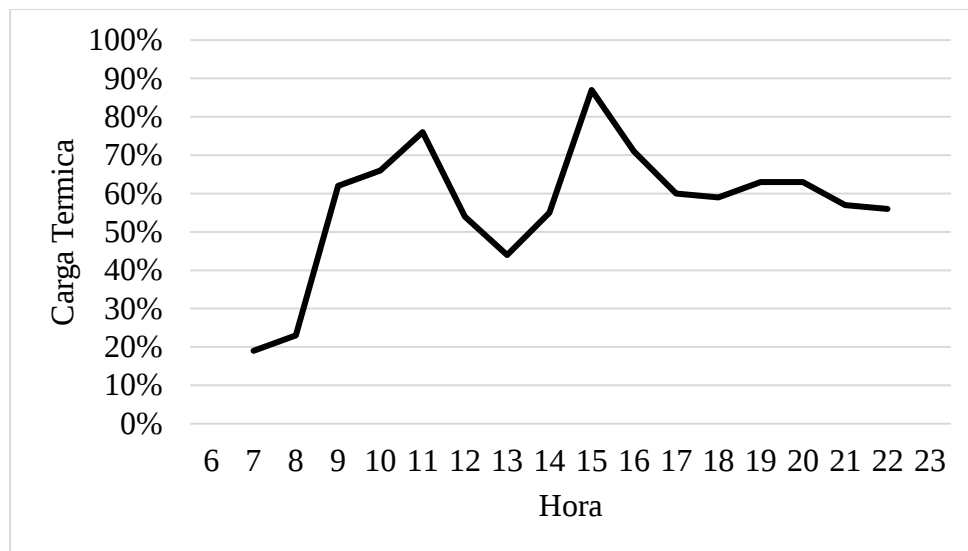


Figura 3.2 Gráfico do percentual da demanda de carga térmica dos ambientes da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Ainda para estabelecimento das demandas de eletricidade (Figura 3.2), aplicou-se o método dos graus-dia (ERBS *et al.*, 1983; SHIN, DO, 2016; D'AMICO *et al.*, 2019), considerando dados climáticos para a cidade de Natal (CLIMATICUS, 2011) com uma temperatura de conforto de 22°C, definida com base na NBR 16401-2 (2008), e dados sobre a ocupação do edifício (ECT - Escola de Ciências e Tecnologia, 2019) conforme descrito acima. Essa abordagem tem sido amplamente usada em estudos de otimização (CARVALHO *et al.*, 2019; DELGADO *et al.*, 2018).

3.3 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

Para a quantificação das emissões de gases de efeito estufa utilizou-se o *software* SimaPro v.9.1.0.8 (SIMAPRO, 2019) e base de dados *Ecoinvent* 3.6 (2019), cujos processos escolhidos caracterizam uma alocação atribucional. O método empregado foi o IPCC 2013 GWP 100a (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2013), que engloba apenas o potencial de aquecimento global como categoria de impacto. Nesse método, os cálculos se dão de modo que, ao longo de 100 anos, as sequelas cumulativas dos gases de efeito estufa são contabilizadas e expressas em kg CO₂-eq (quilogramas de CO₂ equivalente) (IPCC, 2013).

Quanto a utilização de energia da rede elétrica nacional, utilizou-se a metodologia proposta por Carvalho e Delgado (2017) para estimar as emissões de gases de efeito estufa associadas ao consumo de 1 kWh de energia da matriz elétrica do Brasil no ano de 2019. Os dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2020) mais recentes no período foram utilizados, dividindo as fontes de geração de energia em: 66.67 % hidroelétrica, 9.28 % gás natural, 9.15 % eólica, 8.25 % biomassa (bagaço de cana-de-açúcar), 2.79 % nuclear, 1.62 % carvão, 1.55 % óleo, e 0.69 % solar.

As emissões totais associadas aos sistemas de climatização são constituídas de uma parte fixa, devida aos equipamentos, e uma parte variável, devida ao consumo de eletricidade. As emissões fixas são obtidas contabilizando-se os equipamentos (composição material, transporte, manutenção, descarte) e dividindo-se por sua vida útil. As emissões variáveis são obtidas a partir do consumo anual de eletricidade necessário para o funcionamento do sistema. O valor total das emissões é dado em kg CO₂-eq/ano.

3.4 SISTEMA POR COMPRESSÃO DE VAPOR

Os 168 equipamentos existentes no edifício foram classificados em 14 sistemas sendo considerados os tipos de evaporadores, a saber: cassete, *hi-wall* ou piso teto; e os tipos de condensadores: *split*, *bi-split* ou *tri-split*. A

Tabela 3.1 sistematiza a classificação dos equipamentos.

Devido à impossibilidade de fazer a desmontagem e pesagem de cada componente do sistema de climatização, a massa de cada elemento que compõe os equipamentos de ar-condicionado foi calculada com base no estudo de Guillen-Lambea *et al.* (2020). Para o latão,

sua massa foi obtida por meio da soma dos pesos das tampas das válvulas de serviço de 1/4 e 3/8 multiplicada por dez, pois o restante da válvula é aproximadamente dez vezes o tamanho da tampa.

Tabela 3.1 Classificação do sistema de climatização da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (informações com base em GARCIA, 2018).

Sistema	Tipo do Condensador	Quantidade (E) e tipo do Evaporador	kBTU/h	COP	Peso (kg)	Fator $M_{t,sist}/M_{t,model}$	Quantidade (S) de Sistemas
1	Split	1 hi-wall	9	3,15	30	0,5857	1
2	Split	1 hi-wall	12	3,01	41	0,8005	1
3	Split	1 hi-wall	18	3,01	62	1,2105	1
4	Split	1 piso-teto	24	2,72	89	1,7376	5
5	Split	1 hi-wall	30	3,20	69	1,3471	2
6	Split	1 cassete	36	2,92	88	1,7181	2
7	Split	1 piso-teto	36	2,94	94	1,8352	3
8	Split	1 piso-teto	60	2,81	134	2,6162	1
9	Bi-split	2 piso-teto	48	2,77	154	3,0066	5
10	Bi-split	2 cassete	72	2,92	170	3,3190	2
11	Bi-split	2 cassete	96	2,94	245	4,7833	43
12	Bi-split	2 piso-teto	96	2,92	267	5,2128	1
13	Bi-split	2 piso-teto	120	2,80	267	5,2128	4
14	Tri-split	3 hi-wall	27	3,20	93	1,8059	14
Total		$\Sigma(E*S) = 168$					85

Dividindo a massa total de cada sistema $M_{t,sist}$ (HITACHI, 2009a, p. 46-50; HITACHI, 2009b) pela massa do modelo $M_{t,model}$ (GUILLEN-LAMBEA *et al.*, 2020) obtém-se o fator da

Tabela 3.1. Este fator é a relação necessária para encontrar os valores dos materiais que compõem cada uma das 14 unidades (ver Apêndice I), apenas o multiplicando pela massa dos componentes do modelo, conforme foi feito com o sistema 1 na Tabela 3.2(a), e dessa mesma forma foi feito para todos os demais 13 sistemas (ver Apêndice I).

A Tabela 3.2(b) apresenta ainda a composição dos materiais da instalação do sistema, que corresponde ao PVC dos canos e conexões usados para a drenagem do condensado e ao gás e ao cobre adicionais devido a extensão dos kits frigoríficos entre os evaporadores e os condensadores, obtidos da análise das plantas baixas do edifício. Considerou-se também os isolamentos (polietileno de baixa densidade expandido, 30 kg/m³,

totalizando 116 kg e fita de PVC, 0,047 kg/m, totalizando 104 kg) e o cabo PP (cobre com cobertura de PVC, 3 vias de 2,5 mm², totalizando 177,7 kg de cobre e 234 kg de PVC).

Tabela 3.2 Composição material dos sistemas de climatização existentes no edifício da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. (a) Sistemas. (b) Materiais da instalação.

Modelo $M_{t,model}$		Fator $M_{t,sist}/M_{t,model}$	Sistema 1		Instalação	
MATERIAL	kg		MATERIAL	kg	MATERIAL	kg
Alumínio	4,95	x 0,5857	Alumínio	2,90	Cobre	1500,00
Cobre	9,90		Cobre	5,80	Polietileno baixa ρ	116,00
Eletrônicos	0,55		Eletrônicos	0,32	PVC	1120,00
Polietileno	9,90		Polietileno	5,80	Cabo PP	412,00
Aço baixa liga	16,70		Aço baixa liga	9,78	R-22	78,30
Aço inox	8,35		Aço inox	4,89		
Latão	0,37		Latão	0,22		
R-22	0,50		R-22	0,29		
			Embalagem	1,50		

(a)

(b)

Como a principal função de um sistema de climatização é atender a uma demanda térmica frigorífica, a unidade funcional escolhida foi a capacidade térmica total do sistema, ou seja, 1.735 kW, levando em conta uma vida útil das máquinas de 10 anos. Foi considerada a extração da matéria prima, transportes, manufatura, varejo, operação e descarte (ver Figura 3.3). A opção de descarte selecionada é o aterro municipal, que contempla o transporte até o aterro sanitário da cidade de Natal e as operações do aterro.

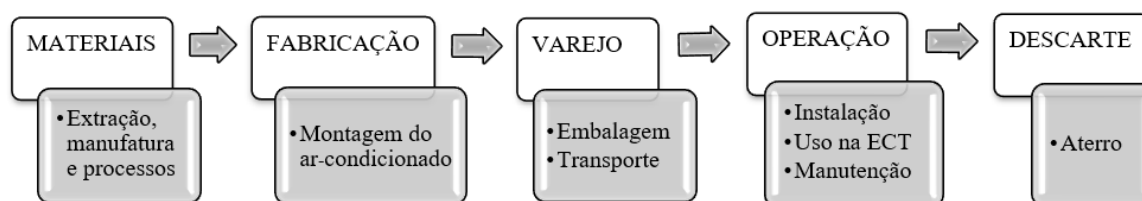


Figura 3.3 Detalhamento da fronteira do sistema de climatização da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Para complementar os cálculos do inventário foram incorporadas algumas suposições sobre o transporte até o local da instalação, a embalagem e a manutenção. Considerou-se que os equipamentos são transportados em grandes caminhões (16-32 t) de São Paulo a Natal (3000 km). Para o transporte entre a loja e a universidade, foi considerada uma distância média de 15 km em caminhões menores (3.5-7.5 t), para as embalagens caixas de papelão com 1,5 kg e para as manutenções semestrais em cada uma das partes interna e externa dos aparelhos, 30 L de água, 40 mL de detergente, WD40, bactericida e energia para ligar uma lavadora de alta pressão. Para a disposição final, considerou-se o aterro sanitário, localizado a 30 km, sendo o transporte realizado em caminhões de 3.5-7.5 t.

O consumo da energia elétrica foi contabilizado conforme os dados do perfil de demanda (Figura 3.2), sendo as porcentagens de cada hora multiplicadas pelo total de carga térmica do sistema. Esses valores foram somados e divididos pela média ponderada do COP das máquinas (2,96), e o valor obtido foi multiplicado por 264 dias (22 dias úteis mensais), alcançando o valor da demanda anual em kWh.

Para o consumo de eletricidade da rede elétrica brasileira (emissões variáveis do sistema), considerou-se 1 kWh consumido a baixa tensão (seção 3.3), contemplando a geração, a transmissão, a distribuição e a transformação, assim como as perdas associadas a cada etapa (CARVALHO e DELGADO, 2017).

3.5 SISTEMA POR ABSORÇÃO SOLAR

Como proposta de substituição do sistema de climatização convencional da ECT foi dimensionado e detalhado um sistema de refrigeração por absorção com apoio de coletores solares. Para o dimensionamento do sistema de climatização por absorção considerou-se a carga térmica projetada de 1.735 kW já empregada para o sistema atualmente instalado nos quatro pavimentos do prédio. Com base nessa carga térmica foram selecionados manuais de fabricantes de cada um dos elementos principais do sistema para sua definição (seção 4.2). A princípio foi elegida uma máquina *chiller* que atendesse a demanda e, em seguida, todos os demais componentes de modo que as características fossem compatíveis com o *chiller* escolhido.

Para o dimensionamento do sistema de coletores solares, utilizou-se a metodologia proposta por Duffie e Beckman (2014). Considerando os dados climatológicos de Natal

(CLIMATE-DATE.ORG, 2020; CRESESB, 2020) e a metodologia descrita por Barbosa e Carvalho (2019) o sistema térmico de energia solar foi dimensionado (seção 4.2).

A partir do dimensionamento do sistema, selecionam-se os equipamentos e obtém-se o inventário de sua composição material. A unidade funcional determinada como a capacidade térmica total do sistema foi de 1.735 kW, considerando as fronteiras do processo em análise do berço ao túmulo. Incluem-se neste patamar a extração da matéria prima, transporte, manufatura, operação, e o descarte. Estimou-se um deslocamento de 3000 km para todos os equipamentos e dispositivos (com origem: São Paulo/SP). Nesta senda, determinou-se a vida útil de 30 anos, bem como a realização de manutenções preventivas semestrais (conforme PMOC local). Porventura, não foram contabilizadas manutenções corretivas nem troca de peças, e por destino natural do equipamento na condição local contabilizou-se o transporte até o aterro sanitário da cidade de Natal como curso final da maquinaria, visto ser essa a opção mais provável.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 REVISÃO SISTEMÁTICA

Seguindo a metodologia descrita no item 3.2, a pesquisa inicial forneceu 73 artigos da Science Direct e 11 da Scopus. Com isso, 10 publicações foram consideradas relevantes para o escopo estabelecido desta pesquisa, cumprindo os critérios de inclusão e exclusão. Os estudos foram publicados entre 2008 e 2019. A seguir apresentam-se os dez artigos identificados, incluindo a descrição do sistema estudado, metodologia e principais resultados.

Gebreslassie *et al.* (2009) estudaram o projeto ideal de um sistema de refrigeração por absorção (SRA), minimizando simultaneamente o custo anual e os impactos ambientais (método matemático multiobjetivo). Os princípios da ACV foram seguidos, explorando o processo do berço ao túmulo. Consideraram onze categorias de impacto do método Eco-indicador 99, sendo os resultados apresentados em *midpoint* e, em seguida convertidos em três categorias *endpoint* (saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos), resultando finalmente em um único indicador. O ciclo de absorção operou com refrigerante água-amônia e foi simulado pelo Sistema de Modelagem de Álgebra Genérica através de balanços de energia e massa. Também foi desenvolvido um problema de programação não-linear com dois critérios, o que resultou em um conjunto de pontos de Pareto. Várias possibilidades de SRA foram disponibilizadas para os tomadores de decisão, desde o dano ambiental mínimo e o custo máximo até o custo mínimo e o dano ambiental máximo. Com esse espectro de possibilidades, os autores sugerem que os tomadores de decisão selecionem o sistema mais sustentável de acordo com sua demanda.

Gebreslassie *et al.* (2010) propuseram um modelo de programação não linear inteira mista para otimizar as condições de projeto e operação dos sistemas de refrigeração por absorção assistidos por energia solar, levando em consideração critérios econômicos e ambientais. O modelo foi aplicado para projetar um sistema de refrigeração por absorção de água-amônia com 100 kW de capacidade de refrigeração, que operava com sete tipos diferentes de coletores solares, considerando dados meteorológicos da Barcelona, Espanha. O estudo seguiu os princípios da ACV e aplicou o indicador Eco-indicador 99 como método. Inicialmente, a demanda de refrigeração foi definida como a unidade funcional e, em seguida, a análise de inventário foi realizada considerando a demanda de matéria-prima e as emissões relacionadas à fabricação e operação do sistema de refrigeração. Como resultado, foi relatado que ao aumentar a quantidade de coletores solares o custo aumenta em 40% e que o projeto mais vantajoso reduz o impacto ambiental em 70,5%. Em relação à avaliação de danos, o impacto ocorreu principalmente devido ao esgotamento dos recursos naturais, seguido por danos à saúde humana e à qualidade do ecossistema.

Gebreslassie, Groll e Garimella (2012) desenvolveram um método matemático para otimizar as condições de projeto e operação de um resfriador por absorção de água e brometo de lítio de simples efeito. Um modelo não linear de dois critérios foi aplicado para minimizar a área do resfriador e o impacto ambiental. Sendo esse último analisado segundo a metodologia da ACV. Os parâmetros do sistema incluem a geração de calor e a eletricidade consumida pelo resfriador, o impacto ambiental da fase de fabricação não foi considerado. A capacidade de refrigeração do *chiller* foi definida como a unidade funcional. Os resultados da avaliação do impacto ambiental foram baseados em *midpoint* e *endpoint*, aplicando a metodologia do potencial de aquecimento global e as categorias de impacto do Eco-indicador 99, respectivamente. Como resultado, o estudo mostra que o aumento da temperatura no gerador melhora o desempenho ambiental e reduz a área do resfriador. Além disso, foi fornecido um conjunto de opções de projetos de ciclos de refrigeração por absorção, permitindo a escolha do projeto mais adequado de acordo com a aplicação.

Gebreslassie *et al.* (2012) também formularam um modelo de otimização para ciclos de absorção movidos a energia solar, objetivando fornecer refrigeração a um custo mínimo com o menor impacto ambiental possível. Utilizando os princípios da ACV foi feito o estudo dos impactos ambientais. O objeto em análise era um sistema de refrigeração por absorção de simples efeito movido a água e amônia, com 100 kW fornecidos por gás natural ou energia solar, operando sobre as condições climáticas da Barcelona. Além disso, foi avaliada a

influência das emissões dos gases de efeito estufa no desempenho econômico e ambiental do sistema. Os parâmetros do estudo foram representados pela energia consumida no resfriador, assim como pelos impactos da fabricação. A unidade funcional foi a quantidade de demanda de refrigeração atendida. O potencial de aquecimento global foi empregado como uma métrica para quantificar os danos ambientais, seguindo a estrutura do Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2007, com um horizonte de tempo de 100 anos. Os autores demonstraram que, embora o uso da energia solar reduza significativamente o potencial de aquecimento global se comparado ao uso do gás natural, essa redução não é relevante quando a tarifa de gás natural é menor que 0,065 €/kWh, principalmente porque não há compensação de custos de combustível devido a aquisição de coletores solares adicionais.

Koroneos e Tsarouhis (2012) realizaram análises exergéticas e avaliações de ciclo de vida em sistemas solares para aquecimento de espaços internos, climatização e produção de água aquecida. Para a climatização, foi empregado um *chiller* por absorção, auxiliado por um trocador de calor solar com uma resistência elétrica como sistema de reserva, caso o calor da fonte principal não fosse suficiente. Uma vida útil de 20 anos foi considerada para os cálculos, e as emissões foram quantificadas em termos de kg/kWh (unidade funcional). Em relação às emissões associadas à fabricação do sistema, foram coletados dados de ambos os *softwares*, SimaPro e Gabi. O estudo apresentou um impacto ambiental significativo associado a equipamentos, como as tubulações, os ventiloconvectores e a torre de resfriamento. Observou-se que a fase de fabricação era a mais danosa para o meio ambiente.

Beccali *et al.* (2012) investigaram os desempenhos energético e ambiental de uma usina de aquecimento e resfriamento solar usando a metodologia ACV e compararam os resultados com os de usinas convencionais. O sistema incluía um *chiller* por absorção alimentado por uma usina solar com duas configurações diferentes para fornecer aquecimento ou refrigeração. Três unidades funcionais foram definidas para a ACV: uma planta de refrigeração por aquecimento solar com o *chiller* por absorção, kW de energia para o *chiller*, e kWh de refrigeração e aquecimento produzidos. Os limites do sistema abrangeram a produção até a fase de fim de vida útil, e os dados sobre o *chiller* por absorção e a torre de resfriamento foram fornecidos pelo fabricante. Os dados sobre os componentes restantes foram coletados no banco de dados Ecoinvent. Três indicadores *midpoint* foram selecionados para relatar o desempenho energético e ambiental do sistema: exigência de energia global (GER), energia não renovável e potencial de aquecimento global (GWP). As análises

mostraram que a fase de uso é responsável pela maior parte da GER e do GWP, seguida pela fase de produção. Neste último, a fabricação de coletores solares e do *chiller* por absorção foram os principais contribuintes para os indicadores. Como conclusão, os autores relataram que a planta proposta teve um impacto ambiental menor do que o convencional e que a ACV deveria fornecer mais detalhes sobre a fase de uso.

Brunet *et al.* (2012) propuseram um novo projeto para um sistema de refrigeração por absorção (SRA) para aplicações de refrigeração e climatização, com o objetivo de minimizar simultaneamente o custo anual total e o impacto ambiental. O sistema de simples efeito operava em dois níveis de pressão, usando amônia-água para configurações de climatização (10°C a -5°C) e etileno glicol para configurações de refrigeração (-5°C a -10°C). Um programa não-linear foi empregado para solucionar o problema de múltiplos objetivos, otimizando as variáveis de custo e ambientais, nas quais algoritmos personalizados e modelos de programação estratégica foram utilizados. O design ideal do SRA foi simulado pelo *software* Aspen Plus, com suporte no MheatX e Matlab, levando a características específicas: coluna de retificação modelada no formato de bandejas, tamanho do equipamento e condições de operação. O método de avaliação de impacto ambiental Eco-Indicator 99 foi aplicado na ACV e a unidade funcional era a capacidade de refrigeração de 90 kW. O inventário consiste essencialmente nos três elementos seguintes, que eram fontes de impacto ambiental: gás natural, eletricidade e aço inoxidável. A análise das curvas de Pareto obtidas mostrou que existe uma configuração do sistema que leva a uma situação ambiental relativamente favorável, com apenas um ligeiro aumento no custo.

Hang *et al.* (2014) realizaram uma ACV de um sistema de refrigeração solar localizado em uma instalação de teste na Universidade da Califórnia. O sistema incluía concentradores solares parabólicos externos de 54 m², um *chiller* por absorção de água-brometo de lítio com capacidade de 23 kW de duplo efeito, um tanque de armazenamento frio e dispositivos auxiliares. Em relação à metodologia de ACV, os limites do sistema incluíam todas as etapas do ciclo de vida do equipamento e a unidade funcional era a quantidade de energia de refrigeração consumida. Os dados de inventário dos componentes, incluindo coletores solares e resfriador por absorção, foram coletados dos fabricantes devido à escassez de dados na literatura científica e nas bases de dados. Os autores selecionaram o IPCC 2007 GWP 100a como a metodologia para avaliação de impacto. A análise mostrou uma diminuição de 35-70% na pegada de carbono em comparação com os sistemas de

refrigeração convencionais. Os resultados ambientais foram muito sensíveis a parâmetros como a taxa de conversão de eletricidade em dióxido de carbono.

Bukoski *et al.* (2014) compararam o impacto ambiental de dois sistemas de refrigeração aplicados em um estádio em Bangkok, na Tailândia, que exigiam uma capacidade de refrigeração durante a semana de 9.575 TR/h. O sistema referido como "Configuração 1" tinha quatro *chillers* a compressão de vapor (CV) de 500 TR que usavam a rede elétrica da Tailândia. A "Configuração 2" foi proposta como um resfriador por absorção de simples e duplo efeitos com 159 TR, assistido por energia solar, e mais dois sistemas de CV, com potência de 500 TR cada, como apoio para os momentos em que a demanda superasse a capacidade de geração instantânea. A ACV foi utilizada para analisar as consequências ambientais desses sistemas, considerando quatro categorias de impacto em potencial: aquecimento global de 100 anos, acidificação, eutrofização e esgotamento de recursos abióticos. CML 2 (2000) foi o método de avaliação de impacto ambiental selecionado e a unidade funcional foi a capacidade do estádio ao longo de 30 anos. Embora a "Configuração 2" tenha apresentado altos impactos associados à fase de não uso, ela teve um impacto geral melhor, pois a eletricidade fornecida à "Configuração 1" foi baseada em combustível fóssil.

Solano-Olivares *et al.* (2019) realizaram uma avaliação ambiental de um protótipo de um Sistema de Ar-Condicionado por Absorção Solar (SACAS), localizado na Universidade Autônoma do Estado de Morelos, no México, ao norte da cidade de Cuernavaca. O sistema consistia em três partes principais: ciclo de absorção do ar-condicionado, coletores parabólicos (que aquecem o fluido de trabalho, NaOH) e um sistema de placas fotovoltaicas (para consumo elétrico). Outra tecnologia foi estudada para fins de comparação, um Sistema Comercial de Ar-Condicionado (SCAC), operando através da rede elétrica local. O SCAC é do tipo janela, trabalhando com refrigerante R134a em um ciclo de refrigeração por compressão de vapor e vida útil estimada de 10 anos. A unidade funcional é a produção de 114.400 kW. A análise ambiental foi realizada seguindo a metodologia da ACV, utilizando o *software* SimaPro, banco de dados IER-UNAM, método TRACI, e as categorias de impacto foram: potencial de depleção de ozônio, potencial de aquecimento global (GWP), potencial de poluição atmosférica, potencial de acidificação, potencial de eutrofização, potencial carcinogênico, potencial não carcinogênico, potencial de efeito respiratório, potencial de ecotoxicidade (EP) e potencial de depleção de combustível fóssil (FFDP). O estudo mostrou que o SACAS obteve melhores resultados em todas as categorias

de impacto, gerando uma mitigação significativa dos impactos ambientais. As categorias com os maiores valores de impacto (EP, GWP, FFDP) foram posteriormente analisadas, resultando em sugestões de melhorias, como a busca de novos materiais para a construção dos tubos do SACAS.

A Tabela 4.1 resume as principais características dos sistemas estudados, na qual os objetivos são categorizados em quatro possibilidades: (i) Propor projetos ideais com objetivos simultâneos; (ii) Avaliar ambientalmente fontes renováveis; (iii) Comparar os impactos ambientais de sistemas; (iv) Analisar os impactos ambientais dos componentes. Existem, portanto, três tipos principais de limites: do berço ao berço, do berço ao portão e do berço ao túmulo. Na Tabela 4.1, a sigla UF refere-se à Unidade Funcional.

Tabela 4.1 Resumo das principais características dos estudos do estado da arte.

Loc. /Ref.	Objetivo	Sistema(S)	Software/Método/ Base de dados/Impacto ¹	Inventário/ Fronteiras/UF
Espanha / Brunet et al. (2012)	Dimensionamento de um novo sistema minimizando o custo total anual e os impactos ambientais simultaneamente (i)	Sistema de refrigeração por absorção para climatização e refrigeração	# Programa multiobjetivo, software não especificado # Eco-indicador 99 (EI-99) # 10 categorias de impacto do método EI-99	# Simulador de processos e base de dados # Parâmetros épsilon auxiliar # Capacidade de refrigeração: 90 kW
Espanha / Gebreslassie et al. (2008)	Opções para o dimensionamento de um sistema minimizando o custo anual total e os impactos ambientais simultaneamente (i)	Ciclo de absorção amônia-água	# Programa multiobjetivo, software não especificado # Método EI-99 # Base de dados Ecoinvent # Categorias <i>endpoint</i>	# Simulador de processos e base de dados # Berço ao túmulo # Refrigeração produzida pelo sistema durante a vida útil
Espanha / Gebreslassie et al. (2012)	Modelo de otimização para ciclos de absorção alimentados por energia solar (i)	Chiller por absorção de efeito simples de 100 kW utilizando amônia-água	# Software não especificado # IPCC 2007 # Base de dados Ecoinvent # GWP	# Base de dados Ecoinvent # Berço ao portão # Demanda por refrigeração atendida

Espanha / Gebreslassie et al. (2010)	Indicador ambiental adequado para ser otimizado juntamente com critério econômico (i)	Sistema de refrigeração por absorção de 100 kW alimentado por energia solar	# Software não especificado # Método EI-99 # Base de dados Ecoinvent # Métrica: EI-99	# Base de dados Ecoinvent # Berço ao túbulo # Demanda por refrigeração atendida
EUA / Gebreslassie, Groll e Garimella (2012)	Método para otimizar o projeto e as condições de operação de ciclos de refrigeração por absorção (i)	Chiller por absorção de efeito simples utilizando brometo de lítio-água	# Software não especificado # Método EI-99 # Base de dados Ecoinvent # Abordagens <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i>	# Base de dados Ecoinvent # Fase operacional # Capacidade de refrigeração do chiller
EUA / Hang et al. (2014)	Análise ambiental do sistema (ii)	Chiller por absorção de duplo efeito utilizando brometo de lítio-água	# Software não especificado # Método geral da ACV # Dados experimentais # GWP	# Dados diretos # Berço ao túbulo # Consumo de refrigeração
Itália / Beccali et al. (2012)	Avaliação do uso de recursos e outras cargas ambientais relacionadas ao ciclo de vida de uma planta de refrigeração solar (ii)	Chiller por absorção utilizando água-amônia	# SimaPro # Método geral da ACV # Base de dados Ecoinvent # GER, NRE, GWP	# Base de dados Ecoinvent # Berço ao túbulo # Potência do chiller e a energia (kWh) produzida pela planta (refrigeração e calor)
Tailândia / Bukoshi et al. (2013)	Análise comparativa entre os impactos ambientais gerados por dois tipos de sistemas de refrigeração (iii)	Sistema de refrigeração por absorção alimentado por energia solar; e por compressão de vapor	# Software não especificado # Método CML 2 (2000) # Base de dados Ecoinvent # GWP, AP, ETP, ARDP	#Dados indiretos ² #Berço ao túbulo # 9.575 TR-h por semana, durante 30 anos
México / Olivares et al. (2019)	Análise ambiental de dois sistemas de refrigeração: convencional e baseado em energia renovável (iii)	Sistema de ar-condicionado por absorção alimentado por energia solar; e	# Software SimaPro # Método TRACI # Base de dados IER-UNAM	# Dados indiretos ² e diretos # Berço ao túbulo # Refrigeração produzida pelos

		por compressão de vapor	# ODP, GWP, SP, AP, ETP, CP, NCP, REP, EP, FFDP	sistemas durante a vida útil
Grécia / Koroneos e Tsarouhis (2012)	Análise da contribuição de cada componente do sistema aos impactos ambientais (iv)	Chiller por absorção Yazaki	# Software e base de dados: SimaPro e Gabi # Método geral # Impacto não especificado	#SimaPro e Gabi #Berço ao portão #Emissões por kWh

¹Categorias de impacto (CI): potencial de depleção da camada de ozônio (ODP), potencial de aquecimento global (GWP), potencial de poluição (SP), potencial de acidificação (AP), potencial de eutrofização (ETP), potencial de depleção de recursos abióticos (ARDP), potencial carcinogênico (CP), potencial não carcinogênico (NCP), potencial de efeito respiratório (REP), potencial de ecotoxicidade (EP), potencial de depleção de combustível fóssil (FFDP), exigência global de energia (GER), energia não renovável (NRE). Todos esses são indicadores de potencial de impacto, i.e., *midpoint*.

² Dados indiretos são provenientes de documentos, base de dados, literatura técnica, artigos; dados direto foram coletados empiricamente.

Em relação aos limites utilizados, seis estudos trabalharam com o *berço ao túmulo*, e os demais estudos empregaram *berço ao portão*. SimaPro, Ecoinvent e Eco-indicador 99 foram o *software*, banco de dados, e método mais utilizados, respectivamente. Os países onde os estudos foram desenvolvidos apresentam diferenças nos seguintes aspectos: matriz de rede elétrica, processos de reciclagem, descartes de resíduos, entre outras peculiaridades. Isso leva a diferentes resultados nos impactos ambientais para sistemas idênticos localizados em locais distintos. Dos dez estudos que fizeram parte da análise final, a Espanha foi responsável por quatro artigos, os EUA por dois e a Tailândia, México, Itália e Grécia fizeram uma contribuição cada.

Do ponto de vista da ACV, segundo Carvalho e Delgado (2017), os aspectos mais críticos que influenciam a coerência e a transparência dos resultados são: i) definição da unidade funcional; ii) o método de avaliação de impacto ambiental e iii) o método de alocação de impacto. Há uma variação considerável nos resultados das emissões de GEE entre os estudos devido à falta de padronização, mesmo quando se usa a mesma metodologia para modelar cada inventário. Como mencionado por European Commission (2019) e Kalverkamp e Karbe (2019), o uso de dados inconsistentes pode levar a um estudo de ACV não confiável e distorcido, e o uso de conjuntos de dados com diferentes níveis de completude também pode levar a conclusões não confiáveis. A confiabilidade das ACVs depende de dados completos e nítidos que, infelizmente, nem sempre estão disponíveis.

Como limitações desta revisão, pode-se citar a grande variedade das informações contidas nos estudos, e devido à ausência de padronização dos objetos de estudo e dos métodos de avaliação de impactos, uma comparação detalhada não foi possível. Além das diferenças no teor das análises desenvolvidas nos estudos revisados, existe uma grande diferença na forma como os resultados são apresentados, inviabilizando também este tipo de comparação.

4.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA POR ABSORÇÃO SOLAR E INVENTÁRIO

O sistema proposto inclui três máquinas de refrigeração por absorção com potência frigorífica de 615 kW da marca Thermax, modelo 5G 3A C (THERMAX, 2017). De modo que a configuração desse sistema de climatização ficou composta por três arranjos iguais ao esquematizado na Figura 4.1.

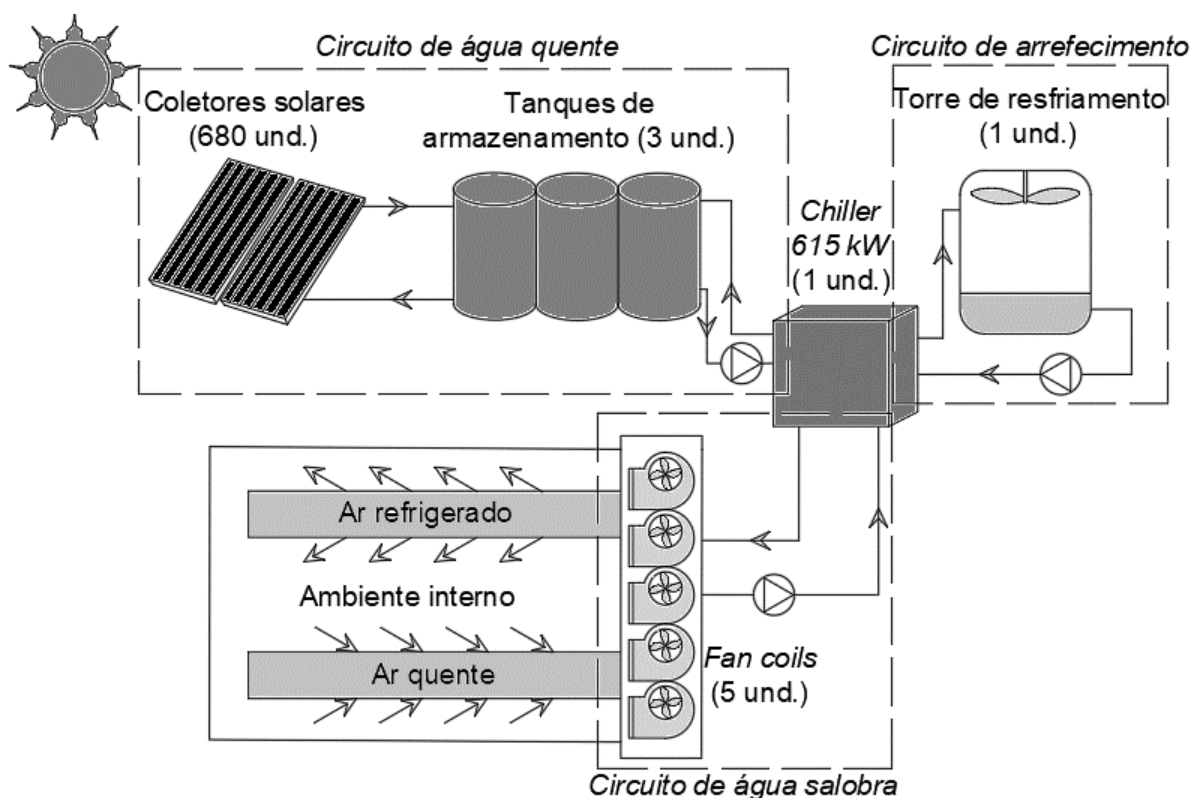


Figura 4.1 Esquema de um arranjo do sistema de climatização por absorção solar

O sistema térmico de energia solar que compõe o circuito de água quente contém 2040 Coletores S-81 Solar Tech (SOLARTECH, 2016a) e 9 tanques de armazenamento de 400 m³ da Eurotank (EUROTANK WORKS, 2020, SOLARTECH, 2016b, KLUPPEL, 2016). Assim, foi atendida a demanda das máquinas *chillers* quanto ao abastecimento de água quente com saída mínima à 90°C, retorno à 85°C e vazão de 132,89 m³/h (ver Apêndice II).

Para o circuito de água arrefecida utilizou-se a torre de resfriamento de modelo TRA 100 da marca Caravela (CARAVELA, 2020), que tem como temperaturas de entrada 36,6°C e de saída 30°C, compatíveis com as máquinas de absorção. As tubulações hidráulicas desse circuito são de PVC e aço galvanizado com cerca de 25 m cada e sem isolamento. Para os circuitos de água salobra e água quente, considerou-se 145 m de tubulação hidráulica de aço galvanizado, com isolamento de lã de vidro revestido de fina película de alumínio.

O circuito de água salobra comporta quinze *fan-coils* da marca Premium Ar-Condicionado e modelo ICP 40 TR (PREMIUM, 2020), cuja temperatura de sucção é 7°C e a de recalque 12°C. Os dutos de ar são de aço galvanizado, com isolamento de lã de vidro revestido com fina película de alumínio. Os dutos de retorno não possuem isolamento.

Cada um dos circuitos possui dois conjuntos de bomba-motor, um ativo e outro reserva, escolhidos com base nos diâmetros de sucção e recalque, potência e altura manométrica. Há quatro bombas Th 150/200 para os circuitos de água salobra e água quente, com um motor trifásico IP55 15CV 132M para cada bomba. Para o circuito de água arrefecida há duas bombas Th 200/315, com motores trifásicos IP55 20CV 160M. Portanto, cada arranjo possui três motores ativos, totalizando 36 kW por arranjo (potência total 108 kW, referente a três arranjos).

Para o restante do sistema foram considerados vários elementos, tais como: válvulas, filtros e instrumentos de medida. As quantidades e características de todos esses elementos estão nas tabelas do Apêndice II.

Nas Tabela 4.2 e Tabela 4.3 constam a descrição dos principais materiais que compõem cada coletor solar e cada reservatório térmico, respectivamente, utilizados no sistema proposto.

Tabela 4.2 Principais materiais que compõem um coletor solar plano S-81 da Solar Tech (2016a).

COMPONENTE	MATERIAL	QUANTIDADE
Cobertura de vidro	Vidro (m ³)	5,16x10 ⁻³
Placa Absorvedora	Alumínio + Tinta absorvedora (kg)	3,85
Caixa de Contenção	Alumínio Extrudado (kg)	3,60
Arranjo de Tubos	Cobre Puro (kg)	2,18
Vedação	Silicone (kg)	0,10
Solda	Foscooper (kg)	0,02
Isolante Térmico	Lã de Rocha (kg)	1,10

Tabela 4.3 Principais materiais que compõem um reservatório de 400 m³ (adaptado de AWWA, 2013 e Eurotank works, 2020).

COMPONENTE	MATERIAL	Kg
Isolante Térmico	Poliestireno Expandido	911,61
Revestimento Externo e pés	Chapa de Alumínio	1.200
Revestimento Interno	Aço Inox 304	16.800
Conexões	Aço Inox 304	148

Para as máquinas de refrigeração por absorção, a metodologia descrita por Carvalho, Delgado e Chacartegui (2016) foi seguida, com base nos dados do fabricante para o modelo 5G 3A C de 175 TR e a composição de seu material está listada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Principais materiais que compõem uma máquina de refrigeração por absorção de duplo efeito (modelo 5G 3A C, THERMAX, 2017)

MATERIAL	kg
Aço inox	1460
Aço baixa liga	1460
Alumínio	2560
Cobre	2930
PVC	244
Glicol	915
Eletrônicos	59
Lã de rocha	427
Isolamento	427

Para a instalação do sistema, foram contabilizados os materiais de válvulas, filtros, instrumentos de medida, bombas, motores, tubulações hidráulicas, isolamentos, torres de refrigeração, *fan-coils* e dutos. A Tabela 4.5 mostra os materiais que constituem a instalação do sistema.

Tabela 4.5 Principais materiais que compõem a instalação do sistema de climatização por absorção

MATERIAL	QUANTIDADE (kg)
Ferro fundido	10.027,98
Aço Inox	2.988,30
Aço	84.053,06
Poliéster	7.872,00
Poliestireno	60,00
Polipropileno	185,52
PVC	1.519,92
Poliamida (nylon)	12,00
Fibra de vidro	240,00
Alumínio	2.604,32
Borracha sintética	72,00
Cobre	3.576,00
Latão	120,00
Lã de vidro	7.584,77

O cálculo das emissões variáveis e o consumo de eletricidade do sistema de climatização por absorção seguiram a mesma metodologia do sistema convencional. Sendo assim, o consumo elétrico foi associado aos três motores de cada arranjo, um de cada circuito, que totalizam uma potência de 108 kW com rendimento de 0,91. O gráfico da Figura 4.2 apresenta o acionamento dos *chillers* possibilitando a conferência da real necessidade das 3 máquinas.

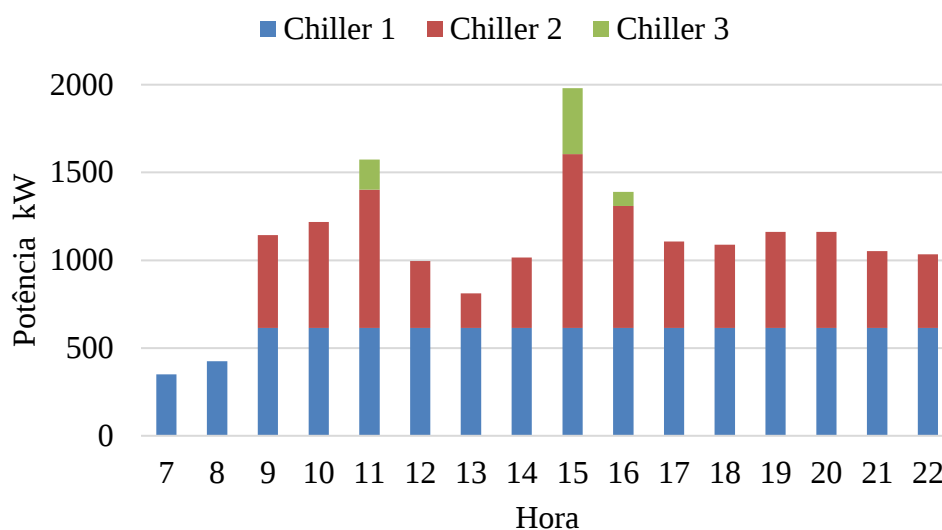


Figura 4.2 Acionamento dos *chillers* do sistema de climatização por absorção.

4.3 ACV DO SISTEMA POR COMPRESSÃO DE VAPOR

O ponto de partida para todas as análises foi a

Tabela 3.1, na qual foi organizado, dividido e classificado todo o sistema de climatização convencional do edifício em estudo. Inserindo todos os dados sobre a composição do material do sistema de climatização por compressão de vapor no SimaPro (SIMAPRO, 2019), e selecionando o método de avaliação de impacto ambiental IPCC 2013 GWP 100a (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2013), obteve-se os resultados da Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Emissões fixas totais dos sistemas de climatização da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Sistema	Capacidade de Refrigeração (kW)	Peso (kg)	Unid.	Tipo do Condensador	Quantidade e tipo do Evaporador	Emissões de gases de efeito estufa (kg CO ₂ -eq)
Sistema 1	2,64	30	x 1	Split	1 hi-wall	894,56
Sistema 2	3,51	41	x 1	Split	1 hi-wall	1086,22
Sistema 3	5,03	62	x 1	Split	1 hi-wall	1465,59
Sistema 4	7,03	89	x 5	Split	1 piso-teto	9765,32
Sistema 5	8,78	69	x 2	Split	1 hi-wall	3183,51
Sistema 6	10,54	88	x 2	Split	1 cassete	4008,05
Sistema 7	10,54	94	x 3	Split	1 piso-teto	6325,43

Sistema 8	17,57	134	x 1	Split	1 piso-teto	2855,03
Sistema 9	14,06	154	x 5	Bi-split	2 piso-teto	15.885,67
Sistema 10	21,08	170	x 2	Bi-split	2 cassete	7107,21
Sistema 11	28,11	245	x 43	Bi-split	2 cassete	211.128,76
Sistema 12	28,11	267	x 1	Bi-split	2 piso-teto	5293,47
Sistema 13	35,14	267	x 4	Bi-split	2 piso-teto	21.384,01
Sistema 14	7,91	93	x 14	Tri-split	3 hi-wall	28.223,24
Instalação						25.310,47
Total						343.916,53

Como observado, o sistema 11 contribui com a maior emissão, pois possui o maior conjunto, com 43 unidades. Quando analisando as contribuições de cada sistema e relacionando com as respectivas potências, averigua-se que quanto maior a capacidade térmica do aparelho, maior é a quantidade de material e, conseqüentemente maior impacto ambiental gerado. Os sistemas 4 e 10 são uma exceção, assim como os sistemas 13 e 14. Analisando a primeira situação, observa-se que a causa é a quantidade de massa do conjunto de cada configuração, já que um evaporador piso-teto, mesmo de menor potência, como é o caso, tem mais massa que um cassete, enquanto o condensador bi-split (um condensador para dois evaporadores) tem menos massa do que dois condensadores split do sistema 4 (HITACHI, 2009b).

Por outro lado, apesar das máquinas bi-split e tri-split (um condensador para três evaporadores) ocuparem menos espaço, elas são mais pesadas que as split de mesma potência e, portanto, geram mais impactos para uma mesma capacidade térmica. Dessa forma, conclui-se que esses resultados também podem ser úteis para comparações individuais com o conjunto correspondente a cada sistema da Tabela 4.6.

A Figura 4.3 mostra a divisão em porcentagem do impacto fixo associado aos sistemas de climatização do edifício. A contribuição relativa à instalação, de 7,4 % das emissões do sistema como um todo, é muito significativa e decorre da grande extensão dos kits frigoríficos, cuja soma estimada é de 2.237 m. Uma das incertezas dos resultados gira em torno dessa estimativa, visto que não há como precisar o caminho exato percorrido pela tubulação, o que contribui também no valor do gás R-22 que necessita ser adicionado devido a extensão da linha. Além disso, foi empregado nos cálculos um valor médio para o diâmetro dos tubos de cobre e para a seção transversal do cabo PP.

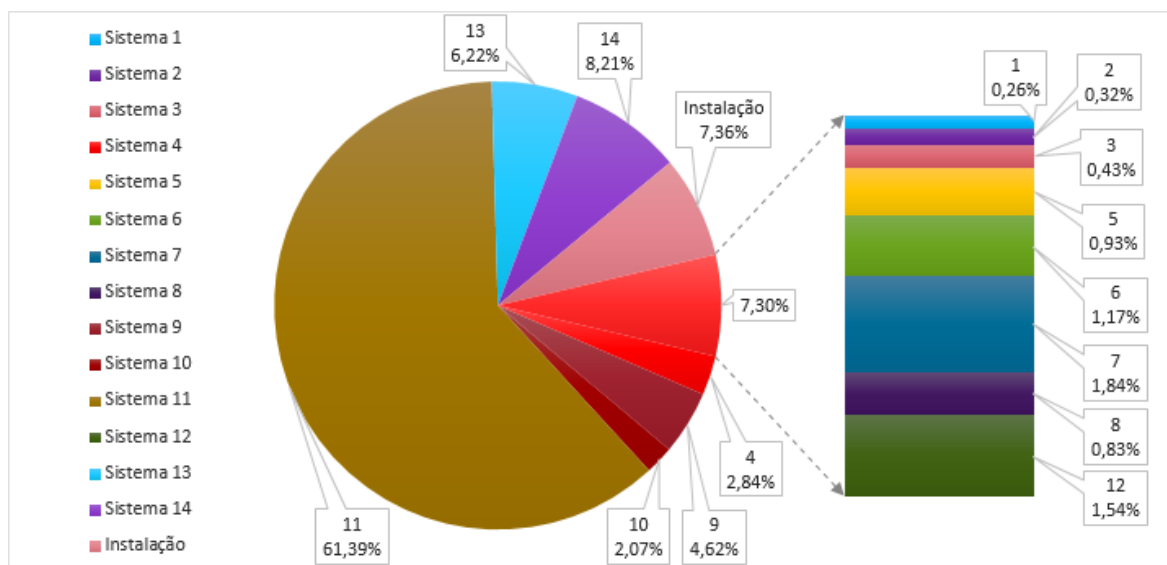


Figura 4.3 Composição das emissões associadas ao sistema de climatização da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Na Tabela 4.7 as emissões fixas foram desagregadas em subsistemas, que são mostrados graficamente na Figura 4.4. A Tabela 4.7 revela a grande contribuição dos materiais, 81,7 %, sendo o cobre e os eletrônicos os principais colaboradores, com 10,6 % e 53 %, respectivamente. Esse dano pode ser mitigado por meio da reciclagem ou reutilização de materiais, o que já reduziria também os danos relacionados ao descarte (barras pretas no gráfico da Figura 4.4). Na Figura 4.4, os materiais são representados pela barra azul do gráfico.

Tabela 4.7 Emissões fixas de GEE associadas aos subsistemas de climatização da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Identificação do Sistema	Material (kg CO ₂ -eq)	R-22 (kg CO ₂ -eq)	Transporte (kg CO ₂ -eq)	Manutenção (kg CO ₂ -eq)	Descarte (kg CO ₂ -eq)
Sistema 1	657,21	140,33	32,66	16,17	48,19
Sistema 2	825,53	147,37	38,64	16,17	58,51
Sistema 3	1160,29	160,85	50,06	16,17	78,23
Sistema 4	7952,02	890,96	323,67	80,83	517,85
Sistema 5	2543,16	330,69	107,73	32,33	169,59

Sistema 6	3148,17	491,90	128,43	32,33	207,22
Sistema 7	5009,10	737,86	202,43	48,50	327,55
Sistema 8	2306,58	298,53	89,16	16,17	144,59
Sistema 9	13.127,62	1361,21	500,14	80,83	815,87
Sistema 10	5759,70	741,65	217,44	32,33	356,08
Sistema 11	175.146,86	18.206,41	6427,25	695,12	10.653,12
Sistema 12	4424,27	423,40	161,42	16,17	268,20
Sistema 13	17.696,91	1903,93	645,70	64,66	1072,80
Sistema 14	23.042,08	2525,96	932,91	226,32	1495,97
Instalação	18.093,69	5145,80	52,81	0	2018,16
Total	280.893,19	33.506,87	9.910,46	1.374,08	18.231,94

Em terceiro lugar, o que mais contribui com o aquecimento global é o refrigerante R-22 (barra laranja da Figura 4.4), cujo prejuízo é de 9,7 %. Outros fluidos refrigerantes com menor potencial de agressão ao meio ambiente já estão em estudo e até chegaram no mercado, tendo como exemplo o R410a. Soma-se a isso, a possibilidade do uso de um outro sistema menos danoso, como por exemplo, um por absorção e movido a energia solar, que é a sugestão para a substituição do sistema de climatização atual.

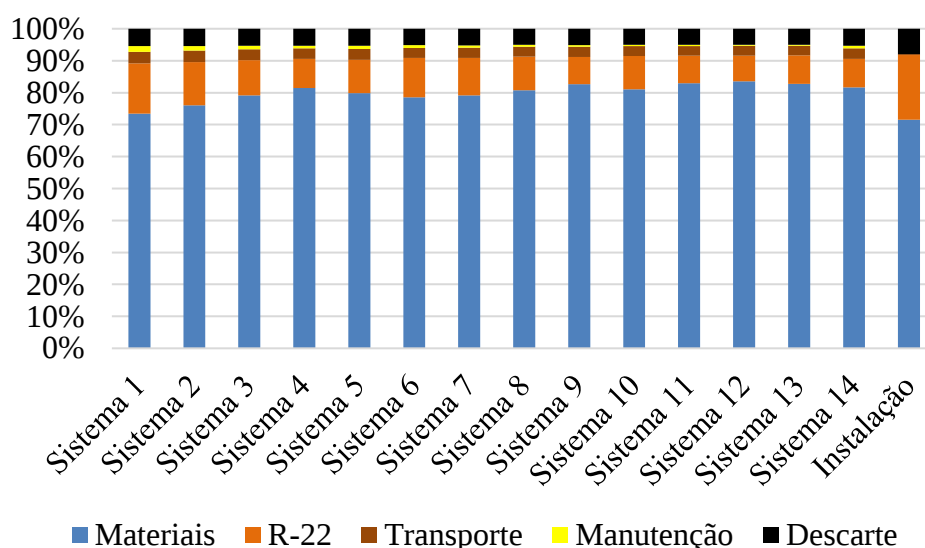


Figura 4.4 Composição das emissões associadas aos subsistemas de climatização da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Em relação à matriz energética nacional, seguindo Carvalho e Delgado (2017), as emissões de GEE associadas ao consumo de energia elétrica da rede elétrica nacional no ano de 2019 foram de 0,227 kg CO₂-eq/kWh. Considerando o perfil de demanda mostrado na Figura 3.2 e os coeficientes de performance das máquinas, obtém-se um consumo anual de 1.415.506,85 kWh. Este valor corresponde a 321.320 kg CO₂-eq/ano.

O montante de emissões fixas associadas ao sistema de climatização (equipamentos, transporte, manutenção e descarte) foi de 343.916,53 kg CO₂-eq (Tabela 4.6), que dividido por sua vida útil de 10 anos, resulta em 34.392 kg CO₂-eq/ano. Portanto, as emissões totais associadas ao sistema são de 34.392 kg CO₂-eq/ano (fixas) mais 321.320 kg CO₂-eq/ano (variáveis), totalizando 355.712 kg CO₂-eq/ano.

Considerando a potência total do sistema aqui estudado, obtém-se o valor de 2050 kg CO₂-eq/kW instalado. Outras pesquisas já aplicaram a ACV a sistemas de climatização (MONFARED *et al.*, 2014, BUKOSKI *et al.*, 2014, SOLANO-OLIVARES *et al.*, 2019), porém as circunstâncias são tão diversas que dificultam a comparação de estudos. Conforme mencionado por Carvalho e Delgado (2017), os aspectos mais críticos que afetam a coerência e transparência de resultados dos estudos de ACV são a definição de unidade funcional (fronteiras do objeto de estudo), o método de ACV aplicado, e como a alocação de impactos é feita. Uma grande faixa de valores pode ser obtida, devido à falta de normatização quando aplicada a mesma metodologia para modelar cada inventário, como as divergências conceituais apontadas por Medeiros *et al.* (2013).

4.4 ACV DO SISTEMA POR ABSORÇÃO SOLAR

A Tabela 4.8 mostra o resultado da quantificação de emissões de GEE para o sistema de climatização por absorção proposto para a Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. A partir da demanda diária (Figura 3.2), o consumo elétrico diário foi estimado em 1.125 kWh. Considerando 264 dias de operação, a demanda anual é de 296.916,71 kWh.

Tabela 4.8 Emissões de gases de efeito estufa associadas ao sistema de climatização por absorção proposto para a Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

		EMISSÕES (kg CO ₂ -eq)				
ITEM	QUANT.	MATERIAIS	TRANSPORTE	MANUT.	DESCARTE	
Coletor	2040	279.705,55	33.599,13	1.314,35	30.318,61	
Tanque	9	603.367,55	115.784,89		107.006,84	
Chiller	3	235.116,16	18.484,96		17.083,55	TOTAL
Instalação	1	314.655,63	83.852,80		75.665,65	1.915.955,67
		Emissões fixas (kg CO ₂ -eq/ano)				63.865,19
		Emissões variáveis (kg CO ₂ -eq/ano)				67.400,77
		Emissões totais (kg CO ₂ -eq/ano)				131.265,96

Na Figura 4.5, destaca-se a cota de 21 % das emissões totais associada aos tanques, visto que se trata de 9 unidades desse equipamento (ver Tabela 4.8) formadas por 85,5 % (em massa) de metais. A quantidade de massa contida na instalação fica aquém apenas daquela dos tanques e correspondem, por sua vez, a quase 12 % das emissões totais.

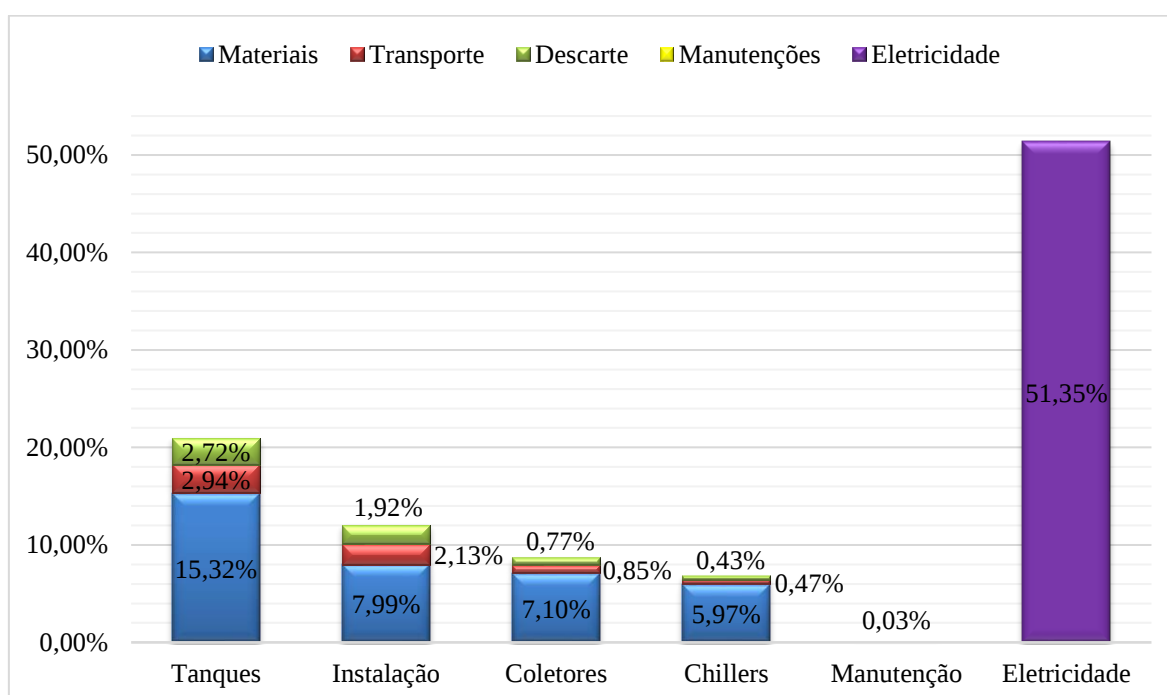


Figura 4.5 Gráfico da contribuição em percentual das emissões de poluentes das partes do sistema de climatização por absorção proposto para a Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Apesar de os *chillers* integrarem mais peso ao sistema que os coletores, estes últimos geram mais emissões. Uma explicação é o fato de os coletores serem compostos por seis

vezes mais alumínio que os *chillers*, elemento de maior impacto ambiental em ambos os equipamentos. Além disso, os coletores contribuem com quase o dobro de emissões referentes ao transporte e ao descarte quando comparados com os *chillers*.

O valor obtido para as manutenções preventivas foi de 1.314,35 kg CO₂-eq (valor bem semelhante ao do sistema de compressão a vapor na seção anterior). Esse resultado corresponde a apenas 0,03 % das emissões totais. Na prática, pode ser necessária a realização de manutenções corretivas não planejadas, além da necessidade de peças de reposição. Conjuntamente, os dois fatores elevariam o montante de emissões nessa categoria.

As emissões totais obtidas para o sistema foram de 3.937.978,80 kg CO₂-eq (ao longo de 30 anos), ou 131.265,96 kg CO₂-eq/ano, que equivale a 2.270 kg CO₂-eq/kW. As emissões variáveis são praticamente equivalentes às emissões fixas. Depois da eletricidade a principal contribuição nas emissões são dos “Materiais”, referente à aquisição de matérias-primas e processos de fabricação, que contribui com 36,39 %, em seguida o transporte (6,39 %), o descarte (5,84 %), e por fim a manutenção (0,03 %).

A substituição do conjunto compressor pela tecnologia de absorção solar foi capaz de poupar um montante quase 4 vezes menor de kWh necessário anualmente. Nos estudos de Beccali *et al.* (2016) e Longo *et al.* (2020), as parcelas de emissões relativas à etapa de operação dos sistemas contemplam o consumo extra de combustível nos *boilers* auxiliares, equipamento que não foi utilizado neste estudo, além de diversas outras diferenças das características dos sistemas e do método de cálculo, impossibilitando uma comparação.

Partindo das análises de Beccali *et al.* (2016), verifica-se oscilações entre os resultados das emissões de GEE em localidades distintas. Neste prisma, infere-se com base nos dados obtidos que os resultados das emissões são determinados em função do panorama climático local. Devido a isso, obtém-se as funções que determinam as demandas energéticas, assim, estes resultados podem ser confirmados em prospectos futuros baseados em ACV tangentes em instalações similares, com as devidas adequações em outras regiões do Brasil.

Apesar da possível existência de alguma incompatibilidade devido às diferenças de estrutura e operação entre os dois sistemas, ambos objetos de estudos desse trabalho possuem uma padronização em seus cálculos que possibilita confiável comparação. Possuem uma mesma sistematização metodológica, além dos mesmos parâmetros da ACV, a saber, unidade funcional, limites de fronteira, *software* e suas configurações, método.

As emissões variáveis do sistema convencional são de 321.320 kg CO₂-eq/ano, de modo que as do sistema proposto são apenas 21 % desse valor, enquanto as emissões fixas

do sistema por absorção são quase o dobro maior em relação ao sistema convencional. Contudo, isso resulta em aproximadamente 63 % menos emissões totais para o sistema de climatização por absorção solar proposto. As emissões globais de GEE estimadas em 2015, após o grande crescimento econômico da china, estavam em torno de 55 Gt CO₂-eq/ano (SALAWITCH *et al.*, 2017, pp. 123). Dessa forma, as emissões totais do sistema de climatização por compressão a vapor em estudo correspondem a $6,47 \times 10^{-7}$ % das emissões globais, enquanto as do sistema proposto correspondem a $2,39 \times 10^{-7}$ %.

Aprofundando em uma análise de sensibilidade, uma consideração interessante é a degradação do sistema de climatização. Com o passar dos anos as máquinas sofrem degradações que reduzem sua eficiência gerando um aumento dos gastos de energia elétrica, e consequentemente maiores impactos ambientais. Segundo o Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL, sigla em inglês), o cálculo da taxa de degradação (Hendron 2006) para sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC) pode ser calculado com base na idade do sistema e sua manutenção. O consumo de energia modificado pela degradação E_{mod} (kWh/ano) pode ser dado por (Magnuson, 2013):

$$E_{\text{Mod}} = \frac{E_i}{(1 - M)^A} \quad (4.1)$$

Sendo E_i o consumo de energia inicial (kWh/ano), A a idade em anos do sistema e M o fator de manutenção que pode variar entre 0,01 para manutenções regulares a 0,02 para ausência de manutenções. O uso desta equação para a degradação de sistemas de AVAC é o método utilizado por estudos recentes (FENAUGHTY e PARKER, 2018; ELEFTHERIADIS e HAMDY, 2018). Sendo assim, o aumento total do consumo elétrico devido a degradação do sistema ao longo de sua vida útil (desde o ano inicial A_i , até o ano final A_f) é calculado pela equação 4.2:

$$E_{\text{Mod}} = \sum_{A_i}^{A_f} \frac{E_i}{(1 - M)^{A-1}} \quad (4.2)$$

Para o sistema convencional por compressão de vapor o aumento do consumo elétrico devido a degradação do sistema está mostrado na Tabela 4.9. O aumento do consumo devido a degradação do sistema foi calculado ao longo de 10 anos (vida útil do sistema). Para

o fator de manutenção foi considerado que houve manutenções regulares apenas nos três primeiros e três últimos anos.

Tabela 4.9 Consumo de eletricidade modificado em razão da degradação do sistema de climatização convencional.

A	E_i (kWh/ano)	M	E_{Mod} (kWh/ano)
1	1.415.506,85	0,01	1.415.506,85
2	1.415.506,85	0,01	1.429.804,90
3	1.429.804,90	0,01	1.444.247,38
4	1.444.247,38	0,02	1.503.951,22
5	1.503.951,22	0,02	1.534.644,10
6	1.534.644,10	0,02	1.565.963,37
7	1.565.963,37	0,02	1.597.921,80
8	1.597.921,80	0,01	1.518.677,70
9	1.518.677,70	0,01	1.534.017,87
10	1.534.017,87	0,01	1.549.513,00
Total em 10 anos (kWh)			15.094.248,19
Média anual (kWh/ano)			1.509.424,82

Já o consumo elétrico do sistema por absorção solar aumenta conforme Tabela 4.10. A degradação foi calculada ao longo de 15 anos (metade da vida útil do sistema), pois foram considerados ambos os motores (ativo e reserva) de cada circuito, de modo que cada motor funciona pela metade da vida útil do sistema completo. Foi considerado um fator de manutenção constante de 0,01.

Tabela 4.10 Consumo de eletricidade modificado em razão da degradação do sistema de climatização por absorção solar.

A	E_i (kWh/ano)	M	E_{Md} (kWh/ano)
1	296.919,71	0,01	296.919,71
2	296.919,71	0,01	299.918,90
3	299.918,90	0,01	302.948,38
4	302.948,38	0,01	306.008,47
5	306.008,47	0,01	309.099,46
6	309.099,46	0,01	312.221,68
7	312.221,68	0,01	315.375,44

8	315.375,44	0,01	318.561,05
9	318.561,05	0,01	321.778,83
10	321.778,83	0,01	325.029,13
11	325.029,13	0,01	328.312,25
12	328.312,25	0,01	331.628,53
13	331.628,53	0,01	334.978,32
14	334.978,32	0,01	338.361,94
15	338.361,94	0,01	341.779,73
Total em 15 anos			4.782.921,82
Média anual			318.861,45

A Tabela 4.11 faz um resumo dos resultados encontrados quando se considera a degradação dos sistemas de climatização. Dessa tabela, observa-se um aumento de 6 % nas emissões do sistema convencional, e de 3,8 % nas emissões do sistema por absorção. Aqui considerou-se somente a degradação do sistema de climatização.

Tabela 4.11 Comparação das emissões considerando a degradação de seu desempenho.

	Sist. Convencional (kg CO₂-eq/ano)		Sist. por Absorção (kg CO₂-eq/ano)	
	Caso base	Com degradação	Caso base	Com degradação
Emissões fixas	34.392		63.865	
Emissões variáveis	321.320	342.639	67.401	72.382
Emissões totais	355.712	377.031	131.266	136.247

Objetivando outra discussão sensível dos dados e considerando o sistema de climatização convencional já instalado, foi feita uma breve análise da implementação de um sistema fotovoltaico. Considerando um painel de silício policristalino (eficiência de 13,5 %, espessura de célula de 270-300 µm e 30 anos de vida útil), equipamento auxiliar, cabeamento e água de manutenção (limpeza), de acordo com Diniz *et al.* (2020), 1 kWh da eletricidade do sistema solar fotovoltaico, resulta em 0,0766 kg CO₂-eq/kWh, o que inclui extração de matérias-primas, fabricação, transporte e operação. Visto que o consumo elétrico anual do sistema de climatização da ECT da UFRN é de 1.509.424,82 kWh (com a degradação do

sistema), a estimativa das emissões variáveis do sistema fotovoltaico seria de 115.621,94 kg CO₂-eq / ano.

A Tabela 4.12 mostra as emissões calculadas para os casos-base (sem degradação) sistema convencional (compressão de vapor) e para o sistema proposto (absorção com coletores solares para água quente). A coluna “Sistema Convencional + Fotovoltaico” compara a nova situação, na qual o sistema convencional é acionado por painéis solares fotovoltaicos.

Tabela 4.12 Comparação das emissões de todos os sistemas.

	Sist. Convencional (kg CO₂-eq/ano)	Sist. Convencional + Fotovoltaico (kg CO₂-eq/ano)	Sist. por Absorção (kg CO₂-eq/ano)
Emissões fixas	34.392	34.392	63.865
Emissões variáveis	321.320	115.622	72.381
Emissões totais	355.712	150.014	136.246

Pela Tabela 4.12, observa-se que a instalação do sistema fotovoltaico reduz em 64 % as emissões referentes ao consumo de eletricidade da rede nacional. As emissões fixas do sistema convencional com painéis fotovoltaicos permanecem as mesmas porque o valor da eletricidade fotovoltaica já inclui os equipamentos. O detalhamento e desagregação dos materiais envolvidos no sistema fotovoltaico pode rastrear a origem das emissões, mas o objetivo da Tabela 4.12 foi a de mostrar a redução global nas emissões (150.014 kg CO₂-eq/ano vs. 355.712 kg CO₂-eq/ano).

Por meio desse detalhamento e desagregação, pode-se melhorar o projeto em atualizações futuras, por meio da escolha racional de equipamentos que detenham melhor eficácia e menores níveis de resíduos quando em fase de descarte. Sendo possível ainda um rearranjo dos equipamentos existentes, possibilitando desta maneira o uso racional do instrumental existente, e viabilizando a reavaliação das operações que envolvem logística de transporte e utilização dos equipamentos em outros fins quando encerrada sua vida útil.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Os sistemas de refrigeração por absorção demonstram bom desempenho ambiental, sendo excelentes candidatos à incorporação de energia renovável. Suas vantagens são demonstradas, apesar do montante de emissões relacionadas à construção destes sistemas. Porém, na comparação com outros trabalhos, verificou-se que há ampla faixa de variação nos resultados de ACV devido à falta de padronização na elaboração do inventário e na aplicação dos métodos de avaliação de impacto ambiental, impossibilitando a comparação entre os estudos.

O sistema existente de climatização de compressão de vapor, com capacidade térmica de 1.735 kW, foi classificado em 14 arranjos distintos. Considerando o consumo de eletricidade associado à sua operação, obteve-se um total de 355.712 kg CO₂-eq/ano, dos quais 321.320 kg CO₂-eq/ano (90 %) referem-se as emissões variáveis (energia elétrica). Além disso houve as emissões referentes aos materiais de 7,90 %, gás R-22 de 0,94 %, transporte de 0,28 %, manutenção de 0,04 % e descarte de 0,05 %. Ao considerar-se a degradação do sistema AVAC, as emissões variáveis aumentaram para 342.639 kg CO₂-eq/ano (6 % a mais).

Considerando a proposta de sistema constituída por coletores solares e refrigeração por absorção, as emissões totais foram quantificadas em 131.266 kg CO₂-eq/ano, das quais 51 % corresponde às emissões variáveis. A maior parcela de emissões fixas foi observada no item “materiais” (obtenção de matéria-prima e fabricação), que corresponde a 36,39 %, em seguida o transporte (6,39 %), o descarte (5,84 %) e a manutenção (0,03 %). Ao considerar-

se a degradação do sistema AVAC, as emissões variáveis aumentaram para 136.247 kg CO₂-eq/ano (3,8 % a mais).

A substituição do conjunto compressor pela tecnologia de absorção solar foi capaz de reduzir as emissões variáveis em 79 %. Por outro lado, as emissões fixas do sistema por absorção são quase o dobro. No contexto geral, resulta em 63 % menos emissões totais associadas ao sistema por absorção sugerido.

A metodologia da ACV é capaz de proporcionar a visão panorâmica necessária para a tomada de decisão quanto as ações que levam à mitigação dos impactos ambientais. Futuramente, assumindo-se que os sistemas de refrigeração por absorção amadureçam a sua presença no mercado, a ACV fornece a oportunidade de fortalecimento de marketing, por meio do uso de etiquetas ecológicas. Nesse sentido, o destaque para produtos de baixo impacto ambiental pode ser feito não apenas com base nas emissões de carbono, mas também outros índices como exigência global de energia (GER) potencial de ecotoxicidade (EP) e potencial de poluição (EP).

Uma sugestão para trabalhos futuros é a de modelar a degradação dos coletores solares para produção de água quente. Trabalhos futuros também podem inserir modelagens de *boilers* como equipamentos de suporte para momentos de alta demanda de calor no projeto do sistema de climatização por absorção, além de ampliar a análise e comparação com mais possibilidades de propostas de sistemas de climatização. Outras categorias de impacto ambiental podem ser computadas e avaliadas, assim como opções diferentes de descarte final dos materiais. Por fim, uma avaliação econômica é necessária para promover maiores otimizações e nortear decisões.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008, “NBR 16401-2: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitárias. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico”, 1ª ed., **Rio de Janeiro**.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014a, “NBR 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura (Versão corrigida)”, **Rio de Janeiro**.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014b, “NBR 14044: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e orientações (Versão corrigida)”, **Rio de Janeiro**.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018, “NBR 16069: Segurança em sistemas frigoríficos”, 2ª ed., **Rio de Janeiro**.
- AL-ALILI, A. *et al.*, 2012, “Modeling of a solar powered absorption cycle for Abu Dhabi”, **Applied Energy**, Vol. 93, pp. 160–167.
- ASHRAE - *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, 2015, “Handbook - Heating, Ventilating, And Air-Conditioning Applications”, Inch-Pound Edition.
- AWWA - American Water Works Association, 2013, “Manual of Water Supply Practices, M42”, Steel Water-Storage Tanks, Denver, EUA: AWWA.
- BARBOSA, R. R., CARVALHO, M., 2019, “A step by step design guide for a solar water heating system considering thermal losses”, **Engenharia Térmica**, v. 18, pp. 26.
- BECCALI, M. *et al.*, 2012, “LCA of a solar heating and cooling system equipped with a small water–ammonia absorption chiller”, **Solar Energy**, Vol. 86, pp. 1491–1503.
- BECCALI, M. *et al.*, 2016, “Solar heating and cooling systems versus conventional systems assisted by photovoltaic: Application of a simplified LCA tool”, **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 156, p. 92-100.

- BELLOS, E., TZIVANIDIS, C., ANTONOPOULOS, K.A., 2015, “Comparison of two solar driven absorption chillers for air-conditioning in Greece”, Proceedings of the 6th International Conference on Experiments/Process/System Modelling/Simulation/Optimization, Atenas, Grécia.
- BRASIL, **Ministério de Minas e Energia**, 2019, “Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2018”. Brasília, p. 6.
- BRUNET, R. *et al.*, 2012, “Combined simulation–optimization methodology for the design of environmental conscious absorption systems”, **Computers & Chemical Engineering**, Vol. 46, pp. 205-216.
- BUKOSKI, J. *et al.*, 2014, “The life cycle assessment of a solar-assisted absorption chilling system in Bangkok, Thailand”, **Energy And Buildings**, Vol. 72, pp. 150-156.
- CARAVELA®, 2020, “Torres de resfriamento de água”, Thermotank Group, Santa de Parnaíba-SP, 09 jul. 2020, Disponível em: <https://www.torre-caravela.com.br/torre-de-resfriamento-de-agua-modelo-wt>, Acesso em: 28 ago. 2020.
- CARVALHO, B. C. T., *et al.*, 2019, “Multicriteria optimization of renewable-based polygeneration system for tertiary sector buildings”. **Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)**, v. 18, n. 11.
- CARVALHO, M., DELGADO, D. B. M., CHACARTEGUI, R., 2016, “Life cycle analysis as a decision criterion for the implementation of solar photovoltaic panels in Northeast Brazil hospital”, **In: energy, transportation and global warming**, Springer, Cham, p. 295-310.
- CARVALHO, M., DELGADO, D., 2017, “Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix”. **LALCA-Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 1, n. 1, p. 64-85.
- ÇENGEL, Y. A., BOLES, M. A., 2013, “Termodinâmica”, 7ª ed., **São Paulo: Mc Graw Hill**.
- CIMSIT, C., 2018, “Thermodynamic performance analysis of the double effect absorption-vapour compression cascade refrigeration cycle”, **Journal of Thermal Science and Technology**, v. 13, n. 1, pp. JTST0007-JTST0007.
- CLIMATE-DATA.ORG., Clima Natal (Brasil), Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-norte/natal-2030/>>, Acesso em 14 ago. 2020.
- CLIMATICUS 4.2., 2011, “Climatic database: Project strategies for 58 Brazilian cities”, **INMET1961–1990 database**, Beta version, Faculty of Architecture and

- Urbanization, University of São Paulo, Technology department, Laboratory of environmental comfort and energy efficiency, Disponível em http://www.fau.usp.br/arquivos/cpq/labs/labaut/conforto/Climaticus_2011%28beta%29.xlsm, Acesso em 25 junho 2020.
- CRESESB: Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica Sérgio Brito, “Potencial Energético: Potencial Solar – SunData”, Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>, Acesso em: 14 ago. 2020.
- D’AMICO, A., et al., 2019, “Building energy demand assessment through heating degree days: The importance of a climatic dataset”. *Applied Energy*, v. 242, p. 1285-1306.
- DE PAULA, C. H. et al., 2020, Optimal design and environmental, energy and exergy analysis of a vapor compression refrigeration system using R290, R1234yf, and R744 as alternatives to replace R134a. “*International Journal of Refrigeration*”, v. 113, p. 10-20.
- DELGADO, D., et al., 2018, “Photovoltaic solar energy in the economic optimisation of energy supply and conversion”. **IET Renewable Power Generation**, v. 12, n. 11, p. 1263-1268.
- DINIZ, D. P.; CARVALHO, M.; ABRAHÃO, R., 2020, Greenhouse gas accounting for the energy transition in a brewery, **Environmental Progress & Sustainable Energy**, p. e13563.
- DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A., 2014, “Solar Engineering of Thermal Processes”, Wiley.
- ECOINVENT, 2019, “The ecoinvent database 3.6.”, Disponível em: <<http://www.ecoinvent.org/>>, Acesso em 21 ago. 2020.
- ECT - Escola de Ciências e Tecnologia, 2019, “Agenda: Eventos semanais”, In: Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em: <https://agenda.ect.ufrn.br/horariosPesquisar>, Acesso em: 30 jun. 2020.
- ELEFTHERIADIS, G.; HAMDY, M., 2018, The impact of insulation and HVAC degradation on overall building energy performance: a case study, **Buildings**, v. 8, n. 2, p. 23.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2018, “Nota Técnica EPE 030/2018 Uso de Ar-Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética”, **Brasília DF: Ministério de Minas e Energia**, 13 dez.

- ERBS, D. G., KLEIN, S. A., BECKMAN, W. A., 1983, “Estimation of degree-days and ambient temperature bin data from monthly-average temperatures”, **ASHARE J.**, 25, (6), pp. 60–65.
- EUROPEAN COMMISSION, 2016, **Guide for interpreting life cycle assessment results**, Available at: <<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC104415/lb-na28266-en-n.pdf>>, Accessed: 27 nov. 2019.
- EUROTANK WORKS, 2020, “Vertical steel tank”, vol.400 CBM (AST-400), Disponível em: <https://eurotankworks.com/storage-tanks/vertical-storage-tanks/vertical-tank-vol-400/>, Acesso em 04 ago. 2020.
- FENAUGHTY, K., PARKER, D., 2018, Evaluation of Air Conditioning Performance Degradation: Opportunities from Diagnostic Methods, Florida Solar Energy Center, **Proceedings of the 2018 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Pacific Grove, CA, American Council for an Energy Efficient Economy.**
- GARCIA, L.C., 2018, “Plano de Manutenção, Operação e Controle – PMOC – aplicado à ECT da UFRN”, **Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia)** - Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Disponível em: <<https://monografias.ufrn.br/jspui/handle/123456789/6854>>, Acesso em: 12 jul. 2019.
- GEBRESLASSIE, B.H. *et al.*, 2009, “Design of environmentally conscious absorption cooling systems via multi-objective optimization and life cycle assessment”, **Applied Energy**, Vol. 86, pp. 1712-1722.
- GEBRESLASSIE, B.H. *et al.*, 2010, “A systematic tool for the minimization of the life cycle impact of solar assisted absorption cooling systems”, **Energy**, Vol. 35, pp. 3849-3862.
- GEBRESLASSIE, B.H. *et al.*, 2012, “Solar assisted absorption cooling cycles for reduction of global warming: A multi-objective optimization approach”, **Solar Energy**, Vol. 86, pp. 2083-2094.
- GEBRESLASSIE, B.H., GROLL, E.A. and GARIMELLA, S.V., 2012, “Multi-objective optimization of sustainable single-effect water/Lithium Bromide absorption cycle”, **Renewable Energy**, Vol. 46, pp. 100-110.
- GEORGE, G., SCHILLEBEECKX, S.J., LIAK, T.L., 2018, “The management of natural resources: An overview and research agenda”, In: *Managing Natural Resources*, Cheltenham: Edward Elgar Publishing.

- GONÇALVES, J.C.S., BODE, K., 2015, “Edifício ambiental”, Ed. Oficina de Textos.
- GUILLEN-LAMBEA, S., CARVALHO, M., DELGADO, M., LAZARO, A., 2020, “Sustainable enhancement of district heating and cooling configurations by combining thermal energy storage and life cycle assessment”, **Clean Technologies and Environmental Policy**, Vol. 24.
- HANG, Y. *et al.*, 2014, “Experimental based energy performance analysis and life cycle assessment for solar absorption cooling system at University of Californian, Merced”, **Energy and Buildings**, Vol. 82, pp. 746-757.
- HAUSCHILD, M.K., ROSENBAUM, R. K., OLSEN, S. I. (Eds.), 2018, “Life Cycle Assessment”, **Springer**.
- HENDRON, R., 2006, Building America Performance Analysis Procedures for Existing Homes, Technical Report, **National Renewable Energy Laboratory**, Golden/USA.
- HITACHI, 2009a, “Utopia Evolution: Multi split inverter”, **Manual do Proprietário e Manual de Instalação**, Disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/read/22312433/raa040aiv-hitachi-ar-condicionado-do-brasil>, Acesso em: 30 jun. 2020.
- HITACHI, 2009b, “Linha Utopia”, **Catálogo técnico**, rev.: 01.
- IEA - International Energy Agency, 2018, Energy Efficiency 2018: “Analysis and outlooks to 2040”. International Energy Agency, 2020. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/2369>. Acesso em: 20 de agosto de 2020.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013, “Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto protocol”, Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/>, Acesso em: 21 ago. 2020.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018, “Summary for Policymakers”. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

- IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2019, “Cadernos ODS: ODS 13 Tomar medidas Urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos”, **ipea**, p. 50, Disponível em: https://www.ipea.gov.br/porta1/images/stories/PDFs/livros/livros/191014_cadernos_ODS_objetivo_13.pdf, Acessado em 30 mai 2020.
- ISO - International Standard Organization 14040, 2006a, “Environmental management – life cycle assessment – principles and framework”, Genebra, Suíça.
- ISO - International Standard Organization 14044, 2006b, “Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines”, Genebra, Suíça.
- JING, Y. *et al.*, 2019, “Exergoeconomic design criterion of solar absorption-subcooled compression hybrid cooling system based on the variable working conditions”, **Energy Conversion and Management**, vol. 180, pp. 889-903.
- KALVERKAMP, M. and KARBE, N., 2019, “Comparability of Life Cycle Assessments: Modelling and Analyzing LCA Using Different Databases”, **Cascade Use in Technologies 2018**, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, pp. 51-63.
- KIM, D.S., INFANTE, F.C.A., 2008, “Solar refrigeration options – a state-of-the-art review”, **International Journal of Refrigeration**, Vol. 31, pp. 3–15.
- KLUPPEL, R. P., 2016, “Curso de Conversão Térmica da Energia Solar”. João Pessoa: CEAR/UFPB.
- KORONEOS, C., TSAROUHIS, M., 2012, “Exergy analysis and life cycle assessment of solar heating and cooling systems in the building environment”, **Journal of Cleaner Production**, Vol. 32, pp. 52-60.
- KUSHWAHA, S.K., TIWARI, A.C., 2016, “Evaporative cooling comfort in agricultural tractor cabin”, **J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.** **38**, pp. 965–976.
- LI, Z., GAN, Z., QIU, L., 2015, “Cold inertance tube for 4 K Stirling type pulse tube cryocoolers”, **Physics Procedia**, v. 67, n. Supplement C, pp. 451-455.
- LONGO, S. *et al.*, 2020, “Energy and environmental life cycle impacts of solar-assisted systems: The application of the tool ELISA”, **Renewable Energy**, v.145, pp. 29-40.
- MAGNUSON, G. R., 2013, **Assessment of degradation of equipment and materials in relation to sustainability measures**, Tese de Doutorado, University of Kansas.
- MALI, N.A., BHAGWAT, S.S., 2017, “Mapping of optimum operating condition for LiBr–water refrigeration cycles”, **Sādhanā** **42**, pp. 257–269.

- MEDEIROS, D.L. *et al.*, 2013, “Inconsistências Metodológicas em Estimativas de Emissões de Gases do Efeito Estufa na Matriz Elétrica Brasileira”, *4th International Workshop Advances in Cleaner Production*, São Paulo.
- MONFARED, B., FURBERG, R., BJÖRN, P., 2014, “Magnetic vs. vapor-compression household refrigerators: a preliminary comparative life cycle assessment”, **International journal of refrigeration**, v. 42, pp. 69-76.
- ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2020, Disponível em: <http://www.ons.org.br/>, Acesso em 30 ago. 2020.
- PREMIUM, 2020, “Fan Coil, Catálogo Técnico”, Premium Ar-Condicionado, Disponível em: <https://www.premiumarcondicionado.com.br/fan-coil/>, Acesso em: 31 ago. 2020.
- SALAWITCH, R. J., CANTY, T. P., HOPE, A. P., *et al.*, 2017, **Paris Climate Agreement: Beacon of Hope**, Paris INDCs, Springer Nature, Disponível em: https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&as_ylo=2016&as_yhi=2021&q=Paris+Climate+Agreement%3A+Beacon+of+Hope&btnG=, Acesso em: 09 de março de 2021.
- SCHMID, F., BIERLING, B., SPINDLER, K., 2019, “Development of a solar-driven diffusion absorption chiller”, **Solar Energy**, v. 177, pp. 483-493.
- SHIN, M., DO, S. L., 2016, “Prediction of cooling energy use in buildings using an enthalpy-based cooling degree days method in a hot and humid climate”, *Energy and Buildings*, v. 110, p. 57-70.
- SHIRAZI, A. *et al.*, 2018, “Solar-powered absorption chillers: A comprehensive and critical review”, **Energy Conversion and Management**, v. 171, pp. 59-81.
- SIMAPRO, 2019, “Software SimaPro v.9.”, Disponível em: <www.simapro.nl>, Acesso em 21 ago. 2020.
- SOLANO-OLIVARES, K. *et al.*, 2019, “Life cycle assessment of a solar absorption air-conditioning system”, **Journal of Cleaner Production**, Vol. 240, pp. 118-206.
- SOLARTECH, 2016a, “Informações Técnicas do Coletor Solar S-81”, João Pessoa.
- SOLARTECH, 2016b, “Informações Técnicas do Boiler de 2000L”, João Pessoa.
- STOECKER, W.F., SAINZ JABARDO, J.M., 2018, “Refrigeração industrial”, **Ed. Edgard Blücher**, pp. 13-43.
- THERMAX, 2017, “Hot water vapour Absorption Chiller 15TR to 1525TR (50kW to 5350kW)”, **Cooling and Heating Division**, 5G/01, US, Disponível em:

<http://www.thermax-usa.com/pdf/Hot-Water-driven-absorption-Chillers/Hot-Water-driven-absorption-Chillers.pdf>, Acesso em: 20 de ago. de 2020.

VAINFAS, R., *et al.*, 2016, **História** 3, 3ª ed, Saraiva Educação Ltda, São Paulo, Disponível em: https://api.plurall.net/media_viewer/documents/1593332, Acesso em: 09 de março de 2021.

WANG, R., GE, T. (Ed.), 2016, “Advances in solar heating and cooling”, Woodhead Publishing.

ZEYGHAMI, M., GOSWAMI, D. Y., STEFANAKOS, E., 2015, “A review of solar thermo-mechanical refrigeration and cooling methods”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 1428-1445.

APÊNDICE I

Composição material das demais unidades do sistema de climatização por compressão de vapor, complementando Tabela 3.2.

SISTEMA 2		SISTEMA 3		SISTEMA 4	
MATERIAL	kg	MATERIAL	kg	MATERIAL	kg
Alumínio	3,962	Alumínio	5,9918	Alumínio	8,601
Cobre	7,925	Cobre	11,984	Cobre	17,2
Eletrônicos	0,44	Eletrônicos	0,6658	Eletrônicos	0,956
Polietileno	7,925	Polietileno	11,984	Polietileno	17,2
R-22	0,4	R-22	0,6052	R-22	0,869
Aço baixa liga	13,37	Aço baixa liga	20,215	Aço baixa liga	29,02
Aço inox	6,684	Aço inox	10,107	Aço inox	14,51
Latão	0,296	Latão	0,4479	Latão	0,643
Embalagem	1,5	Embalagem	1,5	Embalagem	1,5

SISTEMA 5		SISTEMA 6		SISTEMA 7	
MATERIAL	kg	MATERIAL	kg	MATERIAL	kg
Alumínio	6,66829	Alumínio	8,5045	Alumínio	9,0843
Cobre	13,3366	Cobre	17,009	Cobre	18,169
Eletrônicos	0,74092	Eletrônicos	0,9449	Eletrônicos	1,0094
Polietileno	13,3366	Polietileno	17,009	Polietileno	18,169
R-22	0,67357	R-22	1,9	R-22	1,9
Aço baixa liga	22,4971	Aço baixa liga	28,692	Aço baixa liga	30,648
Aço inox	11,2485	Aço inox	14,346	Aço inox	15,324
Latão	0,49844	Latão	0,6357	Latão	0,679
Embalagem	1,5	Embalagem	1,5	Embalagem	1,5

SISTEMA 8	
MATERIAL	kg
Alumínio	12,95
Cobre	25,9
Eletrônicos	1,439
Polietileno	25,9
R-22	2,7*
Aço baixa liga	43,69
Aço inox	21,84
Latão	0,968
Embalagem	1,5

SISTEMA 9	
MATERIAL	kg
Alumínio	14,88
Cobre	29,77
Eletrônicos	1,654
Polietileno	29,77
R-22	2,3*
Aço baixa liga	50,21
Aço inox	25,11
Latão	1,112
Embalagem	1,5

SISTEMA 10	
MATERIAL	kg
Alumínio	16,429
Cobre	32,858
Eletrônicos	1,8255
Polietileno	32,858
R-22	3,8*
Aço baixa liga	55,428
Aço inox	27,714
Latão	1,228
Embalagem	1,5

SISTEMA 11	
MATERIAL	kg
Alumínio	23,68
Cobre	47,35
Eletrônicos	2,631
Polietileno	47,35
R-22	4,6*
Aço baixa liga	79,88
Aço inox	39,94
Latão	1,77
Embalagem	1,5

SISTEMA 12	
MATERIAL	kg
Alumínio	25,8034
Cobre	51,6068
Eletrônicos	2,86704
Polietileno	51,6068
R-22	4,6*
Aço baixa liga	87,0539
Aço inox	43,5269
Latão	1,92874
Embalagem	1,5

SISTEMA 13	
MATERIAL	kg
Alumínio	25,803
Cobre	51,607
Eletrônicos	2,867
Polietileno	51,607
R-22	5,4*
Aço baixa liga	87,054
Aço inox	43,527
Latão	1,9287
Embalagem	1,5

SISTEMA 14	
MATERIAL	kg
Alumínio	8,9394
Cobre	17,879
Eletrônicos	0,9933
Polietileno	17,879
R-22	0,903
Aço baixa liga	30,159
Aço inox	15,08
Latão	0,6682
Embalagem	1,5

*Estão de acordo com os manuais da Hitachi.

APÊNDICE II

Dados que nortearam o dimensionamento do sistema de climatização por absorção solar (com base em uma carga de refrigeração de 1.735kW) e consequentemente o levantamento do inventário.

COLETORES SOLARES E TANQUES DE ARMAZENAMENTO		
Vazão de consumo (kg/s):	63	
Volume de consumo diário (m³/dia):	3651	
Temperatura ambiente (°C):	25,30	
Temperatura de consumo da água (°C):	90	
Temperatura de armazenamento (°C):	100	
Volume de armazenamento (m³):	3162	
Demanda diária de energia útil (kWh/dia):	274125	
Fração solar recomendada (f)	191887,3238	70%
Energia Perdida (kWh/dia):	41119	
Eficiência térmica do coletor solar	0,52	
Área transparente do coletor (m²)	1,72	
Inclinação dos coletores (β)	16	
Inclinação ótima dos coletores ($\beta_{\text{ótimo}}$)	15,6	
Orientação dos coletores em relação ao norte geográfico	0	
FC instalado	1,0000192	
Área coletora (m²)	3506,76	
Número de coletores S81 Solar Tech	2039	

DUTOS DE INSUFLAÇÃO E DE RETORNO	
Material das chapas	Aço galvanizado
Espessura (mm)	0,79
Peso unitário (kg/m²)	6,10
Seção transversal Insuflação (cm)	20x80
Seção transversal Retorno (cm)	20x90
Área insuflação (m²)	1706
Área retorno (m²)	1681
Peso total (kg)	20670,86

TUBULAÇÃO HIDRÁULICA					
FINALIDADE	MATERIAIS	Metros	DN	Peso (kg/m)	Peso (kg)
Água do Chiller	Aço galvanizado	32	6"	42,60	29299,20
		29	8"	64,60	
Água Quente	Aço galvanizado	35	6"	42,60	
		50	8"	64,60	
Água Fria	Aço galvanizado	28	8"	64,60	1318,32
	PVC	24	10"	18,31	

ISOLAMENTO DUTOS E TUBOS			
MATERIAL	Espessura (m)	kg/m³	Kg
Lã de vidro	0,025	20	7584,8
Alumínio	0,000007	27000	324,32

Bomba	Vazão (m³/h)	Altura manométrica (mca)	Peso (kg)	Materiais	% Peso	kg	Qtd.
Th 150/200	100	9,6	183	Ferro Fundido Aço inox	95 3	173 10	2
Th 150/200	150	9	183	Ferro Fundido Aço inox	95 3	173 10	2
Th 200/315	200	8,2	270	Ferro Fundido Aço inox	95 3	173 10	2

Motor	Potência (cv)	Carcaça	Peso (kg)	Materiais	% Peso	kg	Qtd.
Trifásico IP55	15	132M	72	Ferro Fundido Aço inox	95 3	68 4	4
Trifásico IP55	20	160M	104	Ferro Fundido Aço inox	95 3	99 5	2

TORRE DE REFRIGERAÇÃO						
Parâmetros	Valores	MATERIAIS	% Peso Estimado	kg	Total	
z	6,6	Poliéster	82	2624	7872	
a	6	Fibra de vidro	2,5	80	240	
tf (°C)	26	Aço inox	9	288	864	
tc	14	PVC	2,1	67,2	201,6	
Modelo	WT 101/12	Ferro fundido	3	96	288	
Peso seco (kg)	3200	Polipropileno	1,4	44,8	134,4	

FAN-COILS						
Marca	PREMIUM AR COND.		MATERIAIS	% Peso Estim.	kg	Total
Modelo	ICP 40TR		Alumínio	19	152	2280
Nº p/ sistema	5		Aço (galvanizado)	37	296	4440
Nº total	15		Poliestireno	0,5	4	60
Peso (kg)	800		Borracha sintética	0,6	4,8	72
			Cobre	29,8	238,4	3576
			Latão	1	8	120
			Ferro fundido	12	96	1440
			Poliamida (nylon)	0,1	0,8	12

	Água do <i>Chiller</i>	Água Quente	Água Fria		
INSTRUMENTO	Qtd.	Qtd.	Qtd.	Peso unid. (kg)	Material (maioria 8")
Válvula de gaveta	11	10	11	278	Aço carbono
Válvula global	1	1	1	19	Aço fundido
Válvula de controle	2	2		208	Aço carbono
Válvula de Controle Eletropneumática 3p		1	1	1	Aço inox
Válvula de retenção	2	2	2	16	Aço vazado
Válvula borboleta	7	9	6	16	Aço inox
Eliminador de ar para líquido		1	3	4,3	Ferro fundido
Filtro Y	3	3	3	128	Ferro fundido
Manômetro	6	6	4	3	Aço Inox
Termômetro	2	2	8	3	Aço Inox
Medidor de vazão	1	1	1	71	Ferro fundido
					Polipropileno
					Aço Inox
Indicador de nível	1	1		30	Aço inox (estimado)
Válvula solenoide			2	4,4	Aço inox
Válvula borboleta pneumática			2	4,4	Aço inox (estimado)