



AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO SOLAR PARA UM COMPLEXO DE ENSINO UNIVERSITÁRIO

Lucas de Oliveira Alves

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Planejamento Energético.

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Rio de Janeiro

Março de 2020

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO SOLAR PARA UM
COMPLEXO DE ENSINO UNIVERSITÁRIO

Lucas de Oliveira Alves

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Aprovada por: Prof. Alexandre Salem Szklo

Prof. Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Prof. Diego Cunha Malagueta

Prof. Silvio Carlos Aníbal de Almeida

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2020

Alves, Lucas de Oliveira.

Avaliação de um Sistema de Condicionamento Solar para um Complexo de Ensino Universitário/ Lucas de Oliveira Alves. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XIII, 98 f.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/Programa de Planejamento Energético,2020.

Referências Bibliográficas: p. 91-98.

1.Condicionamento Solar. 2.Concentrador Cilindro-parabólico. 3 Sistema de Refrigeração por Absorção. I. Szklo, Alexandre Salem. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por toda força, graça e companhia ao longo dessa trajetória. A Ele seja dado o louvor, glória e honra.

Aos meus pais por todo amor e esforço em investir na minha educação. Mesmo nas limitações dos recursos sempre se dedicaram em oferecer o melhor que podiam.

À minha irmã Dayane pela parceria incrível, pelo amor, por sempre acreditar em mim e me apoiar incondicionalmente. Seu incentivo em diversas etapas na vida contribuíram fortemente para o sucesso destas. E ao meu cunhado Thiago pela amizade, apoio e ajuda.

Ao meu irmão Leandro e cunhada Patrícia, que além do carinho e amor, me deram o suporte necessário para a conclusão dessa etapa. À minha nova família de Niterói que em diversos momentos me fizeram sentir em casa, em especial: Gilda, André e Juliana.

À minha namorada Caroline por todo apoio, suporte e amor que me fizeram acreditar a cada momento que seria possível a conclusão desse trabalho. Grato pelo ombro, pela parceria e por caminhar junto a mim.

Aos meus pais do coração Geraldo e Rosa por todo apoio em todas as partes da minha vida, pelo amor, pelo suporte emocional e espiritual.

A todos os meus amigos e familiares que fizeram essa etapa se tornar mais leve e por se fazerem presentes mesmo longe fisicamente.

Aos meus amigos do PPE pela parceria, amizade, momentos de alegria, de suporte e por me motivarem a ir até o fim.

Ao professor Alexandre Szklo pela orientação acadêmica e de vida ao longo dessa etapa. Ao conhecimento compartilhado, às palavras de incentivo e por acreditar em mim quando pensei que não seria possível.

Ao professor e amigo Diego Malagueta, uma imensa gratidão, por orientar não só no trabalho, como também na vida. Por ser o professor mais significativo da minha graduação, por me apresentar o PPE e por todo suporte e ajuda ao longo dessa dissertação. Seu apoio e sua parceria ficarão gravados na memória, assim como os solos de gaita que trouxeram uma leveza ao processo.

Aos professores Pedro Rochedo e Silvio Aníbal pela contribuição nesse trabalho e participação da banca.

Aos professores e funcionários do PPE.

À CAPES pelo apoio financeiro fundamental para a realização desse trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONDICIONAMENTO SOLAR PARA UM COMPLEXO DE ENSINO UNIVERSITÁRIO

Lucas de Oliveira Alves

Março/2020

Orientador: Alexandre Salem Szklo

Programa: Planejamento Energético

Há crescente interesse pelo uso da energia solar, o que, no caso da energia solar térmica de concentração, pode envolver usos alternativos, como o resfriamento/condicionamento solar. Com uso de ferramentas computacionais para análise de conforto térmico e simulação de sistemas energéticos, este estudo avalia um sistema de condicionamento solar em um complexo universitário composto por três edifícios na cidade de Macaé-RJ. Para isso, analisa um sistema de concentração solar integrado à refrigeração por absorção, com uso da tecnologia solar cilindro-parabólico. Esta análise é elaborada para diferentes configurações da absorção e diferentes parâmetros de produção e armazenamento de energia térmica solar. Assim, verifica-se a fração necessária de energia auxiliar requerida pelo sistema. Os resultados indicam que a configuração do sistema de absorção de duplo efeito é a melhor configuração adotada para a localidade, com uma demanda de energia auxiliar de aproximadamente 20% da demanda útil anual. Sistemas de triplo efeito requereriam menos calor no gerador, porém calor de maior qualidade, o que não se obtém durante parte relevante do ano, a partir do sistema de concentração solar proposto em Macaé. De fato, a qualidade de calor está intimamente relacionada à radiação direta local. A metodologia aplicada neste trabalho poderia ser adotada em diferentes localidades, com ênfase na possibilidade de testar sistemas de menor escala em edificações universitárias, onde haveria também ganhos de aprendizado.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EVALUATION OF A SOLAR CONDITIONING SYSTEM FOR A UNIVERSITY
EDUCATION COMPLEX

Lucas de Oliveira Alves

March/2020

Advisor: Alexandre Salem Szklo

Department: Energy Planning

There is growing interest in the use of solar energy, which, in the case of concentrated solar thermal energy, may involve alternative uses, such as solar cooling / conditioning. Using computational tools to analyze thermal comfort and simulate energy systems, this study evaluates a solar conditioning system in a university complex consisting of three buildings in the city of Macaé-RJ. Therefore, it analyzes a solar concentration system integrated with absorption refrigeration, using solar cylinder-parabolic technology. This analysis is designed for different absorption configurations and different parameters for the production and storage of solar thermal energy. Thus, the necessary fraction of auxiliary energy required by the system is verified. The results indicate that the double effect absorption system configuration is the best configuration adopted for the analysed place, with an auxiliary energy demand of approximately 20% of the annual useful demand. Triple-effect systems would require less heat in the generator, but higher quality heat, which is not obtained during a relevant part of the year, from the solar concentration system proposed in Macaé. In fact, the quality of heat is closely related to local direct radiation. The methodology applied in this work could be adopted in different locations, with an emphasis on the possibility of testing smaller scale systems in university buildings, where there would also be learning gains.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO COM USO DE CONCENTRADOR SOLAR	7
2.1 Concentradores de Energia Solar	7
2.1.1 Recurso Solar e Tecnologias Solares	7
2.1.2 Tecnologia Solar Cilindro Parabólico	19
2.1.3 Armazenamento Térmico	24
2.2 Sistema de Refrigeração por Absorção	27
2.2.1 Descrição do Sistema por Absorção	27
2.2.2 Sistemas de Absorção de duplo e triplo efeito	32
3 METODOLOGIA.....	38
3.1 Procedimentos Metodológicos	38
3.2 Carga Térmica de Condicionamento	39
3.3 Sistema de Refrigeração por Absorção e Sistema de Concentração Térmica Solar	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	64
4.1 Resultados Gerais	64
4.2 Resultados Específicos	68
4.2.1 Resultado Simples Efeito	69
4.2.2 Resultado Duplo Efeito	73
4.2.3 Resultado Triplo Efeito	78
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Calha Parabólica desenvolvida no Campus UFRJ- Macaé. Fonte: Elaboração Própria.	4
Figura 2: Variação da Irradiância Solar Extraterrestre ao longo do ano.	8
Figura 3: Componentes da irradiância solar. Fonte:(PEREIRA et al., 2017).....	9
Figura 4: Mapa Irradiação Direta no Brasil. Fonte: (SOLARGIS, 2019)	10
Figura 5: Mapa Irradiação Direta no Mundo. Fonte: (SOLARGIS, 2019)	10
Figura 6: Fluxograma da aplicação da energia solar. Fonte: EKOS BRASIL (2010) ...	11
Figura 7: Temperatura de trabalho das tecnologias solares.....	12
Figura 8: Refletor Linear Fresnel. Fonte: IEA (2010) Adaptado	15
Figura 9: Planta Solar Fresnel na Índia. Fonte: HELIOCSP (2018)	16
Figura 10: Concentrador Disco Parabólico. Fonte: IEA (2010) Adaptado	17
Figura 11: Planta Solar Disco Parabólico nos Estados Unidos. Fonte: TESSERA SOLAR (2019)	17
Figura 12: Torre Solar. Fonte: IEA (2010) Adaptado	18
Figura 13: Planta de Torre Solar nos Estados Unidos. Fonte: BRIGHT SOURCE (2010)	19
Figura 14: Tecnologia de Concentrador Solar Cilindro Parabólico. Fonte: IRENA (2013)	20
Figura 15: Parâmetros Geométricos da Calha Parabólica. Fonte: GÜNTHER (2011) Adaptado.....	20
Figura 16: Área de concentração solar de um concentrador cilindro-parabólico.....	21
Figura 17: Alinhamento dos concentradores cilindro-parabólicos em relação à irradiação solar direta. Fonte: GAZOLI et al. (2018).....	22
Figura 18: Custo total das plantas de CSP instaladas por tecnologia e duração de armazenamento 2010-2018. Fonte: IRENA (2019b)	23

Figura 19: Custo por partes do sistema CSP de uma planta de 100MW. Fonte: Adaptado de FITCHNER (2010)	24
Figura 20: Armazenamento e hibridização numa planta solar. Fonte: GEYER (2007) .	25
Figura 21: Simplificação de um sistema de armazenamento direto. Fonte: Mantilla (2017)	26
Figura 22: Simplificação de um sistema de armazenamento indireto. Fonte: Mantilla (2017)	27
Figura 23: Unidade de Absorção Básica. Fonte: STOECKER & JONES(1985) Adaptado	30
Figura 24: Um arranjo de componentes em uma unidade de absorção comercial. Fonte: STOECKER & JONES(1985).....	31
Figura 25: Coeficiente de desempenho (COP) em função da temperatura de suprimento de calor para efeito simples, duplo e triplo no chiller de absorção de água e LiBr. Fonte: GROSSMAN (2012)	33
Figura 26: Sistema de absorção simples efeito com trocador de calor. Fonte: Adaptado de SETTINO et al.(2018)	34
Figura 27: Sistema de absorção duplo efeito com trocador de calor. Fonte: Adaptado de SETTINO et al.(2018)	35
Figura 28: Sistema de absorção de triplo efeito. Fonte: BANU & SUDHARSAN (2018)	36
Figura 29: Diagrama de entalpia-concentração para a solução H ₂ O-LiBr. Fonte: ASHRAE (2001)	37
Figura 30: Fluxograma simplificado das etapas da metodologia. Fonte: Elaboração Própria	38
Figura 31: Fluxograma simplificado para a determinação da carga térmica. Fonte: Elaboração Própria	39
Figura 32: Bloco C do Campus UFRJ-Macaé. Fonte: Elaboração Própria.....	40
Figura 33: Prédio modelado no SketchUp 2017. Fonte: Elaboração Própria.....	42

Figura 34: Interface do OpenStudio (versão 2.8.0). Fonte: OpenStudio (2.8.0)	43
Figura 35: Interface do OpenStudio na aba Schedule (versão 2.8.0) na aba schedules. Fonte: OpenStudio.....	50
Figura 36: Interface do SAM (versão 2018.11.11). Fonte: SAM (2018).....	56
Figura 37: Fluxograma das etapas da simulação da planta solar. Fonte: Elaboração Própria	58
Figura 38: Tela dos parâmetros da aba Projeto do Sistema. Fonte: Elaboração Própria	61
Figura 39: Tela dos parâmetros da aba Campo Solar. Fonte: Elaboração Própria.....	61
Figura 40: Tela dos parâmetros da aba Coletores. Fonte: Elaboração Própria.....	62
Figura 41: Tela dos parâmetros da aba Receptores. Fonte: Elaboração Própria	62
Figura 42: Tela dos parâmetros da aba Armazenamento Térmico. Fonte: Elaboração Própria	63
Figura 43: Comparação das cargas térmicas do 1º quadrimestre, Caso BE/06: Simples Efeito.	69
Figura 44: Comparação das cargas térmicas do 2º quadrimestre, Caso BE/06: Simples Efeito.	70
Figura 45: Comparação das cargas térmicas do 3º quadrimestre, Caso BE/06: Simples Efeito.	70
Figura 46: Comparação das cargas térmicas do 1º quadrimestre, Caso AE/10: Simples Efeito.	71
Figura 47: Comparação das cargas térmicas do 2º quadrimestre, Caso AE/10: Simples Efeito.	72
Figura 48: Comparação das cargas térmicas do 3º quadrimestre, CasoAE/10: Simples Efeito. Fonte: Elaboração Própria.	72
Figura 49: Comparação das cargas térmicas do 1º quadrimestre, Caso BE/06: Duplo Efeito.	74
Figura 50: Comparação das cargas térmicas do 2º quadrimestre, Caso BE/06: Duplo Efeito.	74

Figura 51: Comparação das cargas térmicas do 3º quadrimestre, Caso BE/06: Duplo Efeito.	75
Figura 52: Comparação das cargas térmicas do 1º quadrimestre, Caso AE/10: Duplo Efeito.	76
Figura 53: Comparação das cargas térmicas do 2º quadrimestre, Caso AE/10: Duplo Efeito.	76
Figura 54: Comparação das cargas térmicas do 3º quadrimestre, Caso AE/10: Duplo Efeito.	77
Figura 55: Comparação das cargas térmicas do 1º quadrimestre, Caso BE/06: Triplo Efeito.	79
Figura 56: Comparação das cargas térmicas do 2º quadrimestre, Caso BE/06: Triplo Efeito.	79
Figura 57: Comparação das cargas térmicas do 3º quadrimestre, Caso BE/06: Triplo Efeito.	80
Figura 58: Comparação das cargas térmicas do 1º quadrimestre, Caso AE/10: Triplo Efeito.	81
Figura 59: Comparação das cargas térmicas do 2º quadrimestre, Caso AE/10: Triplo Efeito.	81
Figura 60: Comparação das cargas térmicas do 3º quadrimestre, Caso AE/10: Triplo Efeito.	82
Figura 61: Comparação da potência térmica para os casos de duplo e triplo efeito dos dias 1, 2 e 3 de janeiro. Fonte: Adaptado de SAM (2018).	84
Figura 62: Comparação da potência térmica para os casos de duplo e triplo efeito dos dias 30 de junho, 1 e 2 de julho. Fonte: Adaptado de SAM (2018).	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Pares Refrigerante- Absorvente	28
Tabela 2: Área das salas de aula	41
Tabela 3: Ambientes associados a cada Zona Térmica	44
Tabela 4: Materiais escolhidos para as superfícies da edificação e os valores das principais variáveis.....	46
Tabela 5: Valores das principais propriedades do vidro comum de 3mm.....	47
Tabela 6: Valores das principais propriedades da porta de madeira 25mm.	47
Tabela 7: Valores típicos do calor emitido por pessoas em diversas atividades e locais	48
Tabela 8: Valor da ocupação máxima em cada ambiente	49
Tabela 9: Valores da potência dissipada por diferentes níveis de iluminação	51
Tabela 10: Potência dissipada por computadores e monitores	52
Tabela 11: Potência dissipada por impressoras e copiadoras	52
Tabela 12: Valores do COP e Tg para cada arranjo do Ciclo de Absorção	55
Tabela 13: Casos simulados em relação a eficiência e a hora de armazenamento	59
Tabela 14: Valores da temperatura de entrada do fluido térmico em cada arranjo do sistema de absorção	60
Tabela 15: Resultado da simulação da carga térmica de condicionamento	65
Tabela 16: Carga térmica requerida pelo gerador do sistema de refrigeração por absorção	66
Tabela 17: Resultado da Simulação no SAM para o Sistema de Simples Efeito.....	67
Tabela 18: Resultado da Simulação no SAM para o Sistema de Duplo Efeito.....	67
Tabela 19: Resultado da Simulação no SAM para o Sistema de Triplo Efeito.....	68
Tabela 20: Fração de requerimento de energia auxiliar para os casos de simples efeito	73
Tabela 21: Fração de requerimento de energia auxiliar para os casos de duplo efeito ..	77
Tabela 22: Fração de requerimento de energia auxiliar para os casos de triplo efeito...	83

1 INTRODUÇÃO

Segundo PEREIRA *et al.* (2017) a energia solar é uma das fontes de energia mais promissoras diante dos desafios energéticos do milênio. É ampla a sua aplicação em diferentes campos, seja em processos térmicos, dinâmicos ou químicos. Como exemplo dessas aplicações, podem-se destacar a utilização em aquecimento de água (BASSO *et al.*, 2010), climatização de ambientes (DROSOU, KOSMOPOULOS & PAPADOPOULOS, 2016) e geração de eletricidade (SORIA, SCHAEFFER & SZKLO, 2014).

Na busca de atender as metas do Acordo de Paris, IRENA (2019a) afirma que são necessárias profundas medidas de eficiência energética e uma transformação energética *limpa*. Para isso, tornam-se necessários investimentos consideráveis no setor energético.

Segundo Fatih Birol (diretor executivo Agência Internacional de Energia) o aumento significativo da demanda mundial por aparelhos de ar condicionado é um dos pontos mais críticos sobre a questão energética atual (IEA, 2018a). Diante de tal cenário, torna-se fundamental o estabelecimento de melhores medidas de eficiência para a questão do resfriamento.

Segundo o relatório “The Future of Cooling” (IEA, 2018a) o uso de aparelhos para conforto térmico é responsável por cerca de 20% de toda eletricidade utilizada em edifícios. O aumento da demanda para esse fim, além de pressionar os sistemas de geração de energia elétrica ainda aumentam as emissões de CO₂. Segundo (DULAC, ABERGEL & DELMASTRO, 2019) as emissões de CO₂ relacionadas ao resfriamento tem expandido de forma acelerada. Nos últimos 30 anos essa emissão triplicou, alcançando valores de 1130 milhões de toneladas. Ademais, no mesmo documento há a previsão de que a utilização de aparelhos de ar condicionado triplicará até 2050. O número aproximado de 1,6 bilhões de aparelhos de ar condicionado verificado no ano de 2018 crescerá para cerca de 5,6 bilhões de aparelhos no ano de 2050. (IEA, 2018a)

Interessantemente, o aumento da temperatura global deverá impactar diretamente no maior consumo de energia final para sistemas de resfriamento (SCHAEFFER *et al.*, 2012). Segundo (DULAC, ABERGEL & DELMASTRO, 2019), essa evidência foi

comprovada no ano de 2018, considerado muito quente em diversas partes do mundo, que apresentou um aumento de 5% de consumo energético comparado ao ano anterior.

Assim, tem se realizado esforços para a utilização de sistemas renováveis de refrigeração. Cada vez mais tem se estudado sistemas que produzem o efeito de resfriamento de forma abundante, eficiente e com menor emissão de gases poluentes. O termo *solar cooling* (refrigeração solar) é amplamente encontrado na literatura (DROSOU, KOSMOPOULOS & PAPADOPOULOS, 2016; XU & WANG, 2018; WU et al., 2020; AGUILAR-JIMÉNEZ et al., 2020; SAIKIA et al., 2020). Este termo está relacionado aos sistemas de refrigeração que operam à energia solar, seja através da conversão solar em energia elétrica ou em energia térmica.

Muitos estudos têm avaliado a inserção de sistemas solares em edifícios públicos como: escolas, universidades e hospitais. Dentre os quais destacam-se: AGUILAR-JIMÉNEZ et al. (2020); PAKSOY et al. (2000); FASFOUS et al. (2013); MALAGUETA, DUTRA & SZKLO (2014); TSOUTSOS et al. (2009).

Uma forma de utilizar a energia solar para aplicação em sistemas de condicionamento é através de um *chiller* de absorção. Os sistemas de refrigeração por absorção são sistemas operados a energia térmica, e podem ser operados conjuntamente a sistemas de aproveitamento da energia solar. Segundo BANU & SUDHARSAN (2018) a tecnologia de refrigeração por absorção operado a energia solar é um sistema apropriado e ecologicamente benéfico de aproveitamento da energia térmica, como também mostra-se um sistema eficiente já que o requerimento da energia para o resfriamento está em fase com a energia térmica obtida através da radiação solar.

Nos últimos anos diversos estudos têm sido elaborados de forma a avaliar e melhorar a performance dos sistemas de refrigeração por absorção. Na literatura são encontradas pesquisas para diferentes configurações do sistema de absorção. Desde sistemas de baixa performance (simples efeito) até sistemas mais complexos e de melhor coeficientes de performance (COP). Dentre esses estudos pode-se citar: EISA, DEVOTTA & HOLLAND (1986); KIM, PARK & LEE (1999); KAITA (2002); SIOUD, BOUROUIS & BELLAGI (2019); AZHAR & SIDDIQUI (2020).

Por sua vez, na literatura, diversos softwares têm sido empregados para as análises termo-energéticas em edificações. Com destaque para a utilização do *software* EnergyPlus. Este programa foi criado pela NREL (*National Renewable Energy*

Laboratory) do Departamento de Energia dos Estados Unidos com o apoio de várias instituições acadêmicas, laboratórios e empresas privadas (BLAIR et al., 2018). Comumente esse software interage com outros dois softwares: o SketchUp, responsável pela modelagem 3D da edificação; e o OpenStudio, *plugin* associado ao SketchUp que permite a introdução e alterações de parâmetros da edificação para a simulação energética. Dentre os trabalhos que utilizaram a interação desses três programas para análises termo-energéticas em edificações, pode-se citar: AL-ZUBAYDI (2013), ARANTES (2012); RUPP (2011), SANDER (2017); ALGHOUL & RIJABO & MASHENA (2017), ZHANG et al. (2020).

Para a modelagem de sistemas com uso de tecnologia renovável, o *software System Advisor Model* (SAM) apresenta grande destaque de aplicação. O SAM é uma ferramenta que permite análise técnica, energética e econômica em projetos de energia renovável com diversas tecnologias (fotovoltaica, térmica, biomassa, aquecimento de água, geotérmica, entre outras). Dentre as pesquisas acadêmicas que utilizaram o SAM, citam-se: MANTILLA (2017), SORIA, SCHAEFFER & SZKLO (2014); GAZOLI et al. (2018); EZEANYA et al. (2018).

Diante da relevância dos estudos sobre sistemas de refrigeração por absorção, modelagem termo-energética em edificações e sistemas de concentração solar, o presente trabalho unirá esses temas numa abordagem energética para um complexo de ensino universitário.

O objetivo geral desse trabalho é propor, dimensionar e avaliar a aplicação de um sistema de condicionamento de ar operado a energia solar térmica em edificações de um Complexo Universitário na cidade de Macaé-RJ. O sistema é composto pela combinação da tecnologia de concentração solar cilindro-parabólico e uma unidade de refrigeração por absorção. Cabe ressaltar que o sistema dispõe de um subsistema para o armazenamento da energia térmica, como também uma fonte de energia auxiliar para o fornecimento de energia nos momentos de ausência de energia térmica de origem solar. A energia auxiliar é comumente utilizada para estabilização da produção de energia e fundamental em sistemas instalados em sítios de médias radiações, como se caracteriza o Campus em Macaé. Esta energia auxiliar advém de queimadores que produzem calor a partir de fontes de origem fóssil (gás natural, GLP, óleo diesel, entre outros) ou queima de biomassa.

Como objetivo específico, visa-se também averiguar qual o melhor sistema de absorção (estágio simples, duplo ou triplo) para calhas parabólicas com diferentes eficiências óticas, instaladas sempre no mesmo sítio.

Vale destacar ainda que no campus de Macaé da UFRJ tem sido desenvolvido, por alunos e professores, o projeto de uma calha parabólica de pequena escala, para uma planta-piloto, com conteúdo local (CARMO, 2016; ALMEIDA, 2018; SANTOS, 2018). A calha parabólica desenvolvida é composta pela discretização da curva parabólica em um conjunto de espelhos planos. Esta discretização propicia uma simplificação do processo de fabricação e uma redução dos custos finais do projeto, porém resulta num sistema com maior perdas óticas, e consequente redução de eficiência. A calha parabólica elaborada no campus UFRJ- Macaé pode ser vista na Figura 1.

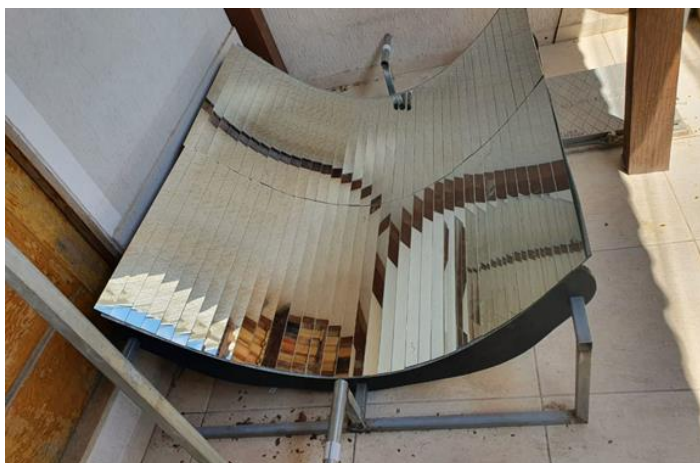


Figura 1: Calha Parabólica desenvolvida no Campus UFRJ- Macaé. Fonte: Elaboração Própria.

Mesmo que se possa aplicar sistemas tecnicamente e economicamente mais maduros para o condicionamento de ar utilizando a energia solar (por exemplo: uma planta fotovoltaica operando juntamente à um *chiller* elétrico), uma planta-piloto para um sistema alternativo de condicionamento solar com tecnologia concentradora cilindro parabólico em Macaé tem, portanto, os benefícios da aprendizagem científico-tecnológica; e também a possibilidade de verificar a aplicação deste tipo de sistema em região com recurso solar direto de média qualidade, em contraposição à sua aplicação que existe atualmente em sítios de alta radiação solar direta (JOSEPH, 2012).

Para tanto, este trabalho segue o procedimento descrito nos tópicos abaixo:

- Apresentar uma abordagem teórica sobre os sistemas de concentração de energia solar com foco na utilização térmica, de forma a apresentar as principais tecnologias de concentração solar.

- Apresentar uma abordagem teórica sobre os sistemas de refrigeração de absorção e suas principais configurações.

- Realizar a modelagem 3D dos edifícios que compõem o Complexo Universitário UFRJ- Macaé;

- Definir a carga térmica de condicionamento de ar para o conforto térmico nesse Complexo Universitário através de um conjunto de softwares de simulação termo-energética;

- Analisar o emprego de três configurações distintas do sistema de refrigeração por absorção aplicados de acordo com a disponibilidade da radiação do local;

- Definir os parâmetros do campo solar e do sistema de armazenamento de energia térmica a serem empregados no sistema de condicionamento;

- Determinar a produção de energia térmica para diferentes casos propostos no estudo;

- Avaliar o equilíbrio entre a demanda e a produção de energia térmica para operar o(s) sistema(s) de absorção;

- Compreender a influência da qualidade de energia a ser entregue pelo campo solar para o funcionamento dos sistemas por absorção;

- Determinar a configuração que demanda a menor necessidade de energia auxiliar em base anual. Assim, verificar a viabilidade técnico-energética da configuração.

A dissertação foi estruturada em cinco capítulos. O presente Capítulo 1 possui caráter introdutório. Nele são apresentados os objetivos gerais e específicos do estudo, como também sua motivação, relevância e contribuição.

O Capítulo 2 é dedicado à fundamentação teórica a respeito do sistema de concentração solar e do sistema de refrigeração. Na seção referente ao sistema de concentração solar, apresenta-se brevemente o recurso solar, cujo detalhamento foge ao escopo desta dissertação, e as principais tecnologias de concentração solar, como também o sistema de armazenamento térmico. Na seção destinada aos sistemas de absorção são

descritos os ciclos de refrigeração por absorção nas diferentes configurações adotadas no presente estudo: simples efeito, duplo efeito e triplo efeito.

O Capítulo 3 refere-se ao detalhamento dos procedimentos metodológicos aplicados no trabalho. Primeiramente, o capítulo apresenta uma seção com a visão geral dos procedimentos adotados para a operação conjunta do sistema de concentração solar e o sistema de refrigeração por absorção. Adiante são definidos separadamente o método do cálculo de carga térmica da edificação e o método para a determinação da energia térmica produzida pelo campo solar. Para isso, são descritos os parâmetros da simulação, as considerações adotadas e os softwares utilizados para cada objetivo. Nesse capítulo também são detalhados os casos a serem estudados.

O capítulo 4 é dedicado à exposição e discussão dos resultados. Neste capítulo são apresentados os resultados da simulação da carga térmica da edificação, dos parâmetros otimizados na simulação do sistema de concentração solar, da energia produzida, área requerida para o projeto e a fração de energia auxiliar requerida para a operação do sistema. Para isso, são apresentados gráficos com a interação da produção e demanda da energia térmica para os casos analisados.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas do estudo, as limitações encontradas e as sugestões para trabalhos futuros.

Após o último capítulo encontra-se a seção pós-textual, com as referências bibliográficas utilizadas nesta dissertação.

2 REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO COM USO DE CONCENTRADOR SOLAR

A primeira seção deste capítulo discute a importância e os benefícios da energia solar. Esta seção também evidencia as principais tecnologias solares e suas aplicações nas mais importantes plantas solares no mundo.

Na segunda seção descreve-se o ciclo termodinâmico de refrigeração por absorção. Nesta dissertação este ciclo é aplicado conjuntamente ao sistema de concentração solar. Primeiramente, realiza-se uma abordagem dos principais elementos do ciclo de absorção, de forma a expor sua constituição, seu funcionamento e a sua finalidade. Em seguida, são apresentadas as principais substâncias utilizadas neste ciclo, como também as suas características. Por fim, são descritas distintas configurações do ciclo de absorção (simples, duplo e triplo efeito).

2.1 Concentradores de Energia Solar

2.1.1 Recurso Solar e Tecnologias Solares

Segundo PEREIRA *et al.* (2017) a energia solar é uma das fontes de energia mais promissoras diante dos desafios do milênio. Isso devido a sua ampla aplicação em diferentes campos, seja em processos térmicos, dinâmicos ou químicos.

O Sol fornece energia através de radiação eletromagnética. Pela distância que há entre o Sol e a Terra somente uma pequena parcela dessa radiação atinge a superfície terrestre. A Irradiância Solar que chega ao topo da atmosfera é chamada de “Irradiância Extraterrestre”. Essa irradiância fora da atmosfera sofre variação de acordo com a distância entre o sol e a Terra, podendo variar de 1.322 W/m^2 a 1.412 W/m^2 . (PINHO & GALDINO, 2014)

A Figura 2 apresenta a variação da Irradiância Solar Extraterrestre ao longo do ano. Nela observa-se que o valor máximo ocorre a uma data próxima do solstício de verão e o valor mínimo ao solstício de inverno, ambos considerando o hemisfério sul.

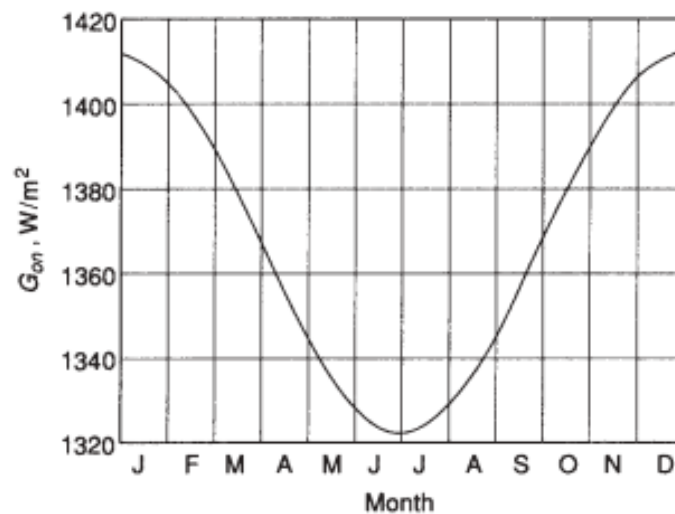


Figura 2: Variação da Irradiância Solar Extraterrestre ao longo do ano.

Fonte: DUFFIE & BECKMAN (2013)

Após passar pelo topo da atmosfera a radiação ainda sofre variações no seu valor. Durante seu trajeto na atmosfera a radiação sofre processos de absorção e reflexão. Os processos de absorção estão relacionados principalmente a interação da radiação com moléculas de ozônio, vapor de água, oxigênio e dióxido de carbono. A reflexão está ligada intimamente às nuvens, superfície de gelo e a superfície terrestre. O valor da irradiância que chega à superfície terrestre é aproximadamente 1000 W/m^2 quando verificado ao meio dia numa boa condição climática. (TORRES, 2012)

A Figura 3 apresenta os componentes da Irradiância Solar. Como antes citado, a Irradiância Extraterrestre (G_0) está relacionada à radiação no topo da atmosfera. Após a passagem pelo topo da atmosfera, a radiação pode ou não sofrer espalhamento na atmosfera. Quando a radiação vinda do sol sofre dispersão na atmosfera esta é denominada: radiação difusa. A taxa da radiação difusa por unidade de área (W/m^2) denomina-se Irradiância Difusa (G_{dif}). Quando a radiação solar não sofre dispersão na atmosfera esta é denominada: radiação direta. A taxa energética por unidade de área deste componente da radiação pode ser classificada em: Irradiância Direta Horizontal (G_{dir}) ou Irradiância Direta Normal (G_n). A Irradiância Direta Normal também chamada de DNI é um componente importante da radiação para a operação de concentradores solares. O último integrante da radiação é a Irradiância Solar Total ou Irradiância Global Horizontal (G) que corresponde à soma das parcelas das radiações difusa e direta. Por fim, observa-

se também na figura o componente “albedo”, este está relacionado à parte da radiação que é refletida por uma superfície ou um corpo. (DUFFIE & BECKMAN, 2013)

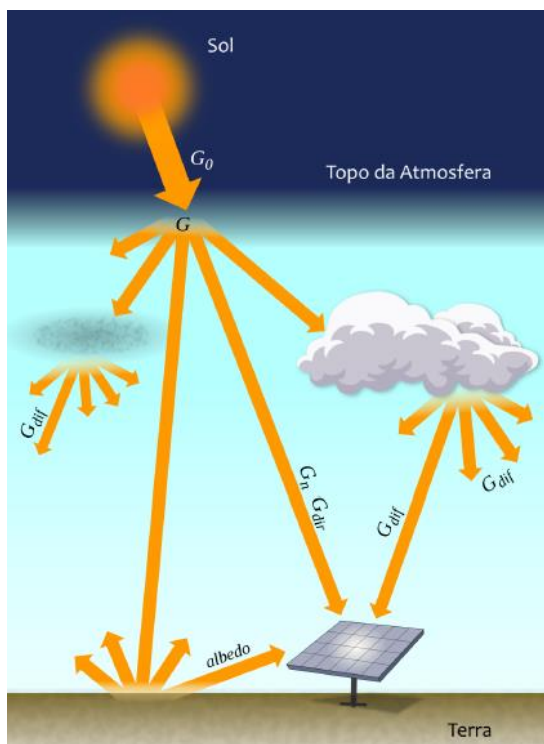


Figura 3: Componentes da irradiância solar. Fonte:(PEREIRA et al., 2017)
 Nota: Irradiância Extraterrestre (G_0), Irradiância Difusa (G_{dif}), Irradiância Direta Horizontal (G_{dir}), Irradiância Direta Normal (G_n).

A Figura 4 apresenta um mapa com a Irradiação Direta no Brasil. Diferente da irradiância que é a taxa de energia (W) por unidade de área (m^2), a irradiação é a irradiância integrada num intervalo de tempo e sua unidade é o Wh/m^2 . O Brasil é um país com alto potencial de radiação solar, como observado no mapa a região nordeste apresenta altos valores de Irradiação Direta, principalmente no oeste da Bahia com média aproximada de $6,0 Wh/m^2$. Segundo TORRES (2012) essa região apresenta alto valor de Irradiação Direta devido ao clima semiárido, com baixa presença de chuvas e a menor média de área de nuvens em todo o Brasil. Em contrapartida, a região norte mesmo próxima da Linha do Equador apresenta características geográficas e climáticas que diminuem a incidência desse tipo de radiação. Por fim, observa-se que algumas áreas no Centro-Oeste e no oeste da Paraíba e Rio Grande do Norte apresentam bons valores de Irradiação Direta e se colocam como lugares com grande potencial para instalação dos concentradores solares.

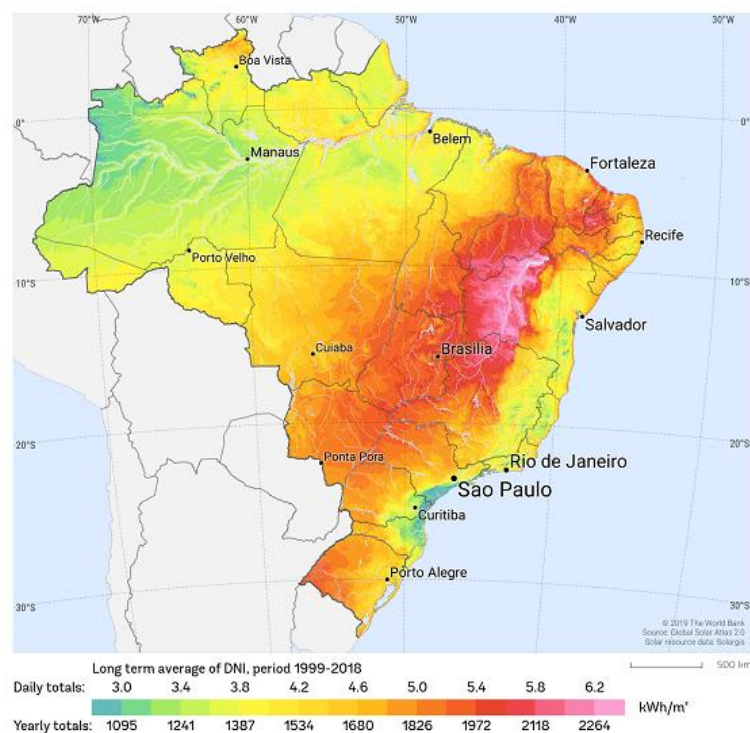


Figura 4: Mapa Irradiação Direta no Brasil. Fonte: (SOLARGIS, 2019)

A Figura 5 apresenta o mapa de Irradiação Direta no mundo. Nela pode-se observar algumas regiões com grandes valores de irradiação, com destaque para o sudoeste dos Estados Unidos, Chile, Austrália, Sul da África, parte do Oriente Médio e sudoeste da China.

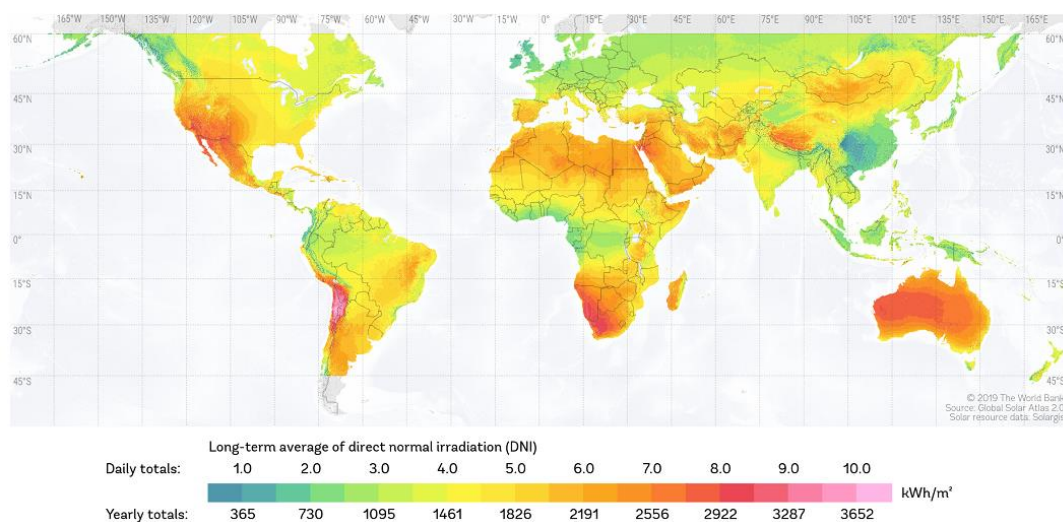


Figura 5: Mapa Irradiação Direta no Mundo. Fonte: (SOLARGIS, 2019)

O aproveitamento do recurso solar pode ser realizado basicamente de três formas: (EKOS BRASIL, 2010)

- Fotovoltaica: conversão direta de energia solar em elétrica.
- Térmica: utilização da energia solar para aquecimento de água, plantas de dessalinização, secagem de grãos, climatização de ambientes, geração de energia elétrica, entre outros.
- Bioclimática: integração da energia solar a fachadas de prédio e residência (arquitetura solar).

A Figura 6 apresenta um esquema com as possíveis aplicações da energia solar.

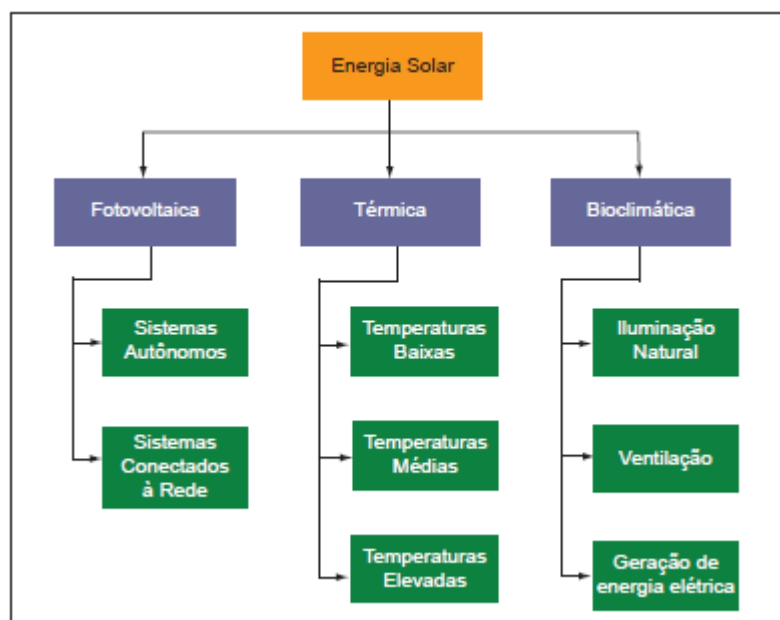


Figura 6: Fluxograma da aplicação da energia solar. Fonte: EKOS BRASIL (2010)

Na utilização da energia para fins térmicos há uma faixa de temperatura de trabalho que está relacionada com a tecnologia de aproveitamento solar aplicada. Em muitas aplicações é necessário o fornecimento de energia em temperaturas elevadas, as quais não podem ser alcançadas por coletores planos. Para o fornecimento de energia térmica em altas temperaturas torna-se necessário diminuir as áreas de perda de calor. Uma forma de alcançar essas temperaturas é a colocação de um dispositivo ótico entre a fonte de energia e a superfície de absorção. (DUFFIE & BECKMAN, 2013)

As tecnologias que utilizam esse princípio de concentração dos raios solares em um receptor através da reflexão em espelhos são denominadas: concentradores solares.

Os principais concentradores solares são: cilíndrico parabólico, refletor linear Fresnel, disco parabólico e torre central. A Figura 7 apresenta diversas tecnologias solares de acordo com a temperatura de operação.

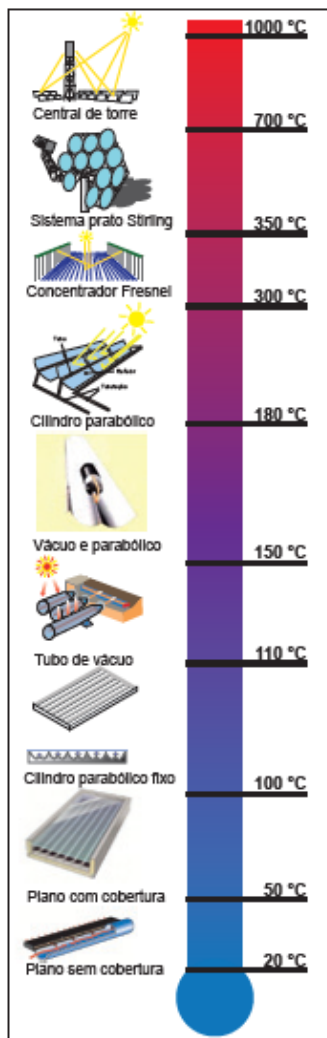


Figura 7: Temperatura de trabalho das tecnologias solares.

Fonte: EKOS BRASIL (2010)

Segundo ITP (2018) os concentradores solares são uma tecnologia relativamente madura comercialmente, conquanto apresentem uma capacidade total instalada inferior a outras tecnologias como a fotovoltaica e a eólica. Segundo IEA (2018b), no ano de 2017 houve um crescimento de capacidade instalada de energia renovável em 178 GW. Enquanto a capacidade fotovoltaica apresentou um aumento de 97GW e a capacidade eólica de 44 GW, a capacidade de energia solar concentrada cresceu apenas 0,1 GW (IEA, 2018b). Porém com as questões políticas sobre as mudanças climáticas e redução da

utilização de combustíveis fósseis, há uma perspectiva de crescimento da utilização de sistemas de concentração solar. Essa perspectiva de crescimento também se baseia: na redução dos custos gerais da tecnologia, no aumento da maturidade e aceitação da tecnologia de concentração e um menor custo para o armazenamento de energia de térmica (ITP, 2018).

Segundo IEA (2010), por ser a tecnologia concentradora uma chave importante para a mitigação das mudanças climáticas, deve-se criar um plano de ações que auxiliem governos, indústrias, organizações não-governamentais, entre outros atores na inserção e desenvolvimento dessa tecnologia. Para alcançar tal objetivo, IEA (2010) propõe que os governos estabeleçam um ambiente favorável para a implementação e desenvolvimento da tecnologia, para isso deve: criar incentivos para produtores, simplificar procedimentos burocráticos, oferecer terras, desenvolver projetos de aproveitamento do calor além da produção de energia elétrica, entre outros. Para as indústrias, cabe principalmente buscar potenciais reduções de custo e incentivar a busca por inovações nos elementos constituintes do sistema (espelhos, receptores, fluido, etc.). Às organizações não-governamentais cabe auxiliar na aceitação pública dos projetos dos concentradores, de forma a avaliar suas vantagens e desvantagens.

O sistemas de concentração de energia solar apresentam algumas vantagens e desvantagens em relação a outras tecnologias. Segundo KALOGIROU (2009) as principais vantagens do sistema são:

- maior eficiência termodinâmica por permitir maiores temperaturas no fluido de trabalho;
- maior eficiência térmica referente à menor área de perda de calor;
- por requerer menos material nas superfícies refletores quando comparado ao coletor plano, esse sistema apresenta menor custo por área de superfície coletora.

As principais desvantagens das tecnologias de concentração de energia solar são (KALOGIROU, 2009):

- pouca coleta de radiação difusa;
- necessidade de sistemas de rastreamento para que o coletor esteja na posição ótima em relação ao sol.

- ao longo de sua vida útil os espelhos podem perder sua capacidade de reflexão, e requerem limpeza e manutenção periódicas.

Cada tipo de tecnologia concentradora solar possui suas características individuais de operação, porém alguns elementos são as bases do seu funcionamento. ITP (2018) lista alguns subsistemas chaves que compõem o sistema de concentração solar:

- campo de espelhos, os quais refletem a radiação para um ponto focal de absorção;
- receptor, instalado na linha de foco dos espelhos é o local por onde o fluido de trabalho circula.
- fluido de trabalho, tem como função retirar o calor no receptor e transportá-lo para o tanque de armazenamento ou para o ciclo termodinâmico.
- sistema de armazenamento térmico, permite o despacho controlado da energia térmica.
- o bloco de utilização, local onde a energia térmica será despachada.

A seguir são descritas as principais tecnologias de concentração de energia solar. Estas tecnologias podem ser aplicadas para a produção de energia elétrica ou energia térmica. Nesta seção são apresentados os seguintes tipos: refletor linear Fresnel, disco parabólico e torre central. A tecnologia de coletor cilindro parabólico será apresentada separadamente na seção 2.1.2 por ser o tipo aplicado ao projeto deste trabalho.

- Refletor Linear Fresnel

Como mostrado na Figura 8, o refletor linear Fresnel é composto basicamente por um absorvedor e um conjunto de espelhos refletores. Os refletores se localizam na base e refletem os raios para o absorvedor. Neste sistema, o absorvedor é instalado numa estrutura fixa e somente os espelhos alteram sua posição de acordo com a posição ótima em relação ao sol. (CASTRO, 2016)

Os espelhos utilizados são planos ou possuem uma pequena curvatura. Estes são localizados há alguns metros do receptor que opera com um fluido de trabalho que receberá o calor proveniente do sol. Quando comparada às outras tecnologias, esta se identifica como uma estrutura mais simples principalmente pelo formato dos espelhos e pelo receptor fixo. (SILVESTRE, 2016)

A principal vantagem do sistema Fresnel está no fato de requerer menor custo de investimento. Seu *design* mais simples (antes citado) além de apresentar menor custo facilita a geração direta de vapor (IEA, 2010). Uma desvantagem relacionada à tecnologia Fresnel é o sombreamento entre refletores adjacentes que podem diminuir a eficiência do sistema. Para amenizar esse efeito deve-se aumentar o espaçamento entre os refletores (o que acarreta um aumento da área de instalação dos espelhos) ou aumentar a altura da torre de absorção (o que ocasiona um aumento dos custos) (KALOGIROU, 2009). Segundo ITP (2018) as vantagens de possuir um *design* mais simples e de menor custo superam a desvantagem de possuir menor eficiência.

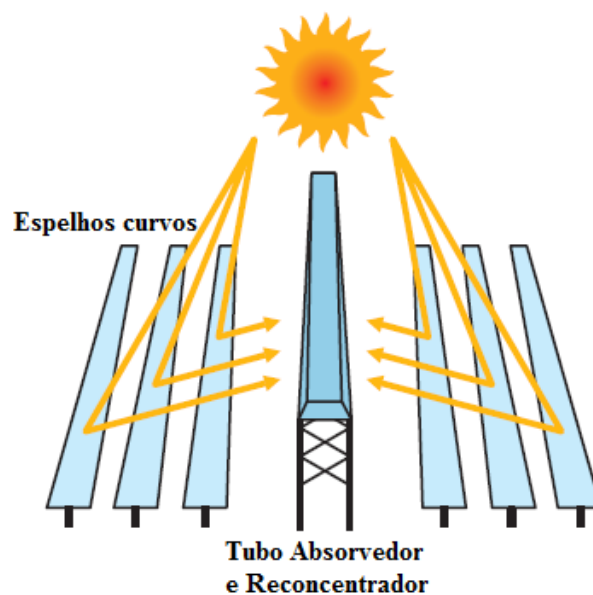


Figura 8: Refletor Linear Fresnel. Fonte: IEA (2010) Adaptado

A Figura 9 apresenta uma planta solar que utiliza a tecnologia de refletor linear Fresnel. Esta planta está localizada no distrito de Jaisalmer, no Rajastão-Índia. Esta usina pertence à *Reliance Power* e é considerada um dos projetos mais avançados em tecnologia Fresnel do mundo. Ela possui uma capacidade instalada de 125 MWe.



Figura 9: Planta Solar Fresnel na Índia. Fonte: HELIOCSP (2018)

- Concentrador Disco Parabólico

Como demonstrada na Figura 10, esta tecnologia é constituída por um disco parabólico que opera com foco pontual, ou seja, os espelhos refletem todos os raios incidentes para um mesmo ponto. Os raios concentrados aquecem o fluido de trabalho. A energia térmica contida no fluido pode ser utilizada diretamente por um motor (geralmente *Stirling*) acoplado a um gerador para fornecimento de energia elétrica, ou pode ser utilizada em um outro sistema de aproveitamento térmico. (KALOGIROU, 2009)

Essa tecnologia possui uma estrutura de rastreamento em dois eixos, com isso posiciona sua abertura total em posição ótima em relação ao sol durante todo momento. O concentrador Disco Parabólico fornece a melhor eficiência de todos os concentradores solares. A temperatura operacional pode superar os 1000°C (mesma temperatura alcançada por torres solares). (ITP, 2018)

O Disco Parabólico tem a versatilidade de operar de forma independente, cada disco apresenta capacidade entre 5 kWe e 25 kWe. Esta é uma tecnologia apropriada para operação em sistema isolados. (ANEEL, 2005)

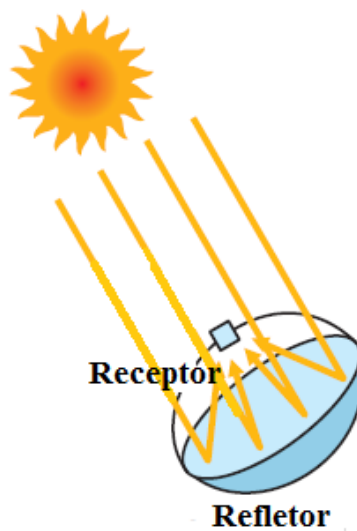


Figura 10: Concentrador Disco Parabólico. Fonte: IEA (2010) Adaptado

A Figura 11 apresenta uma planta solar de discos parabólicos no Arizona, Estados Unidos da América desenvolvida pela Tessera Solar. Segundo a *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) o status da planta hoje é não operacional, porém a planta possuía 60 Discos Stirling da tecnologia *SunCatcher* com capacidade de 1,5 MWe. Cada disco tinha a capacidade de produção de 25 quilowatts-elétrico (kWe). (TESSESRA SOLAR, 2019)



Figura 11: Planta Solar Disco Parabólico nos Estados Unidos. Fonte: TESSERA SOLAR (2019)

- Torre Central

A Torre Solar Central é uma tecnologia solar composta por heliostatos (conjunto de espelhos planos ou levemente curvos) que focam os raios do sol em um ponto fixo que se localiza no topo de uma torre (ver Figura 12). Igualmente ao Disco Parabólico, esse sistema possui rastreamento em dois eixos. O calor entregue ao receptor pode fazer com que o fluido de trabalho alcance temperaturas acima de 1000 °C. (SILVESTRE, 2016)

Segundo IRENA (2013) as plantas de Torre Central por operarem a altas temperaturas apresentam vantagens consideráveis sobre as outras tecnologias de concentração solar. A longo prazo, essa tecnologia poderá apresentar a eletricidade mais barata entre os concentradores solares, mas para isso é necessário mais experiência comercial.

Geralmente, cada heliostato em unidade receptora possui uma área entre 50 m² e 150 m² com 4 espelhos por pilar. (KALOGIROU, 2009)

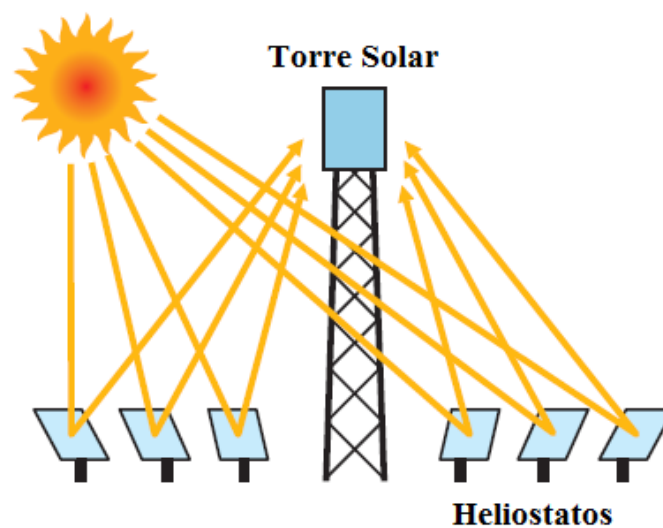


Figura 12: Torre Solar. Fonte: IEA (2010) Adaptado

A Figura 13 apresenta uma planta de Torre Solar *Ivanpah Solar Electric Generating System* (ISEGS) que se localiza na Califórnia, Estados Unidos da América. Esta usina possui uma capacidade de 392 MWe e ocupa uma área de 14,2 km². A planta solar apresenta três torres e possui instalados 173.500 heliostatos, com dois espelhos em cada. (BRIGHT SOURCE, 2010)



Figura 13: Planta de Torre Solar nos Estados Unidos. Fonte: BRIGHT SOURCE (2010)

2.1.2 Tecnologia Solar Cilindro Parabólico

As primeiras usinas solares térmicas com a tecnologia cilindro parabólico foram desenvolvidas no EUA no ano de 1906 com composição muito semelhante às das atuais. Porém, os problemas técnicos e os materiais que compunham o sistema inviabilizaram a produção de energia elétrica em grande escala (DGS, 2005). Somente na década de 1960 que os Estados Unidos criaram uma base para o desenvolvimento dessa tecnologia. Anos depois com a crise de petróleo e com a elevação do preço da energia elétrica, com incentivo fiscal, isenção de impostos para usinas solares, entre outros, que os projetos começaram a ser financeiramente atrativos (DGS, 2005). Em 1984, entrou em operação comercial a primeira usina utilizando a tecnologia solar cilindro parabólico. A partir desse ano, os Estados Unidos experimentaram um crescimento no uso dessa tecnologia (DGS, 2005).

A tecnologia de concentração solar cilindro parabólico consiste em um espelho côncavo de formato parabólico que foca os raios solares em um receptor. Neste tubo receptor passa um fluido (fluido de transferência térmica) que deve possuir ótimas características térmicas como: alta condutividade térmica, estabilidade térmica e alto calor específico. Este fluido pode ser um óleo, água pressurizada, sais fundidos, entre outros. Ele tem como função o acionamento do ciclo termodinâmico. Após a transferência de calor para o ciclo ele retorna para o campo solar num sistema fechado. (SILVESTRE, 2016)

A Figura 14 apresenta um sistema de concentradores cilindro parabólico com a conexão de vários espelhos côncavos em fileira.



Figura 14: Tecnologia de Concentrador Solar Cilindro Parabólico. Fonte: IRENA (2013)

A geometria e a composição da calha parabólica é um fator fundamental para a eficiência da tecnologia. Os parâmetros observados na Figura 15 são utilizados para descrição da calha, os quais são: comprimento da calha, distância focal, abertura da calha e ângulo do aro (ângulo entre o eixo óptico e a linha que liga a borda do espelho com o ponto focal). (GÜNTHER, 2011)

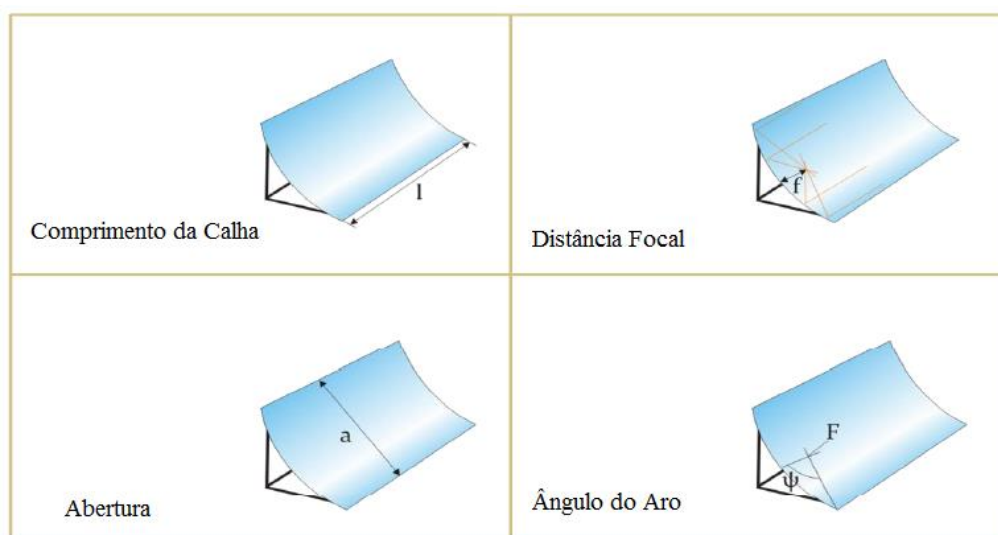


Figura 15: Parâmetros Geométricos da Calha Parabólica. Fonte: GÜNTHER (2011) Adaptado

A “área de concentração solar” é um termo importante nos estudos de plantas solares que utilizam cilindros parabólicos. Como visto na Figura 16, essa área de

concentração corresponde a superfície delimitada pela abertura dos espelhos e o seu comprimento. Pela figura pode-se notar que a área de concentração não corresponde à área real da superfícies dos espelhos, mas sim à área da superfície que é perpendicular aos raios incidentes. (GAZOLI *et al.*, 2018)

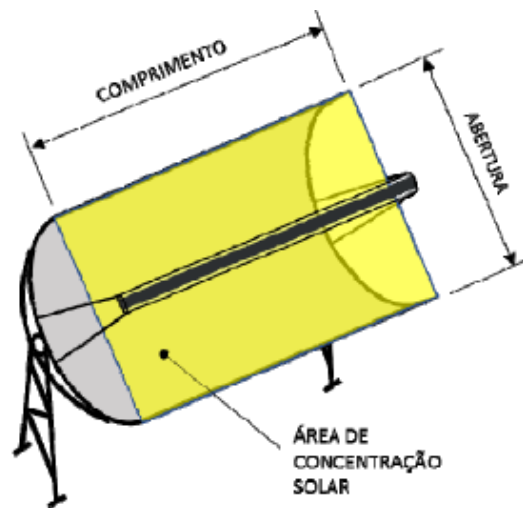


Figura 16: Área de concentração solar de um concentrador cilindro-parabólico.

Fonte: GAZOLI *et al.* (2018)

Visto que o concentrador solar cilindro parabólico aproveita a radiação solar direta, torna-se necessário aplicar um sistema de rastreamento solar que permita a sua rotação. A posição ótima do concentrador é quando o plano de simetria (ver Figura 17) se encontra paralelo à radiação normal direta. Os sistemas de rastreamento do cilindro parabólico são de apenas um eixo pois a concentração dos raios solares é linear. Em sistemas onde a concentração é pontual faz-se necessário um rastreamento em dois eixos. A orientação do eixo mais utilizada para a tecnologia cilindro parabólico é o alinhamento Norte-Sul com rastreamento Leste-Oeste. (GÜNTHER, 2011)

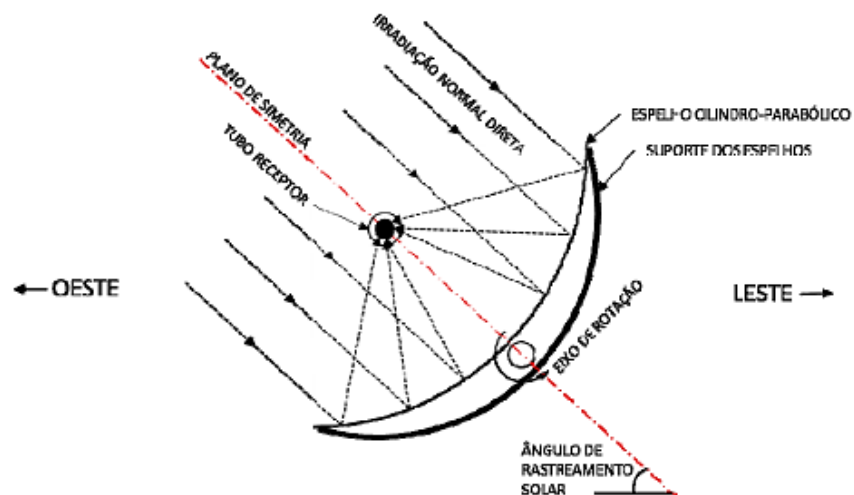


Figura 17: Alinhamento dos concentradores cilindro-parabólicos em relação à irradiação solar direta.

Fonte: GAZOLI et al. (2018)

A Figura 18 apresenta o custo total de instalação das plantas CSP para a produção de energia elétrica por tecnologia e horas de armazenamento de 2010-2018. Ressalta-se aqui, como será detalhado mais à frente, que os dados se referem a plantas de geração de eletricidade, portanto incluem custos do bloco de potência e são otimizados em seu par campo solar-armazenamento para o despacho elétrico.

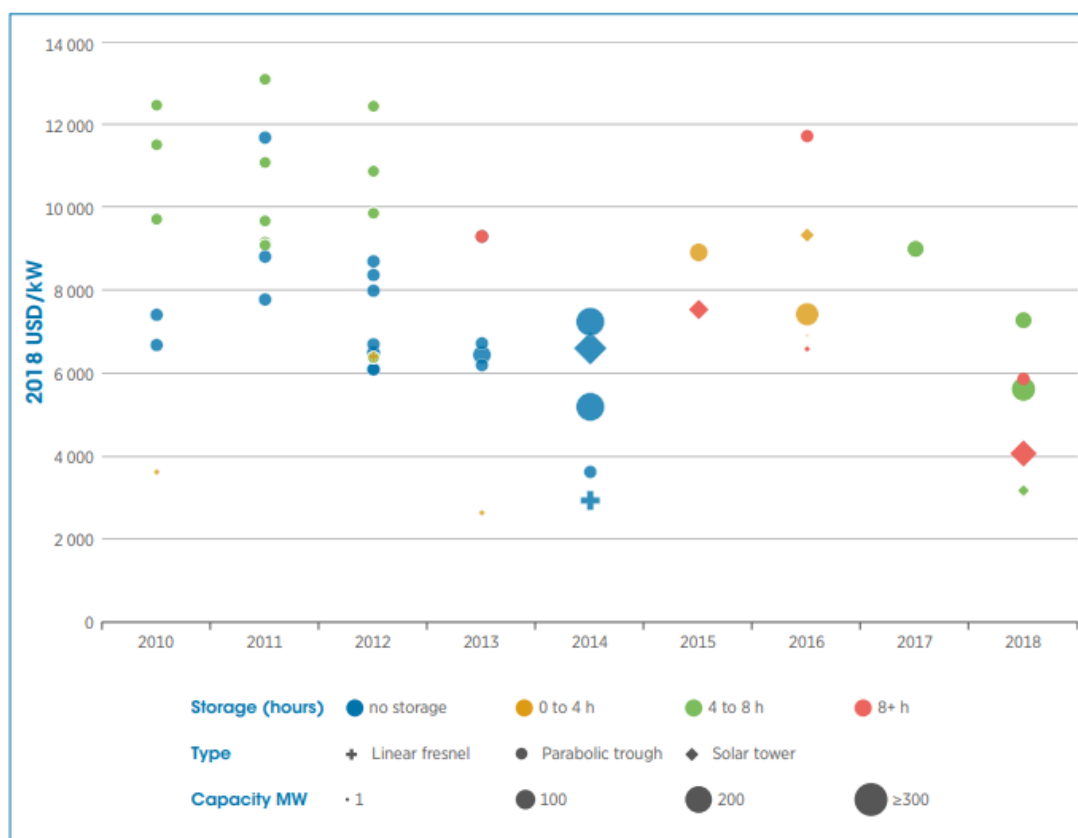


Figura 18: Custo total das plantas de CSP instaladas por tecnologia e duração de armazenamento 2010-2018. Fonte: IRENA (2019b)

Assim, segundo IRENA (2019b), o custo de capital de plantas de concentração solar para geração elétrica diminuiu da faixa de USD 6 100–13 100/kW em 2010–2012, para a faixa de USD 3 200–7 300/kW em 2018. A partir de 2013 verifica-se a instalação de plantas com maiores períodos de armazenamento (superiores a 8 horas). Finalmente, identifica-se que na última década predominou a construção de plantas solares com a tecnologia cilindro parabólico. Desde 2014 não houve instalação de plantas com a tecnologia Fresnel para geração elétrica.

Não obstante, como antes ressaltado, os dados discutidos acima incluem custos que não estariam presentes na planta com foco em geração de energia térmica. Neste sentido, a Figura 19 apresenta a ordem de grandeza da participação no custo de capital de cada parte do sistema de concentração solar cilindro-parabólico para uma planta com capacidade de 100 MW elétricos (FITCHNER, 2010). Salvaguardadas as diferenças e simplificações, em ordem de grandeza, considerando o custo total de uma planta cilindro-parabólico USD 7 300/kW, e que a planta concentradora solar para fins térmicos não

utiliza o bloco de potência (estimado em 17% do custo total), a estimativa para o custo para uma planta CST ficaria na faixa de USD 6000/kW.



Figura 19: Custo por partes do sistema CSP de uma planta de 100MW. Fonte: Adaptado de FITCHNER (2010)

2.1.3 Armazenamento Térmico

O sistema de armazenamento de energia térmica quando aplicado ao sistemas de concentração de energia solar, permite manter a operação da máquina térmica mesmo na ausência do recurso solar requerido pelo sistema CSP. O sistema de armazenamento armazena a energia térmica produzida em momentos de boas radiações em um fluido térmico que ficará estocado em um tanque. A energia térmica armazenada pode ser liberada de acordo com a demanda em circunstâncias de ausência de radiação solar adequada à planta CSP. Esse armazenamento melhora o fator de capacidade da planta e, se otimizado, sua competitividade econômica. Todavia, a inserção desses sistemas gera custos. Estes custos estão relacionados diretamente aos equipamentos para o armazenamento e indiretamente à necessidade de superdimensionamento da planta (campo solar), em relação a sua capacidade nominal. O campo solar superdimensionado, resulta num aumento de coletores, espelhos, equipamentos auxiliares e na necessidade de uma área de aplicação maior. (IRENA, 2013)

A Figura 20 apresenta um esquema proposto por GEYER (2007) onde é demonstrado um sistema que opera com armazenamento e utilização de energia auxiliar. Nas horas onde há radiações altas e o sistema de concentração solar produz energia

excedente, ela é armazenada para os momentos onde o sistema não pode suprir a demanda energética. Ao fim da utilização da energia térmica armazenada, torna-se necessário utilizar uma outra fonte (não solar) que supra o requerimento energético para que o sistema opere na potência desejada.

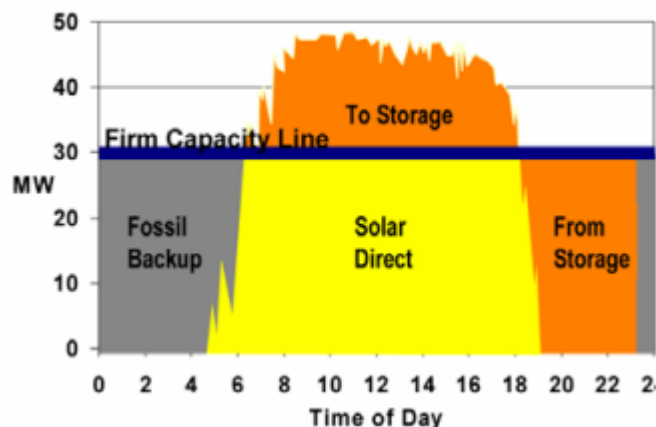


Figura 20: Armazenamento e hibridização numa planta solar. Fonte: GEYER (2007)

Em muitos sistemas, principalmente em lugares de baixa radiação, são utilizados subsistemas de energia auxiliar para que se possa prolongar a operação. Porém em muitas usinas há regras de limitação para uso da energia auxiliar de origem fóssil. Por exemplo, Segundo GEYER (2007) a usina de *Nevada Solar One* não pode usar gás com a finalidade de produção de energia, apenas para proteção contra ações de congelamento do fluido de armazenamento.

Nas áreas que apresentam baixa Radiação Direta Normal (DNI) a utilização de um combustível auxiliar junto ao sistema de armazenamento garante que a planta opere a sua capacidade com custos menores do que se dependesse apenas do campo solar e da energia armazenada. (IEA, 2010)

Segundo SATTLER *et al.* (2011) os tipos de armazenamento térmico podem ser classificados em quatro grupos principais:

- Sistemas de armazenamento de energia térmica de calor sensível: neste caso, a substância de armazenamento não sofre mudança de fase. O calor absorvido ou liberado é resultado da mudança de temperatura do material.

- Sistemas de armazenamento de energia térmica de calor latente: nesse caso há mudança de fase da substância de armazenamento. Basicamente há a possibilidade de três mudanças de fases: sólido-sólido, líquido-sólido e líquido-vapor. Essa se apresenta como uma das formas mais eficientes de armazenar energia.

- Acumulador de Vapor: são vasos de pressão com água quente que se alimentam de vapor e podem garantir a temperatura e pressão adequada para operação.

- Sistema de armazenamento termoquímico: a energia é armazenada através de adsorção ou reação química reversível.

Os sistemas de armazenamento de calor sensível em unidades de concentração de energia solar podem ser integrados de duas formas: (MANTILLA, 2017)

- Direta: o próprio fluido de transferência armazena o calor e flui através de dois tanques: um tanque frio e outro quente. Os tanques fazem o gerenciamento dos fluidos que entram ou saem do bloco de potência. O fluido que estava no tanque frio flui para o campo solar armazena energia térmica e se dirige para o tanque quente onde poderá ser despachado conforme a necessidade do bloco de potência. Ver Figura 21.

- Indireta: O fluido de transferência não é utilizado para o armazenamento, com isso há a presença de outra substância que irá trocar calor através de um trocador de calor e assim armazenar a energia térmica. Ou seja, a energia térmica é armazenada num sistema fechado ao sistema principal. Ver Figura 22.

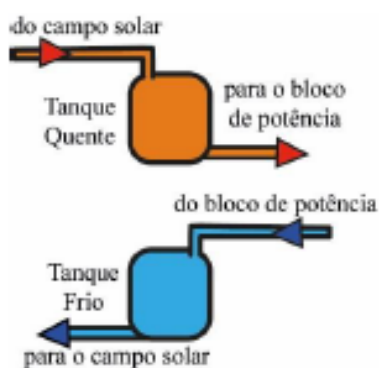


Figura 21: Simplificação de um sistema de armazenamento direto. Fonte: Mantilla (2017)

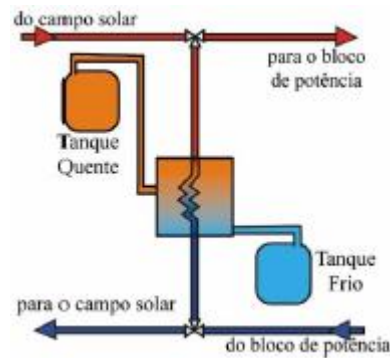


Figura 22: Simplificação de um sistema de armazenamento indireto. Fonte: Mantilla (2017)

Após a descrição do sistema de concentração solar, a próxima seção descreve diferentes tipos de sistema de refrigeração por absorção, cujo aporte de energia principal virá da transferência de calor de plantas CSP, configurando uma opção de refrigeração solar.

2.2 Sistema de Refrigeração por Absorção

2.2.1 Descrição do Sistema por Absorção

O ciclo de refrigeração por absorção é um ciclo constituído basicamente por: gerador, bomba, válvulas de expansão (ou redutoras de pressão), condensador, absorvedor e evaporador. Diferente do sistema de compressão de vapor que é considerado um ciclo operado a trabalho, o ciclo de absorção é um ciclo operado a calor. Enquanto o sistema por compressão de vapor utiliza o trabalho de um compressor para a elevação da pressão do fluido e sua circulação no ciclo, o sistema por absorção é acionado através de uma fonte de calor para a vaporização do refrigerante a alta pressão. No sistema de absorção há a presença de um equipamento para o aumento da pressão: a bomba. Porém o trabalho requerido pela bomba para uma taxa de refrigeração não é significativo, quando comparado ao trabalho requerido pelo sistema por compressão de vapor para mesma taxa de refrigeração. O principal aporte energético do sistema por absorção é o calor requerido pelo gerador (STOECKER & JONES, 1985).

Assim, o ciclo de absorção opera com um par de substâncias: o refrigerante e o absorvente. O primeiro é responsável por retirar o calor do meio a ser refrigerado no

evaporador e o segundo tem como função absorver este vapor de refrigerante vindo do evaporador (GUIMARÃES, 2011). Diversos pares podem ser utilizados, como mostra a Tabela 1. Os pares mais utilizados nos sistemas de refrigeração são: água - brometo de lítio (H_2O -LiBr) e água-amônia (H_2O - NH_3) (NOBERTO, 2018).

Tabela 1: Pares Refrigerante- Absorvente

Absorvente	Refrigerante
Água	Amônia, metil amina ou outras aminas alifáticas
Solução de água e brometo de lítio	Água
Solução cloreto de lítio e metanol	Metanol
Ácido sulfúrico	Água
Hidróxido de sódio ou potássio	Água
Nitrato de lítio	Amônia
Sulfocianeto de amônia	Amônia
Tetracloroetano	Cloreto de etila
Dimetil eter tetraetileno glicol	Cloreto de metileno
Óleo de parafina	Tolueno ou pentano
Glicol etílico	Metil amina
Éter dimetílico ou glicol tetraetílico	Monofluor dicloro metano

Fonte: Pohlman (1979), Sresnewsky (1983) *apud* ABREU (1999)

Segundo ASHRAE (2001) os pares de fluidos de trabalho devem possuir algumas características para sua aplicabilidade nos sistemas de absorção, dentre as quais pode-se destacar:

- O par não deve formar sólidos numa determinada faixa de temperatura e composição, pois a cristalização pode bloquear o fluxo no equipamento.
- O refrigerante deve ser mais volátil para que a separação entre eles ocorra de modo mais facilitado.

- O absorvente e o refrigerante devem possuir alta afinidade nas condições em que ocorre a absorção, pois deste modo há menor requerimento da quantidade de absorvente.
- A pressão que é determinada pelas propriedades do fluido deve ser moderada, porquanto baixas pressões requerem equipamentos mais volumosos, e altas pressões requerem equipamentos mais espessos e resistentes.
- Devido às condições severas em que os fluidos são submetidos, estes devem apresentar alta estabilidade química.
- Os fluidos não devem apresentar alto poder corrosivo, toxicidade ou inflamabilidade. Nestes casos deve-se aplicar critérios rígidos de segurança.
- Viscosidade, tensão superficial, difusividade térmica, difusividade mássica são importantes características para o par absorvente- refrigerante.
- O refrigerante deve possuir alto valor de calor latente para que a taxa de circulação do par possa ser minimizada.
- O par não pode ter um alto impacto para o aquecimento global e a destruição da camada de ozônio.

A Figura 23 apresenta um esquema básico de um ciclo simples de refrigeração por absorção. Quando uma fonte de calor é inserida no gerador há a separação do refrigerante e do absorvente. O vapor refrigerante segue para o condensador onde será resfriado de forma controlada por meio de ar ou água em um trocador de calor (processo 1-2). Desta forma o refrigerante retornará a fase líquida para posteriormente sofrer quedas de pressão e temperatura pela válvula de expansão (processo 2-3). Após esse processo, o refrigerante sai do nível de alta pressão do condensador para o nível de baixa pressão do evaporador. Ao chegar no evaporador, o refrigerante a baixa pressão e temperatura retira calor do meio a ser refrigerado (processo 3-4) e evapora-se na temperatura do evaporador. Quando o refrigerante chega ao absorvedor ele é então absorvido pela solução líquida de baixa concentração de refrigerante (solução absorvente). Esta solução pobre em refrigerante vem diretamente do gerador após passar por uma válvula redutora de pressão (processo 7-8). O processo no absorvedor deve ser resfriado a ar ou água, pois caso fosse realizado adiabaticamente ocorreria um aumento de temperatura da solução podendo interromper a

absorção do vapor— reação exotérmica (STOECKER & JONES, 1985). Após a absorção, a mistura é levada pela bomba do absorvedor para o gerador, onde tem sua pressão aumentada (processo 5-6). Ao chegar no gerador todo ciclo se repete.

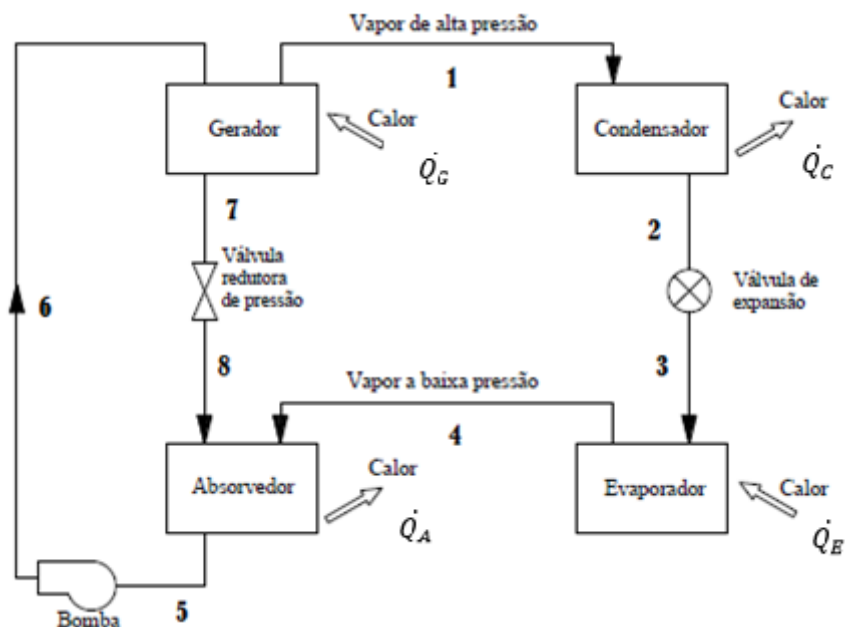


Figura 23: Unidade de Absorção Básica. Fonte: STOECKER & JONES(1985) Adaptado

Como observado na Figura 23, podem ser identificadas duas entradas e duas saídas de energia térmica no ciclo de absorção (a energia consumida pela bomba foi considerada desprezível). As saídas estão relacionadas às taxas energéticas no condensador ($\dot{Q}_C$) e no absorvedor ($\dot{Q}_A$). As entradas estão relacionadas às taxas energéticas no evaporador ($\dot{Q}_E$) e no gerador ($\dot{Q}_G$). O calor no condensador é retirado de meio controlado por água ou ar numa taxa $\dot{Q}_C$. De modo análogo, o calor no absorvedor é retirado por meio de água ou ar numa taxa $\dot{Q}_A$. A potência térmica requerida no evaporador ($\dot{Q}_E$) refere-se à quantidade de calor por unidade tempo que deve ser retirada do ambiente a ser refrigerado de forma a mantê-lo a uma determinada temperatura. A determinação correta dessa carga térmica é fundamental para um bom funcionamento dos componentes do sistema e para a preservação da vida útil dos equipamentos. A potência térmica do gerador ($\dot{Q}_G$) está relacionada à quantidade de energia térmica por unidade de tempo a ser entregue ao sistema, esta é a energia de acionamento do processo. Esta energia térmica pode ser obtida por diversos meios, como: energia solar (caso da presente dissertação), cogeração, queima de biomassa, queima do gás natural, aproveitamento de calor rejeitado em outros processos, ente outros (SILVA & MOREIRA, 2008).

O desempenho do ciclo de absorção é caracterizado por um coeficiente chamado Coeficiente de Performance (COP). Este coeficiente relaciona a taxa de energia de refrigeração (efeito desejado) pela potência térmica do gerador (energia requerida). O COP pode ser definido pela seguinte equação:

$$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_G}$$

Em uma unidade de absorção comercial o gerador e o condensador são instalados num mesmo compartimento (vaso) já que estes operam a mesma pressão (alta pressão). De modo análogo ocorre na instalação do evaporador e do absorvedor que podem ser montados num mesmo vaso, porém operam na baixa pressão do sistema. Há a possibilidade de instalação de todos componentes em um único vaso, entretanto deve-se utilizar um separador interno entre as câmaras que trabalham em diferentes pressões (STOECKER & JONES, 1985). O arranjo dos componentes em uma unidade comercial básica de absorção pode ser visto na Figura 24. Nas circunferências destacadas na figura observam-se os equipamentos que podem ser instalados num mesmo vaso de pressão.

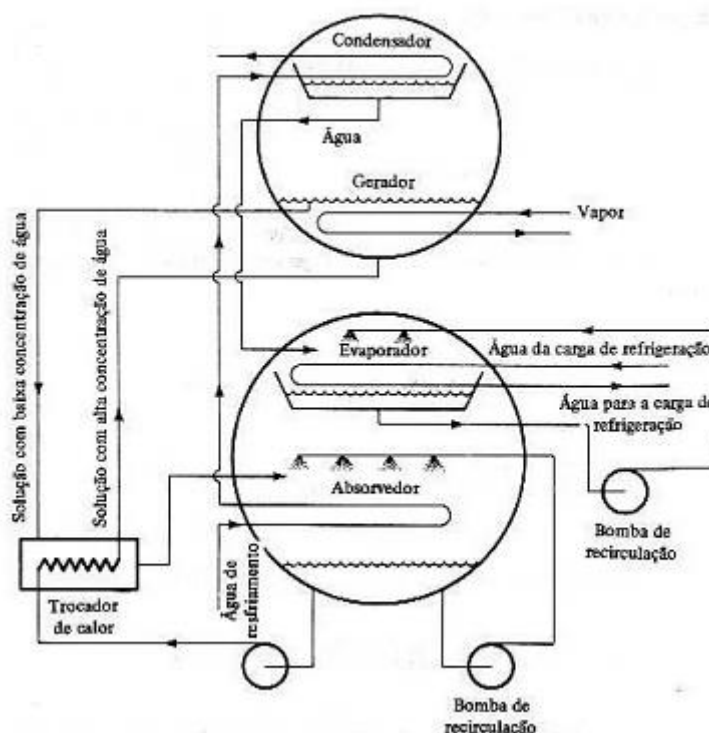


Figura 24: Um arranjo de componentes em uma unidade de absorção comercial. Fonte: STOECKER & JONES(1985)

Nas unidades comerciais de absorção são aplicados diversos materiais que variam de acordo com o componente e os parâmetros de operação. Os materiais dos evaporadores são determinados conforme o fluido refrigerante utilizado. Em sistemas de pequeno porte que utilizam refrigerantes quimicamente estáveis e que são utilizados com o objetivo de resfriar o ar, os evaporadores são geralmente feitos de cobre ou alumínio. Em sistemas industriais de grande porte são comumente encontrados evaporadores de aço carbono. Na construção dos geradores e absorvedores, o aço carbono também é o material mais aplicado, mas a seleção do material deve ser cuidadosamente realizada com base nas propriedades do fluido que os compõem. Por fim, para a construção dos condensadores são utilizados, em sua maior parte, cobre para sistemas de pequeno porte e aço carbono ou ferro fundido nos sistemas industriais de grande porte. (MENNA, 2008)

2.2.2 Sistemas de Absorção de duplo e triplo efeito

Na subseção anterior (2.2.1) foi descrito o sistema de absorção composto basicamente por um gerador, um absorvedor, um condensador e um evaporador. Neste sistema básico é comumente inserido um trocador de calor, entre a solução forte que sobe para o gerador e a solução fraca que desce para o absorvedor, para reduzir a demanda de calor do gerador de vapor. Essa configuração é denominada: simples efeito.

Devido ao baixo COP apresentado pelo ciclo de simples efeito (ver Figura 25), foram desenvolvidos sistemas com maiores performances. Esses diferentes arranjos que apresentam melhor desempenho são denominados “sistemas de multi-efeitos”, dentre eles destacam-se os sistemas de duplo e de triplo efeito. Esses sistemas são estruturados de modo a aproveitar o calor rejeitado do estágio que opera a maiores temperaturas em estágios que operam à menor temperatura. Assim obtém-se ganho extra do efeito de resfriamento desejado (MARTINS, 2014). Devido aos inúmeros tipos de configurações

dos sistemas multi-efeitos, essa subseção apresenta apenas o funcionamento do duplo e do triplo efeito (configurações avaliadas no presente estudo).¹

A Figura 25 apresenta os coeficientes de performance (COP) para diferentes sistemas de absorção (simples, duplo e triplo efeito) em diferentes temperaturas de calor fornecido no gerador. Os valores apresentados são para sistemas com mesmo tamanho dos componentes e para o mesmo valor de temperatura de resfriamento.

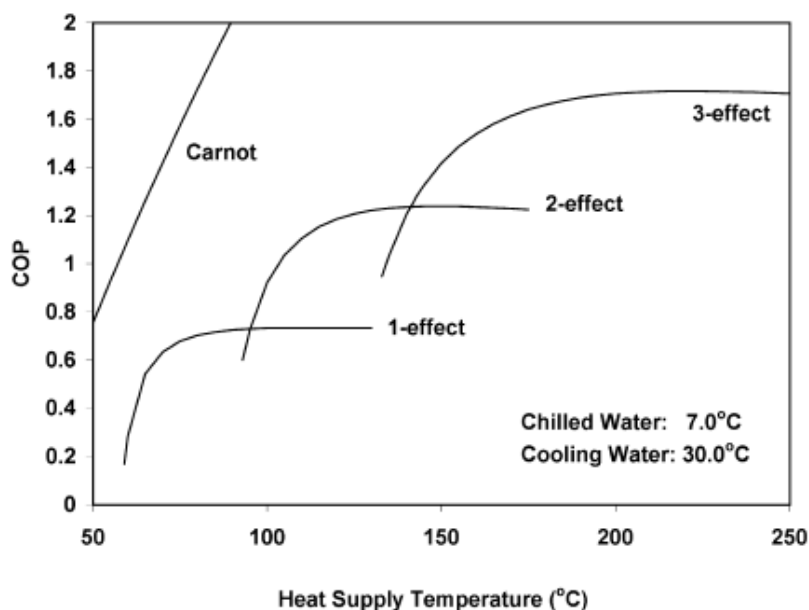


Figura 25: Coeficiente de desempenho (COP) em função da temperatura de suprimento de calor para efeito simples, duplo e triplo no *chiller* de absorção de água e LiBr. Fonte: GROSSMAN (2012)

O sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito é constituído por dois geradores e dois condensadores. O sistema de simples efeito apresenta apenas um gerador e um condensador. A eficiência energética do sistema de duplo efeito é maior pois recupera parte do calor que é rejeitado normalmente pelo condensador (HAU, 2010). No entanto, o calor fornecido ao primeiro gerador do sistema de duplo efeito precisa ter melhor qualidade, ou seja maior temperatura. Logo, um segundo gerador pode ser adicionado ao sistema, porém à temperaturas mais baixas, pois como já citado, este é aquecido recuperando o calor dispensado no condensador (SETTINO *et al.*, 2018).

¹ Outras configurações do ciclo de absorção podem ser vistas em BANU & SUDHARSAN (2018).

A Figura 26 e a Figura 27 apresentam, respectivamente, uma configuração de simples e duplo efeito em série operados a tecnologia solar com a presença de tanque de armazenamento. Nelas, podem-se identificar os principais equipamentos e o percurso dos fluidos no sistema.

Na Figura 27 observa-se que o sistema de duplo efeito apresenta dois geradores. O calor a maior temperatura é fornecido diretamente ao gerador de alta pressão com a função de evaporar o refrigerante e separá-lo do absorvente. O vapor produzido ao ser condensado libera calor para o segundo gerador (de menor pressão) produzindo vapor de refrigerante adicional. Após a passagem do refrigerante pelo evaporador ele flui para o absorvedor onde é absorvido pela substância absorvente. Por fim, a solução é bombeada diretamente para o gerador de alta pressão. Como o vapor é produzido duas vezes, o sistema se classifica como duplo efeito. Deste modo, os sistemas de duplo efeito requerem aporte de calor a maiores temperaturas do que as dos sistemas de simples efeito, mas demandam menos calor. A aplicação do sistema de duplo efeito apresenta-se como uma alternativa interessante para sistemas que utilizam energia solar, pois trabalha com temperaturas atingíveis e bons valores de COP. (BANU & SUDHARSAN, 2018).

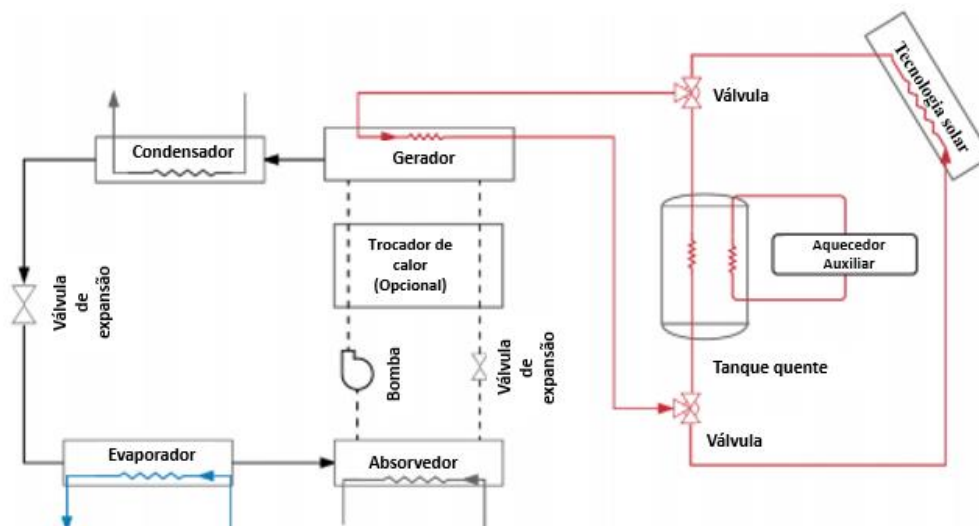


Figura 26: Sistema de absorção simples efeito com trocador de calor. Fonte: Adaptado de SETTINO et al.(2018)

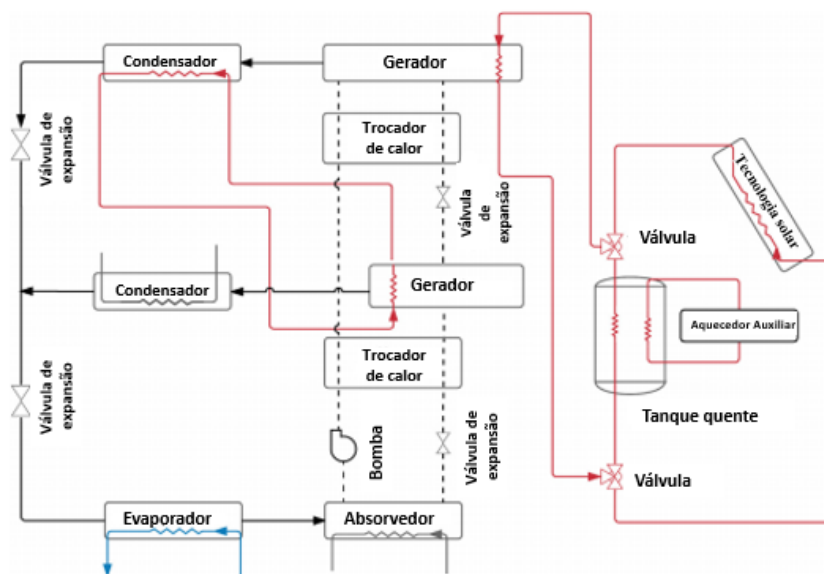


Figura 27: Sistema de absorção duplo efeito com trocador de calor. Fonte: Adaptado de SETTINO et al.(2018)

Finalmente, o sistema de triplo efeito é um sistema composto por três geradores (o que explica seu nome). Comparado ao duplo efeito, anteriormente explicado, este sistema apresenta mais um gerador que requer aporte de calor a temperaturas ainda mais elevadas do que aquelas observadas nos sistemas de duplo efeito. Este sistema pode ser considerado como um sistema que opera em quatro níveis de pressão (BERECHE, 2007).

A Figura 28 apresenta a configuração de um sistema de triplo efeito. O ciclo apresenta três pares de gerador-condensador para três diferentes níveis de pressão: alta, intermediária e baixa. Além desses componentes, o sistema ainda apresenta na última linha de pressão um evaporador e um absorvedor. Após a evaporação do refrigerante no gerador de alta pressão (G1), ele segue para o condensador que rejeitará o calor ao gerador e pressão intermediária (G2). Em seguida o fluido condensado a pressão intermediária rejeita calor no ultimo gerador de baixa pressão (G3). Os fluidos refrigerantes dessas três etapas seguem para o evaporador onde realizam o efeito de resfriamento. Ao sair do evaporador o fluido refrigerante é absorvido e a solução rica em refrigerante segue para o gerador de alta pressão (G1) de forma consecutiva, passando por G2 e G3.

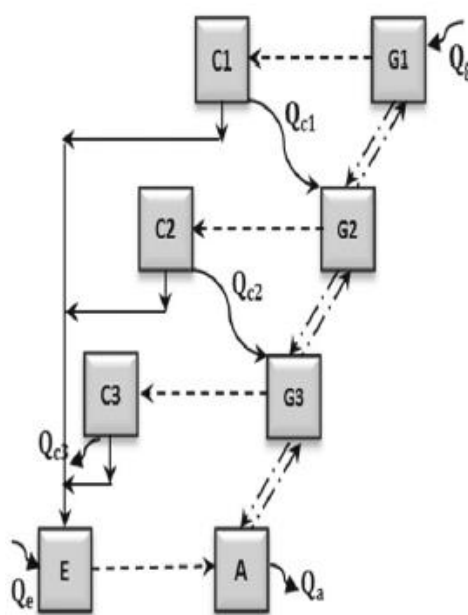


Figura 28: Sistema de absorção de triplo efeito. Fonte: BANU & SUDHARSAN (2018)

O sistema de triplo efeito apresenta valores de performance ainda maiores quando comparado aos *chillers* de duplo efeito (logo demandam menos calor). No entanto, esse sistema requer uma temperatura mais alta para operar o sistema (calor de maior qualidade) e possui mais componentes, o que acarreta num maior custo de capital quando comparado aos sistema de simples e duplo efeito (HAU, 2010). Com o aumento do número de efeitos e o respectivo aumento da temperatura de trabalho, há também uma maior preocupação com as perdas de calor e corrosão no sistema (BERECHE, 2007).

Além da corrosão, a cristalização é um importante fator no desempenho e operação dos sistemas de triplo efeito (BANU & SUDHARSAN, 2018). Há diferentes pontos de pressão e temperatura em que o LiBr começa o processo de cristalização. Como o brometo de lítio é uma solução salina aquosa, há uma temperatura em certa concentração em que o sal se separa da solução e cristaliza. Essa cristalização pode interromper o fluxo da solução no sistema. (GUIMARÃES, 2011).

A Figura 29 apresenta um diagrama com as faixas de operação do sistema utilizando a solução H₂O-LiBr (Água e Brometo de Lítio) com os valores de entalpia, concentração do brometo de lítio e temperatura da solução. Nela pode-se observar os valores das variáveis em que ocorre a cristalização. Altos valores de concentração do LiBr

propiciam a cristalização. Segundo NETO (2016) um aumento na temperatura de operação do gerador aumenta o desempenho do sistema, porém pode facilitar a cristalização da solução, já que o aumento da temperatura do gerador acarreta num aumento da concentração de LiBr na solução.

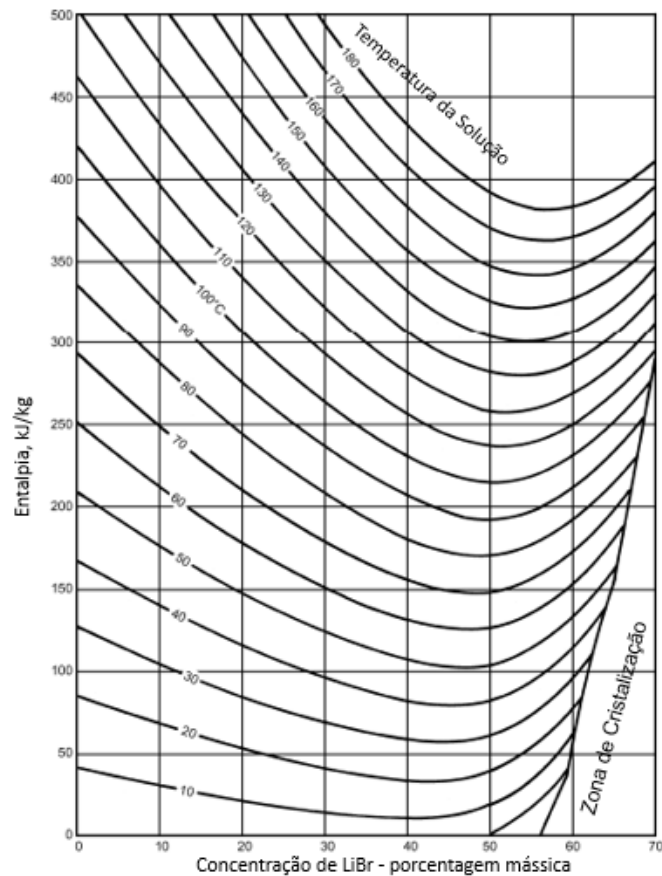


Figura 29: Diagrama de entalpia-concentração para a solução H₂O-LiBr. Fonte: ASHRAE (2001)

Após a descrição do sistema de concentração solar e do sistema de refrigeração por absorção, o próximo capítulo detalha os procedimentos metodológicos adotados para a análise energética da integração desses dois sistemas no condicionamento de ar de um Complexo Universitário.

3 METODOLOGIA

3.1 Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos descritos nesse capítulo visam à avaliação da operação do sistema de condicionamento de ar através de energia solar em três edifícios universitários do Campus UFRJ-Macaé. Para isso propõe-se a utilização de três configurações distintas do sistema de condicionamento por absorção (simples, duplo e triplo efeito) operado por energia solar térmica. Os métodos aqui detalhados objetivam a análise qualitativa e quantitativa das principais variáveis da simulação computacional.

Para satisfazer esse objetivo, precisa-se primeiramente obter o perfil da carga térmica requerida para o condicionamento dos ambientes do complexo universitário. O procedimento metodológico para sua obtenção é descrito na seção 3.2 deste capítulo. Com essa simulação obtém-se a carga térmica de pico que será requerida pelo evaporador do sistema de refrigeração por absorção ($\dot{Q}_e$). Este valor é fundamental para a determinação da potência requerida no gerador ($\dot{Q}_g$) do sistema de refrigeração por absorção, cujo calor será transferido do sistema de concentração solar.

A seção 3.3 detalha a metodologia aplicada para a obtenção da energia térmica fornecida pelo sistema solar que nos permite avaliar as variáveis de projeto e sua influência no funcionamento global do sistema de condicionamento. Assim como descreve e quantifica as propriedades relevantes dos sistemas de absorção. Por fim, nesta seção também são apresentados os cenários criados para análise e discussão nesta dissertação. Uma visão geral da metodologia adotada pode ser observada de modo simplificado na Figura 30.

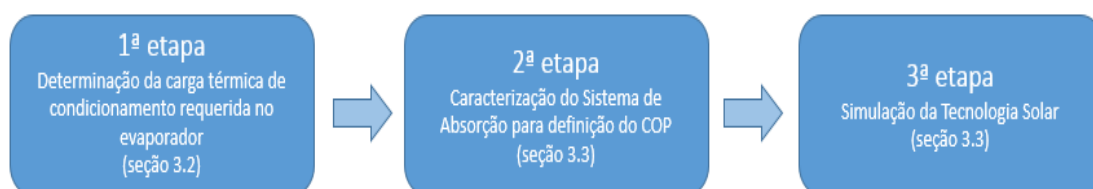


Figura 30: Fluxograma simplificado das etapas da metodologia. Fonte: Elaboração Própria

3.2 Carga Térmica de Condicionamento

O primeiro passo para a avaliação do sistema de condicionamento solar refere-se à determinação da carga térmica de refrigeração. Devido à complexidade da edificação, com diversos tipos de ambientes, dimensões, diferentes perfis de ocupação, entre outros, torna-se fundamental a utilização de softwares para descrever o seu comportamento térmico. Para esse fim, foram utilizados três softwares: SketchUp 2017, OpenStudio 2.8.0 e EnergyPlus 8.7.0. O uso desses softwares acoplados para análises termoeenergéticas é amplamente citado na comunidade acadêmica e pode ser encontrado nos trabalhos de RUPPER (2011), ARANTES (2012), AL-ZUBAYDI (2013), SANDER (2017), entre outros. Um esquema simplificado com a função de cada software pode ser visto na Figura 31. Para aplicação desse método torna-se necessário o conhecimento de alguns dados referentes à edificação e as características climáticas da cidade de Macaé.

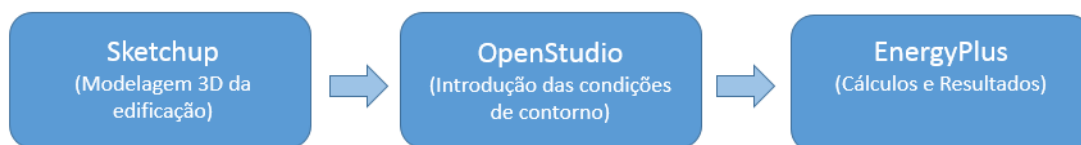


Figura 31: Fluxograma simplificado para a determinação da carga térmica. Fonte: Elaboração Própria

Para a modelagem no SketchUp 2017 foi necessário obter as características da envoltória das edificações e suas superfícies internas como: área total da edificação, número de salas e suas dimensões (área de piso, parede e teto), o número de janelas e portas com suas respectivas áreas e posicionamentos, assim como a orientação da edificação. Esses dados foram levantados a partir da planta do prédio e de visitas locais. Uma imagem real do prédio pode ser vista na Figura 32.



Figura 32: Bloco C do Campus UFRJ-Macaé. Fonte: Elaboração Própria.

Cabe ressaltar, que os três prédios que compõem o complexo universitário possuem as mesmas dimensões e materiais de construção. Nesse trabalho será adotado o mesmo perfil de ocupação e horas de utilização para cada um dos prédios. Essa assunção se baseia na semelhança da utilização das salas, seja para a ministração de aulas ou para o uso de caráter administrativo.

Os prédios possuem 3 andares. O primeiro andar é composto por salas administrativas, dois sanitários (masculino e feminino) e um auditório. O segundo e o terceiro são constituídos por salas de aula e laboratórios, apresentando cada um dois sanitários. As salas são numeradas de 01 até 15, totalizando 13 salas por andar, já que as salas 01/02 e 04/05 são agrupadas. Neste trabalho, as salas 01/02 e 04/05 foram denominadas “salas conjugadas” e as demais de “salas simples” (áreas próximas de 60 a 70 m²). A área de cada sala pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 2: Área das salas de aula

SALA	ÁREA (m²)
01/02	137,02
03	66,94
04/05	134,80
06	61,72
07	61,10
08	70,58
09	64,34
10	65,23
11	63,43
12	69,89
13	62,90
14	61,75
15	61,75

Fonte: SUAID et al. (2016)

Referente às portas e janelas, as salas simples apresentam apenas uma porta e as conjugadas apresentam duas. Todas as portas possuem largura de 0,90 m e altura de 2,10 m. O edifício apresenta três tipos de janela:

- Janela maxim-ar com 1 porta com largura de 0,91 m, altura de 1,40 m e peitoril de 1,20.
- Janela de correr com 2 folhas fixas e 2 folhas móveis com 4,00 m de largura, altura de 1,40 e peitoril de 1,20.
- Janela pivotante de 4 folhas, com largura de 3,80, altura de 0,60 e peitoril de 2,15 m.

Salienta-se que a modelagem realizada não leva em consideração alguns detalhes do prédio como escada, corrimão, jardim interno, pilastras, entre outros, já que visa apenas a criação de zonas térmicas para a determinação da carga térmica para o condicionamento dos ambientes. A Figura 33 apresenta o prédio modelado no SketchUp.

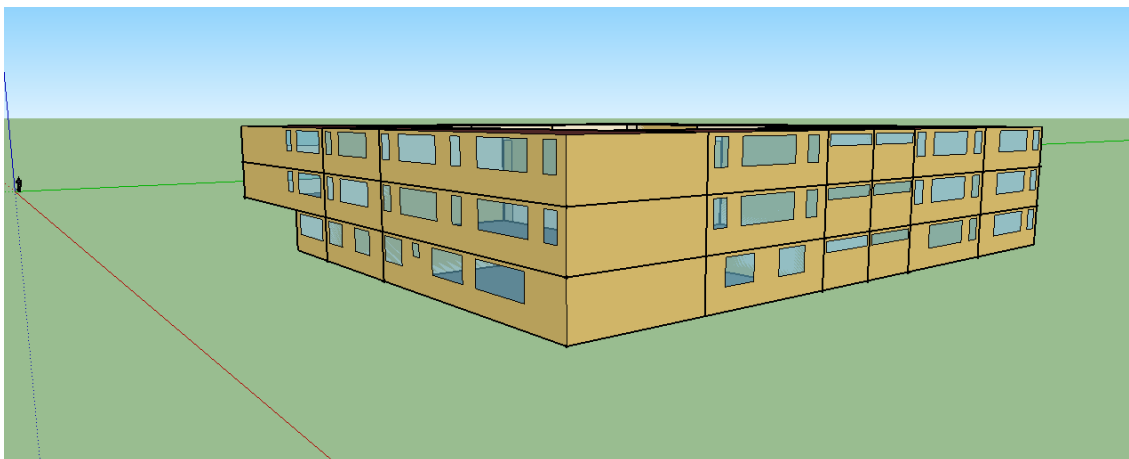


Figura 33: Prédio modelado no SketchUp 2017. Fonte: Elaboração Própria

Após a modelagem do prédio torna-se necessária a caracterização de cada zona térmica. Para isso, deve-se inserir os dados das características climáticas, construtivas e de regime de utilização, como:

- Dados climáticos da cidade de Macaé;
- Propriedades físicas dos materiais de superfície utilizados internamente e externamente (paredes, teto e chão), como também seus revestimentos;
- Propriedades físicas dos materiais de sub superfície utilizados internamente e externamente (janelas e portas);
- Número de pessoas, perfil de ocupação e tipo de atividade;
- Iluminação;
- Equipamentos Elétricos;
- Temperatura requerida no interior do ambiente;
- Infiltração.

O OpenStudio é a ferramenta que permite introduzir e alterar as características antes citadas da edificação para a simulação, permitindo analisar o impacto de diversas variáveis no modelo. Este software foi desenvolvido por um conjunto de laboratórios pertencentes ao Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (*United States Department of Energy- DOE*), a citar: NREL (*National Renewable Energy Laboratory*),

ANL (*Argonne National Lab*), LBNL (*Lawrence Berkeley National Lab*), ORNL (*Oak Ridge National Lab*) e PNNL (*Pacific Northwest National Lab*) (EERE 2019).

Neste trabalho o OpenStudio foi acoplado ao SketchUp como barra de ferramentas que permite editar e acrescentar as informações do modelo para serem carregadas no EnergyPlus. Para isso, o OpenStudio cria um arquivo na extensão .osm incluindo todas as características construtivas e perfis de uso do modelo 3D para posterior visualização de resultados. A Figura 34 apresenta a interface do programa que através de suas abas nos permite introduzir individualmente as características nas zonas térmicas da construção.

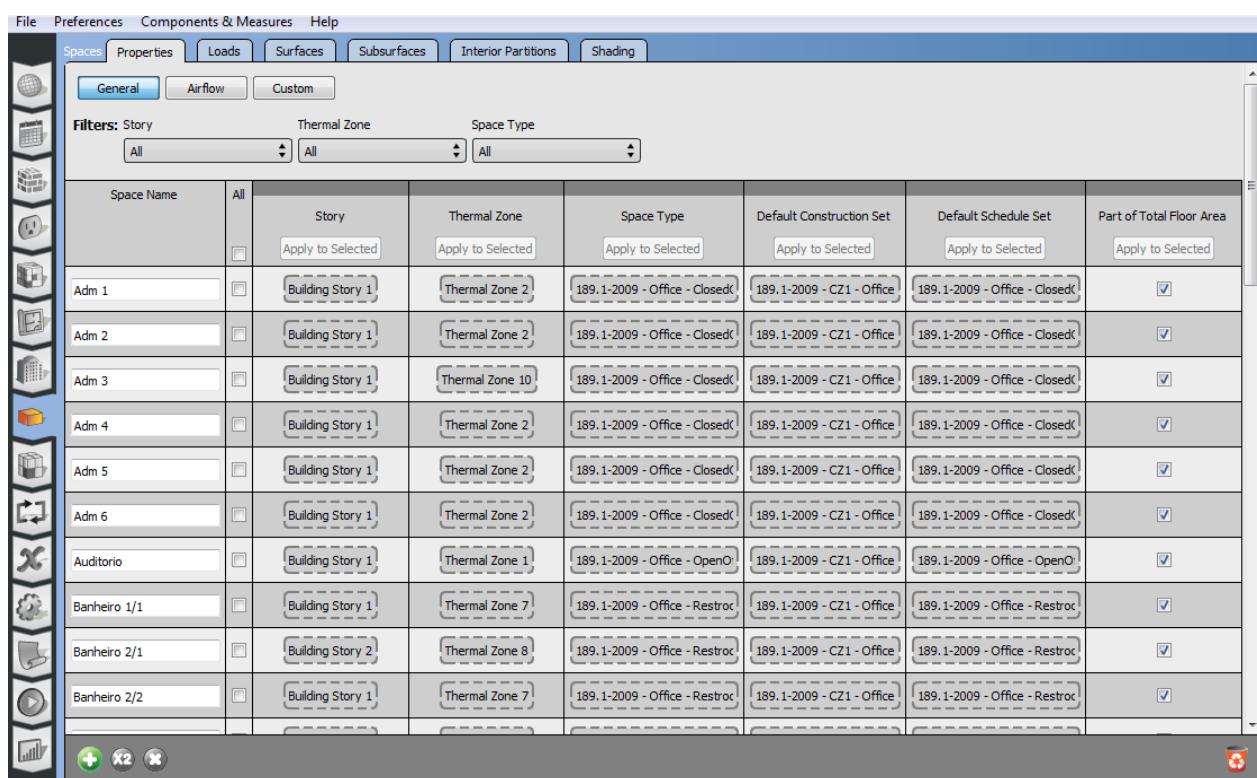


Figura 34: Interface do OpenStudio (versão 2.8.0). Fonte: OpenStudio (2.8.0)

Para a simulação, as salas (administrativas e de aula) e o auditório foram divididos em 10 zonas térmicas. Essas zonas térmicas foram criadas para agrupar espaços que possuíam semelhança em seu perfil construtivo, de utilização e de ganhos internos. Deste modo, os 39 ambientes (6 banheiros, 1 auditório, 4 salas de aula conjugadas, 22 salas de aula simples, 5 salas administrativas simples, 1 sala administrativa conjugada) foram

agrupados em 10 zonas térmicas (*Thermal Zone*). A Tabela 3 abaixo apresenta cada ambiente associado a sua respectiva zona térmica.

Tabela 3: Ambientes associados a cada Zona Térmica

Zona Térmica	Ambientes
Zona Térmica 1	Auditório
Zona Térmica 2	Salas Administrativas Simples
Zona Térmica 3	Salas de Aula Simples 2º andar
Zona Térmica 4	Salas de Aula Simples 3º andar
Zona Térmica 5	Salas de Aula Conjugadas 2º andar
Zona Térmica 6	Salas de Aula Conjugadas 3º andar
Zona Térmica 7	Banheiros 1º andar
Zona Térmica 8	Banheiros 2º andar
Zona Térmica 9	Banheiros 3º andar
Zona Térmica 10	Sala Administrativa Conjugada

Fonte: Elaboração Própria

Os dados de entrada das características climáticas, construtivas e de utilização necessários à simulação para as zonas térmicas são descritas com maiores detalhes a seguir:

- Dados climáticos da cidade de Macaé;

Os arquivos climáticos utilizados correspondem à cidade de Macaé (Latitude: -22.3717, Longitude: -41.7857). Os arquivos utilizados possuem a extensão “*.epw*” (*Energy Plus Weather data format*) e “*.ddy*” (*Design Day File*) e foram fornecido por LABEEE (2018). Estes arquivos foram inseridos no programa na aba *Weather Files and Design Days* e fornecem as variáveis climáticas (temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, pressão atmosférica, entre outras) de interesse para a simulação.

- Propriedades físicas dos materiais de superfície utilizados internamente e externamente (paredes, teto e chão), como também seus revestimentos;

As propriedades físicas dos materiais como: condutividade térmica, coeficiente de transferência por convecção, espessura do material, densidade, calor específico, entre outras, são importantes características para a determinação do fluxo de calor entre dois ambientes (interno-interno/externo-interno).

Para a simulação, os materiais são classificados como: de “superfície” (*surface*), que são utilizados para a construção de tetos, pisos, paredes e telhados; e “sub superfície” (*sub surface*), que são materiais que compõem as janelas e as portas. Os materiais de superfície, são classificados em: superfície exterior (*exterior surface*) quando esta compõe a envoltória do edifício e está em contato direto com a radiação; superfície interior (*interior surface*), que refere-se às paredes divisórias e tetos internos; e superfície de contato com o solo (*ground contact surface*). No programa, estes são inseridos na aba *Construction Sets* permitindo a escolha de materiais presentes na biblioteca local na aba *Materials* ou a introdução dos valores obtidos em literatura. O programa ainda permite importação de biblioteca de materiais, deste modo os materiais não fornecidos no programa puderam ser importados para a caracterização da edificação.

A escolha dos materiais foi baseada nos valores típicos de construções desse porte (NBR 15220), no estudo de SANDER (2017) e através de visitas de campo. A Tabela 4 indica os materiais utilizados em cada tipo de superfície, assim como os valores das suas propriedades físicas necessárias para o cálculo da carga térmica.

Tabela 4: Materiais escolhidos para as superfícies da edificação e os valores das principais variáveis.

Superfície	Material	Espessura (m)	Condutividade (W/m.K)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.K)	Absortância Solar
Paredes Externas (<i>exterior walls</i>)	Tijolo ¹ (<i>brick 4 in</i>)	0,1016	0,405	1121	790	0,70
	Argamassa de emboço ² (<i>stucco 1in</i>)	0,0253	0,692	1858	837	0,92
	Azulejo ² (<i>Tile 1/2 in</i>)	0,0127	1,590	1920	1260	0,70
Paredes Internas (<i>interior walls</i>)	Tijolo ¹ (<i>brick 4 in</i>)	0,1016	0,405	1121	790	0,70
	Argamassa de emboço ² (<i>stucco 1in</i>)	0,0253	0,692	1858	837	0,92
Chão (<i>floor</i>)	Concreto ² (<i>concrete 4in</i>)	0,1016	1,311	2240	836,8	0,85
	Piso ² (<i>Tile 1/2 in</i>)	0,0127	1,590	1920	1260	0,70
Cobertura (<i>roof</i>)	Concreto ² (<i>concrete 4in</i>)	0,1016	1,311	2240	837	0,85
	Isolamento ² (<i>roof insulation</i>)	0,0800	0,049	265	1460	0,70
Teto (<i>ceilings</i>)	Concreto ² (<i>concrete 4in</i>)	0,1016	1,311	2240	837	0,85
	Gesso ² (<i>gypsum or plaster 1/4in</i>)	0,0064	0,580	800	1090	0,70

Fonte: ¹ NREL(2019), ² OpenStudio (2.8.0)

Uma vez que o tijolo empregado na construção não está disponível na biblioteca local do programa, foi necessária a importação de uma biblioteca com um conjunto de materiais disponibilizados por NREL(2019).

Cabe ressaltar que, na especificação dos tetos (*ceilings*), foi considerado um espaço de ar (entre o gesso e o concreto) cuja a resistência térmica foi de 0,18 m².K/W (OPENSTUDIO 2.8.0).

- Propriedades físicas dos materiais de sub superfície utilizados internamente e externamente (janelas e portas);

As portas e janelas são classificadas no programa como sub superfícies (*sub surface*). Analogamente às superfícies, estas são classificadas em “sub superfícies externas” (*exterior sub surface*) e “sub superfícies internas” (*interior sub surface*).

As propriedades relevantes referentes à janela são: espessura, transmitância solar na incidência normal, transmitância visível na incidência normal, absorptância solar e condutividade. Os valores dessas propriedades podem ser observados na Tabela 5, e referem-se a uma janela de vidro transparente comum de 3mm (OPENSTUDIO 2.8.0).

Tabela 5: Valores das principais propriedades do vidro comum de 3mm.

Propriedade	Valor
Espessura (m)	0,003
Transmitância solar na incidência normal	0,837
Transmitância visível na incidência normal	0,898
Absortância Solar	0,07
Condutividade (W/m.K)	0,9

Fonte: Adaptado OPENSTUDIO (versão2.8.0)

As portas são elementos que nessa edificação recebem pouca ou nenhuma radiação direta já que se encontram no interior dos corredores. As propriedades relevantes referentes à porta são: condutividade térmica, espessura do material, densidade, calor específico e absorptância solar. Os valores dessas propriedades podem ser observados na Tabela 6, e referem-se a uma porta de madeira 25 mm (OPENSTUDIO 2.8.0). Todas as portas possuem largura de 0,90 m, altura de 2,10 m e 25 mm de espessura.

Tabela 6: Valores das principais propriedades da porta de madeira 25mm.

Propriedade	Valor
Espessura (m)	0,025
Condutividade (W/m.K)	0,15
Densidade (kg/m³)	608
Calor específico (J/kg.K)	1630
Absortância Solar	0,5

Fonte: Adaptado OPENSTUDIO (versão2.8.0)

- Número de pessoas, perfil de ocupação e tipo de atividade;

Uma importante parcela da carga interna (energia produzida no interior do ambiente) está relacionada ao número de pessoas, seus respectivos níveis de atividade e horário de ocupação. O ser humano perde calor para o ambiente e isso se intensifica com o maior grau de sua atividade (perfil metabólico). Os valores típicos por pessoa dessa taxa energética relacionada a atividade e o local onde se encontram são fornecidos pela NBR 16401-1 e podem ser vistos na Tabela 7. No presente trabalho, para a carga por pessoa, foi adotado o valor típico de uma pessoa sentada em trabalho leve em um escritório. O valor de calor sensível (70 W) e calor latente (45W) foram inseridos no OPENSTUDIO 2.8.0 na aba *activity levels* para todas as zonas de estudo criadas.

Tabela 7: Valores típicos do calor emitido por pessoas em diversas atividades e locais

Nível de atividade	Local	Calor sensível (W)	Calor latente (W)
Sentado, trabalho leve	Escritórios, hotéis, apartamentos	70	45
Atividade moderada em trabalhos de escritório	Escritórios, hotéis, apartamentos	75	55
Parado em pé, trabalho moderado, caminhando	Loja de varejo ou departamento	75	55
Caminhando, parado em pé	Farmácia, agência bancária	75	70
Trabalho sedentário	Restaurante	80	80
Trabalho leve em bancada	Fábrica	80	140
Caminhando 4,8 km/h, trabalho leve em máquina operatriz	Fábrica	110	185
Trabalho pesado	Fábrica	170	255
Trabalho pesado em uma máquina operatriz, carregando carga	Fábrica	185	285

Fonte: Adaptado NBR 16401-1 “Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 1:

Projetos das instalações

Depois da especificação do nível de atividade por pessoa, determinou-se a ocupação máxima em cada zona térmica para posterior construção do perfil de ocupação. Os dados de ocupação máxima foram estimados por pesquisa de campo para cada uma das zonas térmicas, parte pelo número máximo de lugar para acomodações (cadeiras, carteiras, área disponível, entre outros) em cada recinto e parte por entrevista com funcionários locais. A ocupação máxima de cada ambiente pode ser vista na Tabela 8.

Tabela 8: Valor da ocupação máxima em cada ambiente

AMBIENTE	OCUPAÇÃO
Salas de aula simples	40
Salas de aula conjugadas	80
Salas administrativas simples	8
Salas administrativas conjugadas	15
Banheiros	7
Auditório	100

Fonte: Elaboração Própria

Definida a ocupação máxima, construiu-se no programa o perfil dessa ocupação. Este perfil é caracterizado pelo horário e a taxa de ocupação. Essa taxa varia de 0 a 1 (0 a 100%) do valor máximo de ocupantes e pode ser alterada de acordo com o horário de um dia típico. Neste trabalho, como demonstrado na Figura 35, foram criados três padrões de ocupação: dias úteis (azul claro), sábados (roxo) e domingos (rosa). Em cada padrão pode-se estabelecer o perfil de ocupação. Como exemplo, na Figura 35, observa-se que durante os horários de 8:00-12:00h e 13:00-17:00h a taxa de ocupação vale 1 (100%, ocupação máxima), nos horários de 0:00-8:00h e 22:00-0:00h há inatividade no ambiente (taxa de ocupação 0) e nos horários de 17:00-22:00 a taxa de ocupação é de 0,4 (40% da ocupação máxima). Ressalta-se que, para o dia de sábado, foi adotado 20% da ocupação máxima nos horários de funcionamento, devido ao baixo fluxo de pessoas no Campus. Para os dias de domingo, devido à não funcionalidade do Campus, considerou-se a taxa de 0% da ocupação máxima. Em relação ao perfil mensal, adotou-se uma taxa de 0,1 (10%) para todo o mês de janeiro e 0,75 (75%) para o mês de dezembro. No mês de janeiro ocorrem as férias acadêmicas, logo essa pequena taxa foi considerada pela presença exclusiva do corpo administrativo nas edificações. No mês de dezembro foi

desconsiderada a ocupação do edifício na última semana do ano devido ao recesso acadêmico.

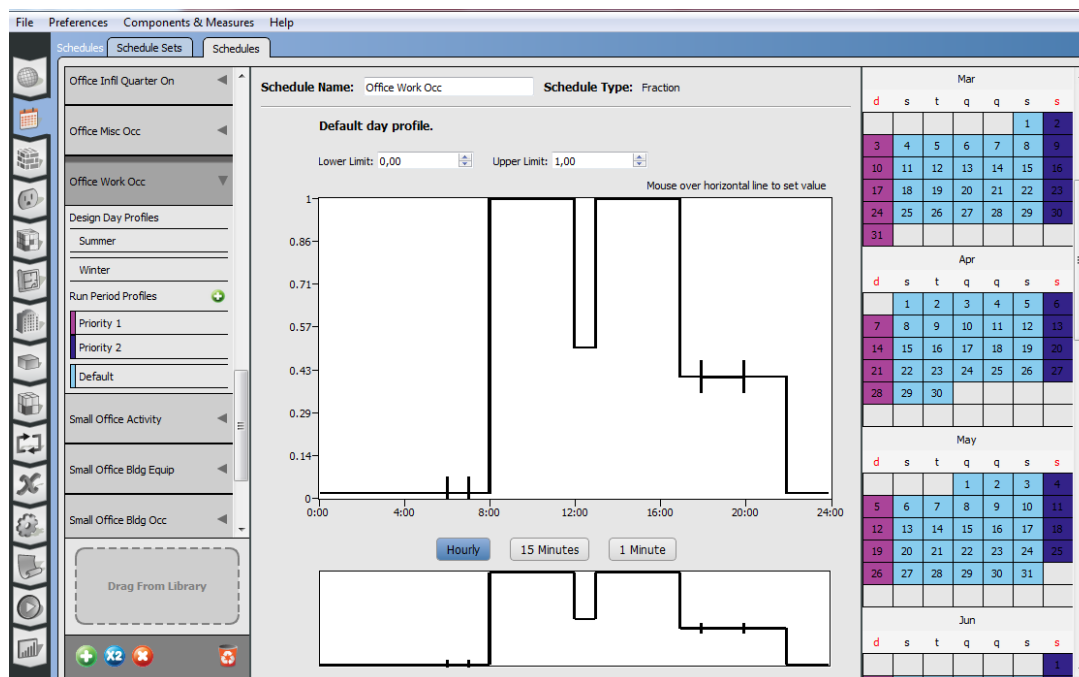


Figura 35: Interface do OpenStudio na aba *Schedule* (versão 2.8.0) na aba *schedules*. Fonte: OpenStudio

- Iluminação;

Outra fonte interna de calor está relacionada à iluminação artificial. As lâmpadas presentes no recinto são dissipadores de calor e contribuem para o aumento da carga interna. Segundo a NBR 16401-1 o tipo e potência das lâmpadas devem ser fornecidos pelo projeto de iluminação, porém na ausência podem ser adotados os valores presentes em uma tabela na norma. Uma simplificação dessas informações pode ser observada na Tabela 9, que fornece os valores típicos das densidades de potência de iluminação de acordo com o tipo da luminária e o local de funcionamento. Para a presente simulação foi adotado o valor da potência de dissipação de uma lâmpada fluorescente instalada em escritórios e bibliotecas: 16 W/m² (ver Tabela 9).

Analogamente ao que foi realizado no perfil de ocupação horária no tópico anterior, elabora-se um perfil de utilização da iluminação artificial. Este apresenta seu pleno funcionamento no período noturno (17:30-22:00h) e uma taxa de 0,5 (50%) para o restante do período de funcionamento (8:00-17:30h).

Tabela 9: Valores da potência dissipada por diferentes níveis de iluminação

Local	Tipos de Iluminação	Nível de iluminação Lux	Potência dissipada W/m ²
Escritórios e bancos	Fluorescente	500	16
Loja	Fluorescente	750	17
	Fluorescente compacta		23
	Vapor metálico		28
Residências	Fluorescente compacta	150	9
	Incandescente		30
Supermercados	Fluorescente compacta	1000	21
	Vapor metálico		30
Armazéns climatizados	Fluorescente	100	2
	Vapor metálico		3
Cinemas e teatros	Fluorescente compacta	50	6
	Vapor metálico		4
Museus	Fluorescente	200	5
	Fluorescente compacta		11
Bibliotecas	Fluorescente	500	16
	Fluorescente compacta		28
Restaurantes	Fluorescente compacta	150	13
	Incandescentes		41

Fonte: Adaptado NBR 16401-1 “Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos das instalações

- Equipamentos Elétricos;

Os equipamentos elétricos presentes no recinto são outra fonte interna de calor considerada para o cálculo da carga térmica. Para os diferentes ambientes fez-se necessário o levantamento do número de equipamentos existentes. Segundo NBR 16401-1, os valores da dissipação devem ser fornecidos pelo fabricante, porém na ausência dessas informações devem ser adotados valores típicos presente na norma. No presente trabalho não foram considerados os valores de potência dissipadas por aparelhos portáteis (*notebook*, por exemplo) utilizados por professores ou alunos. Os valores adicionados ao programa referem-se aos equipamentos de uso constante nos ambientes administrativos como: computadores e copiadoras. Os valores típicos relacionados a esses equipamentos podem ser vistos na Tabela 10 e Tabela 11.

O perfil horário de uso dos equipamentos também foi definido no programa. Considerou-se uma utilização de modo contínuo entre os horários de 8:00-20:00h, horário relacionado ao funcionamento das salas administrativas.

Tabela 10: Potência dissipada por computadores e monitores

Computadores	Uso contínuo W	Modo Economizador W
• Computadores		
Valor médio	55	20
Valor com fator de segurança	65	25
Valor com fator alto de segurança	75	30
• Monitores		
Pequeno (13 pol. a 15 pol.)	55	0
Médio (16 pol. a 18 pol.)	70	0
Grande (19 pol. a 20 pol.)	80	0

Fonte: Adaptado NBR 16401-1 “Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos das instalações

Tabela 11: Potência dissipada por impressoras e copiadoras

Impressoras e copiadoras	Uso contínuo W	1 página por minuto W	Ligada em espera W
• Impressoras a laser			
De mesa, pequena	130	75	10
De mesa	215	100	35
De escritório, pequena	320	160	70
De escritório, grande	550	275	125
• Copiadoras			
De mesa	400	85	20
De escritório	1100	400	300

Fonte: Adaptado NBR 16401-1 “Instalações de ar-condicionado - Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos das instalações

- Temperatura requerida no interior do ambiente;

A temperatura escolhida para o interior do ambiente deve fornecer às pessoas as condições satisfatórias para a realização das atividades. As condições térmicas para a realização dessas tarefas com bom rendimento é classificado como conforto térmico.

Segundo NBR 16401-2, a sensação de conforto térmico é subjetiva, deste modo os valores de temperatura e umidade apresentados na norma são para a satisfação de no

mínimo 80% das pessoas. Num dia típico de verão, a temperatura que propicia esse conforto se encontra entre 22,5°C-25,5°C (umidade relativa de 65%) e 23,0°C-26,0°C (umidade relativa em 35%). Num dia típico de inverno a temperatura de conforto está entre 21,0°C-23,5°C (umidade relativa de 60%) e 21,5°C-24,0°C (umidade relativa de 30%). Segundo a NR-17, proposta pelo Ministério do Trabalho, a temperatura no interior de locais onde se exigem trabalhos intelectuais deve ser efetivamente entre 20°C -23°C.

Diante de tais informações, foi adotado como dado de entrada para a simulação a temperatura de 23,0°C no interior dos ambientes. Esta temperatura apresenta-se dentro dos valores propostos por ambas as normas nas estações analisadas.

- Infiltração

Por fim, um outro fator aplicado para a obtenção da carga térmica interior é a infiltração de ar. A sua ocorrência deve-se ao fluxo de ar em pequenas aberturas presentes em janelas, portas, entre outras regiões que apresentam frestas com o meio exterior. Esse ar, não proposital que penetra no sistema já climatizado, entra com temperatura maior do que a do ambiente interior, sendo deste modo necessária a retirada dessa energia adicional para a manutenção da temperatura de conforto. Este efeito é comumente relacionado à presença de ventos e diferença de pressão entre o ambiente interno e externo. No presente trabalho não foi considerado o efeito de infiltração devido à pressão positiva presente com o funcionamento do sistema de condicionamento nos recintos.

Ao fim de toda definição das características relativas à edificação no OpenStudio, os arquivos são exportados para o EnergyPlus para a realização dos cálculos, visualizações dos resultados das variáveis requeridas e geração dos arquivos de erros presentes na simulação. O EnergyPlus é um *software* para simulação energética em edifícios criado pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) do Departamento de Energia dos Estados Unidos com o apoio de várias instituições acadêmicas, laboratórios e empresas privadas. O *software* possui diversos recursos, dentre os quais podem se destacar: soluções baseadas em balanço de energia térmica de radiação e convecção; interação horária entre zonas térmicas e ambiente; cálculos de iluminação das zonas de estudo; e relatórios detalhados dos dados de saída (ENERGYPLUS, 2019). Os dados de saída relativos à obtenção da carga térmica e seu pico obtidos no *software*, a fim

de determinar a potência máxima de trabalho, são vistos na seção de resultados desta dissertação.

3.3 Sistema de Refrigeração por Absorção e Sistema de Concentração Térmica Solar

Uma vez determinada a carga térmica de condicionamento das edificações, cabe especificar o sistema de refrigeração aplicado. Neste trabalho foram consideradas três configurações do sistema de refrigeração por absorção: simples, duplo e triplo efeito. Os estágios do ciclo de absorção conferem ao sistema diferentes desempenhos, ou seja, podem requerer mais ou menos energia térmica solar. Cada configuração requer também uma qualidade maior do calor recebido, ou seja, quanto maior o número de efeitos maior será a temperatura do calor demandado pelo sistema de refrigeração por absorção.²

Para isso, torne-se necessária a determinação do COP (Coeficiente de Performance). Este determina a relação entre a potência do evaporador ($\dot{Q}_e$) no sistema de refrigeração por absorção e a potência requerida no gerador ($\dot{Q}_g$) atendida pelo concentrador cilindro parabólico. Neste trabalho considerou-se desprezível o trabalho requerido pela bomba.

Como procedimento metodológico para a determinação do coeficiente de performance (COP) foi realizada uma análise dos principais valores na literatura acadêmica proposta por BANU & SUDHARSAN (2018). Para o estágio simples (simples efeito) foi adotado o valor de 0,65 (EISA; DEVOTTA; HOLLAND; 1986), para o duplo adotou-se 1,36 (KIM; PARK; LEE; 1999) e para o triplo efeito 1,80 (KAITA, 2002). Os valores dos coeficientes de performance para cada estágio do ciclo da absorção, assim como a temperatura de operação do gerador (T_g) são apresentados na Tabela 12.

² A aplicação de sistemas de triplo efeito é menos comum na prática, porém este trabalho o considerou na avaliação para verificar a relação quantidade x qualidade do calor requerido no sistema de condicionamento.

Tabela 12: Valores do COP e Tg para cada arranjo do Ciclo de Absorção

Ciclo de Absorção	COP	Temperatura do gerador
Simples Efeito	0,65	80 °C
Duplo Efeito	1,36	136 °C
Triplo Efeito	1,80	190 °C

Fonte: EISA; DEVOTTA; HOLLAND (1986), KIM; PARK; LEE (1999), KAITA (2002)

Com relação à operabilidade do sistema de absorção, adotou-se a utilização de Brometo de Lítio (LiBr) e Água (H_2O) como par de substâncias de trabalho para os três estágios do estudo. A água atuará como refrigerante e o brometo de lítio como substância absorvente, configuração amplamente adotada para sistemas de condicionamento de ar em ambientes. Segundo SILVA & MOREIRA (2008) o LiBr/ H_2O apresenta inúmeras vantagens para aplicação em sistemas de condicionamento de ar, as quais se destacam: alta entalpia de vaporização, não necessidade de retificação, não periculosidade, entre outros.

Após a caracterização do sistema de absorção foi realizada a simulação da planta de concentração solar térmica. Para esse fim foi utilizado o software *System Advisor Model* (SAM), versão 2018.11.11. Este é um programa gratuito e desenvolvido pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*). Amplamente utilizado por engenheiros, pesquisadores e desenvolvedores de tecnologia, o SAM é aplicado na modelagem de diversas tecnologias renováveis, como: sistemas fotovoltaicos (pequena e grande escala), concentração solar térmica, aquecimento solar da água, geração de energia geotérmica, combustão de biomassa, entre outros (BLAIR *et al.*, 2018).

O SAM é um modelo de software técnico-econômico, entretanto esse trabalho se limitará à análise energética. Como o objetivo do estudo é validar uma planta piloto em um campus universitário, neste momento a questão econômica será de menor relevância comparada às questões físicas e energéticas. Deste modo, na inicialização da modelagem, após a definição da tecnologia, adotou-se a simulação não financeira (*no financial*). Em seguida, foram definidos os parâmetros técnicos para a simulação. A Figura 36 apresenta a interface do SAM para a análise “não financeira”, cujas categorias dos dados de entrada podem ser observadas do lado esquerdo da imagem: localização e recursos, projeto do sistema, campo solar, coletores, receptores e armazenamento térmico. Para as análises

econômicas da mesma tecnologia, o *software* apresenta mais uma aba: parâmetros financeiros (*financial parameters*).

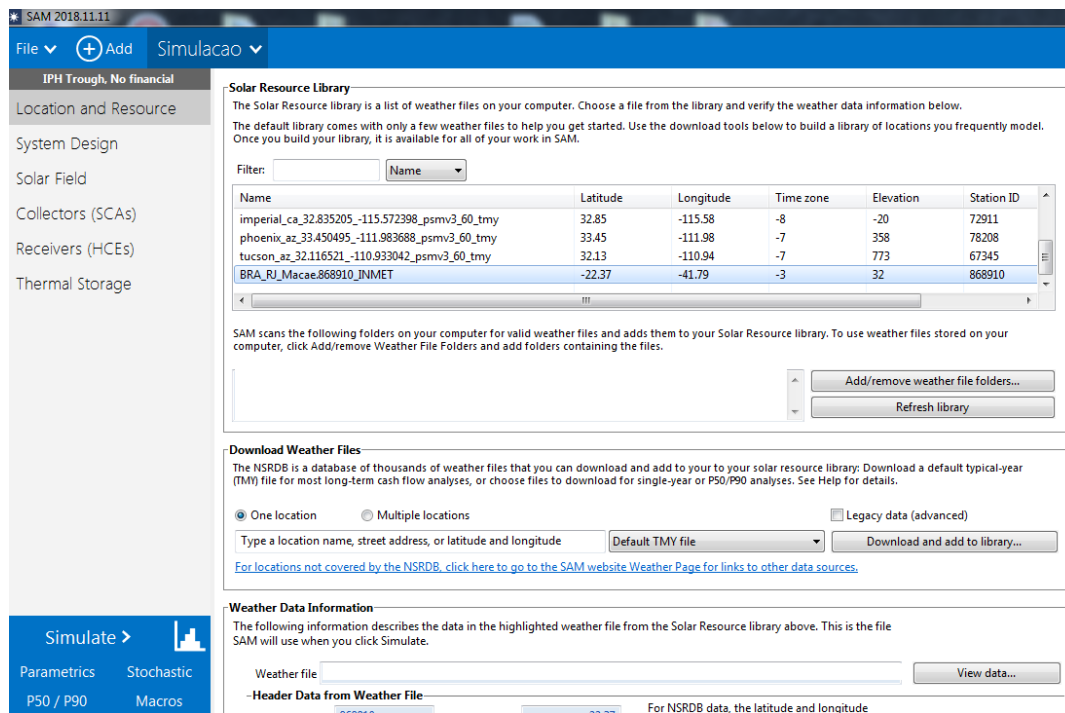


Figura 36: Interface do SAM (versão 2018.11.11). Fonte: SAM (2018)

A descrição das categorias e os principais parâmetros relacionados a cada uma delas podem ser vistos a seguir (SAM, 2018):

- **Localização e recursos (*Location and Resources*):** Nesta aba o programa oferece a importação de arquivos climáticos, seja da biblioteca do programa ou própria do usuário. Assim como, fornece a visualização gráfica de diversas variáveis climáticas após a importação. Na ausência dos dados climáticos para a cidade de Macaé na biblioteca local foi necessária a importação destes dados fornecidos por LABEEE (2018).
- **Projeto do Sistema (*System Design*):** Esta aba permite a introdução de parâmetros nominais de projeto do sistema, como: a irradiância normal direta (DNI) de projeto, o múltiplo solar, as temperaturas de entrada e saída do fluido térmico, as horas de armazenamento, potência térmica do

dissipador de calor (relação à carga térmica aplicada ao sistema de absorção), entre outros.

- Campo solar (*Solar Field*): Esta seção possibilita uma visualização organizada de dados inseridos em outras abas, como também permite a inserção e escolha de dados como: fluido de transferência térmica utilizado e a visualização de suas propriedades (Exemplo: temperaturas máxima e mínima de operação), o espaçamento e ângulos dos coletores, eficiência das bombas, potência de rastreamento (indicação da quantidade de energia elétrica consumida por mecanismo de rastreamento), entre outros.
- Coletores (*Collectors*): Aqui são definidos os parâmetros relativos aos coletores solares, que englobam: os espelhos, os receptores e a estrutura de suporte. O programa disponibiliza em sua biblioteca equipamentos encontrados comercialmente, como também permite a alteração e introdução de parâmetros desejados pelo usuário. Até 4 tipos de coletores podem ser inseridos simultaneamente na simulação. As variáveis presentes nessa seção são: dimensões do coletor, a distância média entre a superfície do coletor e o foco da parábola, comprimento dos tubos e mangueiras que conectam os coletores, parâmetros de eficiência ótica, entre outros.
- Receptores (*Receivers*): Esta aba também permite a utilização de receptores comerciais presentes na biblioteca do programa. Nela é possível visualizar e alterar os valores das características geométricas do receptor (diâmetro externo e interno dos tubos), assim como definir o material de fabricação do tubo absorvedor. Outros parâmetros presentes nessa seção são: estimativa de perda média de calor, fator ótico de sombreamento, fator de redução ótica devido à sujeira, pressão absoluta do gás no vácuo, entre outros.
- Armazenamento Térmico (*Thermal Storage*): Esta aba apresenta duas divisões. A primeira permite a visualização dos parâmetros que foram

definidos na aba “projeto do sistema”, tais como: potência do dissipador de calor, horas de armazenamento e temperatura de entrada e saída do fluido de transferência. A segunda exibe as propriedades físicas do sistema de armazenamento, como: altura e diâmetro do tanque, a altura mínima permitida do fluido, o volume de cada tanque de armazenamento, perda de calor do sistema de armazenamento, a densidade do fluido de armazenamento, entre outros.

Deste modo, a metodologia adotada para a simulação da energia térmica fornecida pelo sistema solar consiste na utilização do software SAM com o uso da tecnologia solar térmica cilindro parabólica. A Figura 37 demonstra uma simplificação da metodologia adotada a qual será descrita com detalhes a seguir.

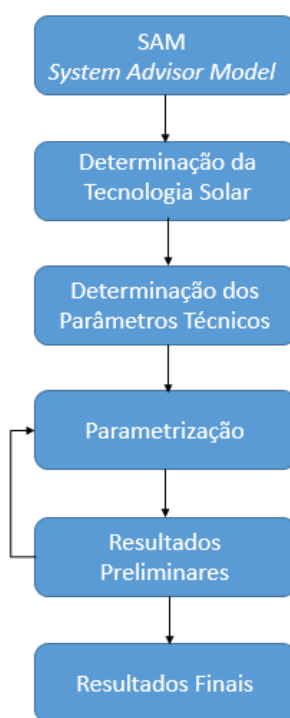


Figura 37: Fluxograma das etapas da simulação da planta solar. Fonte: Elaboração Própria

Uma vez determinada a tecnologia (concentradora solar térmica) e o tipo de análise (não financeira) devem-se definir os parâmetros da simulação. Cabe ressaltar que as etapas aqui descritas foram utilizadas para os arranjos: simples, duplo e triplo efeito do sistema de absorção.

Para a análise no software foram simulados 9 casos para cada configuração do sistema de absorção. Esses casos foram definidos através da combinação de valores de eficiência e horas de armazenamento. As horas de armazenamento aplicadas ao estudo foram de 6h, 8h e 10h. Para as eficiências foram considerados os valores de 0,5 (50%), 0,6 (60%) e 0,7 (70%). Os valores de eficiência adotados se encontram dentro de uma faixa de valores de eficiências óticas de concentradores mais baratos e com processo de fabricação mais simplificado, até valores próximos aos sistemas comerciais. Ou seja, a eficiência de 0,5 foi adotada por se encontrar próxima dos valores estudados para o tipo de construção similar ao elaborado no Campus Universitário (CARMO, 2016). A maior eficiência (0,7) foi adotada por ser um valor próximo dos concentradores produzidos comercialmente pelo mundo (eficiência em torno de 0,8 a 0,85) (KINCAID, 2018; SAM, 2018), porém considerando que os painéis fabricados nacionalmente apresentarão menor eficiência. Os casos foram elaborados como mostra a Tabela 13.

Tabela 13: Casos simulados em relação a eficiência e a hora de armazenamento

Casos ³	Eficiência	Horas de armazenamento
BE/06	0,5	6h
BE/08	0,5	8h
BE/10	0,5	10h
ME/06	0,6	6h
ME/08	0,6	8h
ME/10	0,6	10h
AE/06	0,7	6h
AE/08	0,7	8h
AE/10	0,7	10h

Fonte: Elaboração Própria

Após a criação dos casos foi realizada uma primeira otimização simplificada dos parâmetros através de uma análise paramétrica. Essa análise considerou como valores ótimos os que conferiam uma maior produção anual de energia térmica. Nessa primeira

³ BE= Baixa eficiência (0,5); ME= Média Eficiência (0,6); AE= Alta Eficiência (0,7)

otimização foi parametrizado o Múltiplo Solar. Este é um importante parâmetro na simulação, pois o Múltiplo Solar representa a razão da potência térmica do receptor no campo solar pela potência do dissipador de calor que será entregue ao sistema de absorção (SAM, 2018).

Na próxima etapa foi realizada, para cada caso, a análise paramétrica para a determinação da temperatura de saída do fluido térmico que otimizasse a produção anual de energia. Para isso, foi inserido um conjunto de valores acima da temperatura de entrada do fluido variando de 5° C para cada intervalo. Salienta-se, que a temperatura de entrada do fluido foi obtida utilizando um acréscimo de $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ em relação a temperatura do gerador (T_g), valor amplamente adotado na literatura acadêmica (ANAPOLSKI & INDRUSIAK, 2015; FLOUDAS & GROSMANN, 1987; CERETO, 2004; SANTOS & JESUS, 2005). A Tabela 14 abaixo apresenta os valores adotados como temperatura de entrada do fluido térmico para cada arranjo do sistema de absorção.

Tabela 14: Valores da temperatura de entrada do fluido térmico em cada arranjo do sistema de absorção

Ciclo de Absorção	Temperatura de entrada
Simple Efeito	90 °C
Duplo Efeito	146 °C
Triplo Efeito	200 °C

Fonte: Elaboração Própria

Para a determinação da potência de operação do dissipador de calor foi utilizada a seguinte relação:

$$COP = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} \quad (1)$$

Com a carga térmica máxima para o condicionamento do edifício obtida na seção 3.2 e os COPs adotados na Tabela 12, pode-se calcular a potência térmica do dissipador de calor ($\dot{Q}_g$). Esses valores são apresentados no capítulo de resultados, pois dependem da simulação da carga térmica de condicionamento.

Ao fim dessas parametrizações obtêm-se todos os valores necessários dos parâmetros da aba “projeto do sistema”. A Figura 38 representa a tela dessa aba com os valores de cada parâmetro para o caso BE/06 do estágio simples de absorção.

Design Point Parameters	
Solar Field Design point DNI 500 W/m² Target solar multiple 2.5 Target receiver thermal power 3.00 MWt Loop inlet HTF temperature 90 °C Loop outlet HTF temperature 120 °C	
Heat Sink Heat sink power 1.20 MWt Pumping power for HTF through heat sink 0.55 kW/kg/s Choose Number of Loops	
Thermal Storage Hours of storage at design point 6 hours	
System Availability and Curtailment Curtailment and availability losses reduce the system output to represent system outages or other events. Edit losses... Constant loss: 4.0 % Hourly losses: None Custom periods: None	
System Summary Actual number of loops 12 Actual solar multiple 2.56 Total aperture reflective area 16,560.0 m² Actual field thermal output 3.08 MWt	

Figura 38: Tela dos parâmetros da aba Projeto do Sistema. Fonte: Elaboração Própria

Após a definição da aba “projeto do sistema”, realizou-se a introdução dos parâmetros relativos ao campo solar. O fluido térmico escolhido para a realização da transferência de calor foi água pressurizada, cuja as propriedades podem ser vistas na Figura 39. Os demais valores considerados são padrão do sistema.

Solar Field Parameters	Heat Transfer Fluid
Row spacing 15 m Stow angle 170 deg Deploy angle 10 deg Header pipe roughness 4.6e-05 m HTF pump efficiency 0.85 Piping thermal loss coefficient 0.45 W/m²-K Wind stow speed 25.0 m/s Tracking power per SCA 125.0 W/sca Total tracking power 5,000.0 W Number of field subsections 1 Model piping through heat sink? ☐ Length of piping through heat sink 50.0 m	Field HTF fluid Pressurized Water User-defined HTF fluid Edit... Field HTF min operating temp 10 °C Field HTF max operating temp 220 °C Freeze protection temp 10 °C Min single loop flow rate 1 kg/s Max single loop flow rate 15 kg/s Min field flow velocity 0.228212 m/s Max field flow velocity 3.50111 m/s Header design min flow velocity 2 m/s Header design max flow velocity 3 m/s

Figura 39: Tela dos parâmetros da aba Campo Solar. Fonte: Elaboração Própria

Na aba relacionada aos coletores escolheu-se um modelo comercial encontrado na biblioteca do programa: coletor *SkyFuel SkyTrough*. Os principais parâmetros relacionados a geometria do coletor foram mantidos para a simulação, porém os parâmetros óticos foram alterados de modo que fornecessem uma eficiência ótica nos

valores de estudo (0,5; 0,6 e 0,7). A Figura 40 apresenta os valores de cada parâmetro para o caso BE/06 do estágio simples.

Collector Type 1

Collector name from library

Collector Geometry			
Reflective aperture area	656 m ²	Number of modules per assembly	8
Aperture width, total structure	6 m	Average surface-to-focus path length	2.15 m
Length of collector assembly	115 m	Piping distance between assemblies	1 m

Optical Parameters			
Incidence angle modifier coefficients	Edit data...	Geometry effects	0.8
Tracking error	0.9766	Mirror reflectance	0.8
General optical error	1	Dirt on mirror	0.8

Optical Calculations			
Length of single module	14.375 m	End loss at summer solstice	0.999643
IAM at summer solstice	1.00188	Optical efficiency at design	0.500019

Figura 40: Tela dos parâmetros da aba Coletores. Fonte: Elaboração Própria

Na aba referente aos receptores foi definido um modelo comercial encontrado na biblioteca do programa: receptor *Schott PTR80*. Nenhum valor foi alterado nessa aba, foi considerado o valor padrão do receptor citado para todos os parâmetros. A Figura 41 apresenta os valores de cada variável.

Receiver Type 1

Receiver name from library

Receiver Geometry			
Absorber tube inner diameter	0.076 m	Absorber flow plug diameter	0 m
Absorber tube outer diameter	0.08 m	Internal surface roughness	4.5e-05
Glass envelope inner diameter	0.115 m	Absorber flow pattern	Tube flow
Glass envelope outer diameter	0.12 m	Absorber material type	304L

Figura 41: Tela dos parâmetros da aba Receptores. Fonte: Elaboração Própria

Por fim, na última aba foram definidos os valores referentes ao armazenamento térmico. Nessa seção foi considerado o valor padrão do programa em cada parâmetro na área de Sistema de Armazenamento. Os valores dos Parâmetros do Projeto do Sistema,

como a hora de armazenamento, já foram aplicados na aba Projeto do Sistema. A Figura 42 apresenta os valores de cada parâmetro para o caso BE/06 do estágio simples.

System Design Parameters					
Heat sink power	1.2	MWt	Loop outlet HTF temperature	120.0	°C
Hours of storage at design point	6.0	hours	Loop inlet HTF temperature	90.0	°C

Storage System					
TES thermal capacity	7.2	MWt-hr	Initial hot HTF percent	30	%
Available HTF volume	217	m³	Cold tank heater temperature set point	50	°C
Tank height	15	m	Cold tank heater capacity	0.5	MWe
Tank fluid minimum height	0.5	m	Hot tank heater temperature set point	110	°C
Storage tank volume	224	m³	Hot tank heater capacity	1	MWe
Parallel tank pairs	1		Tank heater efficiency	0.99	
Tank diameter	4.4	m	HTF density	955.704	kg/m³
Wetted loss coefficient	0.3	Wt/m²-K			
Estimated heat loss	0.02	MWt			

Figura 42: Tela dos parâmetros da aba Armazenamento Térmico. Fonte: Elaboração Própria

Todos os procedimentos descritos para cada aba do SAM foram realizados nos três estágios do ciclo de absorção. Ou seja, os valores característicos de cada estágio: potência requerida no dissipador, temperatura de entrada e saída do fluido, os valores otimizados das análises paramétricas do múltiplo solar, entre outros, foram modificados nas análises de cada caso. Com essa simulação foi permitida também a comparação da área requerida para as diferentes configurações do ciclo de absorção.

De forma a avaliar simultaneamente o perfil da carga térmica requerida no sistema de absorção e a carga térmica fornecida pelo sistema solar, foi realizada uma organização dos dados em planilhas no Microsoft Excel® com as médias horárias em cada mês. Com isso, tornou-se possível a análise dos efeitos das diversas variáveis do estudo, como também a interação horária do fornecimento e requerimento de energia que permitiu a determinação da fração de energia auxiliar. A exposição gráfica dos resultados e sua discussão são apresentadas no próximo capítulo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo é dedicado à exposição e discussão dos resultados. Para esse fim, o capítulo está organizado em duas seções. A primeira seção apresenta os resultados gerais do estudo: a carga térmica da edificação, o valor dos parâmetros otimizados na simulação do sistema de concentração solar, a energia produzida e a área requerida. Na segunda seção é exposta, de forma detalhada, a interação horária da energia térmica produzida e a requerida para casos específicos. Com isso, determina-se a fração de energia auxiliar requerida em cada caso proposto.

4.1 Resultados Gerais

A Tabela 15 apresenta o resultado da simulação da carga térmica de condicionamento requerida por um edifício do complexo universitário. Esta tabela expõe os valores do pico da carga térmica requerida no evaporador do sistema de condicionamento por zona, o dia e horário de ocorrência desse pico, a temperatura interna do ambiente, a temperatura do termostato, a temperatura externa e a umidade específica. Esses valores são imprescindíveis para a caracterização da curva de carga e a determinação dos parâmetros de entrada para a simulação do sistema de concentração solar. Cabe ressaltar que as zonas 7, 8 e 9 (banheiros do 1º, 2º e 3º andar) não se encontram na tabela pois, apesar de influenciarem na carga térmica dos outros ambientes, não possuem sistemas de climatização.

Tabela 15: Resultado da simulação da carga térmica de condicionamento

	Carga Térmica Pico (W)	Dia e horário de Pico	Temperatura Interna (°C)	Temperatura do Termostato (°C)	Temperatura Externa (°C)	Umidade Específica (kg Água/kg Ar)
Zona Térmica 1	25389	21/11 17:10h	22,99	23	32,71	0.0209
Zona Térmica 2	33069	21/11 16:50h	22,98	23	33,21	0.0209
Zona Térmica 3	64552	21/11 16:40h	22,98	23	33,43	0.0209
Zona Térmica 4	76028	21/11 17:10h	22,98	23	32,71	0.0209
Zona Térmica 5	24068	21/11 17:10h	22,98	23	32,71	0.0209
Zona Térmica 6	27734	21/11 17:20h	22,98	23	32,44	0.0209
Zona Térmica 10	12729	21/11 17:20h	22,98	23	32,44	0.0209

Fonte: Elaboração própria

O somatório da carga térmica demandada no evaporador é fundamental para a definição da potência do gerador. A carga térmica para cada edifício vale 263.572 W. Os três edifícios em conjunto totalizam uma carga de 790.716 W. A relação dessa carga com o COP resulta na carga térmica no gerador, seus valores são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Carga térmica requerida pelo gerador do sistema de refrigeração por absorção

Ciclo de Absorção	COP	Carga Térmica no Gerador (kW)
Simple Efeito	0,65	1.216
Duplo Efeito	1,36	581
Triplo Efeito	1,80	439

Fonte: Elaboração própria

Conforme apresentado na seção 3.3, os valores da carga térmica no gerador apresentados na tabela acima são utilizados como dados de entrada da potência do sistema de condicionamento solar no SAM. Para o sistema de simples efeito essa potência foi inserida com o valor de 1,2 MW. Para o sistema de duplo e triplo efeito foram, respectivamente, 0,58 MW e 0,43 MW.

A Tabela 17 apresenta uma organização dos resultados das parametrizações das variáveis que otimizam a produção anual de energia (múltiplo solar e temperatura de saída do fluido) e os dados de saída relevantes (energia líquida anual, carga de eletricidade anual e área total reflexiva) para cada caso do sistema de simples efeito.

Como esperado, observa-se um aumento da produção de energia para os seguintes casos:

- mesmo múltiplo solar e hora de armazenamento superior;
- eficiência superior com múltiplo solar e hora de armazenamento similares;
- múltiplo solar superior e mesma eficiência.

Cabe ressaltar que essa tabela apenas expõe os valores ótimos da parametrização e os valores de saída, não sendo o foco principal da análise do estudo. Esta tabela evidencia o aspecto quantitativo das variáveis em cada caso citado.

Tabela 17: Resultado da Simulação no SAM para o Sistema de Simples Efeito

Casos	Múltiplo Solar	Temperatura de saída do fluido (°C)	Energia líquida Anual (kWh-t)	Carga de Eletricidade Anual (kWh-e)	Área Total Reflexiva (m²)
BE/06	2,5	120	2.949.237	76.946	16.560
BE/08	3,0	110	3.114.013	85.513	20.700
BE/10	3,0	110	3.176.206	91.034	20.700
ME/06	2,5	120	3.058.685	70.213	13.800
ME/08	3,0	120	3.508.840	76.972	16.560
ME/10	3,0	120	3.798.339	82.906	16.560
AE/06	2,5	130	3.138.260	52.942	12.420
AE/08	3,0	120	3.635.916	74.678	15.180
AE/10	3,0	120	3.967.661	80.936	15.180

Fonte: Elaboração própria.

De modo análogo ao anterior, a Tabela 18 e a Tabela 19 apresentam os resultados da simulação no SAM para a operação dos sistemas de refrigeração de duplo e triplo efeito, respectivamente.

Tabela 18: Resultado da Simulação no SAM para o Sistema de Duplo Efeito

Casos	Múltiplo Solar	Temperatura de saída do fluido (°C)	Energia líquida Anual (kWh-t)	Carga de Eletricidade Anual (kWh-e)	Área Total Reflexiva (m²)
BE/06	3,0	170	1.384.527	63.172	15.180
BE/08	3,0	170	1.577.701	67.469	15.180
BE/10	3,0	170	1.719.000	72.605	15.180
ME/06	3,0	170	1.465.518	42.513	12.420
ME/08	3,0	170	1.654.163	45.853	12.420
ME/10	3,0	170	1.793.488	48.585	12.420
AE/06	3,0	180	1.496.540	36.735	11.040
AE/08	3,0	190	1.592.038	44.847	11.040
AE/10	3,0	170	1.902.196	46.752	11.040

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 19: Resultado da Simulação no SAM para o Sistema de Triplo Efeito

Casos	Múltiplo Solar	Temperatura de saída do fluido (°C)	Energia líquida Anual (kWh-t)	Carga de Eletricidade Anual (kWh-e)	Área Total Reflexiva (m²)
BE/06	2,5	220	561.062	37.206	6.900
BE/08	2,0	220	544.341	37.620	5.520
BE/10	2,0	220	545.850	49.691	5.520
ME/06	2,5	220	603.079	34.869	6.900
ME/08	2,0	220	642.195	35.604	5.520
ME/10	2,0	220	643.464	36.550	5.520
AE/06	2,5	220	679.823	36.809	5.520
AE/08	2,5	220	723.163	38.108	5.520
AE/10	4,0	220	842.598	43.887	8.280

Fonte: Elaboração própria

Na subseção seguinte são apresentados os resultados da carga produzida e demandada para as diferentes configurações do sistema de absorção (simples efeito, duplo e triplo efeito). Esses resultados são expostos através das curvas elaboradas em planilha com as cargas horárias médias em cada mês do ano. Devido ao grande número de casos em cada configuração (9 em cada), foram determinados dois casos para a discussão detalhada e a exposição gráfica das curvas de cargas.

4.2 Resultados Específicos

Esta seção apresenta os resultados da interação entre a energia térmica produzida pelo sistema de concentração solar e a requerida nos diferentes sistemas de refrigeração (simples, duplo e triplo efeito). Para cada configuração, realiza-se uma exposição gráfica da interação das curvas de demanda e produção de energia, as quais foram realizadas através da organização de dados em planilha eletrônica com as médias horárias de cada mês.

Para esse fim, foram considerados dois casos: o de pior eficiência ótica (0,5) e 6 horas de armazenamento (menor tempo de armazenamento aplicado ao estudo), e um caso

de melhor eficiência (0,7) e armazenamento de 10h (maior tempo de armazenamento aplicado ao estudo).

4.2.1 Resultado Simples Efeito

Nesta subseção são apresentadas, no mesmo gráfico, as curvas de carga térmica fornecida pelo sistema de concentração solar (oferta) e a requerida pelo gerador do ciclo de refrigeração por absorção (demanda) de simples efeito para os casos BE/06 e AE/10.

- CASO BE/06

As três figuras abaixo (Figura 43, Figura 44 e Figura 45) mostram o comportamento da carga produzida, carga requerida e a diferença entre elas para o caso BE/06 (eficiência ótica: 0,5; horas de armazenamento: 6h) no sistema de simples efeito. As figuras citadas representam, individualmente, cada quadrimestre do ano.

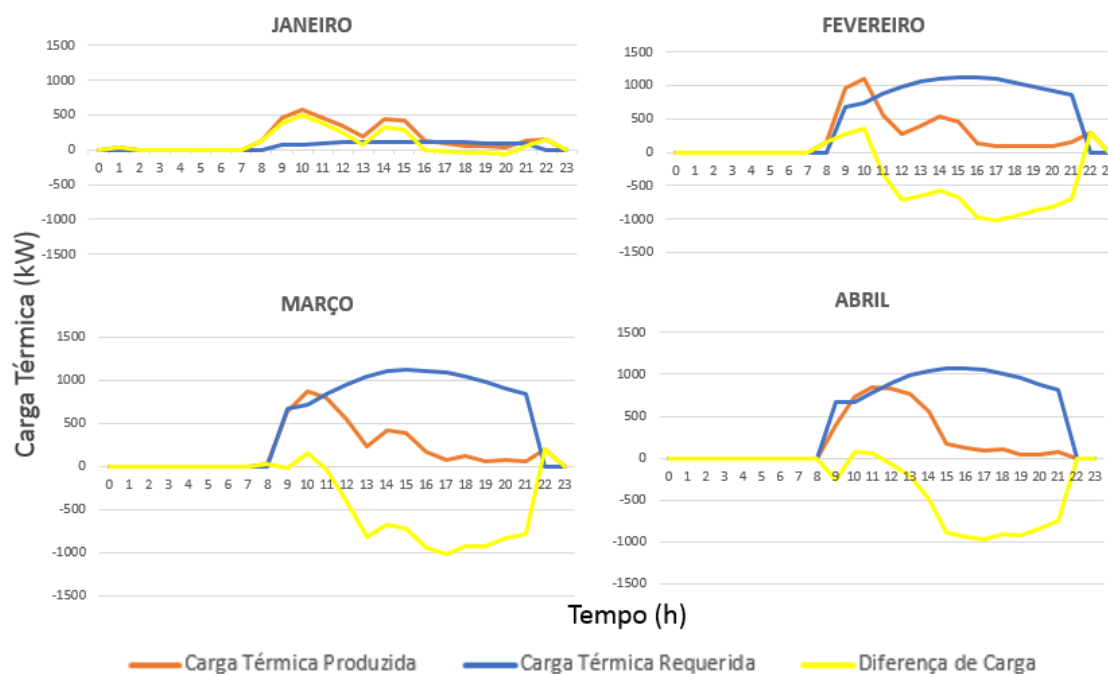


Figura 43: Comparação das cargas térmicas do 1º quadrimestre, Caso BE/06: Simples Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

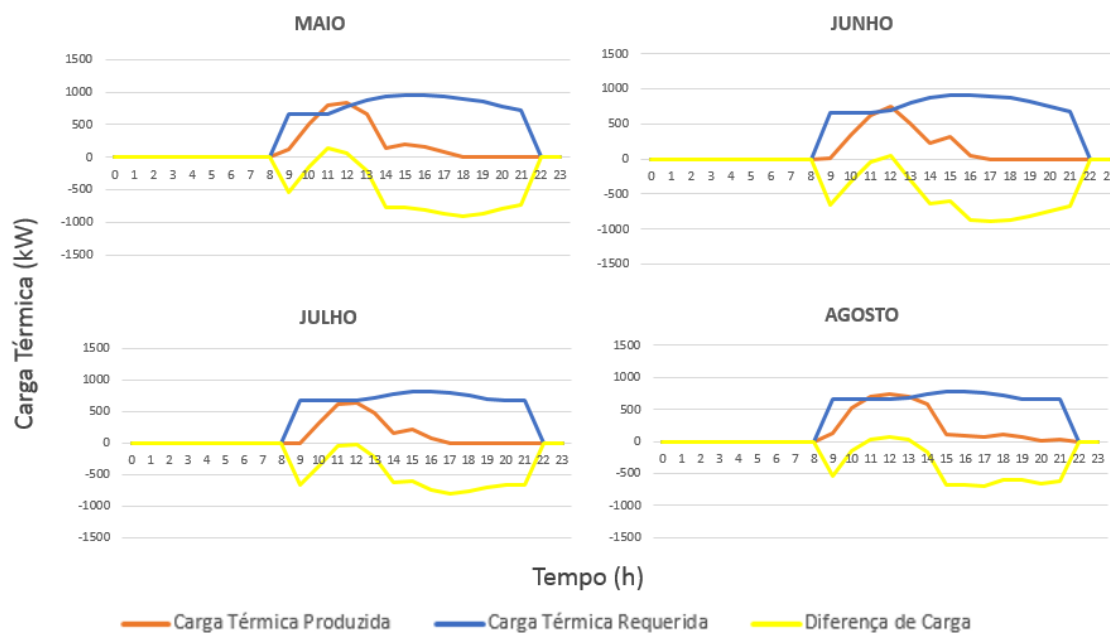


Figura 44: Comparação das cargas térmicas do 2º quadrimestre, Caso BE/06: Simples Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

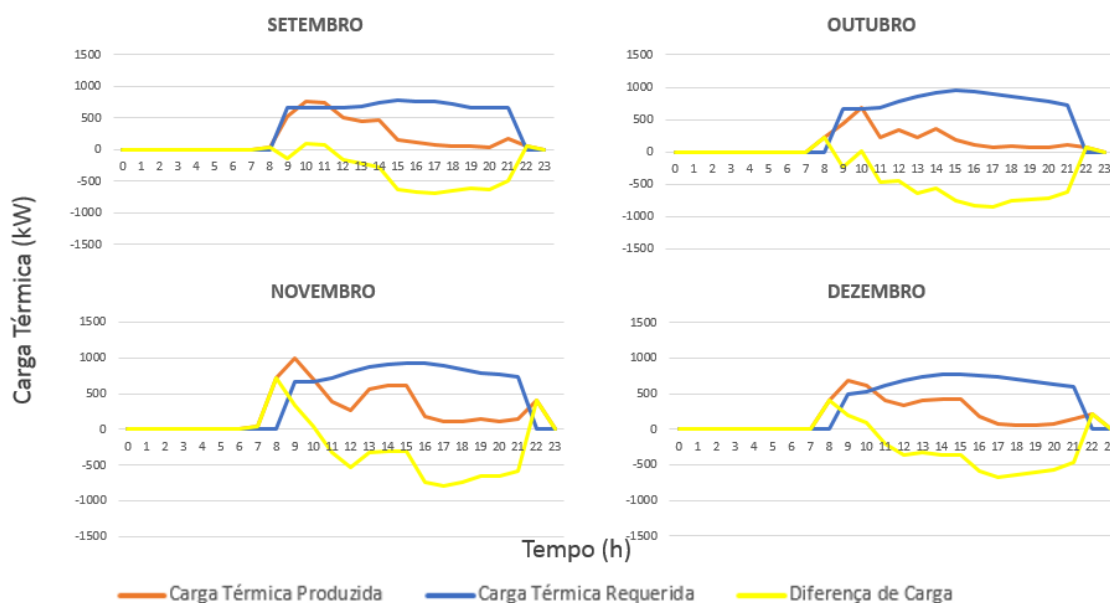


Figura 45: Comparação das cargas térmicas do 3º quadrimestre, Caso BE/06: Simples Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

Para o sistema de simples efeito, conforme apresentado na metodologia, os resultados demonstram uma maior necessidade de energia térmica devida ao menor COP. Ou seja, apresentam altos valores nas curvas de demanda (linhas azuis dos gráficos).

Como observado no mês de janeiro, a produção de energia é consideravelmente superior a demanda energética em maior parte das horas, isso devido ao menor requerimento de energia durante as férias acadêmicas.

A carga térmica requerida nos meses de fevereiro a dezembro é mais elevada, o que resulta na necessidade de mais de 50% de energia auxiliar. Ou seja, torna-se fundamental a aplicação de uma fonte complementar para o suprimento dessa diferença de energia. O mês que apresenta maior demanda de energia auxiliar é o mês de julho (73,43%). Em média o caso proposto supre cerca de 40% da demanda energética anual do complexo.

- CASO AE/10

Os resultados referentes ao Caso AE/10 do sistema de simples efeito são apresentados na Figura 46, Figura 47 e Figura 48. De modo análogo ao caso anterior, o mês de janeiro requer menos energia auxiliar em comparação aos outros meses do ano. O mês de julho é o que representa a maior taxa de requerimento de energia auxiliar em relação a demanda (69%). O caso proposto supre em média 44% da demanda energética anual.

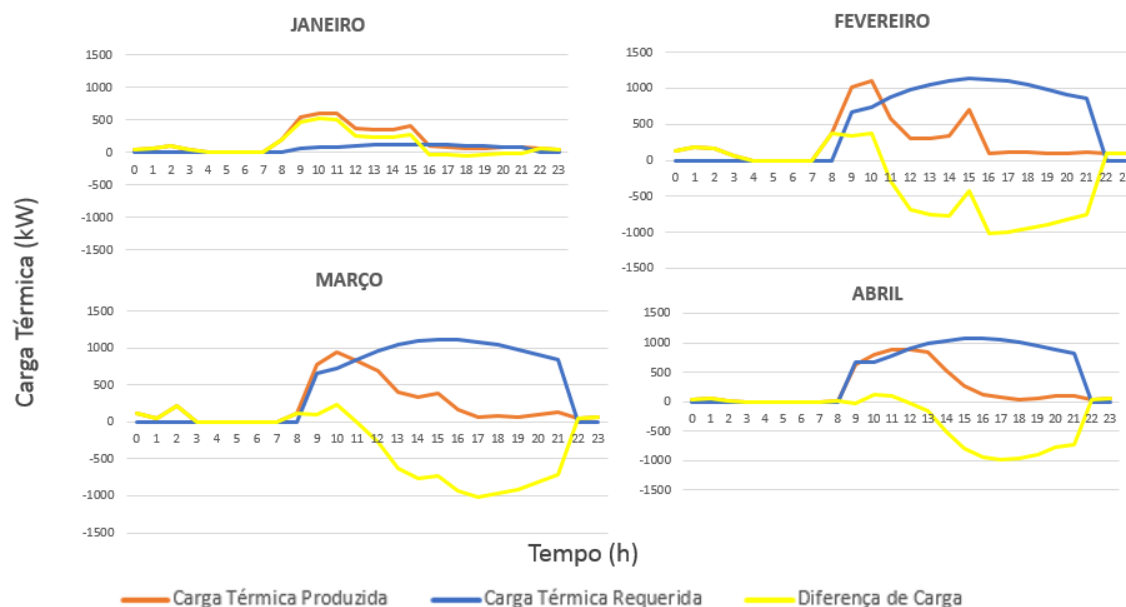


Figura 46: Comparação das cargas térmicas do 1º quadrimestre, Caso AE/10: Simples Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

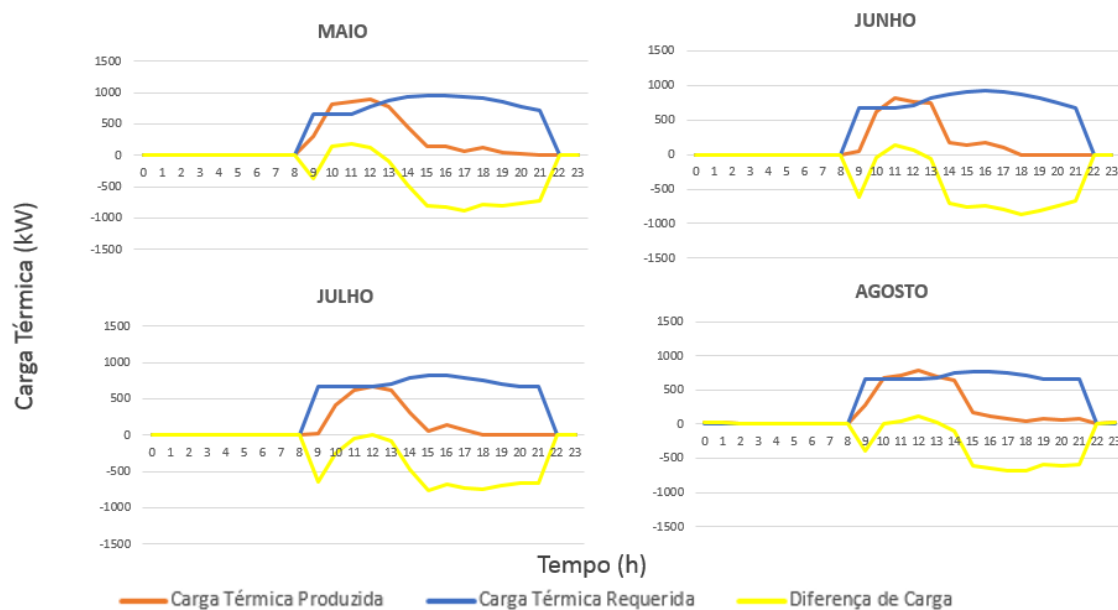


Figura 47: Comparação das cargas térmicas do 2º quadrimestre, Caso AE/10: Simples Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

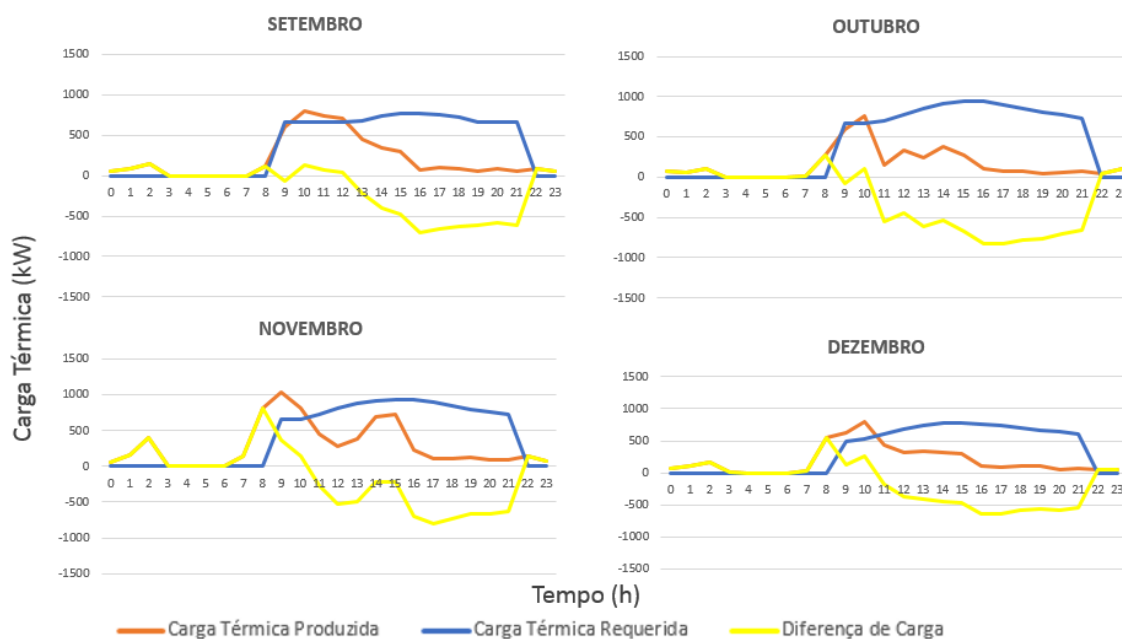


Figura 48: Comparação das cargas térmicas do 3º quadrimestre, Caso AE/10: Simples Efeito. Fonte: Elaboração Própria.

A Tabela 20 apresenta a fração do requerimento de energia auxiliar pela demanda (em porcentagem) dos casos BE/06 e AE/10 para cada mês do ano. Deste modo, permite-se analisar comparativamente o resultado da implicação de cada caso.

Tabela 20: Fração de requerimento de energia auxiliar para os casos de simples efeito

Meses	Simples Efeito (Caso BE/06)	Simples Efeito (Caso AE/10)
Janeiro	13%	12%
Fevereiro	66%	65%
Março	66%	63%
Abril	61%	57%
Maio	69%	61%
Junho	73%	67%
Julho	73%	69%
Agosto	59%	54%
Setembro	57%	54%
Outubro	72%	71%
Novembro	57%	56%
Dezembro	59%	56%

Fonte: Elaboração Própria

Quando comparado os casos, verifica-se uma redução média mensal da energia auxiliar de aproximadamente 3%. A maior diferença do caso BE/06 para o caso AE/10 é observada no mês de maio, um decréscimo aproximado de 8%.

De forma geral, ambos os casos analisados apresentam consideráveis frações de requerimento de energia auxiliar, porém apresentam uma proximidade nos valores mensais (em torno de 50%-70%), exceto janeiro (12-13%).

4.2.2 Resultado Duplo Efeito

Analogamente a subseção 4.2.1, nesta são apresentadas as curvas de carga térmica fornecida pelo sistema de concentração solar e a requerida pelo gerador do ciclo de refrigeração por absorção, desta vez para um sistema de duplo efeito. Os resultados demonstrados também referem-se aos casos BE/06 e AE/10.

- **CASO BE/06**

Os resultados referentes ao caso BE/06 do sistema de duplo efeito são vistos na Figura 49, Figura 50 e Figura 51, que demonstram para cada quadrimestre do ano: a carga térmica produzida pelo sistema de concentração solar, a carga requerida pelo sistema de condicionamento e a diferença entre as cargas citadas.

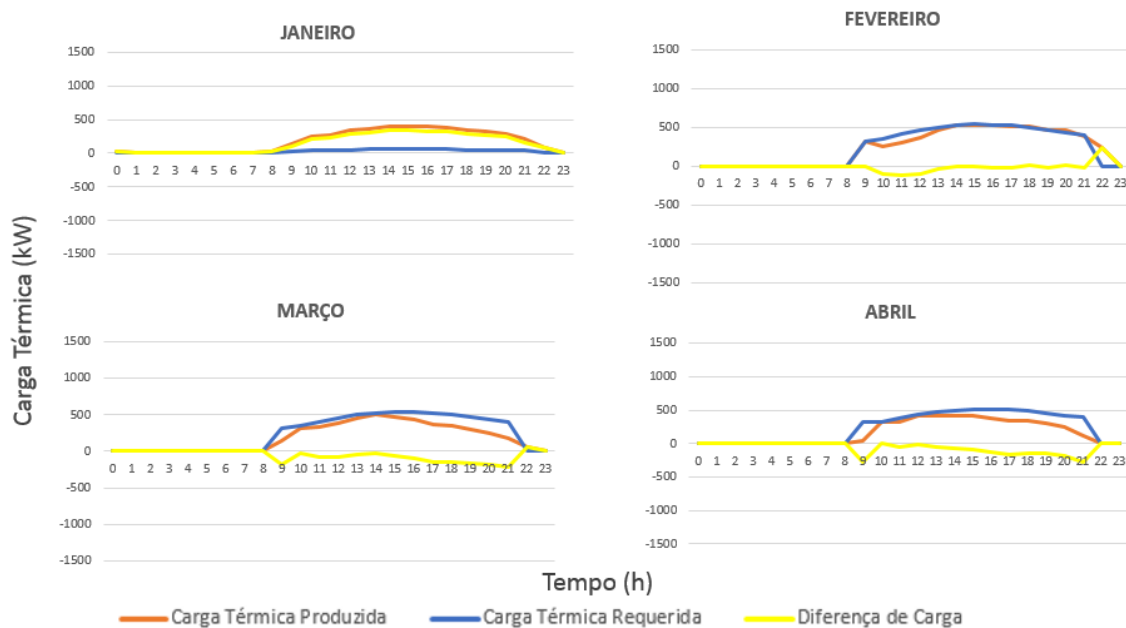


Figura 49: Comparação das cargas térmicas do 1º quadrimestre, Caso BE/06: Duplo Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

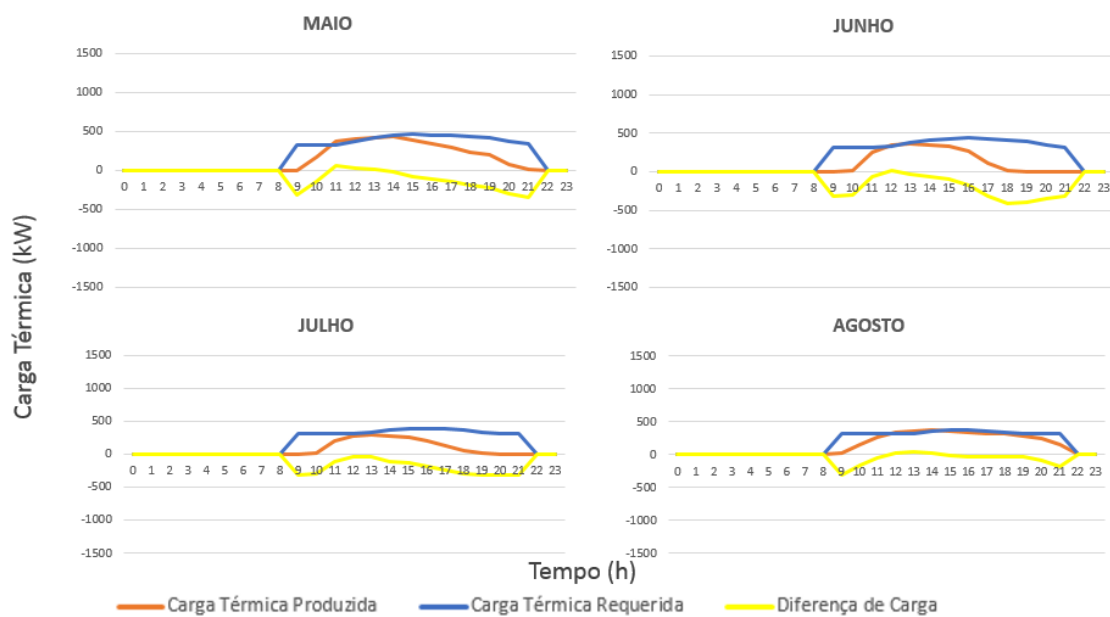


Figura 50: Comparação das cargas térmicas do 2º quadrimestre, Caso BE/06: Duplo Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

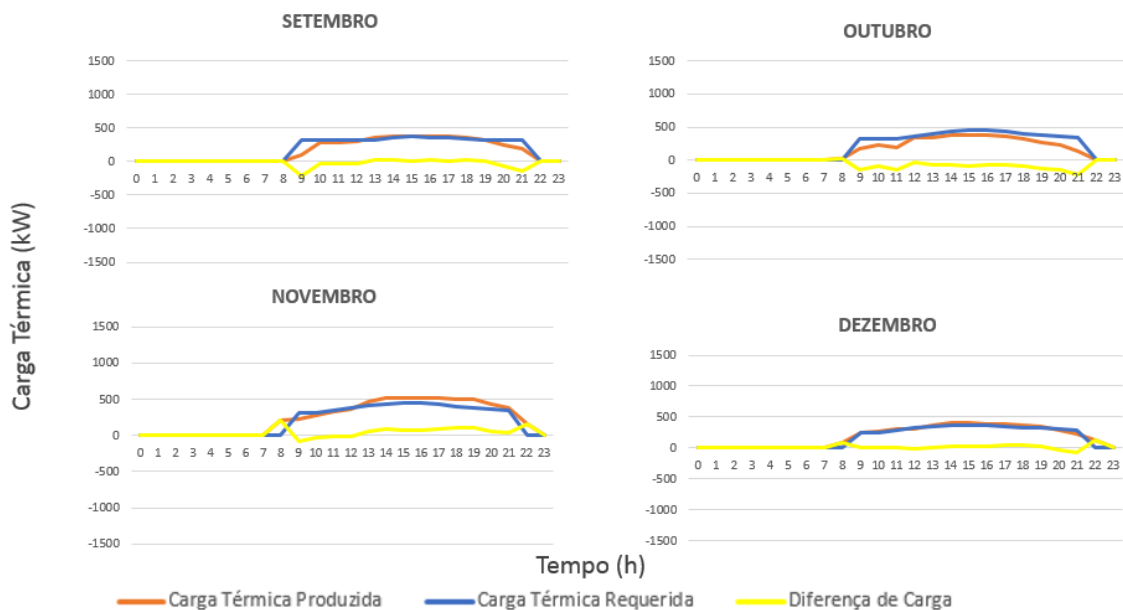


Figura 51: Comparação das cargas térmicas do 3º quadrimestre, Caso BE/06: Duplo Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

Primeiramente, nota-se que as curvas de demanda (representadas nos gráficos pela linha azul) para cada mês sofreram um estreitamento. Esta ocorrência deve-se ao maior COP do sistema de duplo efeito comparado ao de simples efeito, que implica num menor requerimento de energia térmica.

Observa-se que mesmo no caso BE/06 (caso de menor eficiência) toda a curva de demanda está abaixo da curva de energia produzida no mês de janeiro. Ou seja, o sistema para esse mês é autossuficiente, pois toda energia térmica requerida é suprida pelo sistema de concentração solar.

Em relação à necessidade de energia auxiliar, os meses de fevereiro a dezembro apresentam em sua maioria valores abaixo de 50%. Exceto os meses de junho e julho que apresentam um maior requerimento: 58% e 62%, respectivamente. Em média o caso proposto supre cerca de 77% da demanda energética anual do complexo.

- CASO AE/10

No caso AE/10 do sistema de duplo efeito (Figura 52, Figura 53 e Figura 54) observa-se que além do mês de janeiro não requerer energia auxiliar, os meses de fevereiro, março, agosto, setembro, novembro e dezembro apresentam um requerimento abaixo de 10%. O mês de julho apresenta a maior taxa de requerimento de energia

auxiliar: 50%. Em média o sistema do caso proposto supre cerca de 84% da demanda energética anual do complexo.

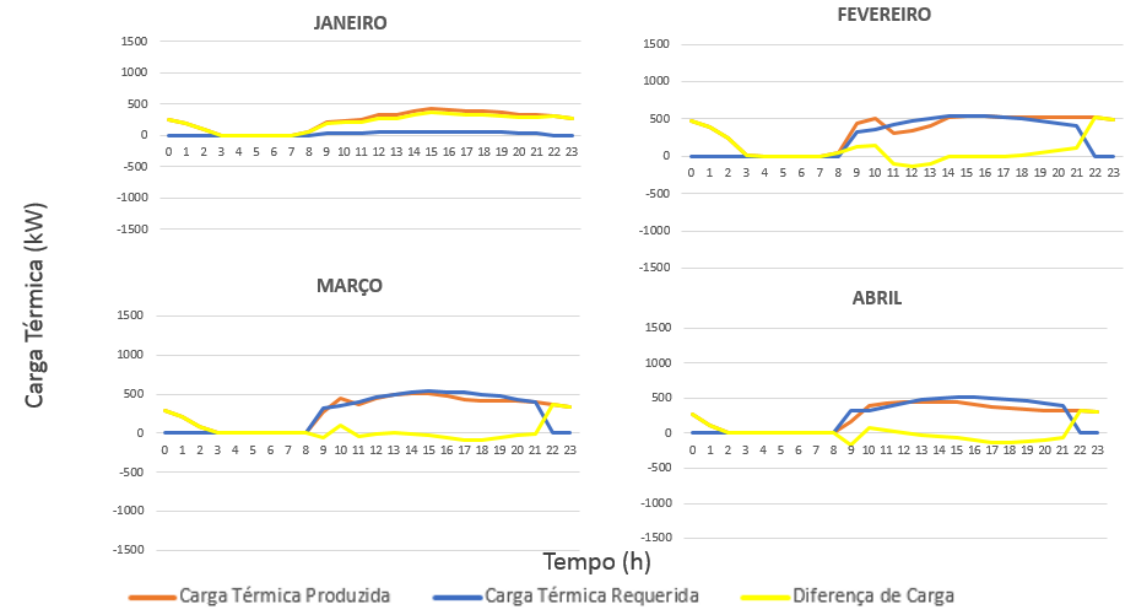


Figura 52: Comparação das cargas térmicas do 1º quadrimestre, Caso AE/10: Duplo Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

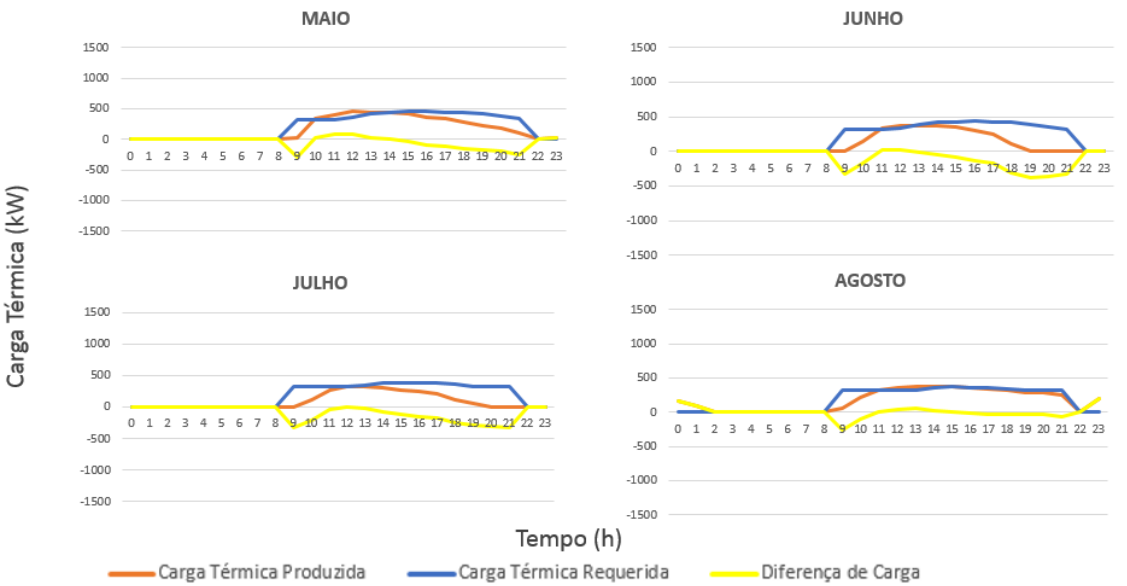


Figura 53: Comparação das cargas térmicas do 2º quadrimestre, Caso AE/10: Duplo Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

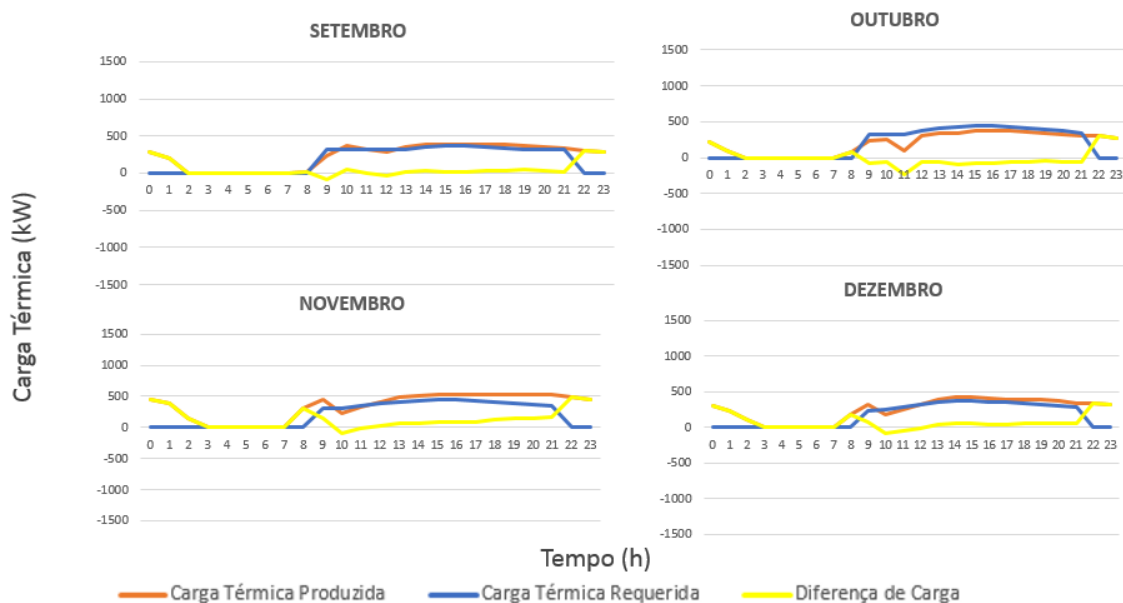


Figura 54: Comparação das cargas térmicas do 3º quadrimestre, Caso AE/10: Duplo Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

A Tabela 21 apresenta as frações do requerimento de energia auxiliar pela demanda dos casos BE/06 e AE/10 do sistema de duplo efeito para cada mês do ano.

Tabela 21: Fração de requerimento de energia auxiliar para os casos de duplo efeito

Meses	Duplo Efeito (Caso BE/06)	Duplo Efeito (Caso AE/10)
Janeiro	0%	0%
Fevereiro	6%	6%
Março	24%	8%
Abril	28%	17%
Maio	37%	25%
Junho	58%	47%
Julho	62%	50%
Agosto	21%	12%
Setembro	11%	3%
Outubro	26%	20%
Novembro	3%	2%
Dezembro	2%	2%

Fonte: Elaboração Própria

Ao comparar-se os casos BE/06 e AE/10 do duplo efeito, verifica-se uma diferença inexpressiva nos meses de novembro a fevereiro. A maior diferença do caso BE/06 para o caso AE/10 é observada no mês de março, com um decréscimo aproximado de 16%. Do caso AE/10 para o caso BE/06 há uma redução média mensal da energia auxiliar de aproximadamente 7%.

De maneira geral, ambos os casos analisados apresentam taxas de requerimento de energia auxiliar significativamente inferiores aos sistemas de simples efeito (cerca de 35%). Desta forma, a configuração de duplo efeito demonstra-se um sistema tecnicamente bem interessante. Visto que existem sistemas de refrigeração de duplo efeito no mercado e o balanço energético demonstrou-se bem favorável. Segundo (BERECHE, 2007), empresas no Brasil como a Thermax do Brasil e TUMA/BROAD comercializam tecnologia de absorção de duplo efeito.

4.2.3 Resultado Triplo Efeito

Nesta subseção são apresentadas as curvas de carga térmica fornecida pelo sistema de concentração solar e a requerida pelo gerador do ciclo de refrigeração por absorção de triplo efeito. Com o objetivo de comparar com os sistemas antes analisados, serão apresentados os casos BE/06 e AE/10.

- **CASO BE/06**

A Figura 55, Figura 56 e Figura 57 são referentes aos resultados do caso BE/06 (eficiência ótica: 0,5; horas de armazenamento: 6h) para o sistema de triplo efeito.

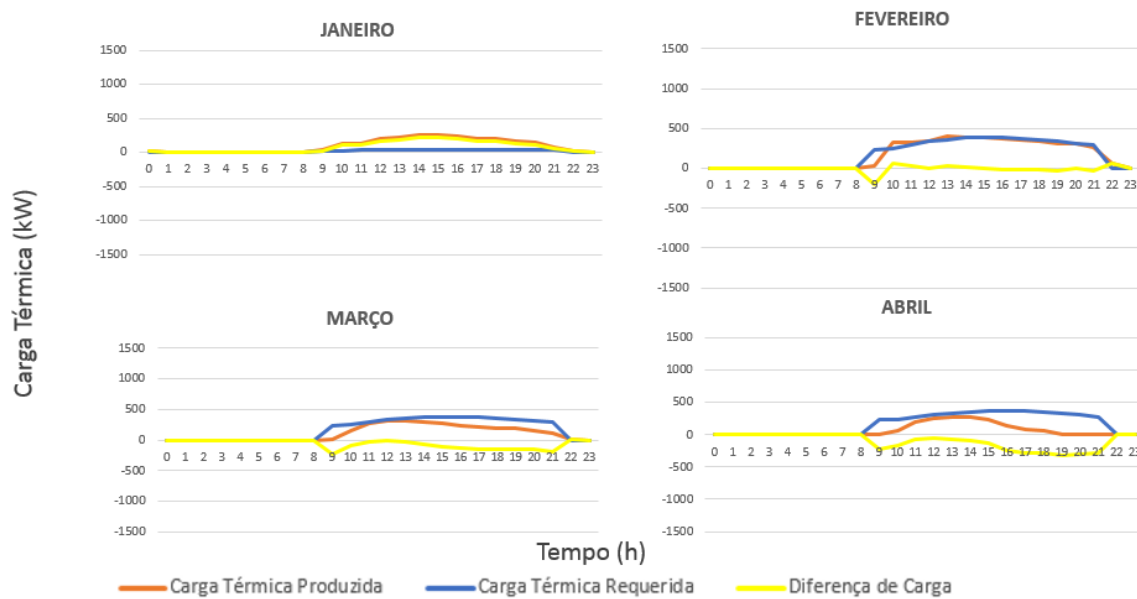


Figura 55: Comparação das cargas térmicas do 1º quadrimestre, Caso BE/06: Triplo Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

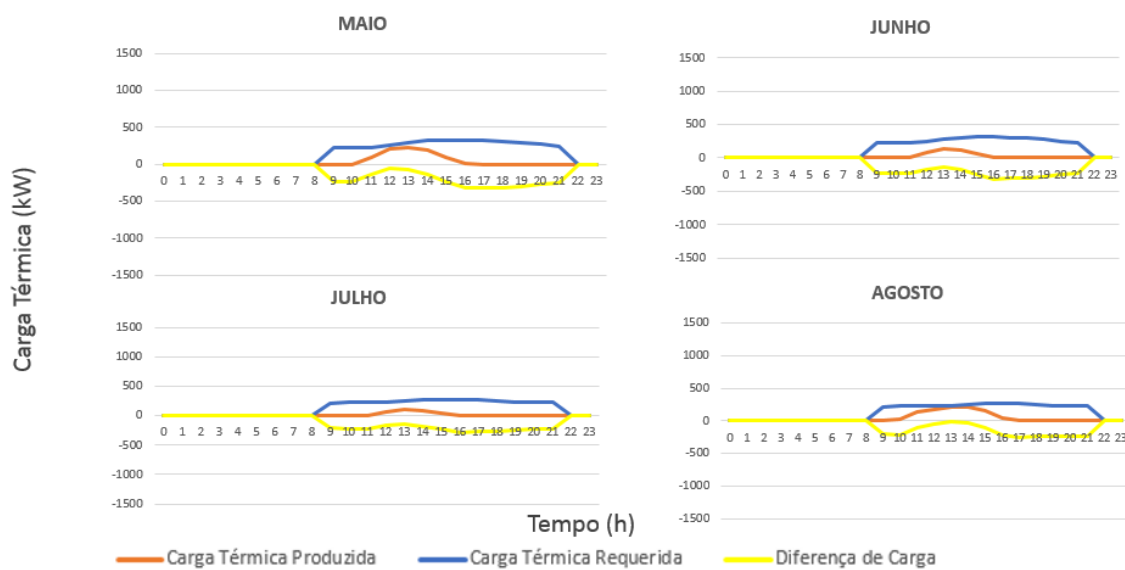


Figura 56: Comparação das cargas térmicas do 2º quadrimestre, Caso BE/06: Triplo Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

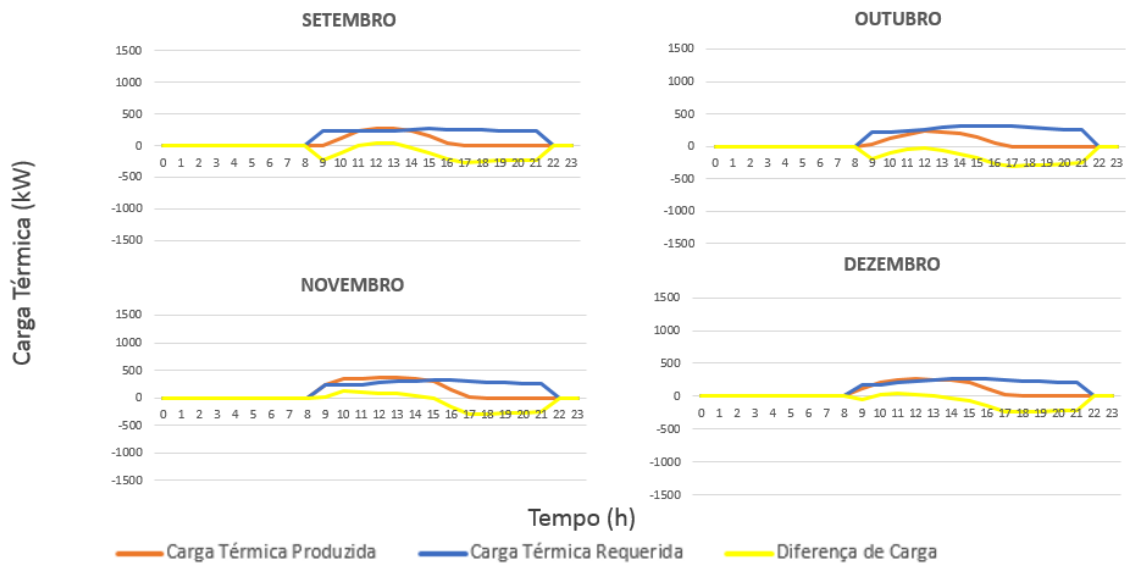


Figura 57: Comparação das cargas térmicas do 3º quadrimestre, Caso BE/06: Triplo Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

Para os meses com boa incidência solar (entre novembro e abril), o sistema apresenta resultados satisfatórios com requerimento abaixo de 50% de energia auxiliar. Porém, no segundo quadrimestre o sistema apresenta necessidade de até 91% dessa energia. Isso deve-se a baixa incidência solar nesses meses, pois o sistema de refrigeração de três estágios requer um calor de alta qualidade, ou seja, trabalha a temperaturas elevadas.

- CASO AE/10

A Figura 58, a Figura 59 e a Figura 60 apresentam os resultados para o caso AE/10 do sistema de triplo efeito.

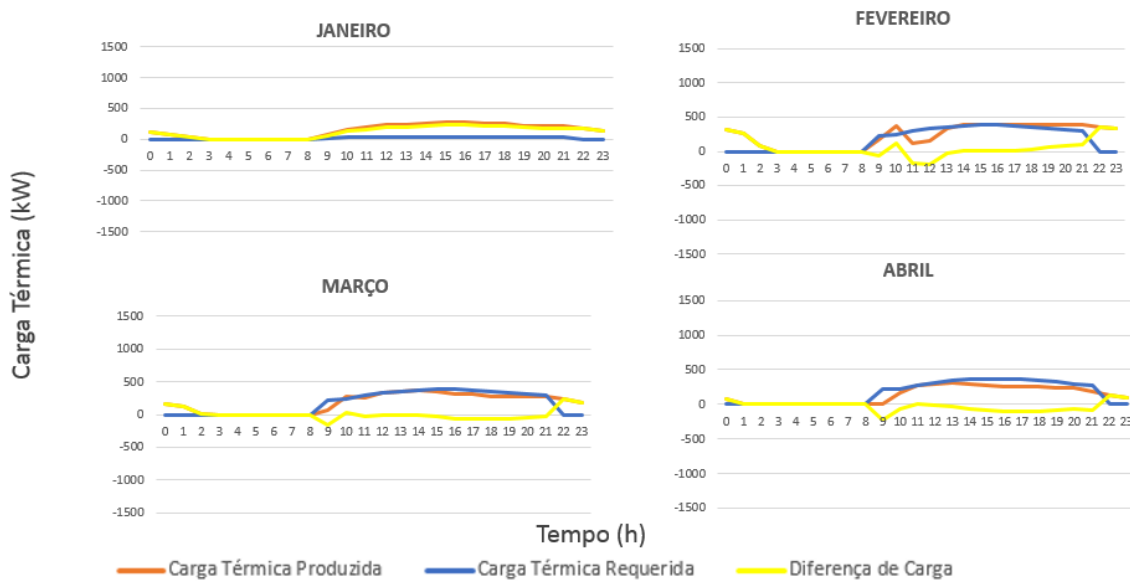


Figura 58: Comparação das cargas térmicas do 1º quadrimestre, Caso AE/10: Triplo Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

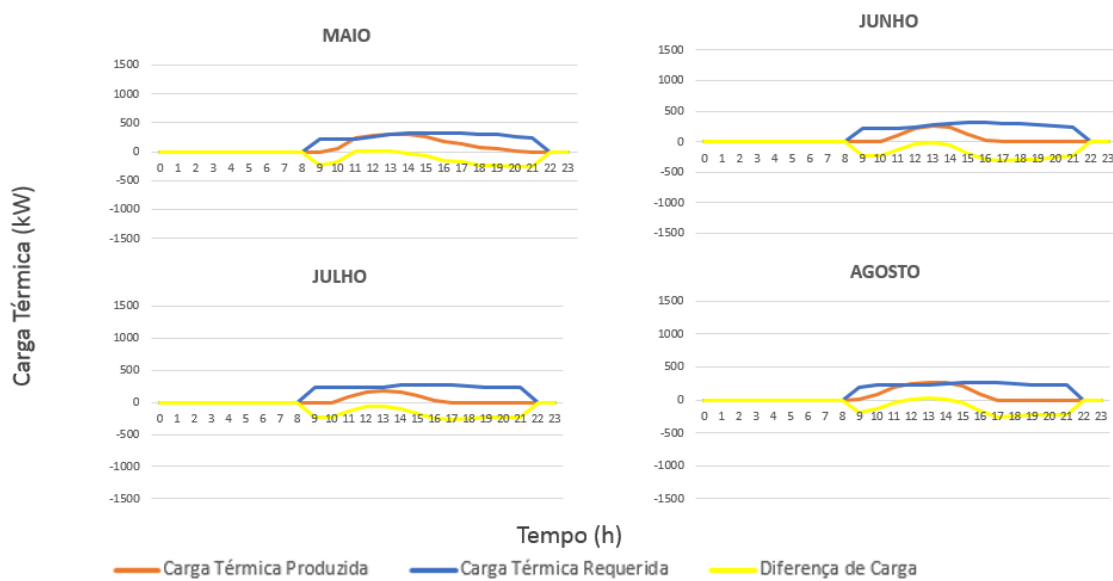


Figura 59: Comparação das cargas térmicas do 2º quadrimestre, Caso AE/10: Triplo Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

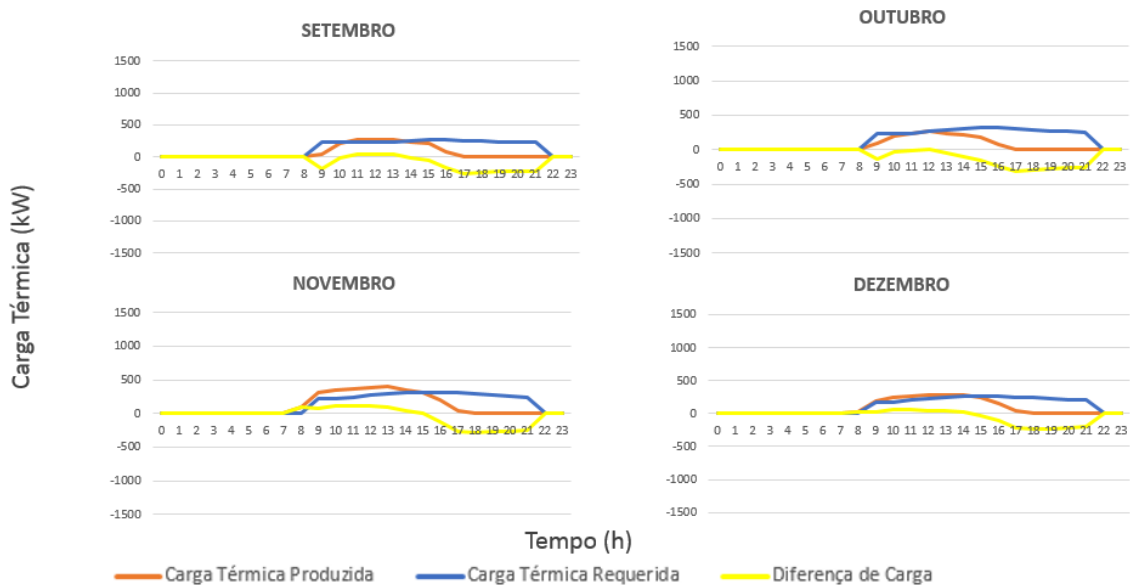


Figura 60: Comparação das cargas térmicas do 3º quadrimestre, Caso AE/10: Triplo Efeito.
Fonte: Elaboração Própria.

Verifica-se que a produção do mês de janeiro é cerca de 6 vezes maior que a demanda, configurando um alto excedente energético. No primeiro quadrimestre a produção de energia é considerável devido à maiores radiações, o que confere ao sistema uma necessidade média de apenas 12% de energia auxiliar. Nos outros meses o requerimento de energia auxiliar apresenta um valor médio de 56%.

Em média anual o sistema do caso proposto supre cerca de 58% da demanda energética do complexo.

A Tabela 22 apresenta as frações do requerimento de energia auxiliar pela demanda dos casos BE/06 e AE/10 do sistema de triplo efeito para cada mês do ano. Segundo a tabela, a maior diferença entre as frações é verificada no mês de abril com um decréscimo de 37%. A redução média mensal da energia auxiliar entre os casos estudados é de aproximadamente 13%.

De modo geral, ambos os casos apresentam frações de requerimento de energia auxiliar significativamente altas para o segundo quadrimestre do ano. Com isso a diferença de eficiência nos casos influencia significativamente a redução dessa fração, média de 18% nesses quatro meses. Meses como janeiro e fevereiro não apresentaram mudança com a variação proposta pelos casos.

Tabela 22: Fração de requerimento de energia auxiliar para os casos de triplo efeito

Meses	Triplo Efeito (Caso BE/06)	Triplo Efeito (Caso AE/10)
Janeiro	0%	0%
Fevereiro	7%	7%
Março	35%	14%
Abril	62%	25%
Maiο	78%	49%
Junho	89%	73%
Julho	91%	77%
Agosto	69%	58%
Setembro	60%	53%
Outubro	65%	59%
Novembro	43%	41%
Dezembro	47%	42%

Fonte: Elaboração Própria

Quando comparamos o sistema de duplo efeito com o triplo efeito para os dois casos, verifica-se o maior requerimento de energia auxiliar para o triplo efeito. Apesar de os sistemas de triplo efeito apresentarem coeficientes de performance maiores que os de duplo efeito, esses sistemas requerem uma qualidade alta do calor na sua operação. Com a simulação, verificou-se que os sistemas de triplo efeito, para os dois casos, requerem em média 48% de energia auxiliar. Isso significa um valor médio superior de 28% ao sistema de duplo efeito.

Uma análise exergética (relacionada à qualidade do calor) nos sistemas é muito importante, pois ela permite verificar o comportamento dos sistemas de refrigeração juntamente ao sistema de geração de energia térmica. Esta análise orienta as decisões sobre qual sistema deve ser aplicado com a qualidade energética oferecida. Sistemas que necessitam de alta qualidade, ao serem alimentados com energia de baixa qualidade, terão rendimento indesejado. Da mesma forma, não é razoável do ponto de vista exergético (irreversibilidade), alimentar sistemas que necessitam de baixa qualidade de calor com aporte de alta qualidade, que poderia ser empregado em conversões nobres.

Para uma melhor análise entre quantidade e qualidade de energia nos sistemas de duplo e triplo efeito, propôs-se uma visualização combinada do comportamento horário

da radiação direta normal e da potência térmica do dissipador de calor, apresentada na Figura 61 e Figura 62, para três dias em diferentes épocas do ano. A Figura 61 apresenta o comportamento horário da potência térmica do dissipador de calor e sua interação com a radiação normal direta para os dias 1, 2 e 3 de janeiro. A Figura 62 demonstra esse comportamento para o intervalo de 30 de junho a 2 de julho. O caso simulado para ambas configurações (duplo e triplo efeito) foi o caso AE/10.

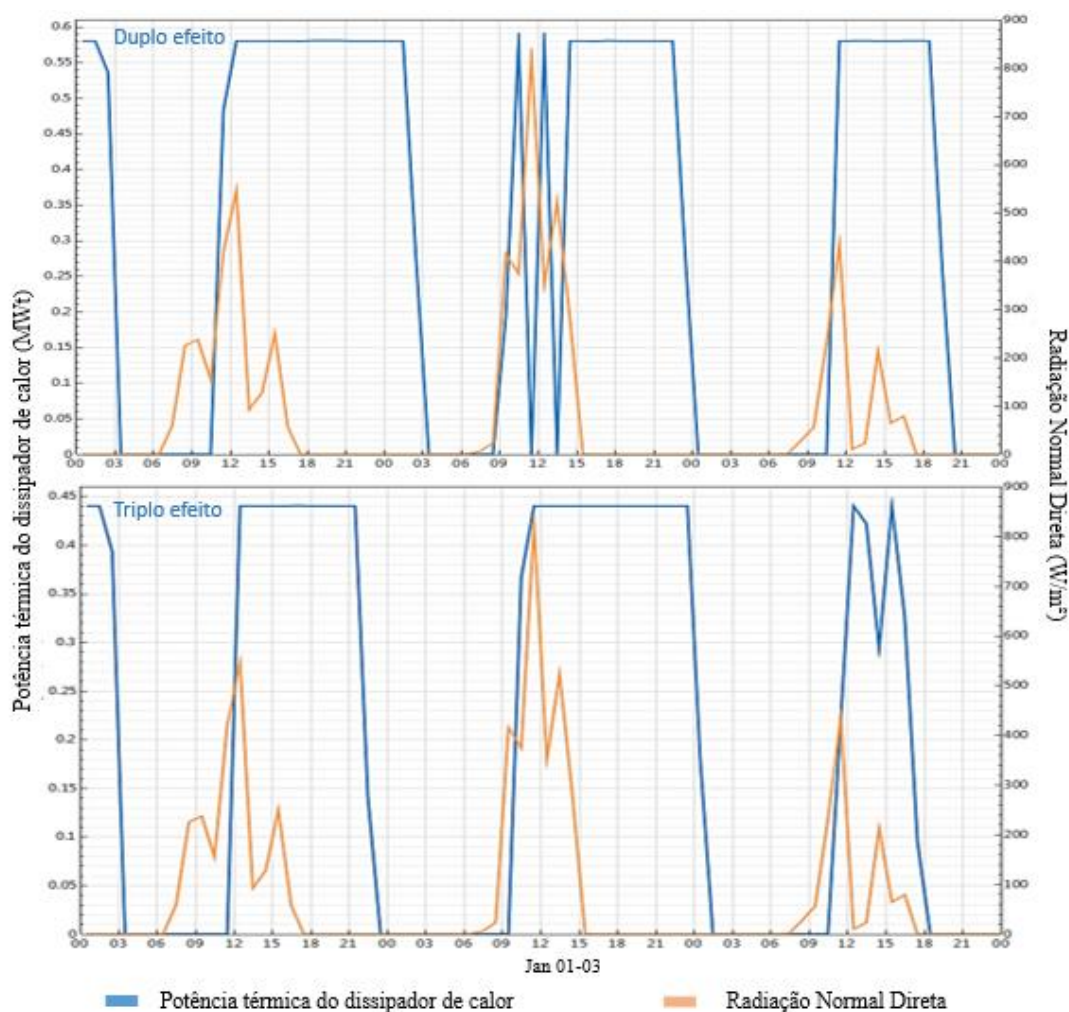


Figura 61: Comparação da potência térmica para os casos de duplo e triplo efeito dos dias 1, 2 e 3 de janeiro. Fonte: Adaptado de SAM (2018).

A partir da Figura 61 pode-se observar que nos dias 1 e 3 de janeiro (dias com radiações médias) o sistema de duplo efeito apresenta melhor produção energética, com maior tempo de operação e maior estabilidade (menor número de interrupções na operação). Para o dia de alta radiação direta normal (dia 2 de janeiro) o sistema de triplo efeito apresenta melhor resultado de produção energética, consequência da melhor

qualidade (temperatura) do calor entregue ao gerador do sistema de refrigeração por absorção.

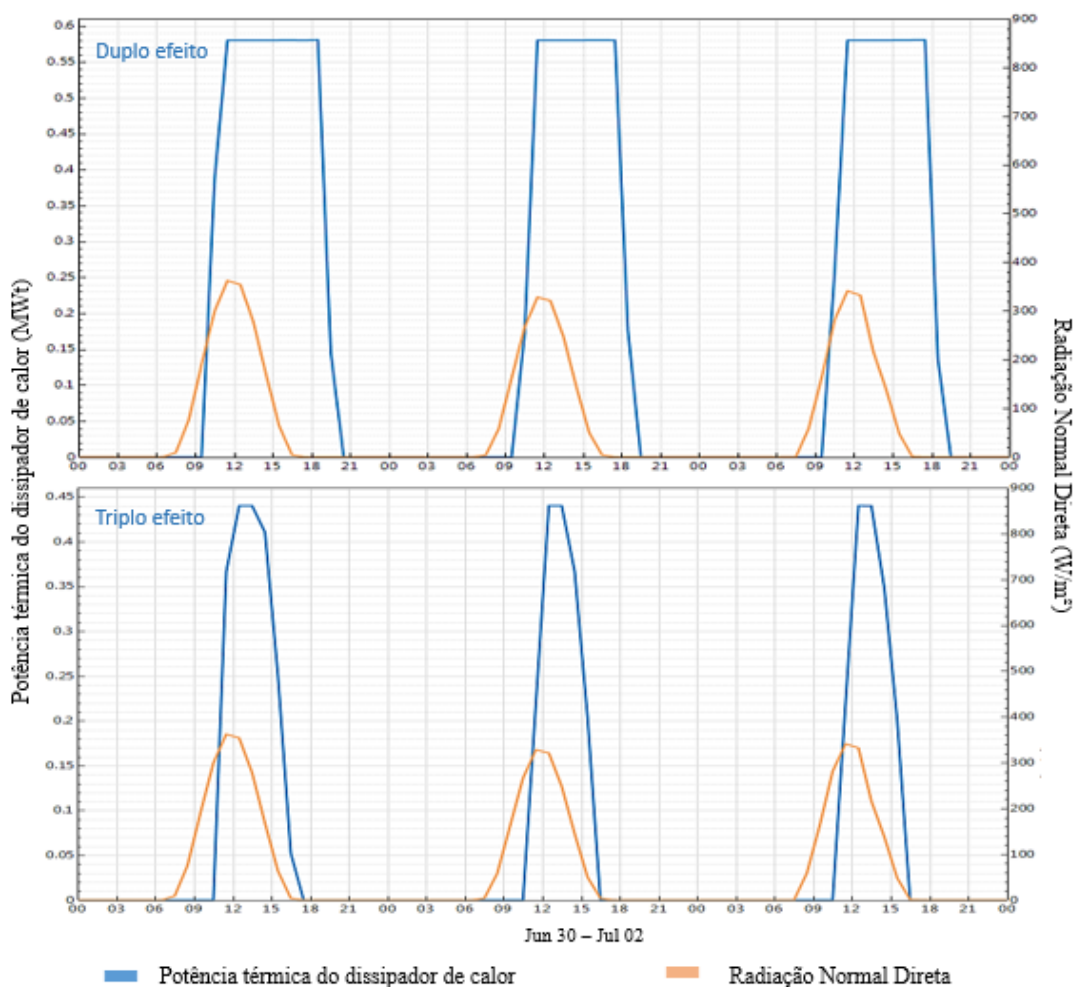


Figura 62: Comparação da potência térmica para os casos de duplo e triplo efeito dos dias 30 de junho, 1 e 2 de julho. Fonte: Adaptado de SAM (2018).

Como observado na Figura 62, para meses com radiações mais baixas o sistema de duplo efeito apresenta produções diárias mais satisfatórias, o que pode ser observado nas curvas mais abertas ao longo do dia. Mesmos que sistemas de triplo efeito configurem-se como sistemas de menor requerimento energético, estes necessitam de uma melhor qualidade de calor. Nos dias de menor radiação sua performance torna-se inferior aos sistemas de duplo efeito apresentando curvas de produção energética mais fechadas (menor horas de operação durante o dia). Isto evidencia que apesar dos sistemas de triplo efeito demandarem menor quantidade energética, estes necessitam de uma maior qualidade de energia (calor a maior temperatura) que está diretamente relacionada ao nível de radiação direta local.

Em conclusão, os resultados aqui apresentados indicam o sistema de duplo efeito como o de melhor desempenho. No entanto, vale ressaltar que os resultados são referentes à aplicação do sistema de condicionamento solar em um sítio específico com média radiação direta, deste modo o destaque para o sistema de duplo efeito não é um resultado universal. Para outros sítios com melhores níveis de radiação, o sistema de refrigeração por absorção de triplo efeito pode apresentar resultados mais satisfatórios.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta dissertação teve como objetivo geral a avaliação de um sistema de condicionamento solar em um Complexo Universitário na cidade de Macaé, a partir de um procedimento de simulação combinada de conforto-térmico de uma edificação e de sistemas solar de concentração associado à refrigeração por absorção. Buscou, assim, propor e testar um procedimento metodológico aplicado a um sistema alternativo de energia. Ademais, desenvolveu esta metodologia para identificação da melhor configuração possível de um sistema de resfriamento em diferentes níveis de eficiência ótica no Campus UFRJ-Macaé.

Para a concretização desse objetivo, foram realizadas simulações para a determinação da carga térmica requerida pela edificação e da energia produzida pelo sistema de concentração solar. A metodologia empregada foi essencial para a obtenção do comportamento entre a energia demandada e ofertada no sistema. Para a simulação da carga térmica foi utilizado um conjunto de softwares: SketchUp 2017, OpenStudio 2.8.0 e EnergyPlus 8.7.0.. Para a determinação da energia térmica produzida pelo campo solar e sua operação junto ao sistema de armazenamento foi utilizado o software *System Advisor Model* (SAM). Esta ferramenta foi utilizada na medida do possível para as condições óticas e geométricas da calha parabólica que está sendo desenvolvida atualmente na Engenharia Mecânica do Campus de Macaé. Após a simulação, ainda foi realizado o trabalho de refinamento e manipulação de dados em planilha eletrônica, de forma a avaliar de forma horária a diferença entre a energia demandada e ofertada. Com isso, foi possível a determinação da energia auxiliar requerida no sistema para sua correta operação. A estimativa da energia auxiliar permitiu também averiguar a adequação energética do sistema proposto ao caso campus universitário em tela, sob a ideia de que este sistema poderia não apenas ter funções de planta-piloto e, portanto, de aprendizado tecnológico, mas também contribuir para atendimento da demanda de condicionamento do local.

A integração dos softwares SketchUP, OpenStudio e EnergyPlus se mostrou uma importante ferramenta para a determinação da carga térmica das edificações. De forma a proporcionar os valores da carga térmica e das temperaturas de pico para as diversas zonas térmicas dos prédios universitários. Os programas utilizados permitiram uma modelagem

apropriada da edificação, assim como a introdução dos parâmetros construtivos e do perfil de utilização dos ambientes. Assim, possibilitando a determinação, com proximidade da realidade, do consumo energético de condicionamento da edificação. A carga térmica simulada obteve o valor de 790.716 W.

O software SAM possibilitou a simulação dos aspectos técnicos e energéticos de forma a determinar a produção de energia para o funcionamento do sistema de condicionamento. Para a análise do sistema foram propostos diferentes casos de operação da planta. Em todos os casos simulados foi empregado o mesmo tipo de tecnologia concentradora solar, porém com diferentes valores de eficiência ótica (0,5; 0,6; 0,7), conforme dados da literatura e da calha sendo desenvolvida atualmente em Macaé. Também, foram empregados diferentes tipos de configurações do sistema de refrigeração por absorção (simples, duplo e triplo efeito), a partir de informações da literatura coerentes com a análise termodinâmica destas alternativas. Essas simulações foram realizadas variando, também, as horas do armazenamento de energia térmica (6h, 8h e 10h).

Com o desenvolvimento do presente estudo, foram verificados valores satisfatórios para o sistema de duplo efeito. Esse sistema requer em média 20% de energia auxiliar na sua operação anual, variando entre autossuficiência no mês de janeiro ao pico de necessidade em julho. Quando comparado aos sistemas de simples e triplo efeito, esse valor apresenta uma diferença de, respectivamente, 35% e 28%.

Assim, apesar de o sistema de triplo efeito ser um sistema de melhor desempenho, e conseqüentemente menor requerimento de quantidade de energia, ele necessita de um aporte de calor a maiores temperaturas comparado ao sistema de duplo efeito. Devido a localidade de aplicação do sistema de concentração solar apresentar média irradiação direta, o sistema de duplo efeito apresenta-se como um sistema mais adequado para a aplicação.

Desta forma, percebe-se a solução de compromisso entre a quantidade e qualidade de energia em sistemas operados a calor, o que é bem flagrante em Macaé. O sistema de refrigeração por absorção de triplo efeito apesar de requerer menor quantidade de energia para seu funcionamento, este necessita de um calor de maior temperatura. Portanto, sugerem-se estudos desse sistema aplicado em outras localidades, pois a inserção do sistema de triplo efeito em lugares com maior radiação normal direta poderia apresentar

resultados satisfatórios. De fato, em meses com maiores radiações diretas (casos de janeiro, fevereiro e março), o sistema de triplo efeito apresentou bons resultados, ou seja, menor requerimento de energia auxiliar.

Logo, a partir dos resultados expostos no capítulo anterior, notou-se que o sistema de duplo efeito apresentou, mesmo para o caso de baixa eficiência ótica nos concentradores, bons resultados energéticos. No mês de janeiro o sistema de condicionamento solar de duplo efeito é autônomo, em outros meses como: fevereiro, novembro e dezembro, requer menos de 10% de energia auxiliar. Em geral, os resultados foram considerados satisfatórios para essa configuração, sendo esta a configuração de melhor aplicabilidade na localidade do presente estudo.

Deste modo, a contribuição desse trabalho foi de propiciar as condições para futuras aplicações do sistema de condicionamento numa universidade pública, em que essa planta piloto de concentração solar pode ser desenvolvida e aperfeiçoada pelo corpo docente e discente. Assim como, estimular a inserção desse sistema em outras edificações públicas como escolas e hospitais.

Mesmo que a análise tenha priorizado a questão energética, recomendam-se estudos econômicos para a implantação do sistema de condicionamento solar. Já que uma limitação presente nesse trabalho foi a estimativa dos custos reais relativos ao componentes do campo solar, do sistema de armazenamento e do sistema de refrigeração por absorção nas suas diversas configurações. Para isso, torna-se necessária a determinação dos fatores econômicos reais envolvidos nesse projeto. Não obstante, nota-se aqui que a ideia de um sistema de condicionamento solar em uma universidade também se traduz no ganho de conhecimento e na formação de pesquisadores e engenheiros no tema, com a possibilidade, inclusive, de efeitos multiplicadores como criação de empresas no tema que poderiam reduzir os custos dos sistemas.

Ademais, como proposta para trabalhos futuros, recomenda-se o estudo desse projeto com a aplicação de outras tecnologias solares, assim como a introdução de sistemas com maiores horas de armazenamento. De forma a tornar o sistema de refrigeração solar mais renovável, propõe-se também que os sistemas de energia auxiliar se baseiem em combustíveis derivados da biomassa, idealmente o biometano pela facilidade da sua queima.

Por fim, sugere-se também a elaboração de um estudo sobre políticas de incentivos à inserção de refrigeração solar em edificações públicas. Visto que a construção de uma planta de refrigeração em uma universidade pública favoreceria o desenvolvimento desse sistema no país, em termos de conhecimento, formação de pessoal, e possibilidade de geração de emprego e renda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 15220: “Desempenho Térmico de Edificações – Parte 1 (Definições, Símbolos e unidades), Parte 2 (Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações). ” Rio de Janeiro, 2003.

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 16401: “Instalações de Ar Condicionado – Sistemas Centrais e Unitários – Parte 1 (Projetos das Instalações), Parte 2 (Parâmetros de Conforto Térmico), Parte 3 (Qualidade do ar interior). ” Rio de Janeiro, 2008.

ABREU, A. F. Sistema de Refrigeração por Absorção Intermitente: Concepção, Dimensionamento, Construção, Ensaio e Considerações Econômicas, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia, São Paulo, 1999.

AGUILAR-JIMÉNEZ, J.A.; VELÁZQUEZ-LIMÓN, N.; LÓPEZ-ZAVALA, R.; GONZÁLEZ-URIBE, L.A.; ISLAS, S. ; GONZÁLEZ, E.; RAMÍREZ, L.; BELTRÁN, R. Optimum operational strategies for a solar absorption cooling system in an isolated school of Mexico, International Journal of Refrigeration, Volume 112, 2020.

ALGHOUL, Samah & RIJABO, Hassan & MASHENA, Mohamed. (2017). Energy Consumption in Buildings: A Correlation for the Influence of Window to Wall Ratio and Window Orientation in Tripoli, Libya. Journal of Building Engineering. 2017.

ALMEIDA, Mateus Barros. Análise de perfil de temperatura do tubo absorvedor de concentradores solares por meio de simulação computacional - Macaé: UFRJ, 2018.

AL-ZUBAYDI, Ahmed Y Taha. Building Models Design And Energy Simulation With Google Sketchup And Openstudio. 2013

ANAPOLSKI, J. L. P.; INDRUSIAK, M. L. S. Síntese Energética De Uma Rede De Trocadores De Calor De Um Processo De Refino De Óleo De Soja: Energetic synthesis of a network of heat exchangers in a soybean oil refining process. Perspectiva, Erechim. v. 39, n.146, p. 27-42, junho/2015.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica –. CHAMADA 019/2015: PROJETO ESTRATÉGICO: “DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA NACIONAL DE GERAÇÃO HELIOTÉRMICA DE ENERGIA ELÉTRICA”. 2015.

ARANTES, Beatriz. Conforto térmico em habitações de interesse social – Um estudo de caso / Beatriz Arantes, 2012.

ASHRAE 2001 Handbook Committee ASHRAE, American Society Of Heating, Refrigerating And Airconditioning Engineers. Atlanta 2001.

AZHAR, Md; SIDDIQUI M. A.; Comprehensive exergy analysis and optimization of operating parameters for double effect parallel flow absorption refrigeration Cycle, Thermal Science and Engineering Progress, Volume 16, 2020. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904919301167>>.

BANU, P.S. A; SUDHARSAN, N.M., Review of water based vapour absorption cooling systems using thermodynamic analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 82, Part 3, 2018, Pages 3750-3761, 2018.

BASSO, Luiz H., SOUZA, Samuel N. M. de, SIQUEIRA, Jair A. C., NOGUEIRA, Carlos E. C., & SANTOS, Reginaldo F.. (2010). Análise de um sistema de aquecimento de água para residências rurais, utilizando energia solar. Engenharia Agrícola, 30(1), 14-21. 2010.

BERECHE, R. P. Avaliação de sistemas de refrigeração por absorção H₂O/LiBr e sua possibilidade de inserção no setor terciário utilizando gás natural. Campinas, 2007.

BLAIR, N.; DIORIO, N., FREEMAN, J.; GILMAN, P.; JANZOU, S.; NEISES, T.; WAGNER, M. 2018. System Advisor Model (SAM) General Description (Version 2017.9.5). Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/ TP-6A20-70414. 2018.

BRIGHT SOURCE. Ivanpah Project Facts. Disponível em: <http://www.brightsourceenergy.com/stuff/contentmgr/files/0/8a69e55a233e0b7edfe14b9f77f5eb8d/folder/ivanpah_fact_sheet_3_26_14.pdf>. 2010

CARMO, N. R. M. Desenvolvimento De Software Para Discretização De Cilindro – Parabólico. UFRJ Macaé – RJ. Dezembro de 2016

CASTRO, L. C. Análise Comparativa Para Geração De Energia Heliotérmica Em Diferentes Regiões Brasileiras. Brasília, 2016.

CERETO, A. C. Integração Energética da Rede de Trocadores de Calor em Extração por Solvente para a Produção de Farelo Branco de Soja. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2004.

DGS, Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie. Planning and installing solar thermal systems: a guide for installers, architects and engineers. Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie (German Solar Energy Society), United Kingdom. 2005

DROSOU, Vassiliki & KOSMOPOULOS, Panos & PAPADOPOULOS, Agis. (2016). Solar cooling system using concentrating collectors for office buildings: A case study for Greece. Renewable Energy. 2016

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. Solar engineering of thermal processes. 3. Ed. New York: John Wiley & Sons, 2013.

DULAC, John; ABERGEL, Thibaut; DELMASTRO, Chiara. IEA (2019), "Tracking Buildings", IEA, Paris. Disponível em:< <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings>>
EERE. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (2019). Disponível em:< <https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/openstudio-0>>.

EISA, M. A. R. & DEVOTTA, S. & HOLLAND, F. A., 1986. "Thermodynamic design data for absorption heat pump systems operating on water-lithium bromide: Part I--Cooling," Applied Energy, Elsevier, vol. 24(4), pages 287-301. 1986.

EKOS BRASIL. Introdução ao Sistema de Aquecimento Solar. São Paulo, 2010. Disponível em:
<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/60551/mod_resource/content/1/Apostila_Aquecimento_Solar.pdf>

ENERGYPLUS. Disponível em: <https://energyplus.net/> 2019. Acesso em: agosto de 2019.

EZEANYA, Emeka & MASSIHA, Gholam & SIMON, William & Chambers, Terrence. System Advisor Model (SAM) simulation modelling of a concentrating solar thermal power plant with comparison to actual performance data. Cogent Engineering. 2018.

FASFOUS, A. & AL ASFAR, Jamil & HAMDAN, Mohammed & AL-SALAYMEH, & SAKHRIEH, Ahmad & AL-HAMAMRE, Zayed & AL BAWAB, Abeer. Potential of

utilizing solar cooling in The University of Jordan. *Energy Conversion and Management*, vol. 65 pp. 729–735. 2013.

FITCHNER (2010) Technology Assessment of CSP Technologies for a Site Specific Project in South Africa Final Report. Washington DC. 2010.

FLOUDAS, C. A.; GROSSMANN, I. E. Synthesis of flexible heat exchanger networks with uncertain flowrates and temperatures. *Computers & Chemical Engineering*, v. 11, n. 4, p. 319-336, 1987.

GAZOLI, J. R. et al. Dimensionamento Básico Do Campo Solar De Concentradores Cilindro-Parabólico Da Usina Termosolar Porto Primavera. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, p. 10, 2018.

GEYER, M. Solar Power and Chemical Energy Systems. SolarPACES Annual Report, 2007. Disponível em: http://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/SolarPACES-Annual-Report-2007_final.pdf.

GROSSMAN, Gershon. Solar-powered systems for cooling, dehumidification and air-conditioning, *Solar Energy*, Volume 72, 2002.

GUIMARÃES, Luiz G. M. Modelagem e construção de protótipo de Refrigerador por absorção de vapor de baixa potência operando com o par água-brometo de lítio e utilizando fontes térmicas de baixa temperatura. Tese de Mestrado. São João del-Rei, 2011.

GÜNTHER, M.; JOEMANN, M.; CSAMBOR, S.. Advanced CSP Teaching Materials. Chapter 5: Parabolic Trough Technology ENERMENA & DRL. 2011.

HAU, ONG. B., Thermodynamic Analysis Of Absorption Refrigeration System (Ars). Universiti Malaysia Pahang. May 2010.

HELIOCSP. Reliance commissions 100 MW concentrated solar power plant in Rajasthan, India. HELIOCSP, 2018. Disponível em: <http://helioscsp.com/tag/rajasthan-sun-technique-energy/>. Acesso em: 20/01/2020.

IEA (2010). Technology Roadmap Concentrating Solar Power. França, 2010.

IEA (2018a), "The Future of Cooling", IEA, Paris (2018). Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>.

IEA (2018b), “Renewables 2018, Analysis and Forecasts to 2023”, IEA, Paris (2018). Disponível em: < <https://webstore.iea.org/download/direct/2322>>.

IRENA, International Renewable Energy Agency. Concentrating Solar Power Technology Brief. 2013.

IRENA (2019a), “Transformando O Sistema Energético”. Disponível em: < https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Transforming_2019_PT.pdf?la=en&hash=1C80BF4184770647989885F8ED872A0122D4D7AB>.

IRENA (2019b), International Renewable Energy Agency. Renewable Power Generation Costs. 2019.

ITP, Energised Group. Concentrating Solar Thermal Technology Status: Informing a CSP Roadmap for Australia. Australia, 2018.

JOSEPH, J., Estudo de um sistema de ar condicionado com assistência solar na África do Sul. Durban: Escola de Engenharia, Universidade de KwaZulu-Natal. (2012) .

KAITA Y. Simulation results of triple-effect absorption cycles. Volume 25, Issue 7, Pages 999-1007, 2002.

KALOGIROU , SOTERIS. Solar energy engineering: processes and systems / Soteris Kalogirou. — 1st ed. 2009.

KINCAID, Nicholas & MUNGAS, Greg & KRAMER, Nicholas & WAGNER, Michael & ZHU, Guangdong. "An optical performance comparison of three concentrating solar power collector designs in linear Fresnel, parabolic trough, and central receiver," Applied Energy, Elsevier, vol. 231(C), pages 1109-1121. 2018.

KIM Jin-Soo, PARK Young, LEE Huen. Performance evaluation of absorption chiller using LiBr +H₂N(CH₂)₂OH +H₂O, LiBr +HO(CH₂)₃OH + H₂O, and LiBr +(HOCH₂CH₂)₂NH +H₂O as working fluids. Applied Thermal Engineering 19 (1999) 217-225.

LABEEE 2018. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>>.

MALAGUETA, D.C., DUTRA, R. M., SZKLO, A. S., 2014, "Análise paramétrica de uma planta CSP-ISCC de trigeração para um hospital em Bom Jesus da Lapa". In: Anais do V Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, 2014, Recife - PE.

MANTILLA, V. A. P. Avaliação Técnica-Econômica Das Ecnologias De Geração Heliotérmica Para O Caso Brasileiro, Considerando Sistemas De Armazenamento Térmico E Híbridização. Tese de Mestrado. Minas Gerais, 2017.

MARTINS, Karlos R. S. B. Simulação e Otimização Computacional de Diferentes Configurações de Sistemas de Refrigeração por Absorção Água – Amônia tipo GAX. Campinas, 2014.

MENNA, Márcio R. M. Modelagem e análise de custo de sistemas de refrigeração por absorção. Tese de Mestrado. UNIOESTE, Toledo, 2008.

NETO, Micael V., Modelação energética de sistemas de absorção em TRNSYS. Coimbra, 2016.

NOBERTO, L.G. de M., Análise De Um Sistema De Refrigeração Por Absorção Com Mistura Água-Brometo De Lítio. Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte. 2018

NREL. National Renewable Energy Laboratory. Concentrating Solar Power Projects. 2019. Disponível em: <https://solarpaces.nrel.gov/by-country/MA>.

NREL. 2019. Disponível em: <https://bcl.nrel.gov/search/site/bricks>.

NR, Norma Regulamentadora Ministério do Trabalho e Emprego. NR-17 - Ergonomia. 2009.

PAKSOY, Halime & ANDERSSON, Olof & ABACI, S & EVLIYA, Hunay & TURGUT, Beste. (2000). Heating and cooling of a hospital using solar energy coupled with seasonal thermal energy storage in an aquifer. Renewable Energy, 2000.

PEREIRA, E. B; MARTINS, F.R.; GONÇALVES, A. R.; ABREU, S. L. de; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; PEREIRA, S. V.; TIEPOLO, G. P.; SOUZA, J. G.; RÜTHER, R. Atlas Brasileiro de Energia Solar 2º ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PINHO, J. T.; GALDINO, M.A. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESEB , 2014 .

RUPP, Ricardo Forgiarini. Dimensionamento de área de janela em edificações comerciais: integração da iluminação natural com a artificial e utilização da ventilação híbrida. 2011.

SAIKIA, Kangkana & VALLÈS, Manel & FABREGAT, Alexandre & SÁEZ, Raúl & BOER, Dieter. (2020). A bibliometric analysis of trends in solar cooling technology. Solar Energy. 2020.

SANDER, Lucas Nogueira, Dimensionamento do Sistema de Refrigeração para o Bloco C – Campus UFRJ Macaé / Lucas Nogueira Sander – Macaé: UFRJ, 2017

SANTOS, Wiliam Souza; JESUS, Willyans Santos. A Tecnologia Pinch: Uma Proposta Para O Consumo Sustentável De Energia. VII Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe, 2015.

SANTOS, I. F. M. Análise numérica da condução térmica transiente para diferentes fluidos em um tubo absorvedor / Igor Ferreira Martins dos Santos. – Macaé, 2018

SATTLER, J.; HOFFSCHMIDT, B.; GÜNTHER, M.; JOEMANN, M. Advanced CSP Teaching Materials. Chapter 9: Thermal Energy Storage. ENERMENA & DRL. 2011.

SCHAEFFER, Roberto & SZKLO, Alexandre & LUCENA, André & BORBA, Bruno & NOGUEIRA, Larissa & FLEMING, Fernanda & TROCCOLI, Alberto & HARRISON, Mike & BOULAHYA, Mohammed. (2012). Energy sector vulnerability to climate change: A review. Energy. 38. 1–12. 10.1016/j.energy.2011.11.056.

SETTINO, Jessica & SANT, Tonio & MICALLEF, Christopher & FARRUGIA, Mario & SPITERI STAINES, Cyril & LICARI, John & MICALLEF, Alexander, 2018. "Overview of solar technologies for electricity, heating and cooling production," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, vol. 90(C), pages 892-909.

SILVA, C.L., e MOREIRA, H.B.C. Avaliação Energética De Um Sistema De Refrigeração Por Absorção Utilizando Gás De Aterro E Gás Natural. Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal) – dez. 2008.

SILVESTRE, A. D. Desenvolvimento De Um Heliostato Para Geração Heliotermica Em Torres Solares. Dissertação Mestrado. Paraíba, 2016.

SIOUD, Doniazed; BOUROUIS, Mahmoud; BELLAGI, Ahmed. Investigation of an ejector powered double-effect absorption/recompression refrigeration cycle, International

Journal of Refrigeration, Volume 99, 2019, Pages 453-468. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700718305024>>.

SOLARGIS. World Map of Direct Normal Irradiation. © 2019 The World Bank, Global Solar Atlas 2.0, Solargis. Disponível em: <<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/world>>. Acessado em: 20 de dezembro de 2019.

SORIA, R.; SCHAEFFER, Roberto ; SZKLO, Alexandre S. . Configurações para operação de plantas heliotérmicas CSP com armazenamento de calor e hibridização no Brasil. In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2014, Recife. V Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2014.

STOECKER, W. F., e JONES, J. W., 1985, “Refrigeração e Ar Condicionado”, Editora Mcgraw-Hill do Brasil.

SUAID, G.; SANTUCCI, J. F.; FROSSARD, L.; GUIDA, L.; ZANI, L.; BRANCO, P.O.; FERNANDES, V. Projeto de Construção: Edificação Institucional. Macaé, 2016.

TESSERA SOLAR. Tecnologia SunCatcher. 2018. Disponível em: <http://www.tesserasolar.com/north-america/projects.htm>. Acessado em: 19/01/2020

TORRES, R. C. Energia Solar Fotovoltaica como Fonte Alternativa de Geração de Energia Elétrica em Edificações Residenciais. São Carlos, 2012.

TSOUTSOS, Theocharis & ALOUMPI, E. & GKOUSKOS, Z. & KARAGIORGAS, M.. (2010). Design of a Solar Absorption Cooling System in a Greek Hospital. Energy and Buildings. 2009.

WU, D, AYE, L, YUAN, Y, MENDIS, P, and NGO, T. "Comparison of optimal oriented façade integrated solar cooling systems in Australian climate zones". Solar Energy 198 (2020).

XU, Zhenyuan & WANG, R.Z.. (2018). Comparison of absorption refrigeration cycles for efficient air-cooled solar cooling. Solar Energy. 172. 2018.

ZHANG, X., YANG, J., FAN, Y., ZHAO, X., YAN, R., ZHAO, J., & MYERS, S. Experimental and analytic study of a Hybrid Solar/Biomass Rural Heating System. Energy, Volume 190, 2020.