CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

DISSERTAÇÃO

ISABELA CORRÊA E CASTRO

ESTUDO TEÓRICO DE UM SISTEMA DE AR CONDICIONADO CENTRAL ACOPLADO À USINA SOLAR DE COLETORES PARABÓLICOS DO CEFET-MG

Orientador: Profº. Drº. Frederico Romagnoli Silveira Lima

Linha de Pesquisa: Eficiência Energética

Belo Horizonte
2022

Isabela Corrêa e Castro

Estudo teórico de um sistema de ar condicionado central acoplado à usina solar de coletores parabólicos do CEFET-MG

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima

Linha de Pesquisa: Eficiência Energética

Belo Horizonte
2022
Isabela Corrêa e Castro

Castro, Isabela Corrêia e
C355e Estudo teórico de um sistema de ar condicionado central acoplado à usina solar de coletores parabólicos do CEFET-MG / Isabela Corrêa e Castro. – 2022.
71 f. : il., gráfs., tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
Orientador: Frederico Romagnoli Silveira Lima.
Banca examinadora: Frederico Romagnoli Silveira Lima, Antônio Gabriel Souza Almeida, Paulo Eduardo Lopes Barbieri.
Bibliografia: f. 65-71.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Energia – Consumo – Teses. 2. Ar condicionado – Teses. 3. Energia solar – Teses. 4. Energias renováveis – Teses. I. Lima, Frederico Romagnoli Silveira. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDD 697.93

Elaboração da ficha catalográfica pela bibliotecária Jane Marangon Duarte, CRB 6º 1592 / Cefet/MG

Isabela Corrêa e Castro

ESTUDO TEÓRICO DE UM SISTEMA DE AR CONDICIONADO CENTRAL ACOPLADO À USINA SOLAR DE COLETORES PARABÓLICOS DO CEFET-MG

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Linha de Pesquisa: Eficiência Energética

Belo Horizonte, 06/09/2022

Resultado: aprovado.

Banca Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
FREDERICO ROMAGNOLI SILVEIRA LIMA
Data: 16/09/2022 12:20:08-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. Frederico Romagnoli Silveira Lima
PPGEM/CEFET-MG

gov.br Documento assinado digitalmente
ANTONIO GABRIEL SOUZA ALMEIDA
Data: 14/09/2022 18:08:17-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. Antônio Gabriel Souza Almeida
IFBA - Instituto Federal de Ciência e Tecnologia da Bahia

gov.br Documento assinado digitalmente
PAULO EDUARDO LOPES BARBIERI
Data: 12/12/2022 19:35:54-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. Paulo Eduardo Lopes Barbieri
PPGEM/CEFET-MG

Dedico este trabalho à comunidade científica e aos colegas engenheiros, para que, juntos, possamos fazer melhor na busca por tecnologias sustentáveis.

Que estejamos sempre conscientes sobre a nossa responsabilidade de detentores do conhecimento, para colocá-lo em prática, desenvolvendo soluções eficientes e sustentáveis, e transmitindo tudo o que sabemos.

AGRADECIMENTOS

Minha eterna gratidão, primeiramente, a Deus, pelas oportunidades de estudo, capacitação e crescimento, e por fazer, assim, parte de uma parcela privilegiada de nossa sociedade. Reconheço este privilégio e sou grata!

Minha igualmente eterna e imensa gratidão aos meus pais, anjos sem asas, que me deram durante toda a minha caminhada, o suporte necessário para que eu pudesse trilhar meus caminhos, abraçar as oportunidades e alcançar as conquistas que alcancei até aqui.

Agradeço ao meu filho, meu pequeno Henriquinho, pelo brilho nos olhinhos que me fez conhecer a forma mais verdadeira do amor, e por ser o combustível que me motiva ainda mais a ser cada dia melhor.

Agradeço aos amigos, aos antigos, pelo apoio diário, por ouvir meus desabafos desesperados na dúvida se eu iria conseguir chegar viva ao fim deste mestrado, em especial à querida amiga Bruna, e ao novo amigo que o mestrado me trouxe, Eduardo, pelos momentos compartilhados, pela parceria, pelos artigos publicados e por termos nos tornado mais fortes juntos nesta caminhada.

Agradeço ao CEFET-MG pela oportunidade de capacitação gratuita e de excelência que o programa oferece à comunidade, ao meu orientador, professor Dr. Frederico Romagnoli, pelo imenso suporte, apoio, compreensão e incentivo, pela parceria em diversos momentos da minha trajetória acadêmica, pelas oportunidades de desenvolvimento, publicações, organizações de palestras, eventos, pelos ensinamentos e por ser hoje um exemplo profissional e pessoal para mim.

Agradeço também ao atual coordenador do programa de pós-graduação em engenharia mecânica, professor Dr. Paulo Barbieri, que me acompanhou desde a graduação, pelos ensinamentos, apoio e incentivo, e por me encher de material quando eu entrava em sua sala com uma dúvida, tendo assim uma parcela de culpa pelo meu encanto por essa área de conhecimento.

Agradeço ainda, ao apoio do professor Dr. Antônio Gabriel Souza Almeida, do Instituto Federal da Bahia, e ao colega Gabriel Nery.

Sem vocês, eu não chegaria até aqui! Muito obrigada!

“A verdade é aquilo que resiste ao teste da experiência”

(Albert Einstein)

RESUMO

Diante da crescente demanda energética mundial, torna-se cada vez mais relevante a busca pela substituição de fontes de energia não renováveis pelas renováveis. Entre os setores consumidores de uma economia, o das edificações representa consumo significativo. Embora seja crescente o número de edificações que possuem sistemas de energia solar, ainda existem poucas aplicações diretas desse tipo de energia para alimentar os sistemas de ar condicionado. Soma-se a esse contexto, o fato de que os sistemas de ar condicionado representam a maior parcela de consumo das edificações em geral e por isso torna-se relevante o desenvolvimento de estudos relacionados à utilização de energias renováveis nesses sistemas. Este trabalho teve como objetivo realizar um estudo teórico da usina solar do CEFET-MG, para suprimento de energia térmica para o sistema de ar condicionado central com *chiller* de absorção para o prédio 20, que apresenta perfil de utilização significativo em termos de consumo energético, visando a proporcionar conforto térmico para a edificação de maneira sustentável. Foi utilizado o *software* TRNSYS 16 para modelagem de coletores, simulando a usina solar, desenvolvida em parceria com a Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, por meio de um projeto de pesquisa e desenvolvimento. Foram realizadas também, análises dos ambientes a serem climatizados no prédio 20 para levantamento de cargas térmicas e seleção do sistema de climatização. Por meio da análise dos resultados, verificou-se a eficiência do *software* escolhido para a modelagem, parametrização dos componentes do sistema, incluindo ajuste de COP de modelos comerciais dos equipamentos selecionados e realização de análises climáticas. Foi possível concluir que a temperatura da água da usina atende ao requerido pelos modelos comerciais de *chiller* de absorção (em média 70°C). Após o cálculo da demanda energética no período de 1 ano pelo *chiller* para 2 perfis de utilização propostos, obtiveram-se valores de 73,77GJ e 91,81 GJ. A simulação no *software* TRNSYS mostrou que os coletores parabólicos são capazes de fornecer 131,49 GJ de energia no mesmo período, ou seja, atendem à demanda de energia total necessária para geração de água gelada para climatização do prédio 20, dando relevância a este trabalho e potencial de contribuição acadêmica e prática.

Palavras chave: Eficiência energética; ar condicionado; energia solar; energias renováveis.

ABSTRACT

Faced with the growing world energy demand, the search for the replacement of non-renewable energy sources with renewable ones becomes increasingly relevant. Among the consuming sectors of an economy, buildings represent significant consumption. Although the number of buildings that have solar energy systems is increasing, there are still few direct applications of this type of energy to power air conditioning systems. Added to this context, the fact that air conditioning systems represent the largest share of consumption in buildings in general, and therefore, the development of studies related to the use of renewable energy in these systems becomes relevant. This work aimed to carry out a theoretical study of the CEFET-MG solar plant, to supply thermal energy to the central air conditioning system with absorption chiller for building 20, which has a significant use profile in terms of energy consumption, aiming to provide thermal comfort for the building in a sustainable way. The TRNSYS 16 software was used to model collectors, simulating the solar plant, developed in partnership with Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, through a research and development project. Analyzes of the environments to be air-conditioned in building 20 were also carried out to survey the thermal loads and select the air conditioning system. The results showed the efficiency of the software chosen for the modeling, parameterization of the system components, including adjustment of COP of commercial models of the selected equipment and performance of climatic analyses. It was possible to conclude that the water temperature of the plant meets the requirements of commercial models of absorption chillers (70°C on average). After calculating the energy demand in the period of 1 year by the chiller for 2 proposed usage profiles, values of 73.77 GJ and 91.81 GJ were obtained. The simulation in the TRNSYS software showed that the parabolic collectors are able to supply 131.49 GJ of energy in the same period, that is, they meet the total energy demand necessary for the generation of chilled water for the air conditioning of building 20, giving relevance to this work and potential for academic and practical contribution.

Keywords: Energy efficiency; air conditioning; solar energy; renewable energy

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Vistas em seção transversal e longitudinal do coletor solar de tubo evacuado..... 22
Figura 2- coletor solar de calha parabólica com alguns dos raios incidentes e refletidos 23
Figura 3 - Modelo físico de receptor de calha parabólica (seção transversal do receptor). 24
Figura 4 - Representação da perda térmica do receptor. 24
Figura 5 - Exemplo de modelo de absorvedor utilizado em simulação computacional 25
Figura 6 - Concentrador parabólico..... 26
Figura 7 - Configurações possíveis de fornecimento de energia auxiliar 32
Figura 8 - TRNSYS - *Simulation studio* 35
Figura 9 - Exemplo de parâmetros de componente..... 36
Figura 10 - Linha 2 da usina solar do CEFET-MG..... 38
Figura 11 - Type 536 no *Simulation Studio* do TRNSYS 40
Figura 12 - parâmetros de configuração do *Type* 536..... 41
Figura 13 - Propriedads termofísicas do MobilTherm 605 42
Figura 14 - Modelo da usina solar do CEFET-MG..... 43
Figura 15 - Fachada lateral do prédio 20..... 44
Figura 16 - Sala 414 do prédio 20 44
Figura 17 - Planta baixa do 4° pavimento do prédio 20 45
Figura 18 - Planta baixa de salas de aula do prédio 20..... 46
Figura 19 - Modelo do prédio 20 47
Figura 20 - Irradiação anual e temperatura ambiente em Belo Horizonte..... 48
Figura 21-Configuração do perfil de utilização no TRNSYS 49
Figura 22 - Perfil de utilização proposto para análise de atendimento pela capacidade da usina..... 50
Figura 23 - Parâmetros de configuração do Type 91..... 51
Figura 24 - Modelo de lâmpada utilizada nas salas de aula 52
Figura 25 - Projetor Epson existente nas salas de aula..... 53
Figura 26 - *Chiller* por absorção – água quente 54
Figura 27 - Arranjo de sistema com *chiller* de absorção. 55
Figura 28 - Type 107, utilizado para modelagem do sistema de ar condicionado..... 56
Figura 29 - Modelo do sistema com *chiller* de absorção acoplado à usina..... 57
Figura 30 - Unidade evaporadora modelo piso teto. 58
Figura 31 - Torre de resfriamento..... 58
Figura 32 – Temperaturas do óleo na entrada do coletor..... 60
Figura 33 - Temperaturas do óleo na saída do coletor 61
Figura 34 - Temperaturas do óleo na saída do coletor e radiação anual 61
Figura 35 - Temperaturas de saída do óleo na saída do reservatório térmico 62
Figura 36 - Temperaturas de água na saída do trocador de calor 62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dimensões dos módulos da usina solar do CEFET-MG 37
Tabela 2- Taxas metabólicas para atividades típicas..... 52
Tabela 3 - Cargas térmicas típicas de alguns dos espaços a serem considerados nas análises 53
Tabela 4 - Demanda de energia para climatização do prédio 20 63
Tabela 5 - Demanda de energia para climatização do prédio 20 63

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
2 JUSTIFICATIVA 14
3 OBJETIVOS 16
3.1 Objetivo geral 16
3.2 Objetivos específicos 16
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
4.1 Cenário mundial de demanda energética 17
4.2 Energia solar 18
4.2.1 Processo de transformação da energia solar 20
4.2.2 Coletores solares 21
4.3 Sistemas de climatização solares térmicos 27
4.3.1 Sistema ativado por calor 28
4.3.2 Sistema ativado por trabalho 28
4.3.3 Sistema de climatização com *chillers* de absorção 28
5 METODOLOGIA 33
5.1 Infraestrutura utilizada 34
5.1.1 TRNSYS 34
5.2 Objeto de estudo: Usina Solar do CEFET-MG 36
5.3 Modelo no TRNSYS da Usina solar do CEFET-MG 38
5.4 Objeto de estudo: sistema de climatização do prédio 43
5.5 Parâmetros de simulação 47
5.6 Cargas térmicas 51
5.7 Seleção do sistema de ar condicionado 54
6 Resultados e discussão 59
CONCLUSÃO 64
REFERÊNCIAS 66

1 INTRODUÇÃO

A demanda crescente por energia, o aumento dos preços dos combustíveis fósseis e as consequências ambientais resultantes do desenvolvimento industrial das nações ao redor de todo o mundo motivam a busca da substituição de fontes energéticas não renováveis por fontes alternativas e renováveis, visando a atender a demanda energética mundial de forma sustentável.

O desenvolvimento de tecnologias para utilização de energias renováveis é foco de atenções e investimentos crescentes ao redor de todo o mundo. As principais motivações para esse crescimento são o aumento das exigências pelas políticas ambientais na busca pela diminuição dos impactos ao meio ambiente e o aumento do custo dos combustíveis não renováveis. Assim, diversas formas de energias alternativas são buscadas, como biomassa, energia eólica e solar.

A energia solar tem ganhado grande importância nos últimos anos e são desenvolvidos numerosos estudos sobre os diversos tipos de coletores e sistemas para a geração de energia a partir do sol. Esse tipo de energia tem sido aplicado diretamente a sistemas, como os elétricos residenciais, para as instalações de iluminação e tomadas, e para aquecimento de água em sistemas hidro sanitários, ou fornecendo energia para processos, como aquecimento de água para cozinhas industriais, por exemplo, que utilizam grandes quantidades de água quente, não só para a preparação dos alimentos como para limpeza dos utensílios. Assim, esforços tem sido aplicados na busca de melhoria da eficiência dos sistemas que utilizam energia solar para que tornem-se economicamente vantajosos.

Entre os setores que demandam energia em uma economia, o das edificações é responsável por parcela significativa do consumo total e o consumo energético pelos sistemas de climatização artificial das edificações, em geral, é responsável por maior parte do consumo, a depender do perfil de utilização.

Diante do apresentado, levando-se em consideração a disponibilidade finita e o alto custo dos combustíveis fósseis, além do nível significativo de emissões de gases intensificadores do efeito estufa por determinadas matrizes energéticas, é necessário o investimento em pesquisas e desenvolvimento de sistemas energéticos que utilizam fontes

alternativas renováveis e menos poluentes. Diante da elevada e crescente utilização de sistemas de ar condicionado nas edificações, torna-se altamente atrativo o uso de energia solar nesses sistemas, em especial nos países onde a disponibilidade solar é abundante e torna ainda mais promissora a utilização dessa energia.

Este trabalho realizou um estudo teórico da usina solar do CEFET-MG, para suprimento de energia térmica como força motriz para o sistema de ar condicionado com *chiller* de absorção proposto para o prédio 20, visando a baixos custos operacionais com energia elétrica em comparação com um sistema que utilize energia da concessionária e visando também à operação do sistema de maneira mais sustentável. O sistema de climatização estudado é um sistema de ar condicionado com *chiller* de absorção, que alimenta com água gelada os climatizadores individuais para cada ambiente. O sistema foi modelado objetivando a atender aos parâmetros de conforto térmico nas salas de aula do prédio, com perfil de utilização significativo em termos de consumo energético. Foi verificada a viabilidade de substituição de energia elétrica da concessionária pela energia fornecida pela usina solar instalada no campus Nova Gameleira. Para essa verificação, foi utilizado o *Software* TRNSYS 16 para modelagem de coletores, simulando a usina solar, desenvolvida em parceria com a Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, por meio de um projeto de pesquisa e desenvolvimento. Além da simulação da usina solar alimentando o sistema de climatização do prédio, foram realizadas análises de viabilidade econômica mais abrangente, levando-se em conta custos, como de aquisição e instalação de equipamentos e materiais, que auxiliaram na conclusão sobre a vantagem de se utilizar o sistema proposto.

Objetivou-se, assim, alcançar uma contribuição acadêmica com essa análise, gerando futuras publicações, levando-se em conta a relevância atual do tema, e contribuição prática, devido à possibilidade de operação do prédio de porte significativo no Campus com uma fonte sustentável de energia.

2 JUSTIFICATIVA

Atualmente, os equipamentos de ar condicionado comercializados operam em sua maioria com energia elétrica. Existem poucas tecnologias disponíveis comercialmente que utilizam energia solar para a alimentação dos sistemas de ar condicionado. Existem modelos de ar condicionado alimentados com energia provinda de sistemas fotovoltaicos, porém, além de apresentarem baixa eficiência, utilizam baterias, cujo descarte resulta em um novo problema ambiental a ser tratado nesse tipo de solução.

Porém, existem demandas e oportunidades de desenvolvimento de tecnologias para utilização de energia solar em sistemas de ar condicionado, devido ao consumo significativo de energia representado por esses sistemas e à relativamente baixa disponibilidade de soluções comerciais em grande escala. Soma-se a esse cenário a constatação do aumento previsto de demanda energética mundial nos próximos anos, além da escassez de combustíveis fósseis e dos impactos ambientais resultantes da combustão desses recursos.

Torna-se, assim, relevante o desenvolvimento de estudos sobre a utilização de fontes renováveis em processos em geral, e em sistemas de climatização artificial.

A realização de estudos para utilização de fontes renováveis é relevante quando se trata de sistemas de climatização. Além de maiores exigências por conforto térmico, os sistemas de climatização artificial são itens indispensáveis em processos que necessitam de controle de parâmetros como temperatura e umidade relativa do ar. Indústrias, hospitais e salas limpas são exemplos de ambientes nos quais a climatização artificial não é um item de conforto, mas é imprescindível à segurança e confiabilidade dos processos. Soma-se a isso, o crescente aumento das temperaturas mundiais, que por um lado é influenciada pela utilização de energias não renováveis, e, por outro, aumenta a demanda energética resultante do aumento da demanda por sistemas de climatização artificiais.

A importância deste estudo justifica-se com base em aspectos ambientais, devido ao alto impacto causado por matrizes energéticas não renováveis e aspectos econômicos, devido ao alto custo de utilização de combustíveis fósseis como fonte energética para processos e sistemas, o que torna cada vez mais importante a busca pela diversificação da matriz energética nacional.

Esses fatores justificam a investigação da viabilidade de aplicação da energia gerada pela usina solar de coletores parabólicos já instalada do Campus Nova Gameleira do CEFET-MG para fornecimento de energia renovável para um sistema de climatização no prédio 20. As características construtivas do prédio já foram analisadas em estudos prévios realizados por alunos da graduação do CEFET-MG, já tendo sido constatada a necessidade de implantação de sistema de climatização para proporcionar conforto térmico, e sua importância para operação do prédio. Foi proposto um sistema de ar condicionado central para o prédio 20, e, devido a seu tamanho, quantidade de salas e perfil de utilização, torna-se relevante a investigação da viabilidade de aplicação da energia renovável gerada utilizando-se de tecnologia de concentração solar por meio dos coletores solares tipo calha parabólica da usina solar existente, reforçando a perspectiva de contribuição acadêmica e prática deste estudo.

Embora existam estudos comparativos sobre as vantagens de utilização de outros tipos de coletores em instalações de ar condicionado solar térmico, como os lineares de Fresnel, o foco será na análise da utilização da usina de coletores parabólicos, buscando-se uma contribuição prática, levando-se em conta sua existência real no campus. Os coletores lineares de Fresnel apresentam maior facilidade de instalação por necessitarem de pouca fundação e podem utilizar fluidos pressurizados, sendo mais leves em relação aos de calhas parabólicas (ABOELWAFA, 2018). Porém, os coletores de calha parabólica apresentam maior eficiência óptica e maior rendimento total. Embora apresentem maior dificuldade de instalação pois requerem em geral maior área e são mais apropriados para instalação ao nível do solo, esse fator não será considerado, pois a usina já está instalada. Foi realizada uma análise comparativa entre alguns tipos de coletores para melhor embasamento e contextualização desta pesquisa.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Análise da viabilidade de suprimento total ou parcial de energia para um sistema de ar condicionado central do prédio 20, no campus Nova Gameleira, pela energia fornecida pela usina solar instalada no CEFET-MG.

3.2 Objetivos específicos

- Desenvolvimento do modelo da usina solar no *software* TRNSYS e de um sistema de ar condicionado solar térmico para o prédio 20 do CEFET-MG, com as devidas definições de parâmetros do sistema;
- Seleção de um sistema de ar condicionado solar térmico para climatização do prédio 20 do CEFET-MG, com base na carga térmica do prédio e nos parâmetros de projeto, conforto térmico e qualidade do ar interior estabelecidos pela ABNT NBR 16401/2008, pela RE 09/2003 da ANVISA e normas ASHRAE;
- Análise da viabilidade de alimentação desse sistema por energia térmica gerada pela usina solar existente no campus, de acordo com o potencial de geração da usina e com a carga térmica a ser combatida pelo sistema de ar condicionado;

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Cenário mundial de demanda energética

A demanda mundial por energia é crescente e o consumo de energia gerada por matrizes que utilizam fontes não renováveis é um fator significante entre os causadores de problemas ecológicos (PÉREZ et al., 2008). Nos últimos 50 anos, o aumento da demanda por energia, juntamente com as mudanças climáticas devido às emissões de gases de efeito estufa chamaram a atenção da comunidade de pesquisa e dos governos para fontes alternativas de energia. Além disso, o crescimento populacional e o desenvolvimento econômico aumentaram a consciência sobre o impacto ambiental dos sistemas convencionais de energia. Estudos recentes constatam a previsão do crescimento da demanda energética, que conflita com a escassez de combustíveis fósseis e os impactos climáticos resultantes da combustão desses recursos (SCHMID, 2019).

Nos últimos anos, a Agência Internacional de Energia (IEA) e a União Europeia (UE) têm prestado cada vez mais atenção ao setor do consumo de energia nos edifícios, em particular no setor do aquecimento e refrigeração. As diretivas de desempenho energético dos edifícios de 2010 e as diretivas de eficiência energética de 2012 foram introduzidas na legislação da UE a fim de reduzir o consumo de energia elétrica e térmica dos edifícios. Esses fatores incentivaram o aumento dos esforços relativos à adoção de fontes de energia alternativas e renováveis no setor da construção (CALISE, 2017).

Com a escassez dos recursos fósseis, o preço desses recursos tende a aumentar no futuro em velocidade preocupante. Portanto, o desenvolvimento de energia sustentável é incentivado por alguns governos durante a crise financeira, como EUA, Japão e China. Prevê-se que o governo chinês investirá de modo que a energia nuclear, eólica e solar na China terão rápido desenvolvimento (LIU, 2010).

As políticas ambientais tornam-se cada vez mais rigorosas em relação ao consumo de energias primárias (PETELA, 2017) e a utilização de energias alternativas é cada vez mais necessária para reduzir as emissões de CO_2 e redução do consumo de energias não renováveis. Na Índia, por exemplo, o primeiro-ministro anunciou recentemente a intenção do governo de reduzir a dependência das importações de petróleo em 50% até 2030 (SUDHEER, 2015). As emissões de CO_2 da Índia atualmente correspondiam em 2016 a 6,5% do total das emissões mundiais (LIU, 2016). No Marrocos, o crescimento da utilização das energias renováveis tem ganhado importância na estratégia energética marroquina, uma vez que o país tem sofrido com a sobrecarga dos sistemas geradores de energia durante o verão. A

estratégia governamental busca uma maneira eficiente de otimizar o uso de energia e diminuir os custos com o consumo de energia. O objetivo é atingir 15% de economia de energia (BOUHAL et al., 2018). O consumo de energia no setor de construção marroquino é responsável por 35% da energia total utilizada, e é crescente nos últimos anos com o desenvolvimento da economia nacional. Segundo Hinrichs et al (2010), aproximadamente 60% do volume dos gases responsáveis pelo agravamento do efeito estufa são provenientes do gás $CO_{2,}$ produto da queima de combustíveis fósseis. O Acordo de Paris, assinado em 2015, rege medidas de redução de efeito estufa a fim de conter o aquecimento global e estabelece a meta de manter a média de aumento da temperatura global em 2°C e a aplicação de esforços visando a reduzir essa média de aumento para 1,5°C. Prevê-se que a contribuição de energia renovável deverá aumentar para 55% a 75% do consumo final bruto de energia na Europa até 2050 (SCARLAT, 2015).

O consumo de energia elétrica pelas edificações é cada vez mais expressivo. O setor de construção representa 25% das emissões totais de CO_2 (BOUHAL et al., 2017). O consumo de energia pelos sistemas de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) nas edificações residenciais e comerciais ultrapassa 50% do total e existem previsões de aumento da demanda por sistemas de climatização artificiais devido às exigências cada vez maiores por conforto térmico pela humanidade, inclusive em climas moderados (VAKILOROAYA, 2015). Ainda segundo Vakiloroaya (2015), o faturamento anual do mercado global de climatizadores aumentou de 7 para 8 bilhões de euros desde 2012. O consumo final de energia nos edifícios da União Europeia representa cerca de 40% do consumo total de energia, segundo Pérez (2008). No setor residencial da UE, cerca de 70% do consumo total de energia final é utilizado para a climatização de ambientes, 15% para água quente sanitária e 15% para eletricidade (PÉREZ et al., 2008).

4.2 Energia solar

A matriz energética utilizada pelas atividades econômicas de um país influencia diretamente no impacto ambiental causado e por isso a fonte dessa energia é um parâmetro crítico a ser avaliado no que diz respeito à segurança energética, sustentabilidade e seu impacto no meio ambiente (DAWN et al., 2016). A energia solar apresenta atualmente um grande potencial de crescimento, sendo transmitida até a terra por meio de ondas eletromagnéticas provenientes do sol (SCHMID, 2019). Estudos recentes têm assumido que o impacto ambiental principal relacionado às tecnologias produtoras de energia a partir de fontes renováveis estão relacionados aos impactos resultantes de seu processo de

fabricação, validando assim a importância de investimentos na produção dessas tecnologias (PETELA, 2018).

Foram realizados numerosos estudos nas últimas décadas sobre a aplicabilidade da energia solar para climatização e foi detectado que barreiras como alto custo inicial ainda permanecem para a comercialização generalizada de tecnologias de resfriamento solar. Não está claro também, atualmente, se termicamente os sistemas acionados por energia solar provarão ser mais competitivos do que os sistemas acionados eletricamente (TAYLOR, 2012).

Embora a aplicação das tecnologias atuais que utilizam energias renováveis ainda enfrente barreiras como custo e eficiência, graças aos esforços aplicados em pesquisas e desenvolvimento, além da escassez dos recursos naturais não renováveis, essas tecnologias têm se tornado mais amplamente aceitas pela sociedade (STANEK, 2018).

Em 2016, a energia solar representava uma fração muito pequena do fornecimento de energia mundial (cerca de 0,5% de geração de eletricidade global) (MASSON, 2016). Porém, o desenvolvimento contínuo de tecnologias modernas de conversão de energia solar nas últimas décadas está tornando os sistemas de energia solar menos caros e mais eficientes. De acordo com a Agência Internacional de Energia, a energia solar pode se tornar a maior fonte de eletricidade até 2050 (IEA, 2014). Essa energia é uma das mais promissoras, pois pode ser utilizada tanto para a geração de energia elétrica e mecânica, quanto para o aproveitamento da energia térmica (Hoffmann et al, 2012).

A energia solar é limpa e acessível a todos em todo o mundo, e apresenta-se viável especialmente em regiões com alta radiação solar. O consumo mundial de energia em 2011 foi de cerca de $5,48 \times 10^8$ TJ, o que significa que o consumo médio total de energia foi de cerca de 17,4 TW. Em comparação, a radiação na Terra recebida do Sol é de cerca de 162.000 TW (MOJIRI, 2013). Isso implica que uma pequena fração dessa radiação solar pode atender às necessidades de energia atuais e futuras do mundo.

Utilizar a luz do sol para produzir resfriamento é uma meta há muito buscada. Intuitivamente, a necessidade de resfriamento é proporcional à intensidade de energia solar incidente, sendo, assim, correspondentes o pico de demanda de resfriamento e a disponibilidade de energia solar máxima. Devido a essa relação entre recurso e necessidade, reforça-se a importância de investimentos em pesquisas e produção de tecnologias para resfriamento solar (TAYLOR, 2012).

Assim, torna-se cada vez mais relevante a utilização de energia solar também em território brasileiro, levando-se em conta a disponibilidade solar no país e a disponibilidade de extensos

territórios para instalação de usinas. Na busca crescente pela adoção de energias renováveis nas edificações e sistemas, a utilização de energia solar tem se tornado cada vez mais comum no Brasil (ANEEL, 2018).

4.2.1 Processo de transformação da energia solar

A energia solar é transmitida até a Terra por meio de radiação e são utilizados pelos sistemas de aquecimento solar para elevação da temperatura do fluido de trabalho. Os principais componentes dos sistemas de aquecimento solar são os coletores solares, reservatório térmico, fonte auxiliar de energia e uma rede de distribuição de água aquecida (LIMA, 2003). Nesses sistemas, ocorre a conversão da energia solar em energia térmica.

Os principais mecanismos de captura da luz solar e fornecimento de energia útil desenvolvidos e comercializados até agora foram o fototérmico e o fotovoltaico. Os coletores fototérmicos transformam a radiação solar em calor útil, enquanto os receptores fotovoltaicos (células fotovoltaicas) são capazes de produzir eletricidade diretamente da luz solar. A primeira conversão prática relatada de radiação solar em energia foi realizada por Augustin Mouchot em 1878 (TORRES, 2009). Ele usou um coletor solar térmico incluindo um refletor cônico para operar um motor térmico. A primeira conversão prática direta da luz solar em eletricidade usando fotocélulas foi realizada em meados da década de 1950 com uma eficiência de conversão de 6% (TYAGI, 2012). Desde então, os mecanismos de coleta e conversão evoluíram e as eficiências de conversão aumentaram. As células fotovoltaicas atingiram agora eficiências tão altas quanto 43,5% (GREEN, 2012) em medições de laboratório. No entanto, tal eficiência vem com um custo de fabricação muito alto das células solares (TORREY, 2010). As células comercialmente viáveis são principalmente células de silício monocristalino e multicristalino com eficiências de módulo variando de 14 a 20%.

A utilização de células fotovoltaicas sob radiação solar concentrada pode reduzir o custo de produção de eletricidade solar (MOJIRI, 2013). Nesses modelos, a maior parte da área da célula fotovoltaica é substituída por concentradores solares, como lentes e espelhos, que geralmente são mais baratos que as células fotovoltaicas. Por exemplo, o custo de uma calha parabólica incluindo os espelhos, dispositivos de rastreamento e estruturas necessárias custa cerca de 295 ($/m2) (TURCHI, 2010), enquanto um sistema fotovoltaico em escala de utilidade feito de células de silício policristalino (com eficiência média de 14,5% e um rastreamento de eixo) custa cerca de 638 ($/m²); 44% deste último deve-se apenas ao custo do módulo fotovoltaico (GOODRICH, 2012) que é igual a cerca de 280 ($/m²).

As tecnologias desenvolvidas atualmente com maior aplicabilidade convertem a energia solar em térmica, promovendo assim o aquecimento de fluidos, e em energia elétrica, utilizando painéis fotovoltaicos. No Brasil, as instalações solares que geram energia térmica são mais encontradas nas regiões sul e sudeste. Os painéis fotovoltaicos são mais amplamente utilizados nas regiões norte e nordeste, devido às características climáticas mais favoráveis a esse tipo de instalação (MUND, 2014).

Os coletores solares térmicos são um tipo especial de trocador de calor que transforma a energia solar radiante em calor. (DUFFIE et al, 2013). Estes dispositivos são responsáveis por captar a energia radiada pelo sol e transformar em energia térmica para o aquecimento de um fluido de trabalho.

Eles podem ser classificados basicamente como: não concentradores e concentradores. Os coletores não concentradores são para aplicações que não ultrapassam em média os 70°C. Os coletores concentradores são para aplicações que requerem temperaturas do fluido de trabalho acima de aproximadamente 70°C.

4.2.2 Coletores solares

Entre os tipos existentes atualmente de coletores solares, estão os de placas planas, tubos evacuados, calha parabólica, entre outros.

Os coletores solares planos são os mais simples, econômicos e populares sistemas de captação de energia solar. O coletor solar de placa plana é um dispositivo que facilita a aplicação direta da energia solar para aquecimento de água no setor doméstico e industrial. Os coletores solares planos existentes apresentam eficiência comparativamente baixa (VERMA et al, 2020).

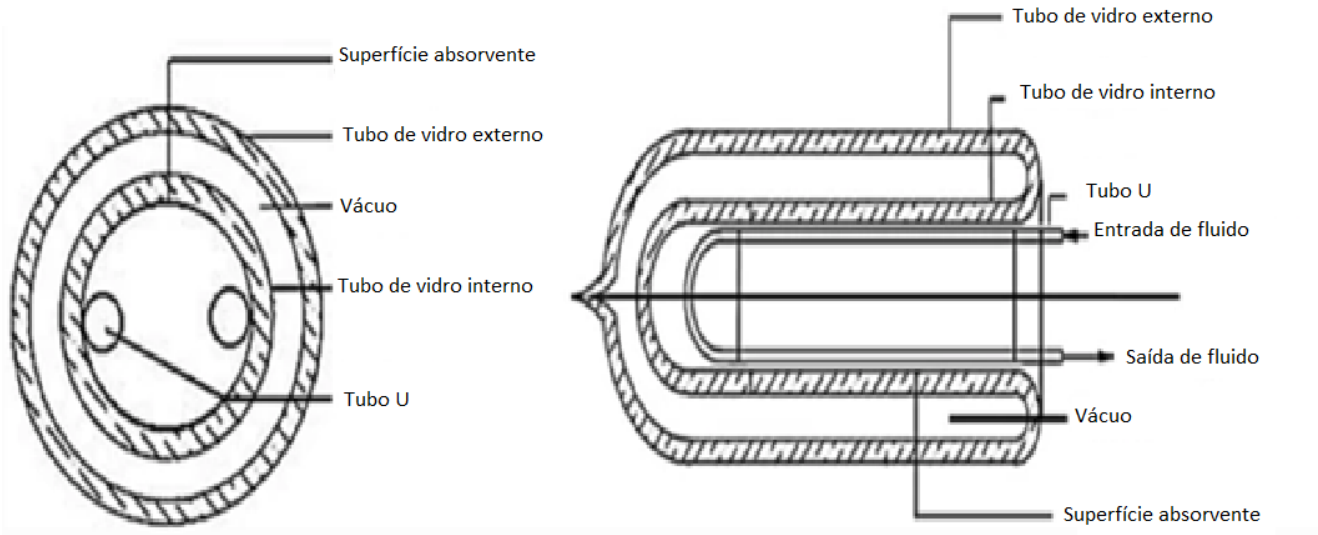
De acordo com Verma et al (2020) os coletores solares tipo tubo evacuado são utilizados para aplicações em médias temperaturas, que preenchem a lacuna entre os coletores de baixa temperatura, e os coletores concentradores para altas temperaturas. Estes coletores apresentam alta viabilidade técnico-econômica e comercial. Segundo Naik et. Al (2021), nos últimos anos, o coletor solar de tubo evacuado é projetado como um dispositivo de utilização térmica solar alternativo para atingir temperaturas de descarga média (60-150°C), devido ao custo-benefício, flexibilidade operacional e recursos de eficiência energética.

Várias configurações de coletores solares de tubo evacuado, como tipo U, tipo H, tipo T, tipo tubo de calor, etc. são relatadas na literatura para vários sistemas solares (NAIK, 2019).

Entre eles, o coletor solar de tubo em U evacuado apresenta maior aplicabilidade prática, simplicidade no projeto e menor custo de investimento. Esse tipo de coletor é basicamente um trocador de calor que transfere a energia da radiação solar do sol para o fluido de trabalho. A radiação solar incidente na superfície externa do vidro do tubo evacuado é transferida para o tubo interno de vidro através do processo de transferência de calor radiativo e, em seguida, o calor é absorvido pelo tubo em U. Do tubo em U, o calor é trocado para o fluido de trabalho.

As vistas em seção transversal e longitudinal do coletor solar de tubo em U evacuado convencional são mostradas na figura 1.

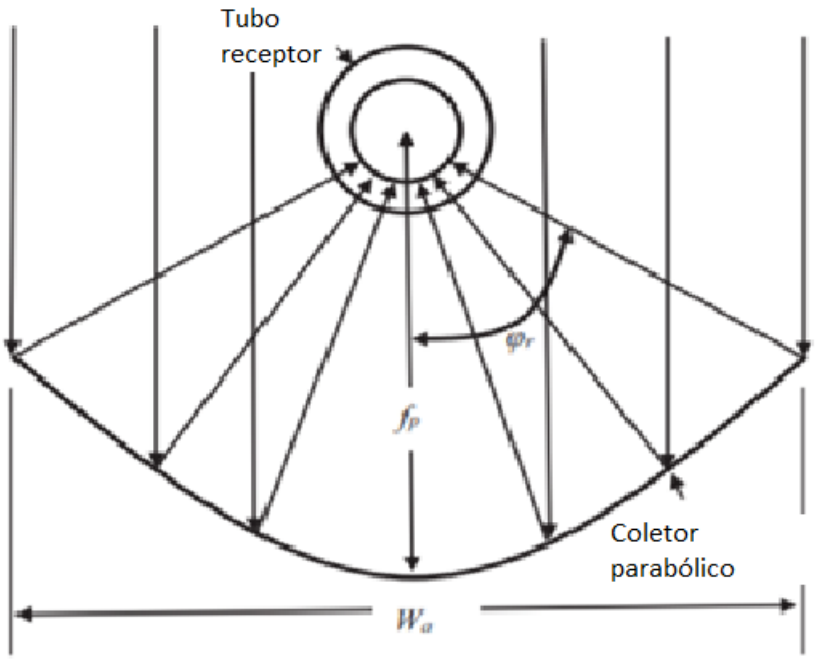
Figura 1 Vistas em seção transversal e longitudinal do coletor solar de tubo evacuado



Fonte: Adaptado de NAIK**,** 2019.

Um sistema de calha parabólica consiste em um coletor na forma de um espelho de formato parabólico que coleta a radiação solar incidente e a reflete em um tubo receptor que é colocado no foco ponto da parábola, conforme mostrado na Figura 2.

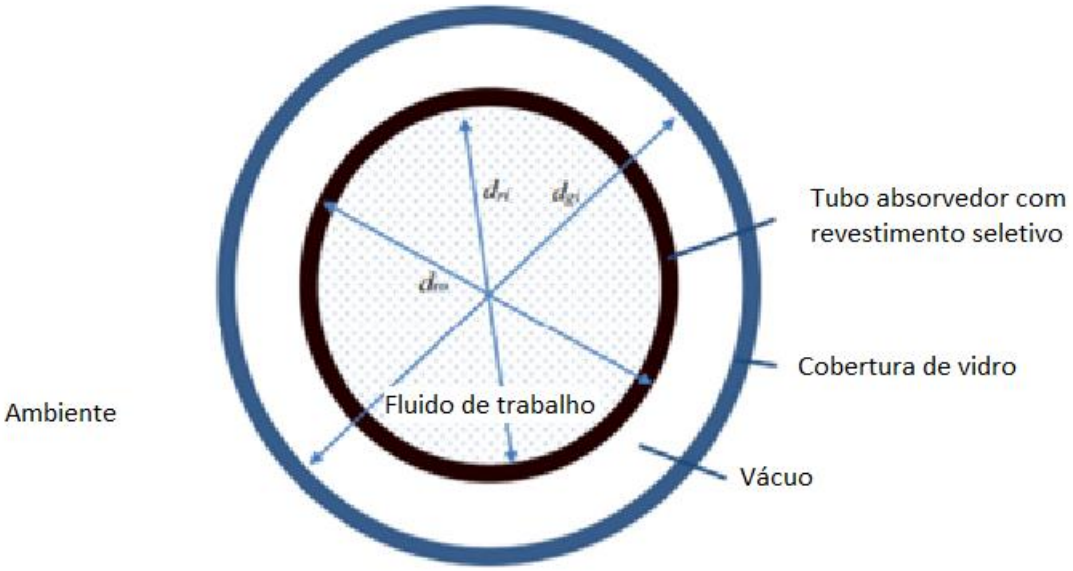
Figura 2- Coletor solar de calha parabólica com alguns dos raios incidentes e refletidos



Fonte: Adaptado de MWESIGYE, 2018

Os raios perpendiculares à abertura do coletor são refletidos para o ponto focal da parábola. O tubo receptor consiste em um tubo absorvedor de aço que é envolvido por uma tampa de vidro. Dentro tubos receptores convencionais, como os usados em usinas de geração de energia, o espaço entre o tubo absorvedor e a tampa de vidro é evacuada a pressões muito baixas de cerca de 0,0103 Pa (PRICE, 2002) para suprimir a perda de calor por convecção. Além disso, o revestimento do tubo absorvedor torna-o altamente absorvente à radiação solar de entrada de baixo comprimento de onda e com menos emissão de radiação infravermelha de alto comprimento de onda. As representações bidimensionais da seção transversal do receptor são mostradas na Figura 3.

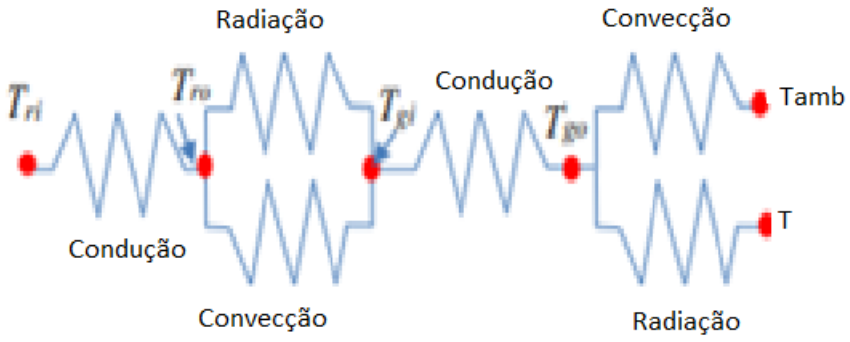
Figura 3 - Modelo físico de receptor de calha parabólica (seção transversal do receptor).



Fonte: Adaptado de MWESIGYE, 2016

O modelo térmico do receptor pode ser representado por uma rede de resistência térmica como mostrado na figura 4.

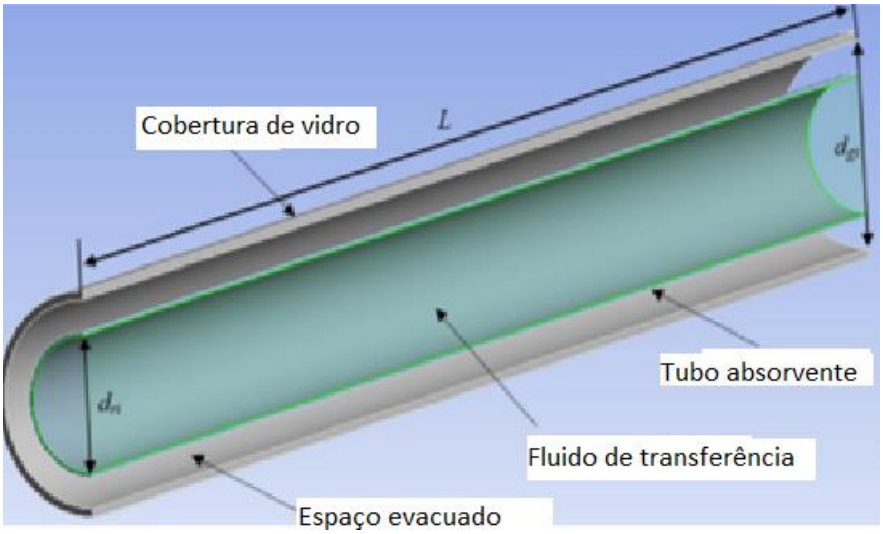
Figura 4 - Representação da perda térmica do receptor.



Fonte: Adaptado de MWESIGYE, 2016

Há transferência de calor por condução através das paredes interna e externa do absorvedor, a diferentes temperaturas, e também por radiação, conforme modelo representado na figura 5.

Figura 5 - Exemplo de modelo de absorvedor utilizado em simulação computacional

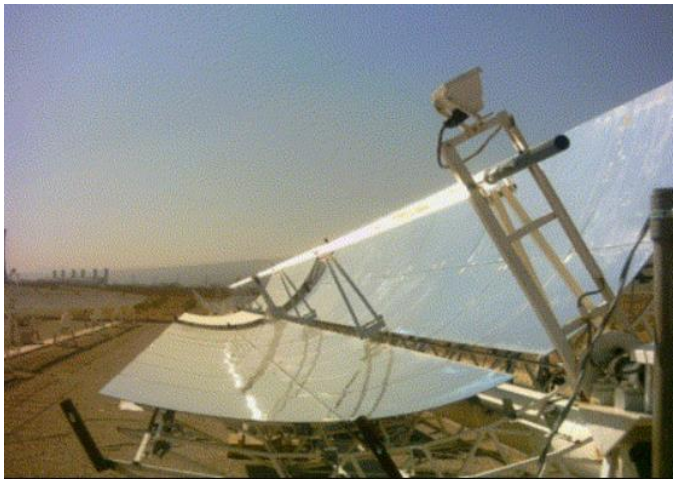


Fonte: Adaptado de MWESIGYE, 2016

Este é um tipo de coletor concentrador, para utilização em aplicações que requerem altas temperaturas, como a geração de vapor para processos industriais ou mesmo geração de energia elétrica em plantas solares. Os sistemas concentradores utilizam ótica para concentrar luz solar em um absorvedor térmico. A energia solar é captada em altas temperaturas por um fluido de transferência de calor e usado para conduzir um ciclo, convertendo o fluxo solar incidente em energia elétrica (MEHOS, 2016).

O coletor solar tipo calha parabólica focaliza a energia que atinge um grande refletor parabólico para um absorvedor relativamente pequeno (LIMA, 2003). O absorvedor contém água ou outro fluido de transferência. Em virtude da concentração de energia em um absorvedor de área diminuta, o fluido alcança níveis muito mais elevados de temperatura que aqueles atingidos pelos coletores planos. O coletor de tipo calha parabólica requer uma montagem sob um mecanismo motorizado de rastreamento do movimento solar, pois a radiação deve incidir no refletor ou na lente com um ângulo correto para ser focalizado pelo absorvedor. Na Figura 6 é apresentado um concentrador parabólico

Figura 6 - Concentrador parabólico



Fonte: NAEENI (2007)

O processo de conversão fototérmica do sistema de geração de energia solar térmica tipo calha parabólica é um dos que entrega maior eficiência ao processo e pode ser dividido nas seguintes seções: a radiação solar é coletada pelos coletores calha parabólicos (PTCs), então é refletida e focada na superfície externa do tubo absorvedor onde o a energia radiante é convertida em energia térmica. A energia térmica será conduzida para a superfície interna do tubo absorvedor e será transferida pelo fluido de transferência de calor dentro do tubo absorvedor com transferência de calor por convecção forçada (KALOGIROU, 2004).

Um dado importante a ser analisado na aplicação de energia solar é a eficiência de coletor solar em condições climáticas variáveis para cada aplicação. A combinação dessas informações leva a um design melhorado e a uma estratégia operacional ideal. A inserção do calor solar é análoga à colocação de uma fonte de utilidade quente e resultará em uma penalidade energética quando o sistema térmico solar fornecer calor abaixo da temperatura.

As usinas de concentração solar térmica (CST) são consideradas uma tecnologia de sucesso para geração de eletricidade, com cerca de 5 GW de capacidade instalada em todo o mundo no final de 2015 (DROSOU, 2018). A maioria das usinas solares em operação usa a tecnologia de coletores parabólicos (PTC) com óleo térmico como fluido de transferência de calor. Além disso, a eficácia do PTC para geração de calor (principalmente sob a forma de água quente pressurizada ou vapor) usado em outras aplicações que não a produção de eletricidade, ou seja, calor de processo e resfriamento solar, já foi apresentado em estudos anteriores.

Nos coletores solares, o reservatório térmico é responsável por acumular o fluido aquecido sem apresentar corrosão ou degradação do seu material interno, bem como suportar as pressões envolvidas no sistema (MATOS, 2014). A escolha do meio de armazenamento irá depender do processo utilizado, no caso de aplicações residenciais ou onde é necessário a utilização de água quente a escolha mais sensata é o armazenamento de água quente, ou

seja, calor sensível. No caso de aplicações com o coletor tipo calha parabólica, onde as temperaturas são mais elevadas, geralmente utiliza-se um circuito indireto, ou seja, o fluido a ser utilizado não é o mesmo que circula nos coletores solares.

Segundo BEAHR (2015), dentre todas as tecnologias de concentração de energia solar disponíveis até agora, a calha parabólica é a mais promissora para geração de energia.

Atualmente, modelos de diferentes complexidades estão sendo desenvolvidos para serem utilizados em Coletores de Calha Parabólica (PTC) a fim de descobrir oportunidades de redução de custos em usinas de energia solar concentrada, no entanto, ainda há uma escassez de modelos dinâmicos simplificados disponíveis para fácil e rápida simulação dessas plantas. Martins et al., (2019) apresentaram um modelo dinâmico simplificado para ser utilizado localmente denominado “Quasi Dynamic Testing” (QDT), permitindo uma rápida caracterização dos coletores e previsão da potência térmica útil específica. A parte experimental do trabalho foi realizada na primeira plataforma brasileira de demonstração e pesquisa que está instalada no campus do CEFEET-MG. Uma linha de PTCs desta instalação foi caracterizada para determinar as constantes de cada termo da equação através de dados de cinco testes realizados sob diferentes condições de céu e temperaturas do fluido de trabalho.

4.3 Sistemas de climatização solares térmicos

A utilização de energia solar em edifícios é um importante contributo para a redução do consumo de combustíveis fósseis e das emissões nocivas para o ambiente. Os sistemas de refrigeração solar térmica ainda apresentam pouco desenvolvimento em relação às aplicações práticas, embora a tecnologia esteja suficientemente desenvolvida há vários anos. O mercado de refrigeração de edifícios ainda tem um alto potencial de crescimento, com menos de 20% atualmente explorado (MATEUS, 2009). Uma pesquisa feita pela Federação Europeia da Indústria Térmica Solar (ESTIF, 2006), mostrou que em 2006 havia apenas cerca de 100 sistemas de refrigeração solar instalados na Europa. Desses, cerca de 67% eram baseados em tecnologia de resfriamento por absorção e mais da metade usava coletores solares de placa plana. O número de sistemas de refrigeração solar aumentará significativamente no futuro próximo, devido à chegada de novos players ao mercado. Existem hoje no mercado vários *chillers* de absorção acionados por água quente, começando com uma capacidade de refrigeração de cerca de 4 kW. Isso possibilita a instalação de sistemas de refrigeração por absorção solar para diversos tamanhos de edifícios, desde residências unifamiliares até grandes edifícios comerciais (MATEUS, 2009).

Os sistemas de refrigeração solar são extremamente promissores devido aos benefícios que podem fornecer em termos de redução da poluição ambiental e economia de energia (CALISE, 2017). A produção de refrigeração e / ou ar condicionado a partir da energia solar é uma alternativa convidativa, visto que a refrigeração de um edifício típico apresenta picos de carga com duração de 2 ou 3 h do tempo de irradiação solar máxima (TAYLOR, 2012).

As projeções feitas mostram que o resfriamento solar exigirá o menor investimento de capital em 2030 devido aos altos COPs que vem sendo apresentado pelas alternativas que tem surgido e às fortes metas de redução de custos para a tecnologia solar.

Os sistemas de climatização solar térmica podem ser divididos em duas abordagens, praticamente:

4.3.1 Sistema ativado por calor

Sistemas que dependem de energia solar térmica, como um ciclo de refrigeração por absorção que é impulsionado principalmente por entrada de calor. Esses sistemas não utilizam trabalho mecânico de compressores, e possuem um dispositivo denominado gerador e um absorvedor.

4.3.2 Sistema ativado por trabalho

Sistemas como o ciclo de compressão de vapor convencional que requer compressor entrada de trabalho que normalmente é alimentada eletricamente.

4.3.3 Sistema de climatização com *chillers* de absorção

A tecnologia de aquecimento solar térmico, principalmente de água para aplicações de calor doméstico e de processo avançou significativamente nos últimos trinta anos (PRANESH, 2019). Instalações de tamanho e capacidade adequados para fornecimento de fluido aquecido na faixa de temperatura entre 50°C e 80°C estão rotineiramente disponíveis usando coletores solares de tubo a vácuo ou até mesmo um design de placa plana simples. O problema do uso de energia solar térmica para ar condicionado atraiu atenção mais recentemente, mas constitui uma tarefa mais difícil (ALI, 2021). Isso ocorre porque *chillers* de absorção que realizam o resfriamento devem ser acionados com fluido a temperaturas de entrada acima de 70°C, dependendo do projeto e coeficiente de desempenho do *chiller*. Para que sejam atingidas as temperaturas necessárias, os sistemas requerem o projeto de

coletores solares adequados; simplesmente expor tubos absorvedores evacuados ou placas planas à irradiação solar não permite atingir temperaturas nesta faixa, a menos que um número extremamente grande de coletores seja usado. Coletores solares parabólicos (PTC), devido à sua taxa relativamente alta de concentração solar tem uma eficiência térmica satisfatória e são geralmente usados para atender à demanda de temperatura mais alta. Os *chiller* de absorção são resfriadores de líquido que utilizam recursos de energia de maneira eficiente por meio de várias fontes de calor, como gás, água quente e vapor, podendo ser esse calor inclusive de fontes residuais, e são uma alternativa ao uso de eletricidade.

Atualmente, o custo de investimento de um *chiller* por compressão de vapor é competitivo, por ser até 5 vezes menor que o de um chiller de absorção. Esse fato ainda é responsável por levar o mercado consumidor a fazer a escolha pelo primeiro tipo de equipamento na maioria dos casos. Contudo, uma vez que os chillers térmicos podem ser alimentados por calor derivado da energia solar, esforços constantes devem ser empreendidos para fazer com que esses sistemas se tornem mais atraentes e sejam instalados com mais frequência. Sua difusão pode contribuir para uma maior participação de consumo de energia renovável no balanço nacional e global e, consequentemente, para economia importante de recursos de energia não renováveis.

Os *chillers* solares dependem de uma fonte de energia com disponibilidade dependente do tempo e, portanto, geralmente são considerados não confiáveis. Portanto, é importante investir em ferramentas de gerenciamento da planta de resfriamento, para possibilitar que esses sistemas sejam eficazes mesmo em locais com poucos recursos solares. Esforços de engenharia devem ser feitos para obter altos valores de fração solar, definidos como a razão entre a energia obtida do coletor solar e a energia total demanda para determinadas condições (TAYLOR, 2012).

Atualmente, é possível encontrarmos na literatura numerosos estudos desenvolvidos com o intuito de investigar estratégias para melhoria da confiabilidade dos sistemas.

O sistema de refrigeração solar é um sistema ecológico que consome energia renovável. Dentre as opções potenciais para resfriamento solar, o sistema de resfriamento por absorção movido a energia solar é competitivo devido à alta eficiência e comercialização do *chiller* de absorção. Um sistema de resfriamento por absorção solar consiste em coletor solar, armazenamento de calor, *chiller* de absorção, torre de resfriamento, carga de resfriamento, bombas e unidades de controle. Sistemas de refrigeração por absorção solar com diferentes coletores solares e *chillers* de absorção têm sido estudados (XU, 2017).

Nas últimas décadas, o sistema de resfriamento por absorção solar composto por coletor solar de baixa temperatura e resfriador de absorção de água LiBr de simples efeito foi amplamente pesquisado. Este sistema adota coletor de placa plana ou coletor de tubo evacuado como fonte de calor e fornece água quente abaixo de 100°C para o resfriador de absorção. Assilzadeh et al. (2005) estudaram um coletor solar de tubo evacuado acionando um sistema de resfriamento de absorção de água LiBr de simples efeito na Malásia. O desempenho do sistema foi calculado em TRNSYS. O projeto ideal para uma saída de resfriamento de 3,5 kW precisava de um coletor de 35 m² e funcionava cerca de 5 horas por dia. Syed et al. (2005) estudaram um coletor de placa plana de 49,9 m² acionando um sistema de resfriamento por absorção de água LiBr de 35 kW de simples efeito em Madri. O COP instantâneo máximo e o COP médio diário de 0,60 e 0,42 foram obtidos experimentalmente. Lizarte et al. (2012) estudaram um coletor de placa plana a vácuo acionando um sistema de resfriamento de absorção de água-LiBr de simples efeito refrigerado a ar de 4,5 kW em Madri. COP médio e COP solar de 0,53 e 0,06 foram obtidos experimentalmente. Esses sistemas tinham intervalo de trabalho curto e exigiam grande área de coletor solar. Coletores solares com temperatura de trabalho mais alta podem ser adotados para melhorar esses resultados. Mazloumi et al. (2008) estudaram um coletor de calha parabólica (PTC) acionando um sistema de resfriamento de absorção de água LiBr de 17,5 kW de simples efeito por simulação. O *chiller* trabalhou 12 h por dia com COP de 0,67 a 0,76. O tempo de trabalho foi maior, mas a eficiência do sistema foi limitada pelo *chiller* de absorção de simples efeito. Para aumentar a eficiência do sistema, *chillers* de absorção com maior eficiência, incluindo *chiller* de absorção de duplo efeito podem ser usados. Bermejo et al. (2010) estudaram experimentalmente um Refletor Linear Fresnel (LFR) acionando um sistema de resfriamento por absorção de água LiBr de duplo efeito na Espanha. Calise et al. (2019), fizeram um estudo comparativo entre coletores de tubo evacuado e refletores lineares de Fresnel. Os resultados mostraram que a tecnologia utilizada na energia solar interfere na seleção do *chiller* de absorção. No caso dos coletores de Fresnel, as temperaturas de condução alcançadas podem ser mais altas, de modo que é possível selecionar um *chiller* de absorção de $LiBrH_2O$ de dois estágios, com um COP igual a 1,2. No caso dos coletores com tubo evacuado, a temperatura de operação mais baixa requer a seleção de um *chiller* de absorção de simples efeito, com um COP nominal igual a 0,8. Esses valores de COP para o *chiller* de absorção são consistentes com os dados disponíveis na literatura.

Embora o PTC permita que sejam atingidas altas temperaturas, o mecanismo de rastreamento solar que compõe esses sistemas leva a maiores custos de operação e manutenção (CABRERA, 2013). Portanto, há uma necessidade de desenvolvimento de

coletores concentradores que possam oferecer uma eficiência satisfatória, com processo de fabricação e manutenção de custos relativamente baixos.

Estudos recentes têm sido desenvolvidos em busca de redução da complexidade e do custo dos coletores. Em 2014, Ratismith et al desenvolveram um estudo que consistiu na análise da instalação de 160 tubos evacuados com absorvedor cilíndrico, cada tubo embutido em uma calha parabólica composta. Este coletor utilizou um *chiller* de absorção de duplo efeito com brometo de lítio (LiBr) e água. Os autores relatam a obtenção de temperaturas de água gelada de saída abaixo de 10°C, de modo que a adequação do sistema solar para utilização em sistema de ar condicionado foi comprovada.

A aplicação de energia solar em vários tipos de sistemas AVAC-R provou seu potencial para redução do uso de energia proveniente de combustíveis fósseis. No entanto, a radiação solar é uma fonte de energia altamente dependente do tempo e não corresponde necessariamente à demanda do edifício. Este problema pode ser resolvido regulando o armazenamento e a liberação de energia térmica de acordo com a carga do edifício. Portanto, um método de controle apropriado deve ser empregado por sistemas AVAC-R assistidos por energia solar para ajustar a demanda transitória do edifício com a energia térmica solar armazenada. Na automação da construção, o gerenciamento de energia e a necessidade de reduzir o consumo geral de energia estão se tornando um assunto cada vez mais importante, devido aos ambientes altamente dinâmicos em associação com as condições frequentemente variáveis de configuração do edifício e sua ocupação (Li et al, 2012).

Para edifícios com ar condicionado, um problema importante é a otimização de energia, por exemplo, usando um modelo confiável para prever toda a transferência de calor e umidade do edifício (Qin et al, 2009). No contexto de edificações e energia, a aplicação de engenharia de modelagem e controle tem se mostrado promissora (Hazyuk et al, 2014).

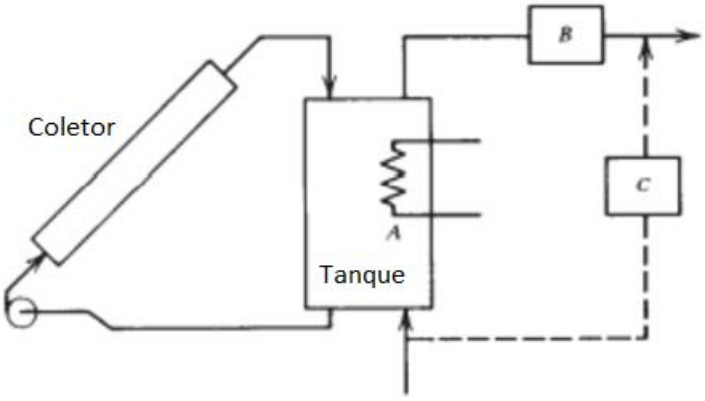
Além dos sistemas de automação e gerenciamento energético com importância comprovada no desempenho energético nas edificações, fontes de energia auxiliar conferem maior confiabilidade aos sistemas que operam com energia solar.

O reservatório térmico é responsável por acumular o fluido aquecido sem apresentar corrosão ou degradação do seu material interno, bem como suportar as pressões envolvidas no sistema (MATOS, 2014). A escolha do meio de armazenamento irá depender do processo utilizado, no caso de aplicações residenciais ou onde é necessário a utilização de água quente a escolha mais sensata é o armazenamento de água quente, ou seja, calor sensível. No caso de aplicações com o coletor tipo calha parabólica, onde as temperaturas são mais elevadas, geralmente utiliza-se um circuito indireto, ou seja, o fluido a ser utilizado não é o mesmo que circula nos coletores solares. Kumaresan et al (2018) utilizou como fluido de trabalho o óleo

Therminol 55 (T55) devido às propriedades deste fluido e a capacidade de trabalhar em temperaturas de até 315°C. Pessoa (2014) utilizou como fluido de trabalho o óleo Mobilterm 60. Este óleo possui alta estabilidade térmica dentro da faixa de temperatura de trabalho que pode chegar até 315°C.

Segundo Lima (2003) o sistema de aquecimento solar de água não é projetado para fornecer 100% da demanda de água quente. Isto ocorre devido às variações climáticas, pois se este critério fosse adotado, o dimensionamento das placas e do tanque deveria ser feito para a pior situação possível, logo ocorreria um superdimensionamento para a maior parte do tempo. Segundo Duffie et al (2013), essa energia auxiliar pode ser fornecida de três formas diferentes, como é apresentado na Figura 7. A energia pode ser fornecida para o tanque do fluido em questão. Nesse caso, a adição de calor no fluido elevará a temperatura na parte de baixo do tanque, que é de onde é tirado fluido para direcioná-lo a entrada do coletor, acarretando numa menor eficiência do coletor solar. Também é possível fornecer energia para o fluido que sai do tanque, podendo ser um aquecedor de funcionamento mais simples e, dessa forma, não será prejudicada a eficiência do coletor solar. Por último, energia auxiliar pode ser adicionada ao fluido que passa pelo tanque quando necessário.

Figura 7 - Configurações possíveis de fornecimento de energia auxiliar



Fonte: Adaptado de DUFFIE, 2013

5 METODOLOGIA

Foi elaborada, primeiramente, uma revisão bibliográfica a sobre aplicação de coletores solares tipo calha parabólica em sistemas de ar condicionado solar térmico.

A modelagem do sistema foi baseada em trabalhos que utilizaram o *software* TRNSYS para sistemas com coletores de calhas parabólicas e *chillers* de absorção, e também com base em arquivos existentes na biblioteca do próprio *software.*

O coletor foi utilizado na geração da carga térmica para alimentar um sistema de ar condicionado com *chiller* de absorção para um prédio do CEFET-MG. O sistema de climatização escolhido foi um sistema de expansão indireta com um *chiller* e climatizadores individuais que atendem às salas de aula, alimentado com água gelada gerada por um *chiller* de absorção.

A norma NBR 15569 [2020] – Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Requisitos de projeto e instalação e normas da ASHRAE foram utilizadas como base para definição dos parâmetros do sistema de aquecimento de água. As normas ABNT NBR 16401-1: Instalações de ar condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 1: Projetos das instalações, RE 09 da ANVISA e normas da ASHRAE foram utilizadas para a definição dos parâmetros do sistema de ar condicionado.

Para a climatização eficiente do prédio, foi considerada a carga térmica conforme procedimentos previstos nas normas de projetos e *software* E-20 HAP Carrier, utilizado comercialmente para levantamento de carga térmica e elaboração de projetos. O foco foi o dimensionamento de um sistema de climatização com base nas características construtivas e de projeto do prédio 20 tal como ele existe atualmente, e na sua real demanda de climatização atual. Considerações a respeito de melhorias do projeto arquitetônico para redução de carga térmica foram estudadas para conhecimento, já pesquisadas em projeto de iniciação científica do CEFET-MG e podem ser objeto de outros estudos futuros.

Após estas considerações e construção do perfil de utilização das cargas térmicas, o modelo foi simulado no TRNSYS. A cidade de referência utilizada foi Belo Horizonte (MG), na qual o campus Nova Gameleira do CEFET-MG está localizado.

5.1 Infraestrutura utilizada

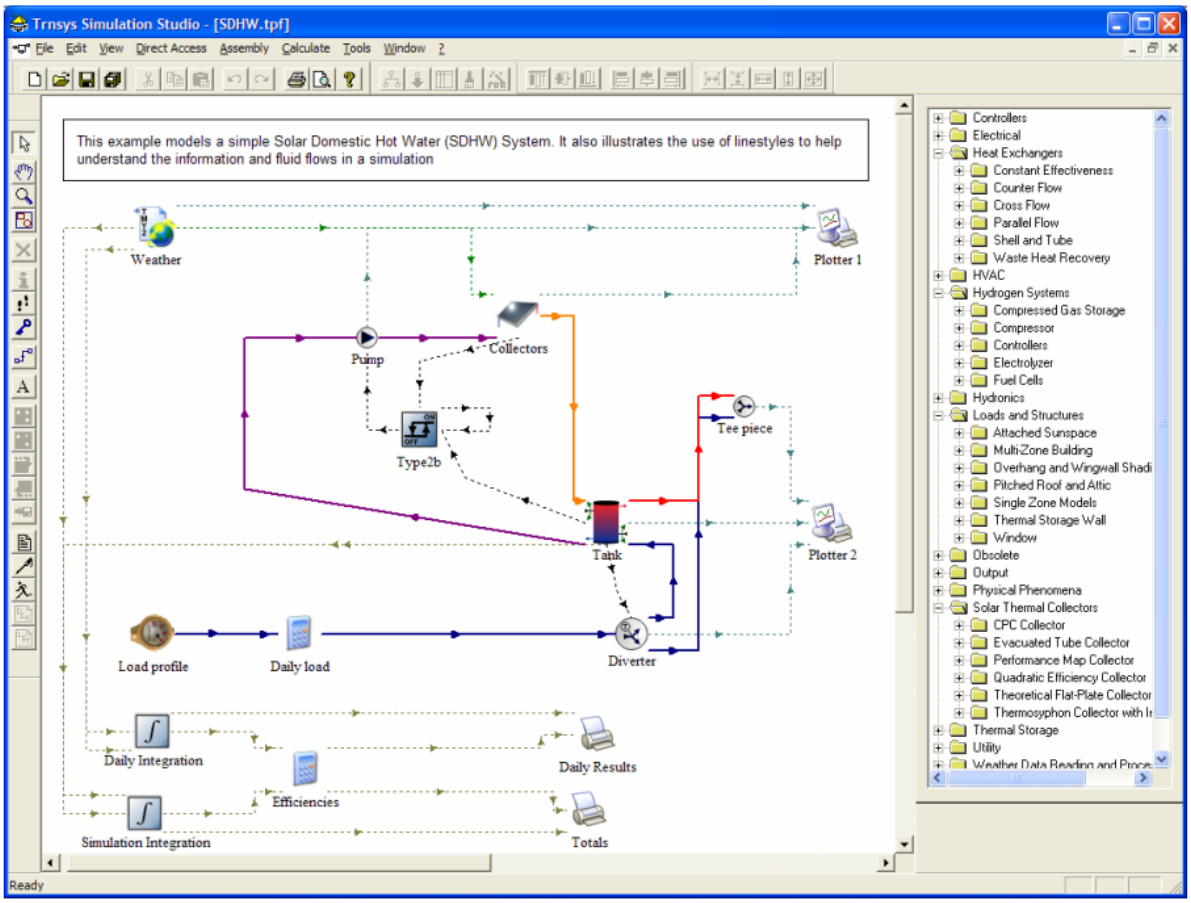
5.1.1 TRNSYS

O *software* utilizado para simulação do modelo foi o TRNSYS 16 (*Transient System Simulation Program*). O TRNSYS é um extensivo ambiente para realização de simulação transiente de sistemas. Segundo o manual do TRNSYS 16 este *software* é utilizado por engenheiros e pesquisadores ao redor do mundo para validar conceitos de utilização de energia, desde simples sistemas de aquecimento de água para aplicação doméstica até o design e simulação de prédios e seus equipamentos, incluindo estratégias de controle, comportamento dos ocupantes e sistemas alternativos de energia (eólica, solar, fotovoltaica e sistemas de hidrogênio). A principal interface visual do *software* é o TRNSYS *Simulation Studio*. Nesta interface, é possível criar os projetos arrastando os componentes para a área de trabalho, realizar conexão entre eles e configurar os parâmetros de simulação.

Para as modelagens realizadas, foram utilizados os *types* do TRNSYS e de sua extensão, TEES.

Na Figura 8, apresenta-se um modelo de aquecimento de água existente no TRNSYS, no ambiente do *Simulation Studio*.

Figura 8 - TRNSYS - *Simulation studio*

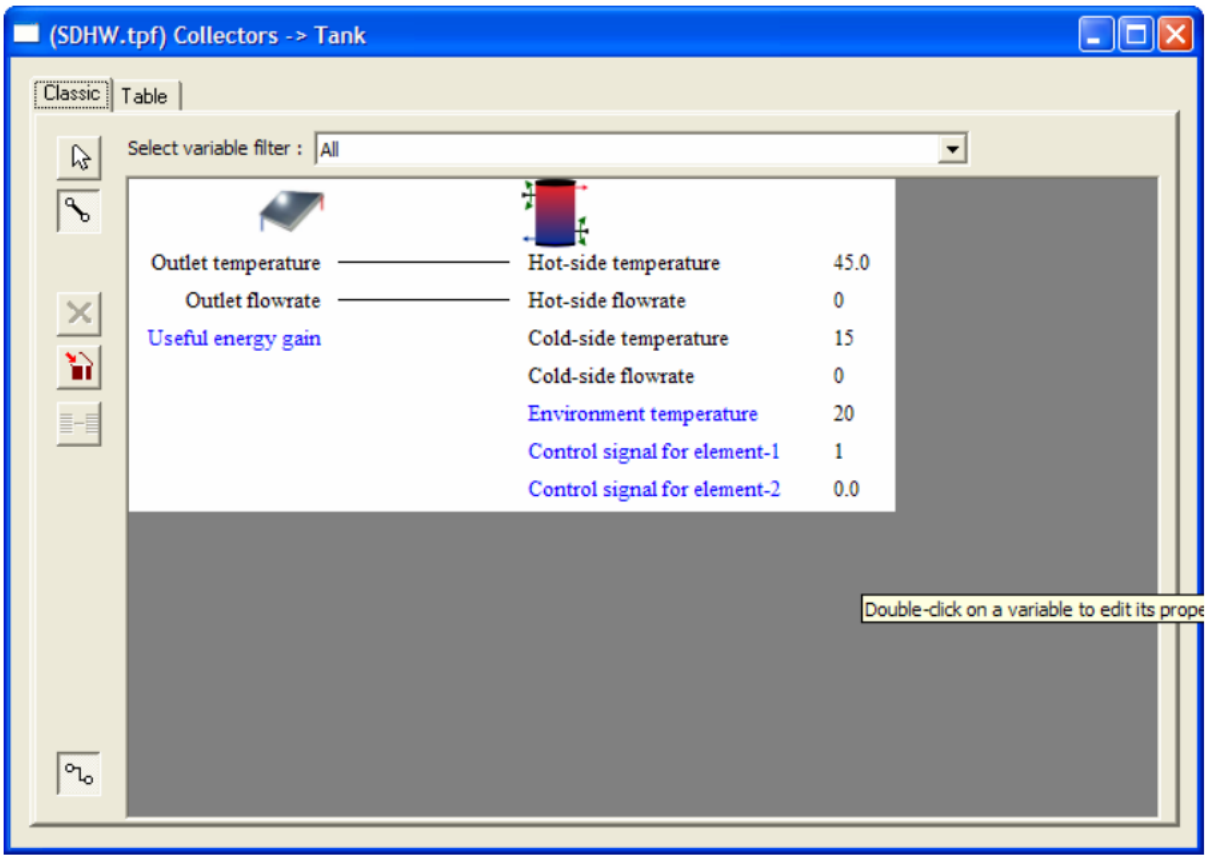


Fonte: MANUAL DO TRNSYS (2007)

No *Simulation Studio*, ainda é possível controlar quais variáveis serão integradas, imprimidas e/ou plotadas. Por fim, esta interface possui um gerenciador dos erros que permite o usuário realizar um estudo detalhado do que ocorreu durante a simulação. O primeiro passo para criação do modelo no *Simulation Studio* é a criação de um novo projeto, posteriormente os componentes podem ser adicionados a área de trabalho para serem configurados.

No TRNSYS, também é possível obter informações do clima. Ao clicar duas vezes em um determinado componente, é possível acessar seus principais parâmetros, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Exemplo de parâmetros de componente



Fonte: Manual do TRNSYS (2007)

Após inserir os componentes na área de trabalho é necessário realizar a conexão entre eles. Os componentes são conectados usando a ferramenta de link. Posteriormente, é possível definir quais parâmetros serão utilizados.

5.2 Objeto de estudo: Usina solar do CEFET-MG

Para a descrição da usina solar do CEFET-MG, foi utilizada como base a dissertação Metodologia Experimental Utilizando Teste Quase Dinâmico para a Avaliação de Coletores Concentradores do Tipo Cilíndrico Parabólico, assim como a dissertação Avaliação Experimental dos Coletores Solares Cilindro Parabólicos da Instalação Solar do CEFET-MG. Ambas as dissertações foram realizadas no programa de pós graduação em Engenharia da

Energia do CEFET-MG em associação com a Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ). A usina solar do CEFET-MG consiste dos seguintes equipamentos: coletores solares, fluido térmico, trocador de calor, sistema de controle de temperatura, circuito térmico, sistemas para movimentação dos coletores e instrumentação. A instalação solar é composta por três linhas de coletores tipo calha parabólica de 20 m de comprimento cada, totalizando 60 m de comprimento. Cada linha é constituída por cinco módulos coletores conectados num circuito em série, com comprimento de 3,75m. A linha 1, que foi projetada e construída antes das demais linhas apresenta abertura menor que as demais.

Na tabela 1 são apresentadas as dimensões dos módulos da Usina Solar.

Tabela 1- Dimensões dos módulos da usina solar do CEFET-MG

	Linha 1	Linha 2	Linha 3
Abertura	2.146 m	3.440 m	3.440 m
Comprimento	3.750 m	3.750 m	3.750 m
Distância Focal	0,55 m	1.121m	1.121m
Razão de Concentração	44	71	71
Diâmetro externo do tubo absorvedor	48,3 mm	48,3 mm	48,3 mm
Diâmetro externo do tubo de vidro	75 mm	75 mm	75 mm
Ângulo de abertura (Rim angle)	90°	75°	75°

Fonte: BORGES (2012)

Na figura 10, apresenta-se parte da instalação solar do CEFET-MG.

Figura 10 - Linha 2 da usina solar do CEFET-MG

Fonte: MARTINS, 2019

As parábolas dos coletores da instalação são de alumínio anodizado de 0,5mm de espessura. A refletividade deste material, segundo Borges (2012), é 82%. O elemento de calor da instalação solar do CEFET-MG é constituído por dois tubos concêntricos, sendo o tubo interno absorvedor e o tubo externo transparente de vidro, utilizado com função de reduzir as perdas térmicas convectivas e radiantes (BORGES, 2012).

5.3 Modelo no TRNSYS da Usina solar do CEFET-MG

A partir da estimativa da carga térmica para alimentar o sistema de ar condicionado solar térmico, foi construído o modelo para simulação no *software* TRNSYS.

Primeiramente, foi modelado o coletor tipo calha parabólica para suprir a energia a ser fornecida para o sistema de climatização. O modelo do coletor solar de calha parabólica é apresentado no Type 536 no *software* TRNSYS também conhecido como concentrador linear parabólico, e foram utilizadas também as equações pertinentes. Segundo o Manual do TRNSYS (2007), essa sub-rotina modela um concentrador parabólico linear; um coletor solar usado para concentrar a radiação solar. O projeto básico do sistema é uma calha parabólica reflexiva que reflete a radiação solar em um tubo absorvedor cilíndrico (receptor). Os concentradores lineares focalizarão a radiação do feixe para o receptor se o sol estiver no plano central do concentrador (o plano incluindo o eixo focal e a linha de vértice do refletor). Esses coletores podem ser girados em torno de um único eixo de rotação, que pode ser Norte-Sul, Leste-Oeste ou inclinado e paralelo ao eixo da Terra (nesse caso, a taxa de rotação é de 15 graus por hora). Existem diferenças significativas tanto na quantidade de radiação do feixe incidente, sua dependência do tempo, quanto na qualidade da imagem obtida com os três modos de operação. Este modelo despreza a radiação difusa e usa a equação de eficiência do coletor linear para modelar o concentrador. O coletor solar desfocará parte da radiação para manter a temperatura de saída abaixo de um máximo especificado pelo usuário, calculando a energia que não deverá ser absorvida se ocorrer uma condição de sobretemperatura.

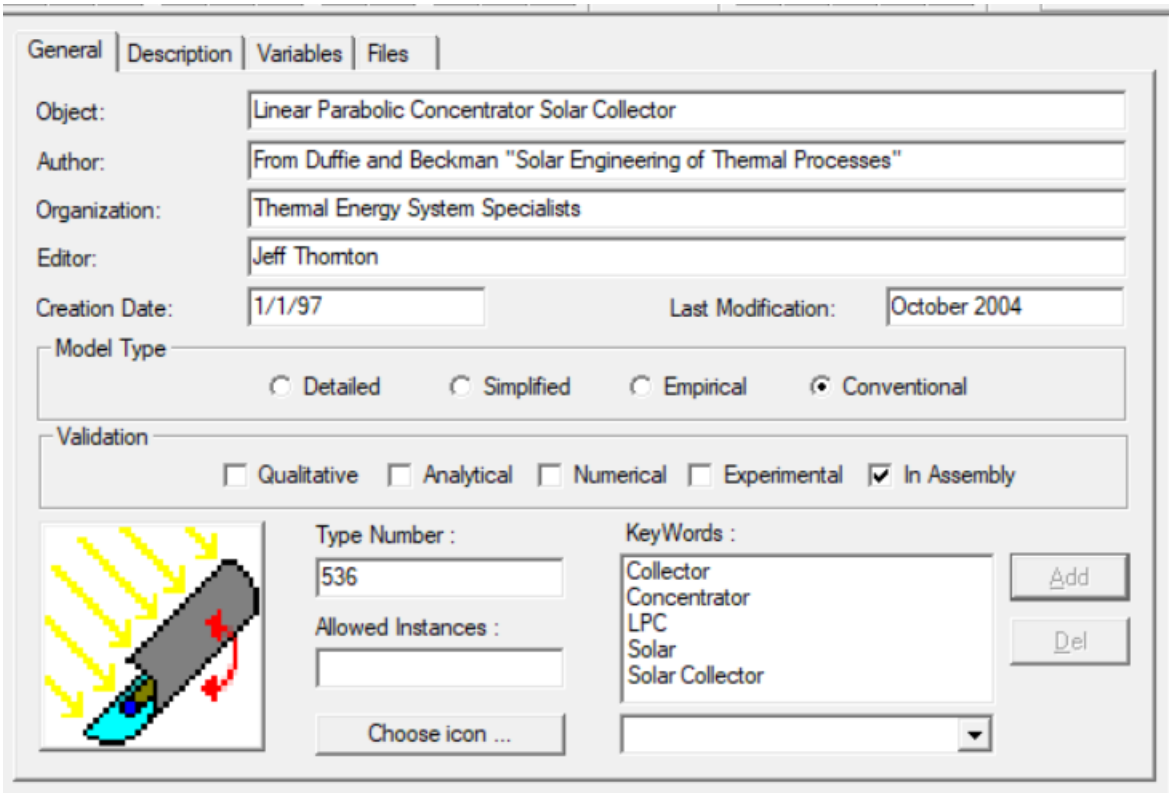
A eficiência térmica do coletor modelado pelo *Type* 536 é baseada nas equações de Duffie et al (2013). A Equação 1 é utilizada como base para cálculo da performance do coletor.

$$\dot{Q}u = A_c[F_R(\tau\alpha)_n I_t - F_R U_L \Delta T] \quad (1)$$

Onde Qu é energia útil gerada do coletor, Ac a área do coletor, FR $(\tau\alpha)n$ é a eficiência com a qual a radiação solar é absorvida pela placa do coletor e removida pelo fluxo através do coletor, It a quantidade de radiação solar incidente no plano da superfície do coletor, $F_R U_L$ é a taxa de perda do coletor, ΔT a diferença de temperatura gerada no coletor, considerada como a temperatura média do fluido no coletor menos a temperatura ambiente.

Foram configurados também os parâmetros do Type 536 como número de coletores e seus arranjos (série, paralelo), área de abertura, razão de concentração, dados do fluido, vazão. Na figura 11 é mostrado o *Type* 536 e opções de configuração.

Figura 11 - *Type* 536 no *Simulation Studio* do TRNSYS



Fonte: *Simulation Studio*

Os principais parâmetros do *Type* 536 são:

• Número de coletores em série: número de coletores idênticos em série;

• Número de coletores em paralelo: número de conjuntos de coletores em série idênticos em paralelo;

• Área de abertura: área de abertura do coletor;

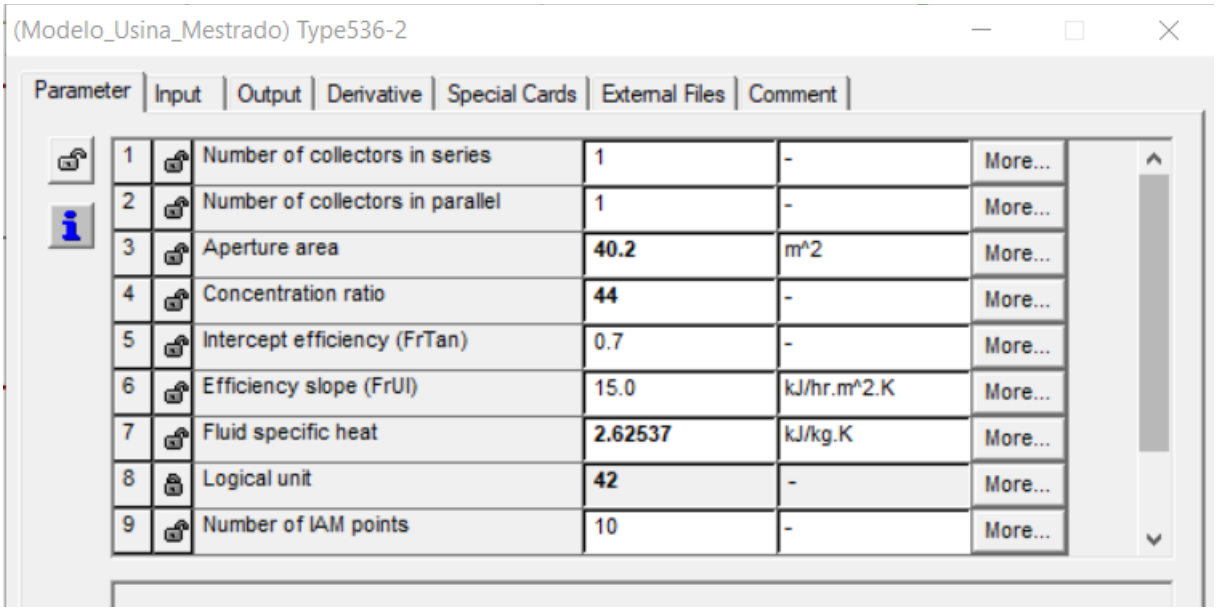
• Razão de concentração: área de abertura dividido pela área do receptor;

• Calor específico do fluido: calor específico do fluido utilizado no coletor;

• Vazão mássica de teste: Vazão por unidade área usada no teste para cálculo da eficiência do coletor.

Na figura 12 são apresentadas as configurações do coletor conforme características construtivas da linha 1 da usina solar do CEFET-MG.

Figura 12 - parâmetros de configuração do *Type* 536



Fonte: *Simulation Studio*

A temperatura de saída do coletor é dada pela Equação 2.

$$T_{out} = T_{in} + \frac{\dot{Q}u}{\dot{m}_{fluid} Cp_{fluid}} \tag{2}$$

Onde T_{out} e T_{in} são as temperaturas de saída e de entrada, respectivamente, $\dot{m}_{fluid}$ a vazão mássica do fluido e Cp_{fluid} o calor específico do fluido.

O modelo do reservatório térmico é apresentado no *Type* 4. O reservatório térmico de um sistema de aquecimento solar pode ser entendido como um acumulador de energia, uma vez que a energia gerada no sistema não é utilizada necessariamente no mesmo momento

que a água aquecida é necessária. Normalmente tem o aspecto físico de um tanque com isolamento térmico, armazenando o fluido aquecido. Os principais parâmetros do *Type* 4 são:

• Posições de entrada variáveis: define o modo de operação do tanque. No caso, o modo 2 opera de forma que o fluxo de fluido quente e o fluxo fluido frio entrem no tanque nos nós que possuem temperaturas próximas as dos respectivos fluxos.

• Volume do tanque: volume do reservatório térmico;

• Calor específico do fluido: calor específico do fluido contido no tanque;

• Densidade do fluido: densidade do fluido contido no tanque;

• Coeficiente de perda do tanque: coeficiente médio de perda de calor do tanque por unidade de área;

• Altura do “nós”: altura dos pontos em que os cálculos serão feitos no tanque;

• Modo do aquecedor auxiliar: no modo 1 de operação, apenas um aquecedor dentro do tanque, da parte quente ou da parte fria, poderá operar;

• Temperatura de ajuste para o elemento: Determina a temperatura para qual o aquecedor auxiliar irá ligar;

• Potência máxima do elemento de aquecimento: taxa de aquecimento máxima que pode ser utilizada pelo elemento de aquecimento;

• Temperatura de ebulição: Temperatura de ebulição do fluido.

O fluido térmico utilizado no teste foi o óleo MobilTherm 605. Na figura 13, apresentam-se as propriedades termofísicas desse óleo.

Figura 13 - Propriedades termofísicas do MobilTherm 605

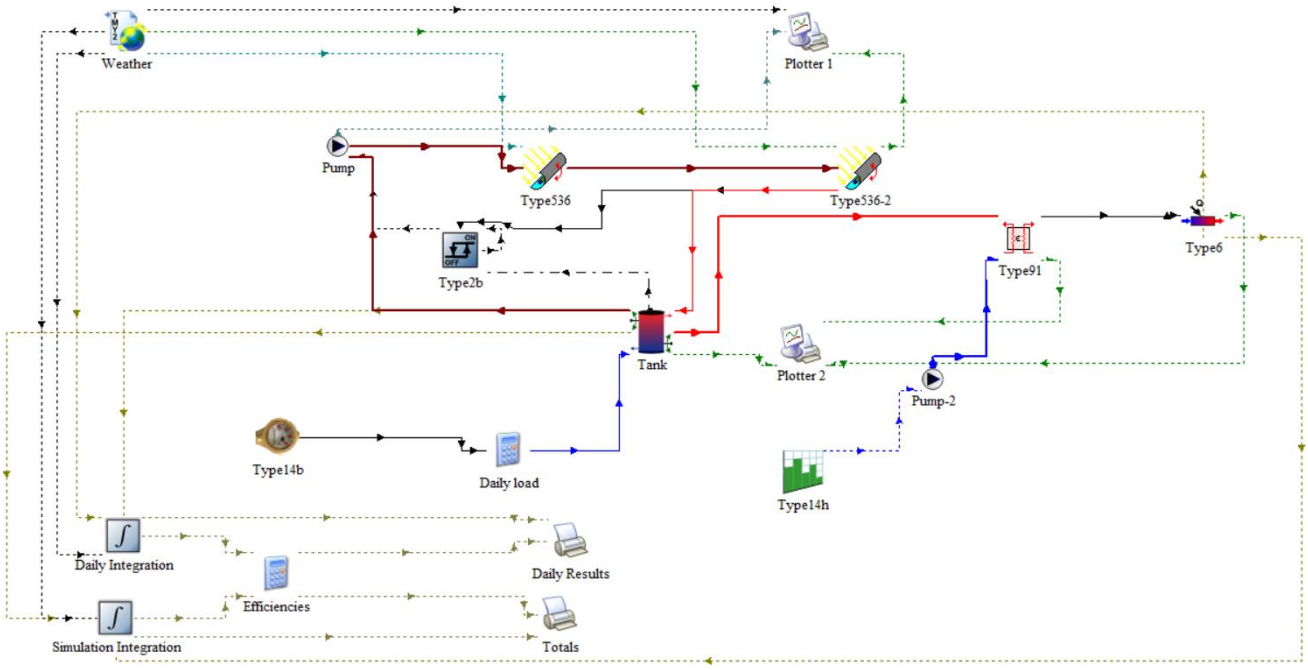
Condutividade Térmica (W/m.K)	**a 40°C**	**0,13417**
	a 220°C	0,12093
Calor específico (kJ/kg.K)	a 40°C	1,96603
	a 220°C	2,62537
Densidade (kg/m³)	a 40°C	840
	a 220°C	770

Fonte: Adaptado de PESSOA, 2014

Como não está sendo considerado fornecimento de 100% de carga pela usina para evitar superdimensionamento, conforme encontrado na literatura, o *Type* 6, parametrizado com o calor específico da água, exerce a função da fonte de energia auxiliar para o sistema.

Com base nos parâmetros construtivos da usina, foi elaborado o modelo no TRNSYS, conforme figura 14

Figura 14 - Modelo da usina solar do CEFET-MG



Fonte: Elaborado pela autora

5.4 Objeto de estudo: sistema de climatização do prédio

Para a especificação do sistema de ar condicionado solar térmico, foram utilizados os dados de carga térmica do prédio 20. Na figura 15, está representada a fachada lateral do prédio 20.

Figura 15 - Fachada lateral do prédio 20

O prédio estudado é dividido em salas distribuídas em quatro andares, um auditório, salas de monitoria, secretaria e apoio, totalizando cinco mil metros quadrados de construção.

Na figura 16, está representada uma sala de aula do prédio 20.

Figura 16 - Sala 414 do prédio 20

O prédio 20 é localizado em Belo Horizonte (19.82° S, 43.96° W, +3h GMT). O clima de Belo Horizonte é classificado como tropical subquente e semiúmido, com verões

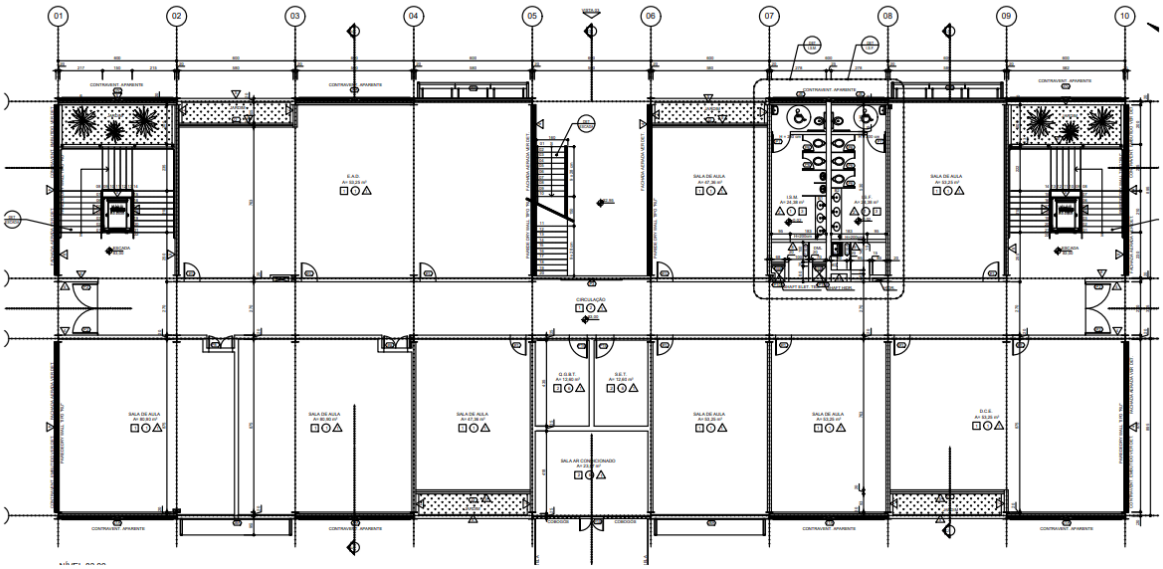
moderadamente quentes e úmidos e invernos secos. A estação seca tem duração de quatro a cinco meses, sendo que 80% das chuvas são concentradas na estação chuvosa (FRANCA, 2009).

Alguns dados necessários para a elaboração deste estudo foram baseados em arquivos disponibilizados por estudo prévio elaborado no CEFET-MG, no qual o dimensionamento da edificação foi feito a partir do projeto arquitetônico do prédio 20, obtido na Divisão de Projetos do CEFET-MG e utilização do *software Sketch up*.

Análises complementares necessárias a este estudo foram desenvolvidas com base no arquivo disponibilizado pelo dimensionamento da edificação realizado nos estudos prévios citados, bem como foram realizados refinamentos dos dados para a análise da viabilidade de climatização de todas as salas por um sistema de ar condicionado central com um *chiller* de absorção alimentado pela usina solar de coletores parabólicos existente no campus.

A planta baixa do 4° pavimento é mostrada na figura 17.

Figura 17 - Planta baixa do 4° pavimento do prédio 20

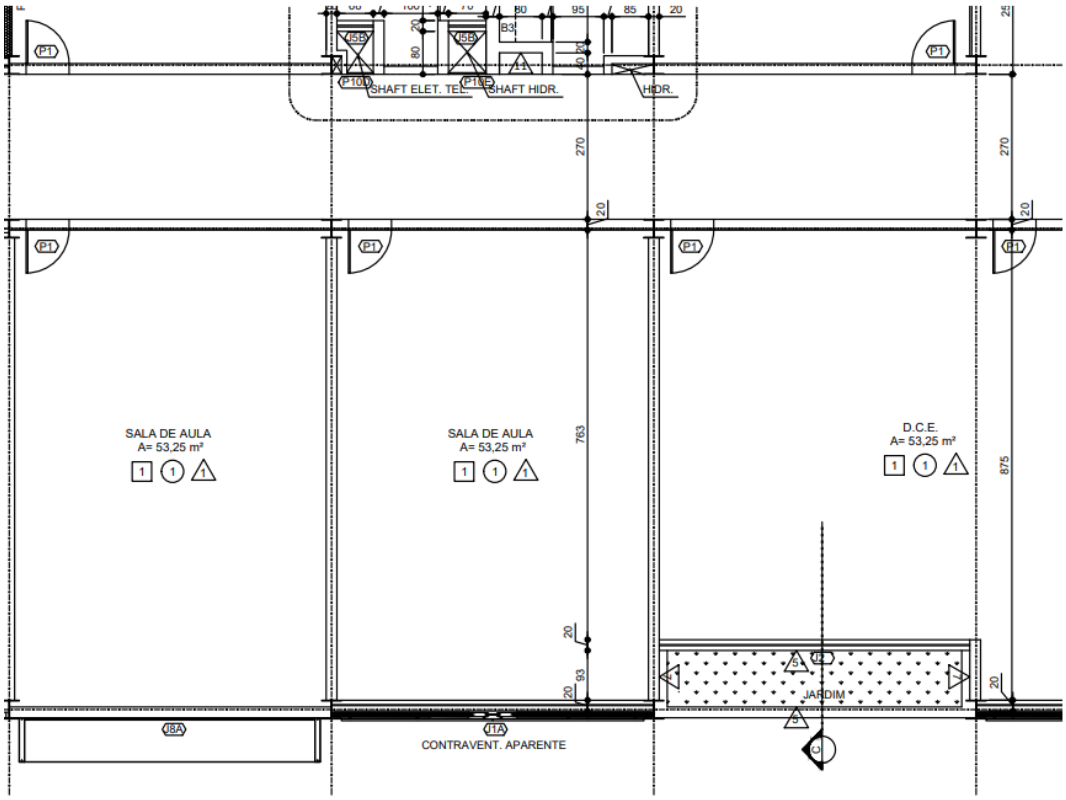


Fonte: Divisão de Projetos – SINFRA - CEFET-MG.

O prédio 20 possui um total de 26 salas de área aproximada de 54m², 6 salas de aproximadamente 80m², um auditório de área aproximada de 100m², sala de apoio pedagógico com aproximadamente 100m², e sala dos professores com aproximadamente 40m². Essas áreas listadas foram as áreas consideradas para climatização. Na figura 18, estão representadas as salas de aula que possuem área aproximada de 50m².

Os banheiros, cozinha e corredores não foram contemplados pelo sistema de climatização.

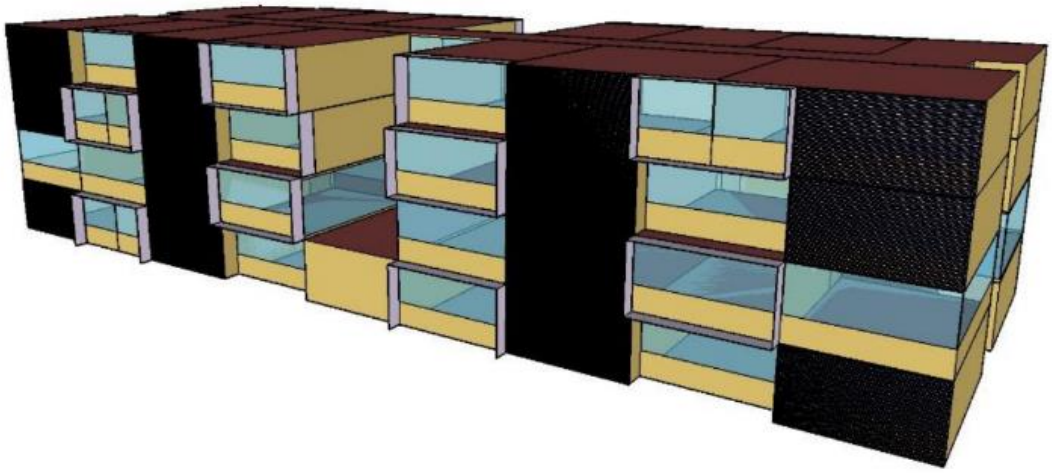
Figura 18 - Planta baixa de salas de aula do prédio 20



Fonte: Divisão de Projetos – SINFRA - CEFET-MG.

O modelo do prédio 20 foi baseado em arquivo já existente, elaborado no *software sketch up*, conforme figura 19

Figura 19 - Modelo do prédio 20



Fonte: ARAÚJO, 2018.

Após conhecimento das características construtivas da usina e do prédio e modelagem dos objetos de estudo com configuração dos parâmetros, foi verificada a possibilidade de atendimento da demanda de energia para o sistema de ar condicionado solar térmico de acordo com a capacidade de geração da usina solar instalada no campus Nova Gameleira do CEFET-MG.

A análise da possibilidade de atendimento do sistema pela usina colar do CEFET-MG foi concluída após finalizado o levantamento da carga térmica do prédio 20.

5.5 Parâmetros de simulação

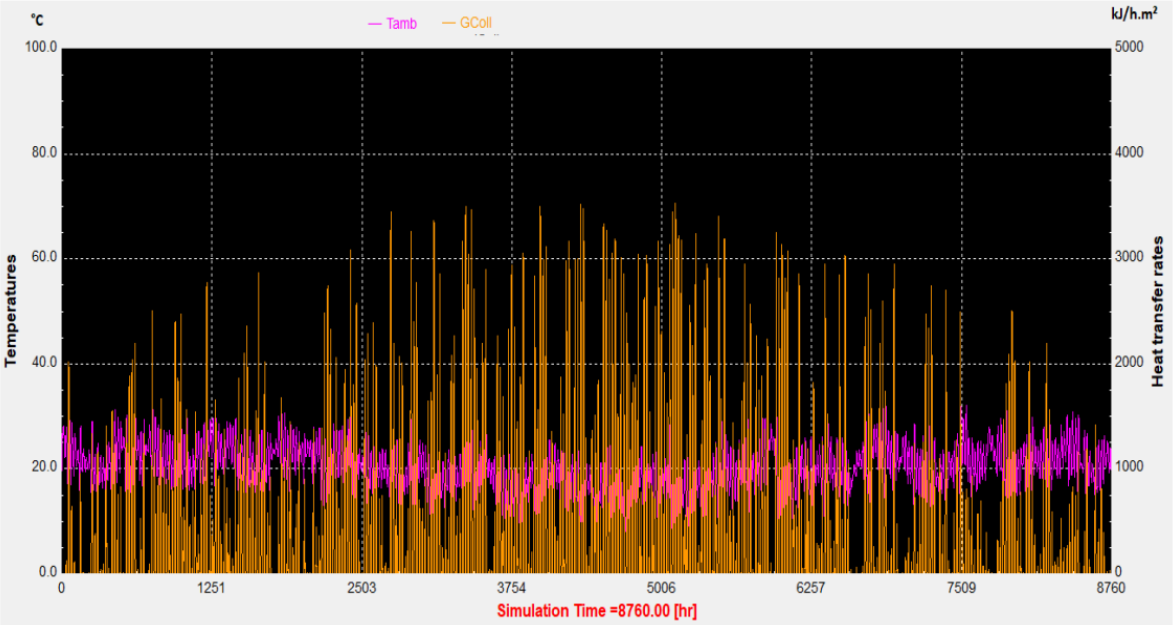
Para a realização da simulação pelos *softwares*, foram definidos os parâmetros conforme características construtivas dos objetos de estudo.

Alguns dados foram obtidos de estudos prévios realizados por discentes da graduação em engenharia mecânica do CEFET-MG. Com o perfil de utilização do sistema e as características de cada componente do modelo definidas no TRNSYS, foi possível realizar a simulação. O estudo foi feito para o período de um ano (8760 horas) e a cidade de Belo Horizonte foi utilizada como referência.

As condições climáticas para a simulação foram extraídas do arquivo climático para a cidade de Belo Horizonte. Esse arquivo é compilado a partir da consideração de dados como latitude, longitude, altitude, fuso horário, temperatura de bulbo seco e úmido, umidade relativa, velocidade e direção do vento, pressão atmosférica, irradiância global sobre o plano horizontal, radiação solar, iluminância celeste, nebulosidade, precipitação, entre outras variáveis necessárias à simulação.

Na figura 20, apresentam-se os dados de irradiação anual (em laranja) e temperatura ambiente (em rosa) em Belo Horizonte. Para este modelo, os dados do feixe de radiação na superfície inclinada são utilizados para simular a taxa de irradiação que intercepta os coletores. Observa-se que nos dias com maiores incidências solares a taxa de irradiação que intercepta o coletor chega até 900W/m².

Figura 20 - Irradiação anual e temperatura ambiente em Belo Horizonte



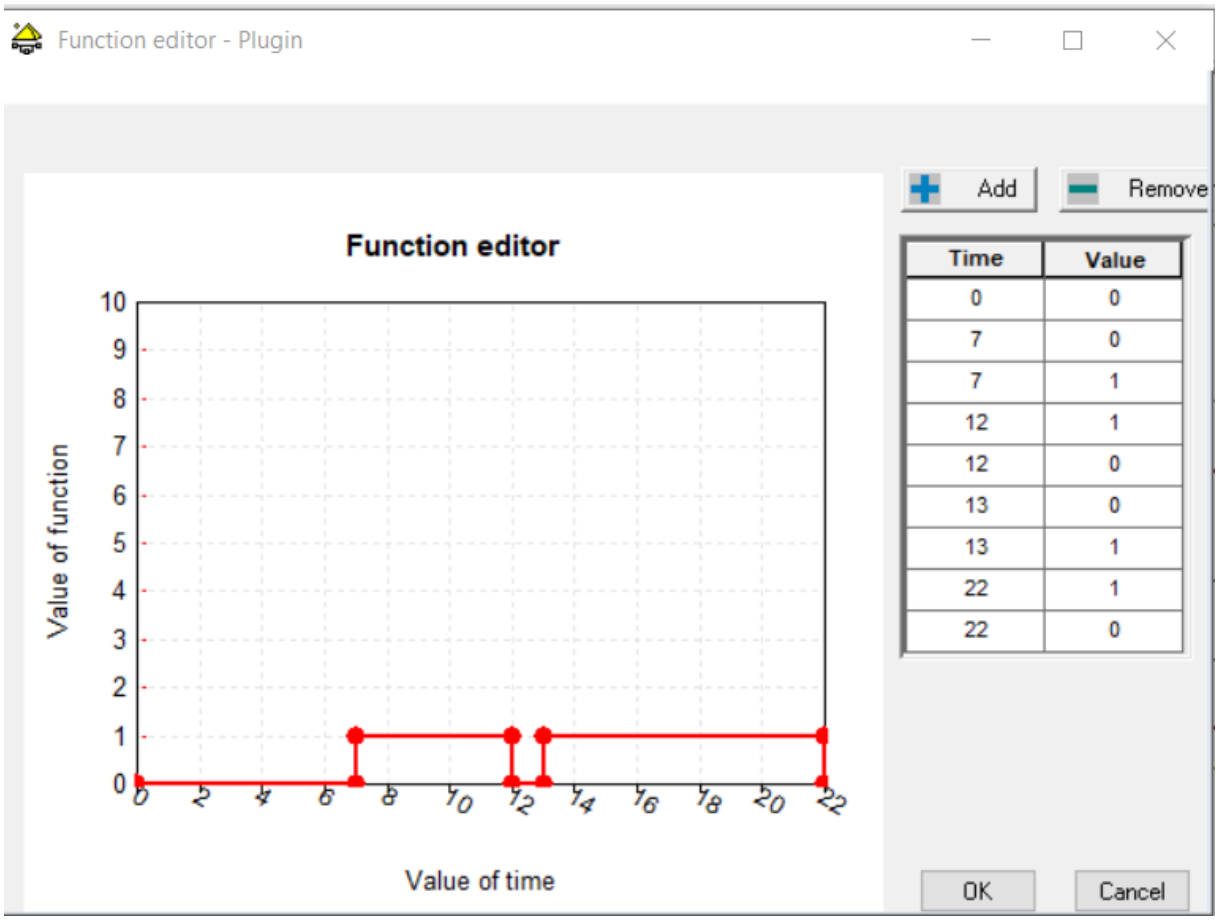
Fonte: Elaborado pela autora

Para que as cargas térmicas sejam calculadas de maneira correta, é necessário definir rotinas de utilização para cada uma das zonas térmicas do modelo termoenergético.

Para isso, foi utilizada informação fornecida pela instituição sobre o perfil de utilização das salas do prédio 20: 8h00 às 12h00, 14h00 às 18h00, 18h00 às 22h00, para dias de semana. Para sistemas com *chiller* de absorção, recomenda-se que o sistema seja ligado de 30 a 60 minutos antes do horário em que se deseja que a água gelada no *chiller* atinja a temperatura desejada. Assim, na parametrização do *type* 14, foi considerada essa particularidade.

Na figura 21, são mostrados os parâmetros configurados no *Type* inicialmente, para atendimento do sistema de climatização durante o período integral de utilização das salas e o gráfico gerado:

Figura 21-Configuração do perfil de utilização no TRNSYS

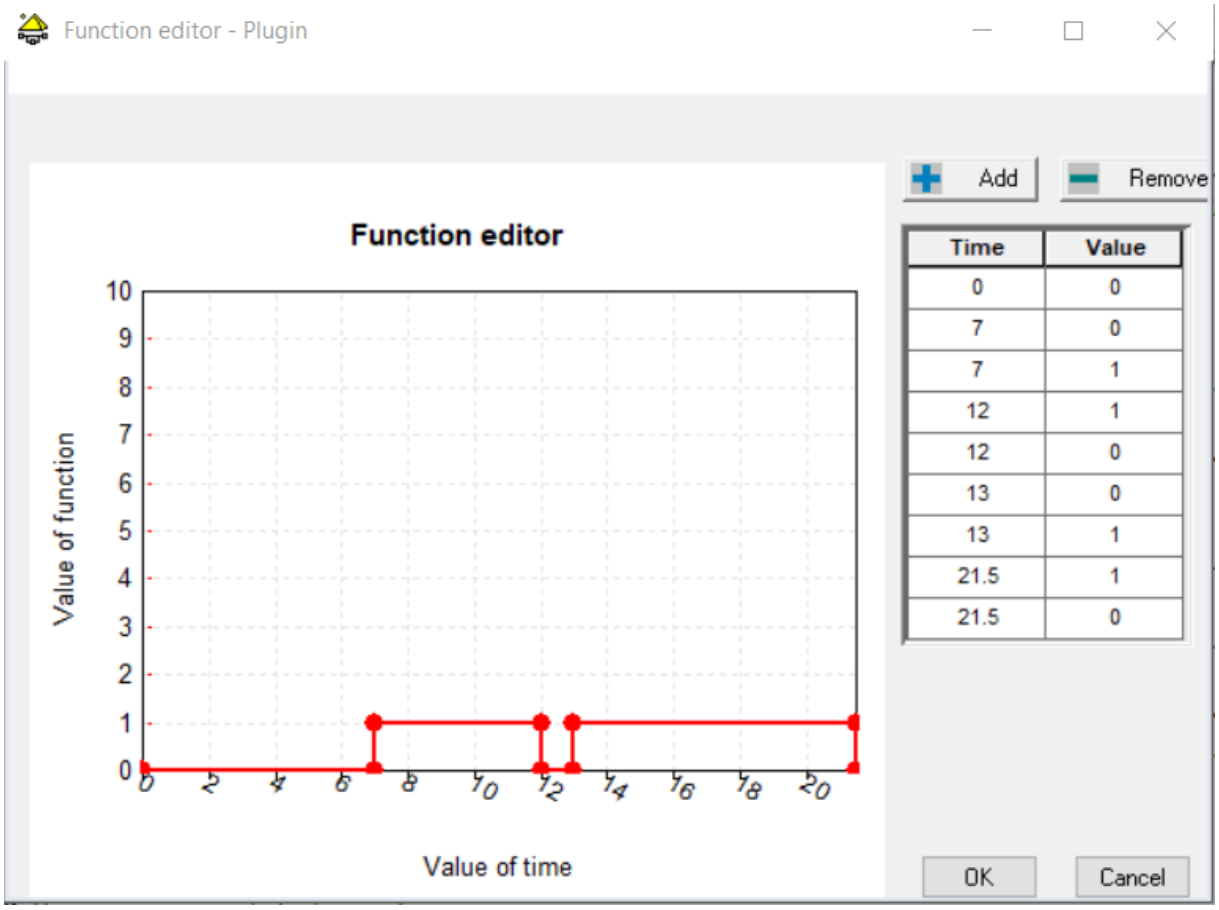


Fonte: elaborado pela autora

Foi considerada a utilização do sistema durante 22 dias por mês, 12 meses por ano para uma análise inicial.

Posteriormente, foi proposto o horário de funcionamento do sistema até 21:30, e um cenário de não utilização do sistema durante os recessos anuais da instituição, estimados em 60 dias. Foi realizada a análise de atendimento com a capacidade da usina instalada para esse perfil de utilização. Na figura 22, está representado o perfil de utilização proposto.

Figura 22 - Perfil de utilização proposto para análise de atendimento pela capacidade da usina

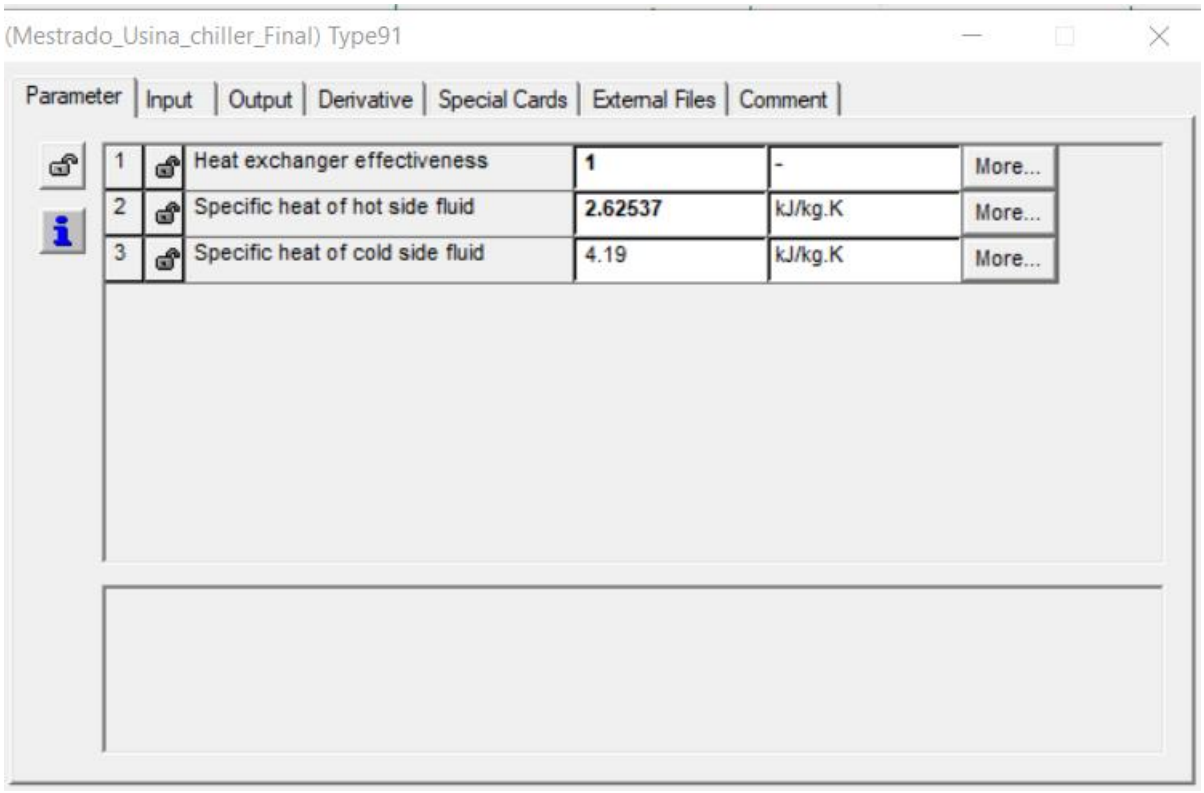


Fonte: elaborado pela autora

Esse *type*, como está configurado no modelo, controla os períodos de funcionamento da bomba e fornecimento de água quente para o sistema, e, consequentemente, de funcionamento do sistema.

As bombas 1 e 2, respectivamente, tem a função de circulação do óleo nos coletores e de água quente a ser fornecida para o *chiller*. Cada bomba foi configurada no modelo com as propriedades dos fluidos correspondentes. O óleo aquecido pelos coletores troca calor com a água no tanque. A água quente e o óleo são bombeados para um trocador de calor representado pelo *type* 91, configurado com os parâmetros dos fluidos, conforme figura 23:

Figura 23 - Parâmetros de configuração do *Type* 91



Fonte: própria autora

5.6 Cargas térmicas

As cargas em cada zona térmica dependem do número de ocupantes e o tipo de atividade realizada, assim como dos equipamentos elétricos e lâmpadas presentes em cada espaço.

Para a taxa metabólica, foi considerado o que está previsto na normas pertinentes: ABNT:NBR 16401 e ASHRAE 55-2017. Na literatura e nas normas, tem-se que o metabolismo é o processo de produção de energia interna a partir de elementos orgânicos. Entretanto, de toda a energia produzida pelo corpo humano, cerca de 80% é transformada em calor, que precisa ser dissipado para manutenção da sua temperatura interna, que é praticamente constante (variando aproximadamente de 35°C a 37°C). A quantidade de calor que é liberada pelo corpo é uma função da atividade desenvolvida - quanto maior a atividade física, maior o metabolismo (LAMBERTS et al., 2016).

Taxas metabólicas para atividades típicas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2- Taxas metabólicas para atividades típicas

Atividade	Taxa metabólica (W/m²)
Leitura, sentado	55
Escrita	60
Andando (superfície plana), 3,2 km/h	115

Fonte: ASHRAE 55-2017

Para ser possível encontrar a taxa metabólica por pessoa (W/pessoa), considera-se a área como sendo a superfície de pele do indivíduo. O valor recomendado pela ASHRAE 55-2017 é de 1,8m² de superfície de pele por pessoa. As lâmpadas presentes nas salas são de 14W cada, conforme indicado na figura 23.

Figura 24 - Modelo de lâmpada utilizada nas salas de aula

Fonte: ARAÚJO, 2018.

Cada luminária oferece espaço para 4 lâmpadas. A sala 414, que representa o tipo de sala de maior ocorrência na edificação, apresenta: 9 luminárias – ou 36 lâmpadas, totalizando 504W – em um espaço de 53,25m². Dessa forma, foi encontrado o valor de 9,465W/m^2 para esse tipo de sala.

Os projetores Epson *PowerLite* W29 foram considerados ligados em todos os períodos de utilização das salas de aula, de acordo com a rotina de cada uma delas. A potência utilizada foi de 284W, conforme especificado pelo fabricante.

Figura 25 - Projetor Epson existente nas salas de aula

Fonte: ARAÚJO, 2018.

Não foram consideradas as utilizações dos ventiladores, considerando-se sua substituição pelo sistema de ar condicionado.

Os resultados para as salas com maior ocorrência no prédio (salas de aula com área aproximada de 54m²), corredores e banheiros encontram-se na tabela 3:

Tabela 3 - Cargas térmicas típicas de alguns dos espaços a serem considerados nas análises

Tipo de zona térmica	Número de pessoas [pessoa/m²]	Taxa metabólica [W/pessoa]	Iluminação [W/m²]	Equipamentos elétricos [W]
Salas de Aula	0,493	104	9,465	1084
Corredores e Banheiros	0,107	120	9,465	0

Fonte: ARAÚJO, 2018.

Conforme já mencionado neste estudo, os corredores e banheiros foram desconsiderados no dimensionamento dos equipamentos de climatização.

5.7 Seleção do sistema de ar condicionado

Para efeito comparativo e validação da aplicabilidade prática deste estudo, primeiramente, foram selecionados comercialmente os componentes de um sistema de absorção conforme disponibilidades comerciais. Posteriormente, foi feita a simulação, avaliando os parâmetros dos *types* fornecidos pelo *software* TRNSYS.

Para atendimento à demanda de carga térmica estimada conforme levantamento baseado nos dados construtivos citados neste estudo, foi selecionado um *chiller* de absorção de capacidade 150TR. Para a seleção deste equipamento, foi utilizado o catálogo do fabricante Carrier. O *chiller* selecionado utiliza água quente como fonte de energia. Na figura 26, está representado o equipamento selecionado.

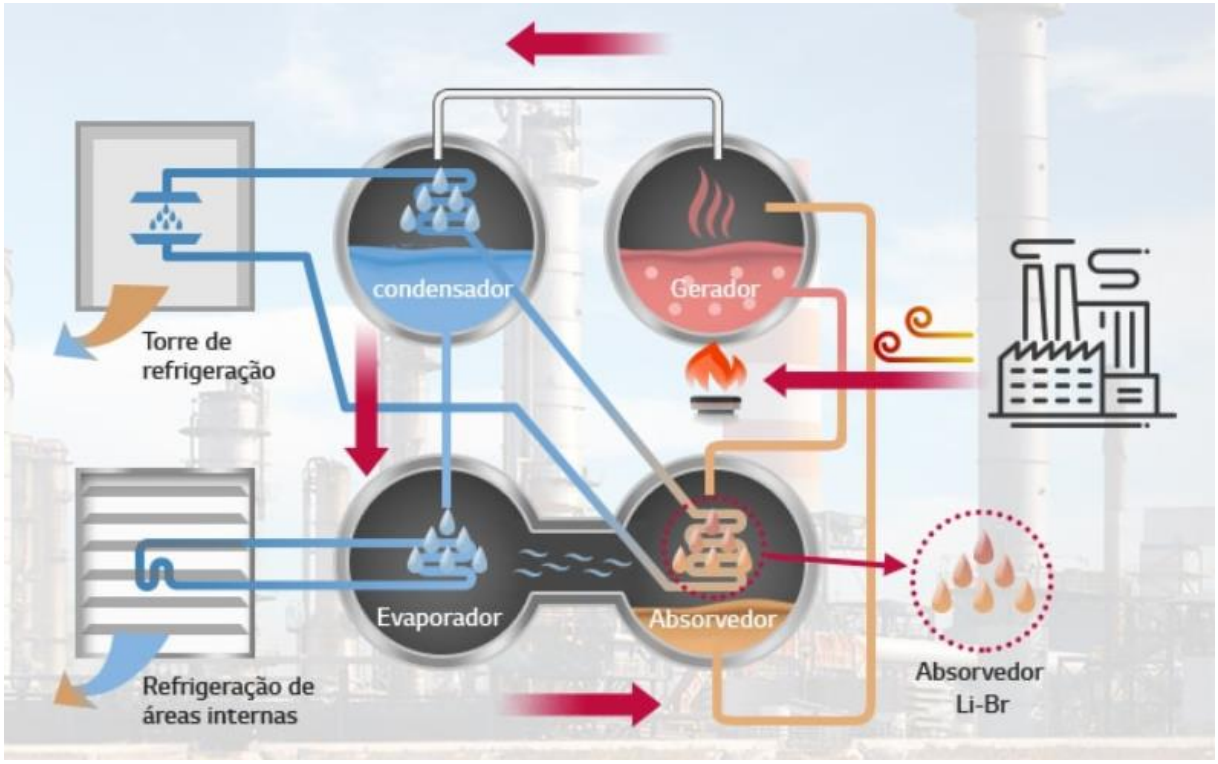
Figura 26 - *Chiller* por absorção – água quente

Fonte: CARRIER, 2022

O *chiller* por absorção tipo água quente utiliza calor em vez de eletricidade, sendo uma alternativa para redução do custo operacional com energia elétrica. Nesse modelo, o insumo principal é calor a baixas temperaturas, substituindo o trabalho mecânico utilizado pelos *chillers* por compressão de vapor, cujo consumo de energia elétrica dos compressores representa a parcela principal de consumo.

Nos *chillers* por absorção, são utilizados 2 fluidos, o absorvedor e o fluido refrigerante. No modelo selecionado, é utilizado brometo de lítio, LiBr, como fluido absorvedor e água como fluido refrigerante. Na figura 27, é apresentado um esquema representativo do ciclo que ocorre em um arranjo com *chiller* de absorção

Figura 27 - Arranjo de sistema com *chiller* de absorção.



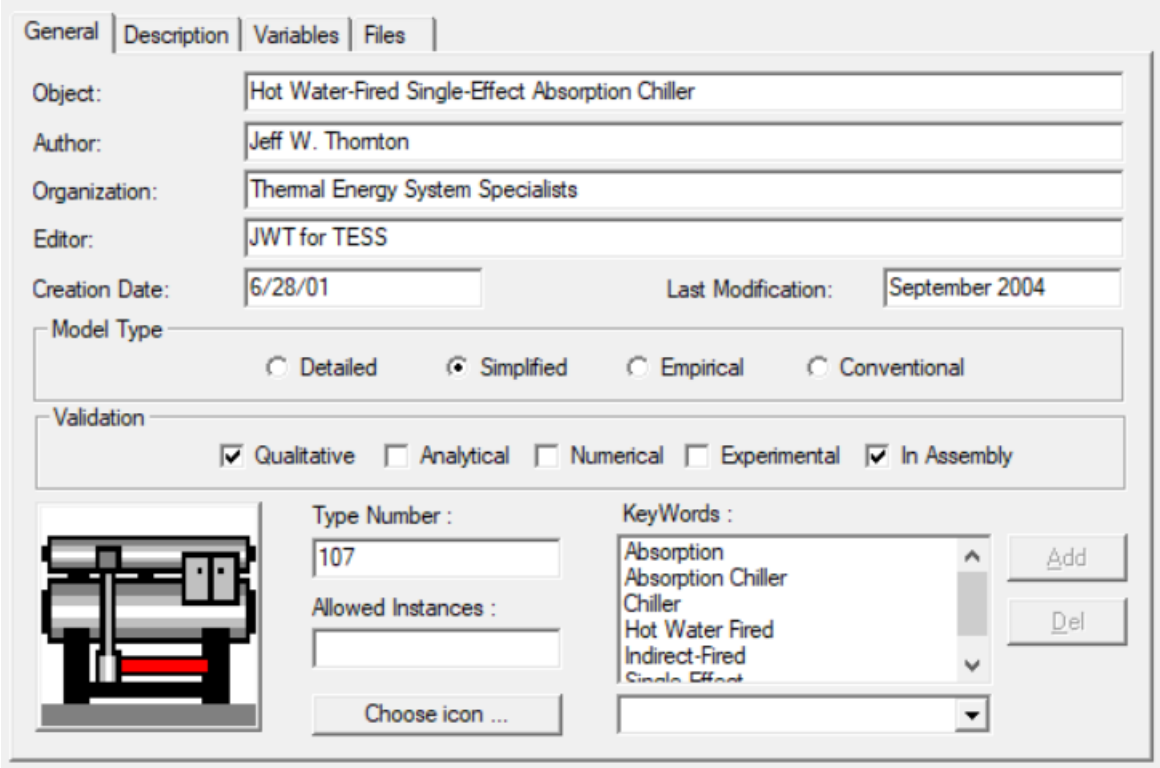
Fonte: LG, 2022

Para a climatização do ambiente, foram selecionadas climatizadores do tipo fancolete hidrônico modelo piso teto, devido à inviabilidade de instalação de dutos no forro levando-se em conta que o prédio já está pronto e em utilização, e visando também ao menor custo de instalação em comparação a um sistema dutado, cujo custo dos materiais é elevado. Foram selecionados os modelos comerciais com capacidade mais próxima da carga térmica calculada para cada ambiente. O COP fornecido pelo catálogo do fabricante foi 0,81, que

condiz com o fornecido para os modelos de *chiller* de simples efeito de absorção por água quente.

Foi utilizado, então o *type* 107 para a simulação do sistema de ar condicionado a ser alimentado pela usina. Segundo o catálogo do *software* utilizado, o *type*107 usa uma abordagem de pesquisa de dados de catálogo para prever o desempenho dos *chillers* de absorção por água quente de simples efeito. Neste projeto, o calor necessário para operação é fornecido por um fluxo de água quente. A energia do processo de absorção do refrigerante é rejeitada para o resfriamento de um fluxo de água e a máquina é projetada para esfriar um terceiro fluxo de fluido para um set point de temperatura designado pelo usuário. A figura 27 mostra o *type* 107

Figura 28 - *Type* 107, utilizado para modelagem do sistema de ar condicionado

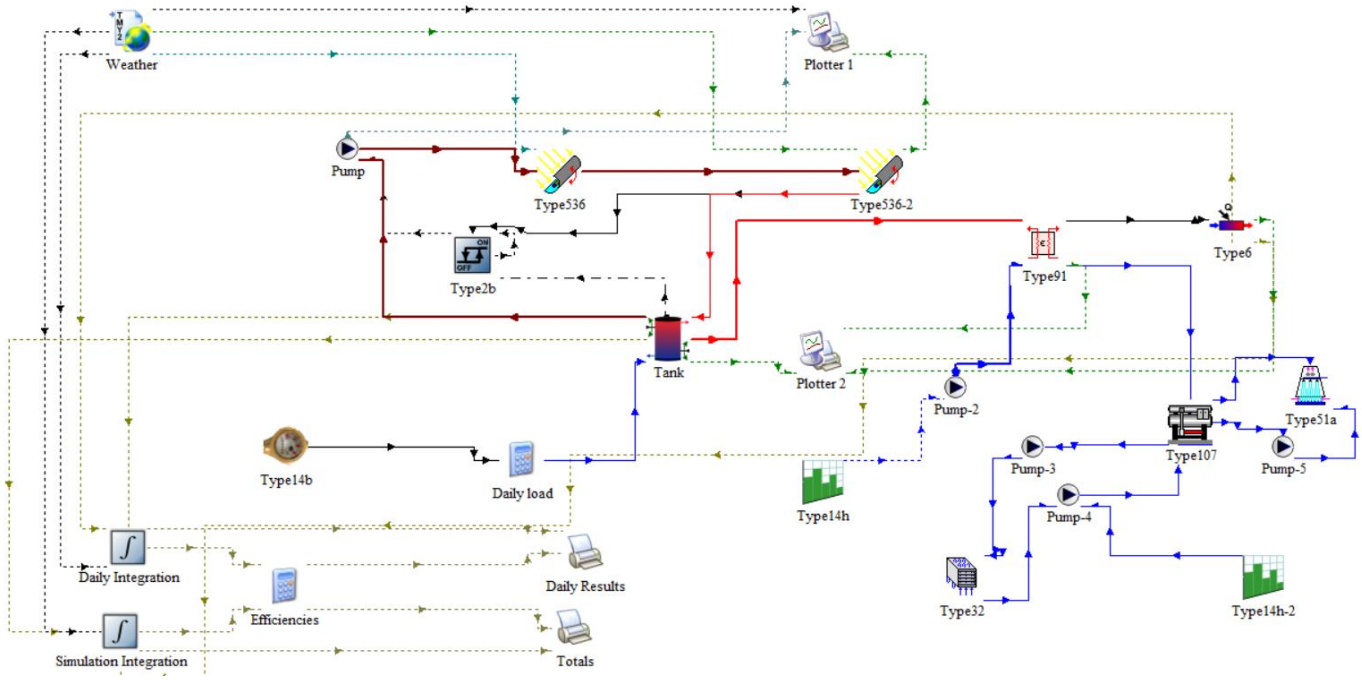


Fonte: TRNSYS, 2007

Para efeitos de avaliação de viabilidade de utilização da água quente fornecida pela usina solar para acionamento do *chiller*, apenas o *type* 107 é necessário. Os demais componentes do sistema, como bombas, evaporadoras e torre de resfriamento, utilizarão energia elétrica.

Assim, foi modelado o sistema de ar condicionado com *chiller* de absorção acoplado à usina solar de coletores parabólicos conforme mostrado na figura 29:

Figura 29-Modelo do sistema com *chiller* de absorção acoplado à usina



Fonte: Elaborado pela autora

Na configuração proposta para o prédio 20, cada unidade climatizadora realiza a climatização de uma sala. De acordo com as cargas térmicas levantadas, para as salas com 54m² e ocupação 41 pessoas, cada fancolete selecionado tem a capacidade 60000BTU/h. Para a sala dos professores, com 40m² e ocupação máxima estimada 15 pessoas, foi previsto um fancolete de 36000BTU/h. Para a sala de apoio com aproximadamente 100m², foi prevista uma unidade climatizadora de 75000BTU/h. Para o auditório, considerando área de 100m² e ocupação 150 pessoas, foram previstas 2 climatizadores de 75000BTU. Na figura 30, está representada uma unidade climatizadora modelo piso teto

Figura 30 - Climatizador modelo piso teto.

Fonte: CARRIER, 2022

O arranjo de sistema escolhido para este estudo constitui em *chiller* de absorção e torres de resfriamento para a condensação a água, além das bombas para circulação da água gelada e água de condensação. Para a seleção do modelo comercial da torre, é necessária uma verificação mais criteriosa da instalação e suporte técnico de um fabricante. Na figura 31, está representada uma torre de resfriamento:

Figura 31 - Torre de resfriamento

Fonte: ALPINA, 2022

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo, foi realizada a simulação no *software* TRNSYS de um modelo com coletores parabólicos que representa a usina solar instalada no campus Nova Gameleira do CEFET-MG para fornecimento de calor como fonte de energia para um *chiller* de absorção componente de um sistema de climatização proposta para o prédio 20 existente no campus.

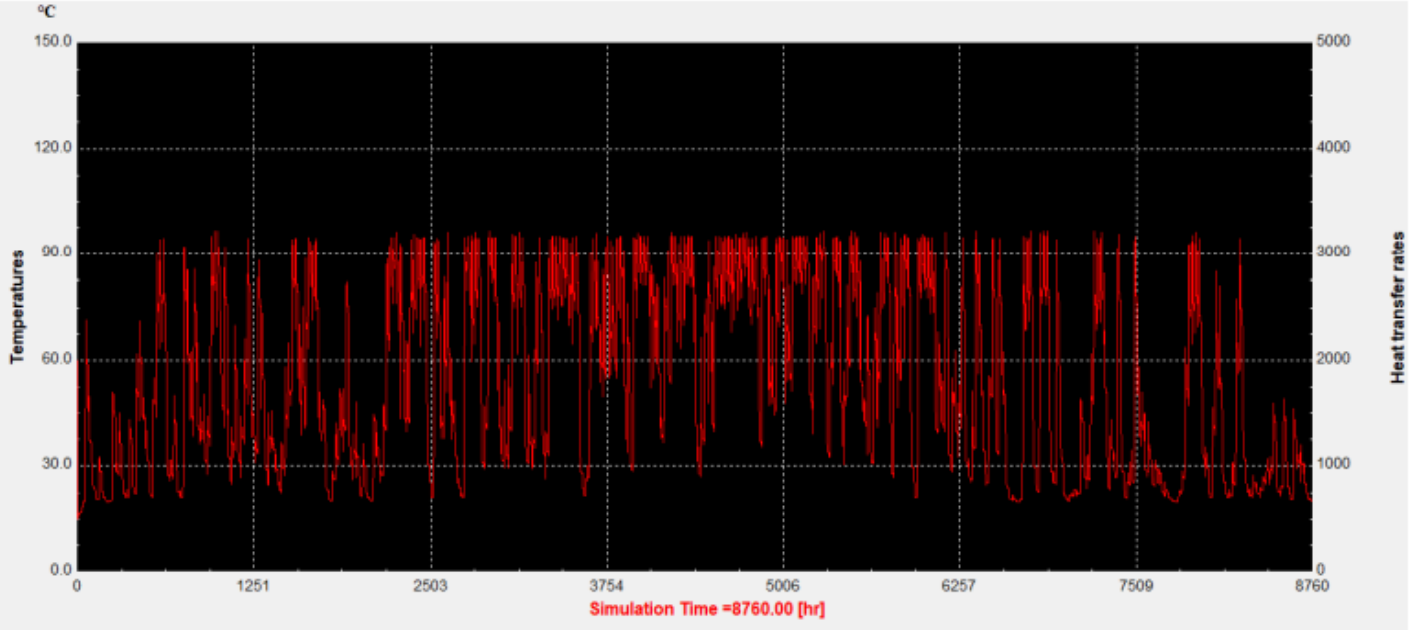
Verificou-se que o *software* TRNSYS possui os modelos que atendem ao objetivo da simulação e é uma importante ferramenta para simulação de sistemas transientes. O modelo utilizando o coletor parabólico foi criado a partir de revisões bibliográficas e modelos já existentes no TRNSYS.

A partir do levantamento de carga térmica conforme características construtivas do prédio 20, de acordo com as orientações normativas pertinentes, foi obtido o valor de 130TR como capacidade térmica a ser atendida pelos equipamentos de climatização. Como este trabalho possui, entre os objetivos, a verificação de viabilidade de aplicação prática da usina solar existente para fornecimento de energia de um sistema proposto de ar condicionado, foi selecionado, inicialmente, um *chiller* de capacidade comercial disponível de 150TR.

Em uma análise posterior, foi selecionado um sistema para atendimento às salas alimentado pela usina solar, e um sistema de expansão direta dedicado para atendimento do auditório, reduzindo a carga térmica total e, consequentemente, a energia a ser suprida pela usina para alimentação do sistema.

Na figura 32, apresenta-se a temperatura do óleo na entrada do coletor tipo calha parabólica. Observa-se que a temperatura na entrada dos coletores chega a valores de até 90°C.

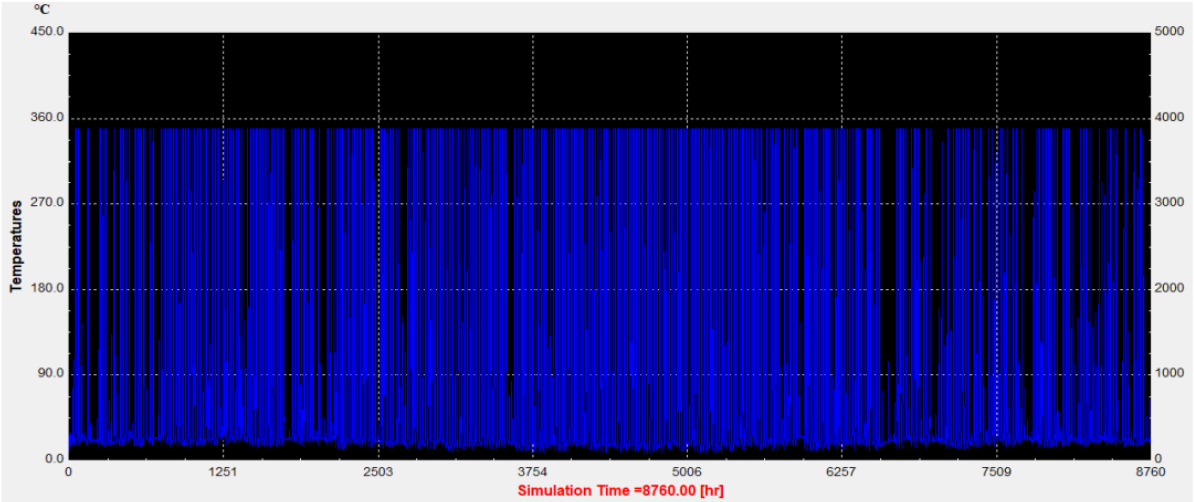
Figura 32 – Temperaturas do óleo na entrada do coletor



Fonte: elaborado pela autora

Na figura 33, é apresentado o perfil de temperatura do óleo na saída dos coletores tipo calha parabólica. Observa-se que em dias de maior radiação a temperatura na saída dos coletores chega a níveis de aproximadamente 360°C.

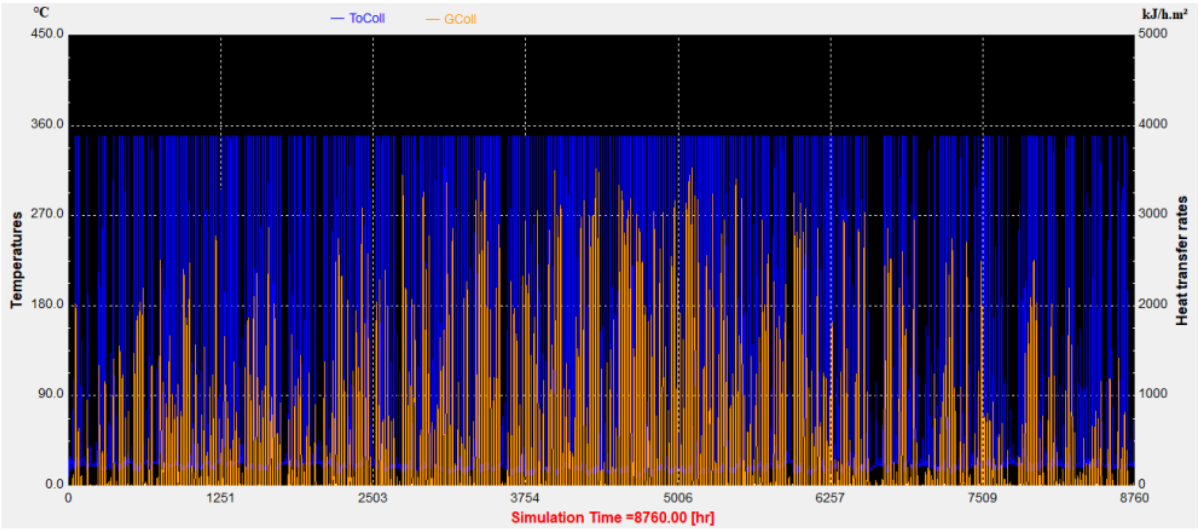
Figura 33 - Temperaturas do óleo na saída do coletor



Fonte: elaborado pela autora

Na figura 34, apresenta-se a combinação dos gráficos de temperatura na saída dos coletores e a irradiação anual.

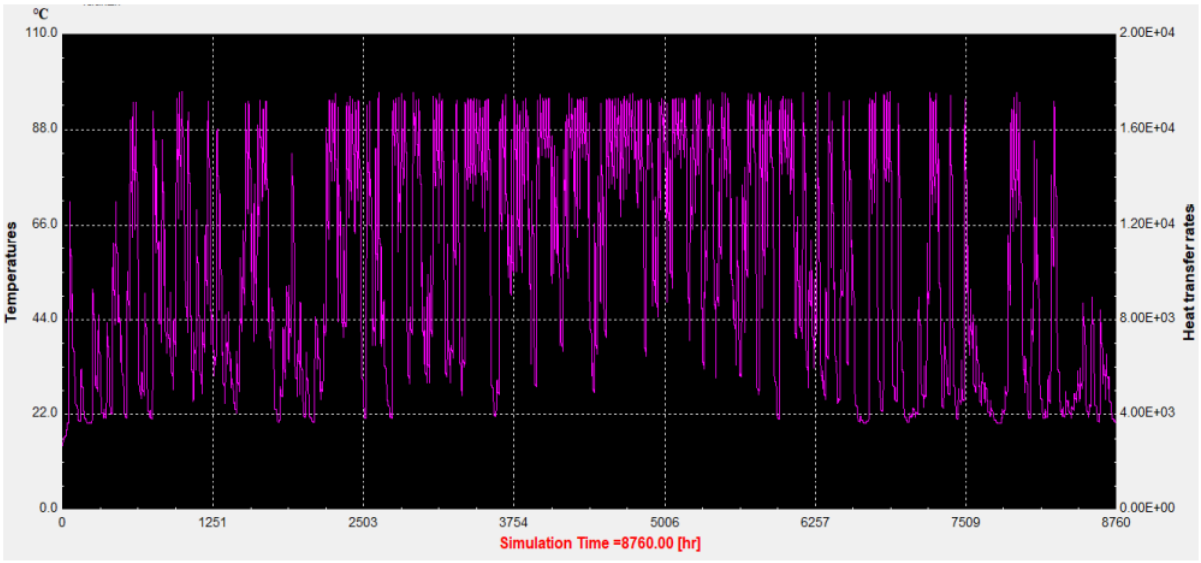
Figura 34 - Temperaturas do óleo na saída do coletor e radiação anual



Fonte: elaborado pela autora

Na figura 35, apresenta-se a temperatura do óleo na saída do reservatório térmico.

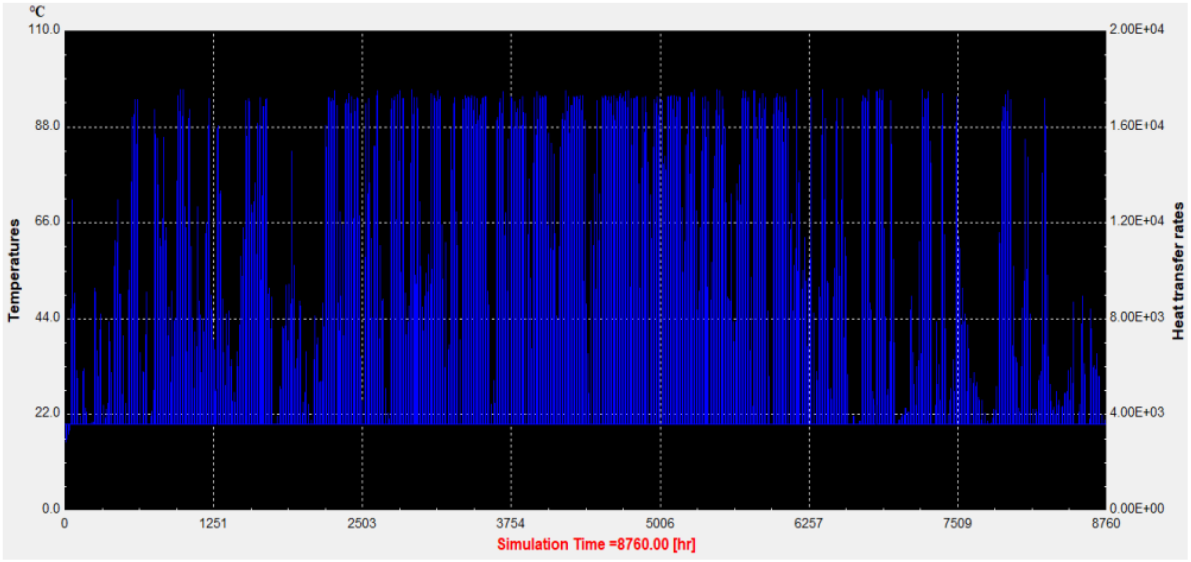
Figura 35 - Temperaturas de saída do óleo na saída do reservatório térmico



Fonte: elaborado pela autora

Os resultados mostram que as temperaturas de água fornecidas pela usina, atingiram, em média, 60°C a 70°C, chegando a aproximadamente 100°C nos meses de maior irradiação.

Figura 36 - Temperaturas de água na saída do trocador de calor



Fonte: elaborado pela autora

Por fim, foi possível chegar no valor da energia gerada pelo sistema de coletores parabólicos durante o período de um ano, correspondente a 131,49 GJ.

Com base nas cargas térmicas levantadas para o sistema, foi possível calcular a potência de refrigeração do *chiller* (em TR), e, com base nos dados de potência do pelo *chiller* selecionado (LJ-A 21 fabricante Carrier), foi possível calcular o valor de energia demandada para climatização do prédio 20, conforme apresentado na tabela 4

Tabela 4 - Demanda de energia para climatização do prédio 20

Dado	Valor	Unidade
Tempo total de uso por dia	14,00	h
Demanda térmica do *chiller*	24840,00	kJ/h
Energia necessária em um dia	347,76	MJ
Energia necessária em um ano	91,81	GJ

Foi proposto também um perfil de utilização com período de operação do sistema de ar condicionado reduzido em meia hora em relação à utilização das salas e desligamento do sistema durante os recessos da instituição. O *Type* 14 foi parametrizado para utilização até 21:30h, gerando os seguintes resultados:

Tabela 5 - Demanda de energia para climatização do prédio 20

Dado	Valor	Unidade
Tempo total de uso por dia	13,50	h
Demanda térmica do *chiller*	24840,00	kJ/h
Energia necessária em um dia	335,34	MJ
Energia necessária em um ano letivo	73,77	GJ

CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi realizar a simulação no *software* TRNSYS de um modelo com coletores parabólicos que representa a usina solar instalada no CEFET-MG, que fornece água quente para um sistema de ar condicionado para climatização do prédio 20 do Campus Nova Gameleira do CEFET-MG.

A modelagem proposta foi concluída por meio da utilização do *software* TRNSYS, que representa uma importante ferramenta para simulação de sistemas transientes. Nele, também foi possível realizar as simulações propostas.

O modelo utilizando o coletor parabólico foi criado a partir de revisões bibliográficas e modelos já existentes no TRNSYS. Já o modelo do ar condicionado foi construído com base na norma ABNT 16401 para levantamento da carga térmica, dimensionamento e seleção dos equipamentos. Também foram verificados dados de catálogo fornecidos por fabricante para os equipamentos e comparados com a literatura e os parâmetros do TRNSYS. O parâmetro do COP do *chiller*, configurado no *type* 107 para 0,53, foi ajustado para 0,81 para o *chiller* de absorção com base no catálogo e literatura.

De acordo com as simulações realizadas, foi possível observar que a radiação em Belo Horizonte chega a níveis de 900W/m², o que está de acordo com as cartas de radiação global solar diária de Minas Gerais, que diz que esta grandeza varia entre 3,0 e 7,5 kWh/m². dia.

Foram propostos 2 perfis de utilização, um considerando climatização dos ambientes em tempo integral de utilização por 12 meses no ano, e o segundo, reduzindo a climatização em meia hora durante o período de utilização, e desligando-se o sistema durante os recessos da instituição. Após o cálculo da demanda energética no período de 1 ano pelo *chiller*, obteve-se o valor de 91,81 GJ de energia para o primeiro perfil de utilização proposto e 73,77GJ para o segundo perfil de utilização. Após a simulação no *software* TRNSYS, verificou-se que os coletores parabólicos são capazes de fornecer 131,49 GJ de energia no mesmo período, ou seja, atendem à demanda de energia total necessária para geração de água gelada para climatização do prédio 20. Considerando-se o perfil de utilização ajustado para desligamento do sistema durante o recesso da instituição, ainda é possível obter uma economia de 20,3% de consumo energético.

Os valores de demanda energética considerados nas análises representam os piores cenários em relação a ocupação, equipamentos em operação e carga térmica. Considerando-se que foram contempladas áreas de utilização esporádica como auditório e salas de apoio,

além de utilização do sistema em todos os dias úteis de todas as épocas do ano, o sistema atende com segurança à demanda energética do sistema de climatização.

Sob o ponto de vista da temperatura da água quente gerada pela usina, os valores são satisfatórios em relação às demandadas pelos modelos comerciais de *chillers* de absorção.

Os modelos comercializados atualmente de *chiller* por absorção demandam a instalação de torres de resfriamento, para realização da condensação a água, o que acrescenta uma maior complexidade e consumo de água ao arranjo. Logo, é necessário realizar uma análise de viabilidade comparando-se a economia de energia com o aumento do consumo de água neste tipo de estudo.

Conclui-se, assim, que, com a configuração existente atualmente no campus, é viável a utilização da usina solar existente no CEFET-MG para alimentação de um sistema de climatização no prédio 20 que atenda ao perfil de utilização atual do campus.

Como estudos futuros, propõe-se a reconfiguração do sistema com equipamentos dedicados aos ambientes como auditório e as salas de apoio para redução da capacidade do *chiller* e disponibilidade de energia fornecida pela usina solar para outras aplicações.

Pode-se, também, refinar a seleção dos componentes do sistema com o apoio de *softwares* comerciais de fabricantes para levantamento do custo da instalação proposta e análise de viabilidade econômica, tendo-se em vista os custos dos *chillers* de absorção e de compressão de vapor, energia elétrica e água.

Conclui-se, ainda, com este estudo, que a aplicação de resultados obtidos por simulações encontra a barreira da indisponibilidade de modelos comercias de equipamentos com valores exatos de capacidade conforme necessidades reais das edificações.

REFERÊNCIAS

ALPINA EQUIPAMENTOS. **Torres de resfriamento.** Disponível em: https://www.alpinaequipamentos.com.br/produto/torres-de-resfriamento-de-agua/serie-tbs/8. Acesso em: 22/06/2022.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Informações Gerenciais**. Disponível em: <www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informações+Gerenciais+-+2°+trimestre+2018/fa14e464-2b54-bfc8-6bf1-c26b42d00d0a>, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16401-1: **Instalações de ar condicionado - Sistemas centrais e unitários Parte 1: Projetos das instalações.** 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2008. 60 p.

ABOELWAFA, O.; FATEEN, S.E.; SOLIMAN, AHMED.; ISMAIL, I.M. **A review on solar Rankine cycles: working fluids, applications and cycle modifications.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 82, p. 868-885, 2018.

ADAMS, S.; KLOBODU, E.K.M.; OPOKU, E.E.O. **Energy consumption, political regime and economic growth in sub-Sahara Africa.** Energy Policy, v. 96, p. 36-44, 2016.

AL-ABIDE, S.F.; MAT, K.; SOPIAN, M.Y.; SULAIMAN, C.H.; LIM, A. **Review of termal energy storage for air conditioning systems**. Renew. Sust. Energ, v. 16, p. 5802–5819, 2012.

ALI, D.; RATISMITH, W. **A semicircular trough solar collector for air-conditioning system using a single effect NH3eH2O absorption chiller.** Energy, v. 215, 2021.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **2001 Ashrae Handbook: Fundamentals.** SI ed. Atlanta, Ga.: Ashrae, 2001.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. ANSI/ASHRAE Standard 55: **Thermal environmental conditions for human occupancy**. Atlanta, 2017.

ARAÚJO, M.C.; **Análise das condições de conforto térmico nas salas de aula do prédio 20 do CEFET-MG via simulação computacional.** Trabalho de conclusão de curso, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2018.

ASSILZADEH, F.; KALOGIROU, S.A.; ALI, Y.; SOPIAN, K. **Simulation and optimization of a LiBr solar absorption cooling system with evacuated tube collectors.** Renewable Energy, v.30, p. 1143-1159, 2005.

BEHAR, O.; KHELLAF, A.; MOHAMMEDI, K. **A novel parabolic trough solar collector model – Validation with experimental data and comparison to Engineering Equation Solver (EES).** Energy conversion and Management, v. 106, p.268-281, 2015.

BERMEJO, P.; PINO, F.J.; ROSA, F.; **Solar absorption cooling plant in Seville.** Solar Energy, v. 84, p. 1503-1512, 2010.

BLANCO, J.; MALATO, S.; FERNÁNDEZ, I.P.; ALARCÓN, D.; GERNJAK, W.; MALDONADO, M.I. **Review of feasible solar energy applications to water processes.** Renew. Sust. Energ, v. 13, p. 1437–1445, 2009.

BORGES, E.B. **Avaliação experimental dos coletores solares cilindro parabólicos da instalação solar do CEFET-MG.** Dissertação de Mestrado – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 165f. 2012.

BOUHAL, T.; AGROUAZ, Y.; ALLOUHI, A.; KOUSKSOU, T.; JAMIL, A.; RHAFIKI, T.E.; ZERAOULI, Y. **Impact of load profile and collector technology on the fractional savings of solar domestic water heaters under various climatic conditions.** Int. J. Hydrogen Energy, v. 42, p.13245–13258, 2017.

BOUHAL, T.; AGROUAZ, Y.; ALLOUHI, A.; KOUSKSOU, T.; JAMIL, A. **Numerical modeling and optimization of termal stratification in solar hot water storage tanks for domestic applications: CFD study.** Solar Energy, v. 157, p. 441–455, 2017.

BOUHAL, T.; SAIFED DIN FERTAHI, S.; AGROUAZ, Y.; RHAFIKI, T.E.; KOUSKSOU, T.; ZERAOULI, Y.; JAMIL, A. **Technical assessment, economic viability and investment risk analysis of solar heating/cooling systems in residential buildings in Morocco.** Solar Energy, v. 170, p. 1043–1062, 2018.

CABRERA, F.J.; GARCÍA, A.F.; SILVA, R.M.P.; GARCÍA, M.P. **Use of parabolic trough solar collectors for solar refrigeration and air-conditioning applications.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.20, p. 103-118, 2013.

CARRIER DO BRASIL. Evaporadora modelo piso teto. Disponível em: https://carrierdobrasil.com.br/blog/produtos/piso-teto-space/. Acesso em: 21/06/2022.

CALISE, F.; FIGAJ, R.D.; VANOLI, L. **Novel polygeneration system integrating photovoltaic/thermal collectors, solar assisted heat pump, adsorption chiller and electrical energy storage: Dynamic and energy-economic analysis.** 2017.

CALISE, F.; d'ACCADIA, M.D.; VANOLI, L. **Transient analysis of solar polygeneration systems including seawater desalination: A comparison between linear Fresnel and evacuated solar collectors.** Energy, v.172, p.647-660, 2019.

CARRIER. **Cátalogo técnico chillers por absorção água quente.** https://ahi-carrier.gr/wp-content/uploads/2017/06/PSD-16LJ_01_82-3.pdf

CHWIEDUK D. **Towards sustainable-energy buildings.** Applied Energy, p.76, 2003.

DAWN, S.; TIWARI, P.K.; GOSWAMI, A.K.; MISHRA, M.K. **Recent developments of solar energy in India: perspectives, strategies and future goals.** Renew Sustain Energy, v. 62, p. 215-235, 2016.

DESIDERI U.; PROIETTI S.; SDRINGOLA, P. Solar-powered cooling system: technical and economic analys is on industrial refrigerationandair-conditioningapplications, Appl. Energy 86 (2009) 1376–1386.

DROSOU, V.; VALENZUELAC, L.; DIMOUDIB, A. **A new TRNSYS component for parabolic trough collector simulation.** International journal of sustainable energy, v.37, p. 209–229, 2018.

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. **Solar engineering of thermal processes**. 4 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.

ESTIF, **Solar assisted cooling – state of the art.** Report of project key issues for renewable heat in Europe (K4RES-H), 2006.

EVENS, D.L. **On the performance of cylindrical parabolic solar concentrators with flat absorbers.** Solar Energy, v.85, p. 19-379, 1977.

FERREIRA, G.N.; SILVA, J.G.; **Estudo teórico da utilização da usina solar do Cefet-mg e coletores solares de baixa Temperatura para fornecimento de calor para o restaurante estudantil.** Trabalho de Conclusão de curso. CEFET-MG, 2021.

GREEN, M.A.; EMERY, K.; HISHIKAWA, Y.; WARTA, W.; DUNLOP, E.D.; **Solar cell efficiency tables (version 39).** Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 20 p. 12-20, 2012.

GOODRICH, A.; JAMES, T.; WOODHOUSE, M. **Residential, commercial, and utility-scale photovoltaic (PV) system prices in the United States: current drivers and cost-reduction opportunities.** Contract, v.303, p.275-300, 2012.

HARRIS, J.A.; DUFF, W.S. **Focal plane flux distribution produced by solar concentrating reflectors.** Solar Energy, v.11, p. 27-403,1981.

HENNING, H.M. **Solar assisted airconditioning of buildings–an overview.** Apply Thermal Engineering, v. 27, p. 1734–1749, 2007.

HINRICHS, R.A.; KLEINBACH, M. **Energia e meio ambiente.** Cengage Learning Editores, 2010.

HOFFMANN, R. et al. **Comparação econômico-ambiental entre coletores solares do tipo placa plana e tubo evacuado.** 3º Congresso Internacional de Tecnologias Para o Meio Ambiente, Bento Gonçalves, p.1-8, abr. 2012.

HAZYUK, I.; GHIAUS, C.; PENHOUET, D. **Model predictive control of termal comfort as a benchmark for controller performance**. Autom. Constr., v. 43, p. 98–109, 2014.

I.E. Agency, Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy (France), (2014).

KALOGIROU, S.A. **Solar termal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion**. Science, v.95, p. 30-231, 2004.

KIM, D.; FERREIRA, C.I. **Solar refrigeration options–a state-of-the-art review.** Int. J. Refrigeration, v.31, p. 3–15, 2008.

KORONEOS C.; TSAROUHIS M. **Exergy analysis and life cycle assessment of solar heating and cooling systems in the building environment.** J. Clean Prod. v. 60, p.32-52, 2012.

KUMARESAN, G.; SANTOSH, R.; RAJU, G.; VELRAJ, R **Experimental and numerical investigation of solar flat plate cooking unit for domestic applications.** Energy, v. 157, p. 436-447, 2018.

LG. ***Chillers*** **por absorção – água quente.** Disponível em: https://www.lg.com/br/business/chiller-agua-quente. Acesso em: 30/03/2022.

LG. **Cátalogo técnico *chillers* por absorção água quente.** Disponível em: https://www.lg.com/br/business/download/airsolution/202004_Catalogo_ChillerAbsorcao[20210429_024814580].pdf. Acesso em: 30/03/2022.

LI, N.; CALIS, G.; BECERIK-GERBER, B.; **Measuring and monitoring occupancy with an RFID based system for demand-driven HVAC operations**, Autom. Constr., v.24, p. 89–99, 2012.

LIMA, J.B.A. **Otimização de sistema de aquecimento solar de água em edificações residenciais unifamiliares utilizando o programa Trnsys.** Dissertação Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

LIU, Z. **National carbono emissions from the industry process: production of glass, soda ash, ammonia, calcium carbide and alumina**. Applied Energy, v. 166, p. 239-244, 2016.

LIU, L.; WANG, Z.; ZHANG, H.; XUE, Y. **Solar energy development in China—A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, p. 301-311, 2010.

LIZARTE, R.; IZQUIERDO, M.; MARCOS, J.D; PALACIOS, E. **An innovative solar-driven directly air-cooled LiBr–H 2 O absorption chiller prototype for residential use.** Energy Building, v. 47, p. 1-11, 2012.

MASSON, G.; LATOUR, M.; BIANCARDI, D. **Global Market Outlook for Photovoltaics Until 2016**. European Photovoltaic Industry Association, 2012.

MARTIN, J. A.; MICHAEL, R.W.; ANDREW, S.M. **Integration of solar thermal for improved energy efficiency inlow-temperature-pinch industrial processes**. Energy Research Group, School of Science & Engineering, University of Waikato, Private Bag 3105, Hamilton 3240, New Zealand, 2009.

MATEUS, T.; OLIVEIRA, A.C. **Energy and economic analysis of an integrated solar absorption cooling and heating system in different building types and climates.** Applied Energy, v.86, p. 949-957, 2009.

MATOS, IB. **Avaliação das possibilidades de inserção de energia solar térmica em cozinhas industriais.** 2014. 59f. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Fluminense, Fluminense, 2014.

MAUTHNER, F.; WERNER, W. **Solar Heat World wide – Markets and Contribution to the Energy Supply.** International Energy Agency (IEA), Gleisdorf, Austria, 2014.

MAZLOUMI, M.; NAGHASHZADEGAN, M.; JAVAHERDEH, K. **Simulation of solar lithium bromide–water absorption cooling system with parabolic trough collector.** Energy Conversion Management, v.49 p. 2820-2832, 2008.

MEHOS, Mark et al. **On the path to SunShot-advancing concentrating solar power technology, performance, and dispatchability.** EERE Publication and Product Library, 2016.

MOJIRI, A.; TAYLOR, R.; THOMSEN, E.; ROSENGARTEN, G. **Spectral beam splitting for efficient conversion of solar energy—A review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 28, p. 654-663, 2013.

MUND, L.F. **Análise da viabilidade técnica e econômica de coletores solares para aquecimento de água em residências.** Trabalho de conclusão de curso – Faculdade Horizontina. Horizontina, 2014.

MWESIGYE, A.; HUAN, A.; MEYER, J.P. **Thermal performance and entropy generation analysis of a high concentration ratio parabolic trough solar collector with CuTherminol VP-1 nanofluid.** Energy Conversion and Management, v.120, p. 449-465, 2016

MWESIGYE, A.; HUAN, A.; MEYER, J.P. **Modeling, simulation and performance analysis of parabolic trough solar collectors: A comprehensive review.** Applied Energy, v.225, p. 135-174, 2018.

N.; YAGHOUB, M. **Analysis of wind flow around a parabolic collector (2) heat transfer from receiver tube.** Renewable Energy, v.32, p. 1259-1272, 2007.

NAIK, B. K.; VARSHNEY A.; MUTHUKUMAR P.; SOMAYAJI, C. **Modelling and performance analysis of U-type evacuated tube solar collector using different working fluids.** Energy Procedia, v. 90, p. 227–237, 2016.

NAIK, B. K.; PREMNATH, S. **Performance comparison of evacuated U-tube solar collector integrated parabolic reflector with conventional evacuated U-tube solar collector.** Nano Rsearch, v.14, 2021.

NETO, J.H.M.; PESSOA, M.A.; BORGES, E.B.; LIMA, F.R.S. **Experimental test of the parabolic trough solar collectors of the first demonstration testing facility of Brazil using the QDT model.** Applied Thermal Engineering, v. 163, 114405, 2019.

PESSOA, M.A. **Metodologia teórica experimental utilizando teste quase dinâmico para avaliação de coletores concentradores do tipo cilindro parabólico.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, Minas Gerais, 165f, 2014.

PETELA, K.; MANFRIDA, G.; SZLEK, A. **Advantages of variable driving temperature in solar absorption chiller.** Renewable Energy, v.114, p.716-724, 2017.

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J.; POUT, C. **A review on buildings energy consumption information.** Energy Build, v. 40, p. 394–398, 2008.

PRANESH, V.; VELRAJ, R.; CHRISTOPHER, S.; KUMARESAN, V. **A 50 year review of basic and applied research in compound parabolic concentrating solar thermal collector for domestic and industrial applications.** Solar Energy, v. 187, p. 293-340, 2019.

PRICE, H.; LÜPFERT E.; KEARNEY, D.; ZARZA E.; COHEN G.; GEE R. **Advances in parabolic trough solar power technology.** Solar Energy, v. 25, p. 124:109, 2002.

QIN M.; BELARBI, R.; AÏT-MOKHTAR, A.; ALLARD, F. **Simulation of coupled heat and moisture transfer in air-conditioned buildings.** Autom. Constr., v. 18, p. 624–631, 2009.

RATISMITH, W.; INTHONG, A.; BRIGGSAB, J. **Two non-tracking solar collectors: Design criteria and performance analysis.** Applied Energy, v. 131, p. 201-210, 2014.

ROBERT, A.T.; TODD, O.; PATRICK, P.; **Prospects for solar cooling – An economic and environmental assessment**. Solar Energy, v.86, p. 1287-1299, 2012.

SCARLAT, N.; DALLEMAND, J.; MONFORTI, F.; BANJA, M.; MOTOLA, V. **Renewable energy policy framework and bioenergy contribution in the European Union – An overview from National Renewable Energy Action Plans and Progress Reports.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 51, p. 969-985, 2015.

SCHMID, F.; BIERLING, B.; SPINDLER, K. **Development of a solar-driven diffusion absorption chiller**– Solar Energy, v.177, p. 483-493, 2019.

STANEK, W.; CZARNOWSKA, L.; SIMLA, T. **Thermo-ecological cost of electricity from renewable energy sources,** Renewable Energy, v. 115, p. 87-96, 2018.

SUDHEER, P.S. **Can India Halve Oil Import Dependence by 2030?** Business Standard, 2015.

SYED, A.; IZQUIERDO, M.; RODRIGUEZ, P.; MAIDMENT, G.; MISSENDEN, J; LECUONA, A. **A novel experimental investigation of a solar cooling system in Madrid**. International Journal of Refrigeration, v.28, p.859–871, 2005.

TAYLOR, R.A.; TODD, O.; PATRICK, P.E.; **Prospects for solar cooling – An economic and environmental assessment.** Solar Energy, v.86, p.1287-1299, 2012.

TORRES, A.M.D.; **Solar thermal heat engines for water pumping: an update.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.13, p. 462-472, 2009.

TORREY, E.R.; KROHN, J.; RUDEN, P.P.; COHEN, P.I. **Efficiency of a laterally engineered architecture for photovoltaics.** Proceedings of the 35th IEEE2010 photovoltaic specialists conference (PVSC), p. 002978–83, 2010.

TURCHI C.; MEHOS M.; HO C.K.; KOLB G.J. **Current and future costs for parabolic trough and power tower systems in the US market.** Solar PACES 2010, Perpingan, France.

TYAGI, V.V.; KAUSHIK, S.C.; S.K. TYAGI, S.K.; **Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, p. 1383-1398, 2012.

VAKILOROAYA, V.; HÁ, Q.P. **Modeling and optimal control of an energy-efficient hybrid solar air conditioning system.** Automation in construction, v.49, p.262-270, 2015.

VERMA, S. K.; GUPTA, N. K.; RAKSHIT, D. **A comprehensive analysis on advances in application of solar collectors considering design, process and working fluid parameters for solar to thermal conversion.** Solar Energy, v. 208, p. 1114-1150, 2020.

XU, Z.Y.; WANG, R.Z. **Simulation of solar cooling system based on variable effect LiBr-water absorption chiller.** Renewable Energy, v.113, p. 907-914, 2017.