

DIEGO DO NASCIMENTO FERREIRA

**Análise Técnica de Sistemas de Refrigeração por Absorção Acionados por Água Quente
Proveniente de Energia Solar**

Diego do Nascimento Ferreira

**Análise Técnica de Sistemas de Refrigeração por Absorção Acionados por Água Quente
Proveniente de Energia Solar**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. José Antonio Perrela Balestieri

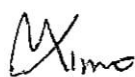
Guaratinguetá - SP
2017

F383a Ferreira, Diego do Nascimento
Análise técnica de sistemas de refrigeração por absorção acionados por água quente proveniente de energia solar / Diego do Nascimento Ferreira – Guaratinguetá, 2017.
62 f : il.
Bibliografia: f. 60-62

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri

1. Refrigeração. 2. Calor – transmissão. 3. Coletores solares.
4. Energia solar. I. Título

CDU 621.56


Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

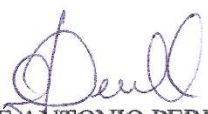
DIEGO DO NASCIMENTO FERREIRA

**ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"**

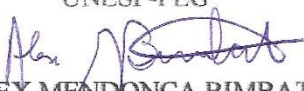
**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELE BALESTIERI
Orientador/UNESP-FEG


Profa. Dra. IVONETE ÁVILA
UNESP-FEG


Prof. Dr. ALEX MENDONÇA BIMBATO
UNESP-FEG

Dezembro/2017

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais Agenor e Celma e a toda minha família, que sempre me apoiaram e me incentivaram durante meus estudos e que estavam sempre presentes em diversos momentos de dificuldade,

aos diversos amigos que fiz nas salas de aula, na República Cabaret, na Moradia Estudantil e na Lobateria, onde compartilhamos momentos desafiadores e alegres, crescemos e aprendemos juntos,

ao meu orientador, Prof. Dr. José Antonio Perrela Balestieri, pelo profissionalismo demonstrado durante a orientação do trabalho, pelo incentivo ao pensamento crítico e analítico e pela vontade de fazer com que eu esteja cada vez mais preparado para ser um engenheiro e me tornar uma pessoa melhor,

ao professor Dr. Marcelo Sampaio Martins pelos anos de orientação em projetos de iniciação científica, contribuindo para meu crescimento pessoal e profissional, principalmente no desenvolvimento de conhecimentos técnicos em Engenharia Mecânica,

à assistente social Cristina Maria Torres Vieira (Cori) por ter se dedicado e se preocupado em me ajudar durante toda a graduação, auxiliando nos processos de obtenção de bolsas de permanência estudantil e moradia estudantil,

à empresa Vela Solaris que disponibilizou gratuitamente uma licença de estudante do *software* Polysun, que foi indispensável para a execução desse projeto,

aos funcionários da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

“Insanidade é continuar fazendo sempre a mesma coisa
e esperar resultados diferentes.”

Albert Einstein

RESUMO

A demanda mundial por equipamentos de refrigeração vem crescendo devido a diversos fatores, dentre eles as mudanças climáticas, como o aquecimento global, e queda nos preços dos equipamentos de refrigeração. Essa demanda crescente implica também em um aumento no consumo de energia elétrica, gerando necessidade de construção de novas plantas e impactando no aquecimento global. Esses fatores suportam a necessidade de desenvolvimento e utilização de energias renováveis para diminuição do consumo de eletricidade e diminuição de impactos causados ao meio ambiente. A energia solar é uma das principais fontes de energias renováveis, e pode ser utilizada em conjunto com sistemas de refrigeração. Nesse projeto estuda-se a aplicação, em edificações, de um sistema de refrigeração por absorção (SRA), acionado por água quente proveniente de uma planta solar. Para isso, é simulado um modelo constituído de 500 m² de coletores solares de tubo evacuado, que alimenta um SRA que utiliza o par H₂O-LiBr e que possui 80 kW de potência, simulando a carga térmica do prédio InovEE da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Nesse modelo utiliza-se tanques de armazenamento de água quente e de água gelada, um queimador auxiliar e um equipamento do tipo *Fan-Coil* para a refrigeração do ambiente. A análise técnica foi realizada no *software* Polysun, que simula instalações que utilizam energias renováveis. Com os resultados do Polysun foi possível garantir que a temperatura do ambiente refrigerado fosse mantida entre 20 e 22 °C durante o ano, com uma fração solar média anual de 63%.

PALAVRAS-CHAVE: Refrigeração Solar. Coletor Solar. Refrigeração por Absorção. Brometo de Lítio. Polysun. Edificações. InovEE.

ABSTRACT

The global demand for refrigeration has been increasing due to many reasons, including the climate changes, such as global warming, and the lower prices of this type of equipment. This growing demand causes also the increase in the use of electricity, which rises the need of building new power plants and affects the global warming. These facts support the need of developing and utilizing renewable energies to lower the use of electricity and to lower the impact on climate changes. Solar energy is one of the main source of renewable energy and is suitable for applications in refrigeration systems. This project studies the use of solar plants to power absorption refrigeration systems applied to buildings. For this purpose, it was simulated a model with a 500 m² evacuated tube collectors plant that powers an H₂O-LiBr absorption chiller with cooling capacity of 80 kW, simulating the thermal load of the InovEE building located at Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. In this model, there are cold and hot water storage tanks, an auxiliary heating and a fan coil device for the refrigeration of the building. The analysis of the model was carried out using the software Polysun, which simulates renewable energy systems. With the Polysun's simulation, the plant was able to guarantee a temperature between 20 e 22 °C inside the building throughout the year, with an average annual solar fraction of 63%.

KEYWORDS: Solar Refrigeration. Solar Collectors, Absorption Refrigeration Systems. Lithium Bromide. Polysun. Buildings. InovEE.

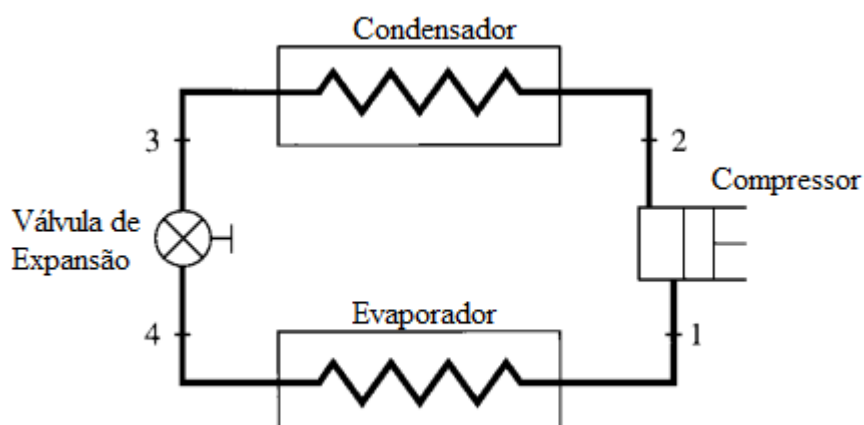
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	CONCEITOS BÁSICOS	11
2.1	SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO	11
2.1.1	Histórico	11
2.1.2	Princípio de funcionamento	11
2.1.3	Sistemas de refrigeração de simples efeito	13
2.1.4	Sistemas de refrigeração de duplo efeito	15
2.1.5	Componentes de um sistema de refrigeração por absorção	17
2.2	REFRIGERAÇÃO SOLAR	23
2.2.1	Coletores Solares	24
2.2.2	Tanque de Armazenamento	27
2.2.3	Queimador Auxiliar	28
2.2.4	Sistema Fan-Coil	28
3	REVISÃO DA LITERATURA	29
4	MATERIAL E MÉTODO	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1	CLIMA	46
5.2	PLANTA SOLAR: COLETORES E TANQUE DE ÁGUA QUENTE	47
5.3	SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO: SRA E TANQUE DE ÁGUA GELADA	49
5.4	SISTEMA DE REPRESENTAÇÃO DA CARGA TÉRMICA	50
6	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	60
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	63

1 INTRODUÇÃO

Sistemas de refrigeração são importantes para garantir conforto térmico em ambientes internos, principalmente em locais de clima úmido e quente. Atualmente, a tecnologia mais utilizada em sistemas comerciais para garantir conforto térmico é a de sistema de refrigeração por compressão (SRC). Nesse caso, o vapor é comprimido, condensado e tem sua pressão reduzida na válvula de expansão de forma que ele possa evaporar novamente no evaporador, retirando calor do ambiente. Para que esse processo ocorra, o compressor necessita ser alimentado com energia elétrica. O processo é apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Sistema de Refrigeração por Compressão



Fonte: Adaptado de Wang (2000)

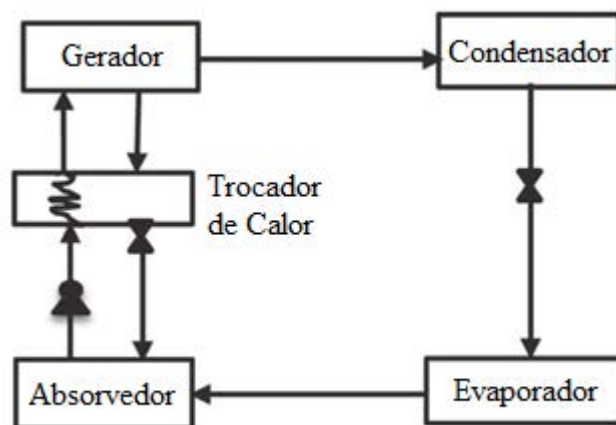
Apesar desse sistema ser o mais utilizado em aplicações de refrigeração, a inserção de SRCs no mundo ainda é baixa, o que demonstra um potencial de crescimento dessa tecnologia. A inserção de SRCs em residências europeias, por exemplo, é de somente 8% (SANTAMOURIS, 2016). Além disso, condições como o aquecimento global, melhora nas condições financeiras da população e queda nos preços de aparelhos de ar-condicionado fazem com que esses equipamentos sejam cada vez mais utilizados. Em 2014, por exemplo, foram vendidos no mundo mais de 100 milhões de equipamentos. 700 milhões são esperados para 2030 e em 2050 essa demanda pode chegar até 1,6 bilhão de unidades (MONTAGNINO, 2016).

Essa crescente utilização aumenta também o consumo de energia elétrica durante o dia. A utilização de sistemas de refrigeração gera picos de consumo de energia que podem implicar na necessidade de construção de novas plantas de geração de energia, para que seja possível o suprimento desses picos (SANTAMOURIS, 2016). Nesse sentido, demonstra-se a necessidade

de ter tecnologias sustentáveis, que busquem reduzir o consumo de eletricidade de sistemas de refrigeração, além de diminuir o impacto que essa demanda gera no aquecimento global.

Uma tecnologia que se enquadra nessa necessidade é a de sistemas de refrigeração por absorção (SRA). A principal diferença deste sistema para o SRC é que o SRA é acionado por energia térmica em vez de energia elétrica. No sistema de absorção, dois fluidos de trabalho são utilizados, sendo os mais comuns os pares amônia - água ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) e água - brometo de lítio ($\text{H}_2\text{O-LiBr}$), sendo os pares formados por refrigerante e absorvente, respectivamente. No funcionamento desse sistema, o refrigerante em forma de vapor passa pelo condensador, onde ele condensa liberando calor para a vizinhança. O refrigerante líquido passa por uma válvula de expansão, tendo sua pressão reduzida de forma que ele possa evaporar no evaporador, retirando calor do ambiente que se deseja refrigerar. Após isso, o refrigerante vai para o absorvedor, onde a solução binária absorve o refrigerante. Essa solução é então bombeada para o gerador, onde a mistura recebe calor, separando os dois componentes novamente. O refrigerante vai para o condensador começando o processo novamente e a solução restante retorna para o absorvedor para absorver mais refrigerante (MANZELA et al., 2010). A Figura 2 apresenta o esquema de um SRA.

Figura 2 – Sistema de Refrigeração por Absorção



Fonte: Adaptado de Olabomi et al. (2017)

A vantagem de sistemas de refrigeração por absorção é que eles podem ser utilizados em sistemas de cogeração. Gases provenientes de motores de combustão interna ou conjuntos a gás, vapor proveniente de sistemas de geração de potência ou perdas de calor de processos podem ser utilizados para acionar um SRA. Além disso, os sistemas de absorção podem ser

utilizados em sistemas de refrigeração solar, que consiste na utilização de energia solar como fonte primária de acionamento do sistema.

O objetivo desse trabalho é a utilização de ferramentas gratuitas de simulação de sistemas de refrigeração solar para avaliar a viabilidade técnica de uma planta de coletores solares que fornece água quente para alimentar um sistema de refrigeração por absorção. Esse sistema será avaliado considerando a aplicação em edificações, utilizando como base de estudo o auditório do prédio InovEE da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, que atualmente é refrigerado utilizando-se de equipamentos de refrigeração por compressão.

2 CONCEITOS BÁSICOS

2.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO

2.1.1 Histórico

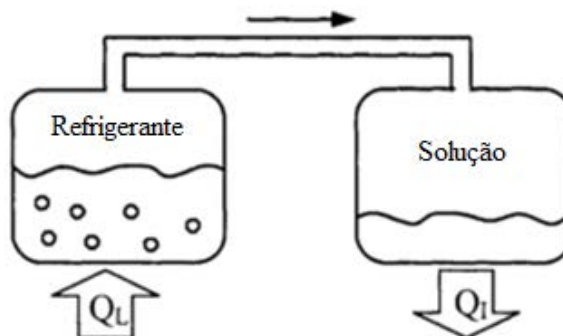
O primeiro equipamento de refrigeração por absorção surgiu em 1859, inventado pelo francês Ferdinand Carré, que patenteou a máquina em 1860 nos Estados Unidos. Esse sistema utilizava como fluido de trabalho o par $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ e funcionou como base para sistemas de fabricação de gelo e armazenamento de alimentos. O par $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ foi utilizado como fluido de trabalho em sistemas de refrigeração por absorção pela primeira vez em sistemas industriais no ano de 1950 (SRIKHIRIN; APHORNRATANA; CHUNGPAIBULPATANA, 2000).

2.1.2 Princípio de funcionamento

O sistema de refrigeração por absorção funciona com uma solução binária como fluido de trabalho, sendo essa solução constituída por um fluido refrigerante e um absorvente. Segundo os autores Sriksirin, Aphornratana e Chungpaibulpatana (2000) existem cerca de 40 fluidos refrigerantes e cerca de 20 fluidos absorventes para utilização em um SRA, porém, os pares mais comuns são $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ e $\text{H}_2\text{O-LiBr}$. O par $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ é geralmente recomendado para refrigeração, pois a amônia (fluido refrigerante) evapora a temperaturas baixas, entre -10 °C e 0 °C . O par $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ é recomendável para conforto térmico, pois a água (fluido refrigerante) evapora a temperaturas acima de 0 °C .

O princípio de funcionamento de um SRA está na evaporação do fluido refrigerante e na absorção deste pelo fluido absorvente. Esse é o processo de absorção, que é apresentado na Figura 3, onde dois recipientes a vácuo estão conectados entre si. No recipiente da esquerda encontra-se líquido refrigerante, enquanto no da direita tem-se uma mistura de líquido refrigerante e líquido absorvente. Nesse processo, o refrigerante em forma de vapor é absorvido pela mistura, fazendo com que a pressão do sistema diminua. Essa redução na pressão faz com que mais fluido refrigerante evapore e continue sendo absorvido pela mistura. Para que a evaporação do refrigerante ocorra, é necessário que o fluido retire calor da vizinhança, causando o efeito de resfriamento.

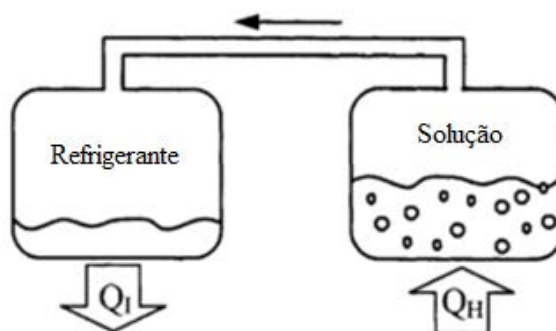
Figura 3 – Processo de Absorção



Fonte: Adaptado de Srihirin, Aphornratana e Chungpaibulpatana (2000)

O processo mencionado na Figura 3 é exotérmico, sendo necessário que a solução ceda calor para o meio ambiente, mantendo sua capacidade de absorção. Além disso, esse processo ocorre até que a solução atinja o estado de saturação. Depois que atingir esse estado, é necessário realizar a separação do líquido refrigerante do absorvente. Para que esse processo ocorra, calor é fornecido ao recipiente da direita, fazendo com que o fluido refrigerante evapore novamente. O refrigerante condensa no recipiente da direita, liberando calor para a vizinhança. O processo de separação é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Processo de Separação

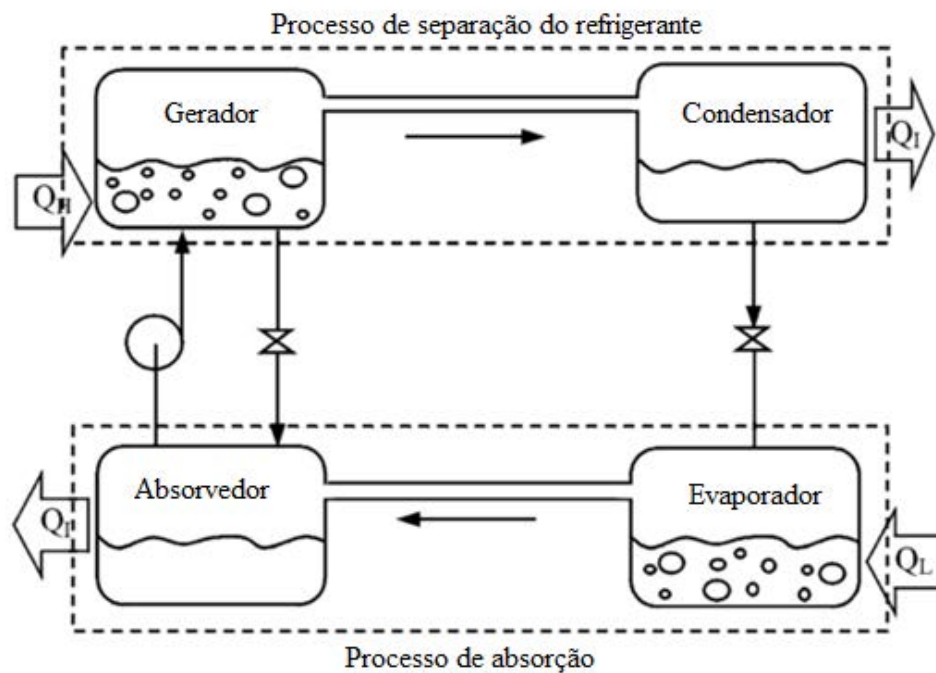


Fonte: Adaptado de Srihirin, Aphornratana e Chungpaibulpatana (2000)

No sistema de refrigeração por absorção, os processos mencionados nas Figuras 3 e 4 são acoplados de forma que a refrigeração é obtida de maneira contínua. A Figura 5 apresenta a junção desses processos. Uma bomba e uma válvula redutora de pressão são adicionados entre o gerador e o absorvedor, e também uma válvula de expansão é adicionada entre o condensador e o evaporador. A bomba é para elevar a pressão da mistura para auxiliar o processo de separação e na circulação da mistura no sistema. As válvulas são para reduzir a pressão da

mistura binária que retorna do gerador para o absorvedor após o processo de separação do refrigerante e para realizar a expansão do refrigerante que sai do condensador e vai para o evaporador.

Figura 5 – Processos de absorção e separação em um único sistema



Fonte: Adaptado de Srihirin, Aphornratana e Chungpaibulpatana (2000)

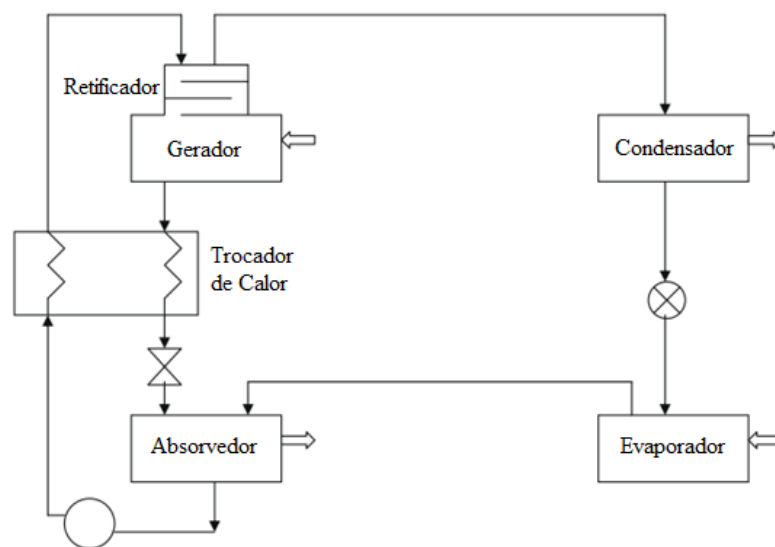
Comparando o processo completo de um SRA apresentado na Figura 5 com o SRC apresentado na Figura 1, é possível perceber que a diferença entre os dois sistemas está na substituição do compressor do SRC pelos equipamentos absorvedor, gerador, válvula redutora de pressão e bomba.

2.1.3 Sistemas de refrigeração de simples efeito

Sistemas de refrigeração por absorção de simples efeito são sistemas que possuem apenas um estágio de separação do fluido refrigerante. O sistema da Figura 5 é um sistema de simples efeito por apresentar somente um gerador. A eficiência desse sistema pode ser aumentada adicionando um trocador de calor entre o absorvedor e o gerador. Com isso, a temperatura da mistura que sai do absorvedor é pré-aquecida antes de entrar no gerador, diminuindo a carga térmica externa necessária para acionar o sistema. Para o caso do par $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, também é

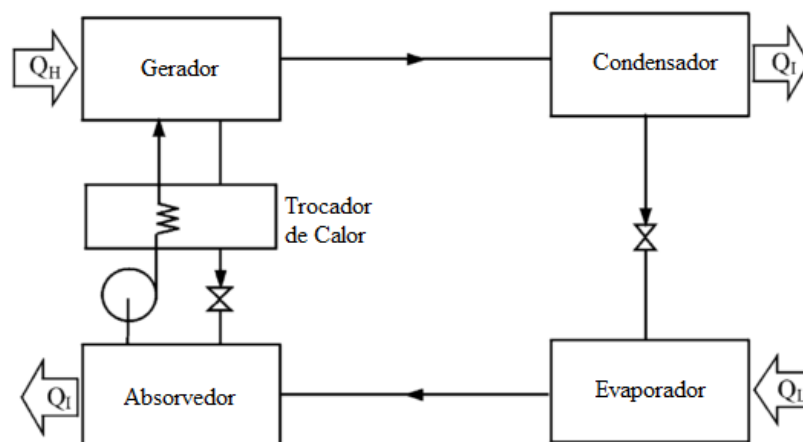
necessário adicionar o componente retificador. Como ambos os fluidos são voláteis, é comum que no processo de separação do refrigerante, a água também evapore. Para evitar que água siga para o evaporador, o retificador é adicionado na saída do gerador para que seja feito o filtro dessa água, fazendo com que ela retorne para o gerador, e conseqüentemente para o absorvedor. Para o par $\text{H}_2\text{O-LiBr}$, esse componente não é necessário. A Figura 6 apresenta um SRA de simples efeito com trocador de calor para o par $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, enquanto que a Figura 7 apresenta um SRA para o par $\text{H}_2\text{O-LiBr}$.

Figura 6 – SRA de simples efeito para a mistura $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$



Fonte: Adaptado de Manzela et al. (2010)

Figura 7 – SRA de simples efeito para a mistura $\text{H}_2\text{O-LiBr}$



Fonte: Adaptado de Srihirin, Aphornratana e Chungpaibulpatana (2000)

Os ciclos de refrigeração apresentados nas Figuras 6 e 7 ocorrem nas seguintes etapas:

1. Solução binária é bombeada do absorvedor para o gerador, passando pelo trocador de calor para ser pré-aquecida antes de entrar no gerador;
2. No gerador, a solução recebe calor para que ocorra o processo de separação do refrigerante. O refrigerante passa pelo retificador (no caso do sistema $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) e vai para o condensador, enquanto a solução restante retorna para o absorvedor;
3. O fluido refrigerante condensa no condensador e depois vai para a válvula de expansão. A pressão é reduzida na válvula, causando também redução da temperatura;
4. O fluido segue para o evaporador, onde ele evapora roubando calor da vizinhança e causando o efeito de refrigeração;
5. Na última etapa, o refrigerante retorna para o absorvedor para ser absorvido pela solução e recomeçar o ciclo.

O coeficiente de Performance (COP) desse sistema pode ser calculado pela equação 1 (WANG; WANG; FENG, 2016).

$$\text{COP} = \frac{\text{Carga térmica de refrigeração}}{\text{Energia térmica de entrada}} \quad (1)$$

Sistemas de refrigeração de simples efeito podem ter o COP de até 0,7 para sistemas funcionando com $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ e até 0,6 para sistemas com o par $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ (BALARAS et al., 2007). Além disso, tecnologias que utilizam o par $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ produzem água gelada geralmente na faixa de 5 a 8 °C, enquanto que para o par $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ essa temperatura pode chegar a até -18 °C (COSTA, 1982).

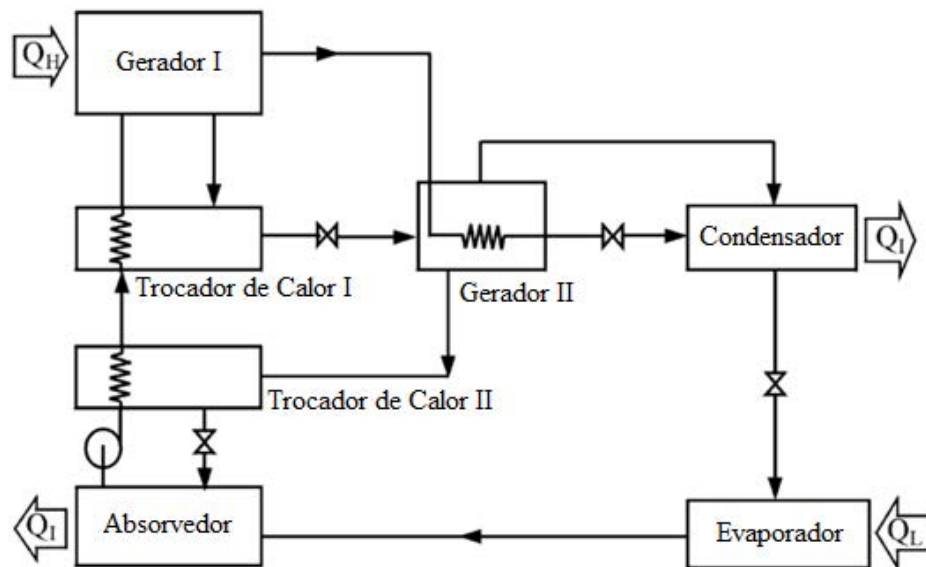
2.1.4 Sistemas de refrigeração de duplo efeito

Nos sistemas de duplo efeito a perda de calor no gerador é utilizada para alimentar um segundo gerador, obtendo um efeito extra de refrigeração e aumentando a eficiência do ciclo. Pode-se considerar o sistema de duplo efeito como sendo a junção de dois sistemas de simples efeito. O COP nesse caso pode ser calculado conforme equação 1.

No SRA de duplo efeito para o par $\text{H}_2\text{O-LiBr}$, apresentado na Figura 8, o gerador I recebe calor de fonte externa, evaporando uma quantidade de fluido refrigerante. Esse fluido, em alta temperatura, é utilizado para acionar o gerador II. A solução binária que deixa o gerador I passa

pelo trocador de calor II, pré-aquecendo a solução que está entrando no gerador I e depois vai para o gerador II, onde uma parcela extra de fluido refrigerante será separado da solução. O refrigerante de ambos os geradores se encontra no condensador, enquanto que a solução binária restante retorna para o absorvedor para iniciar o ciclo novamente.

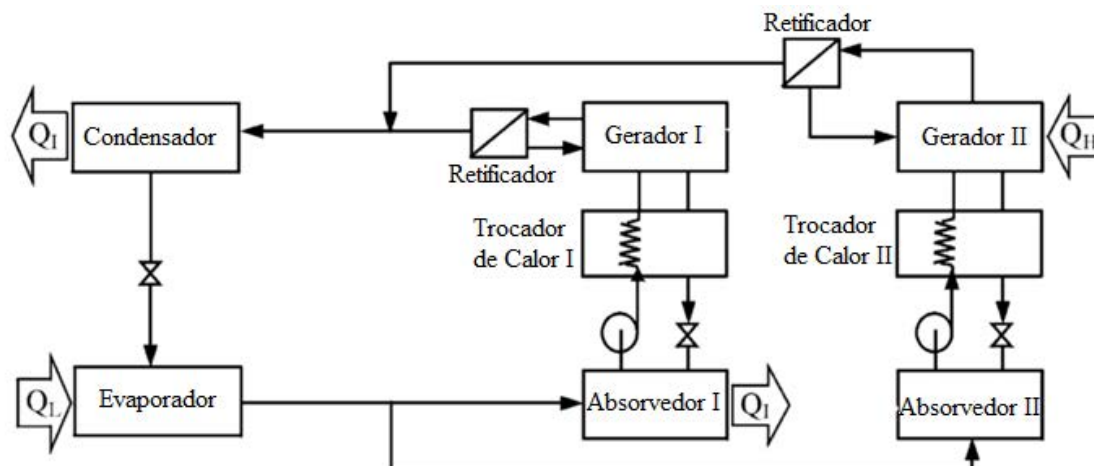
Figura 8 – SRA de duplo efeito em série ($\text{H}_2\text{O}-\text{LiBr}$)



Fonte: Adaptado de Srihirin, Aphornratana e Chungpaibulpatana (2000)

No caso apresentado na Figura 8, tem-se uma junção em série de dois SRAs de simples efeito. Há três níveis de pressão no sistema: a pressão no Gerador I (pressão máxima), a pressão no Gerador II/ Condensador (pressão intermediária) e a pressão no evaporador/ absorvedor (pressão mínima). Para o par $\text{NH}_3-\text{H}_2\text{O}$, a pressão no sistema precisa ser maior devido à pressão de condensação da amônia, e no caso da junção em série, a pressão máxima seria muito alta e o equipamento seria tecnologicamente inviável. Devido a essa questão, o SRA de duplo efeito com fluxo paralelo, apresentado na Figura 9, é utilizado para o par $\text{NH}_3-\text{H}_2\text{O}$.

Figura 9 – SRA de duplo efeito em paralelo ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$)



Fonte: Adaptado de Srihirin; Aphornratana; Chungpaibulpatana (2000)

O sistema da Figura 9 é considerado um sistema de duplo efeito paralelo por ser constituído de dois ciclos independentes. Conforme mencionado anteriormente, para o par $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ é necessário adicionar retificadores nas saídas dos geradores para filtrar água que evapora junto com o fluido refrigerante. Nesse ciclo, o gerador II é alimentado por fonte externa de calor, enquanto que o gerador I é alimentado com calor proveniente do absorvedor II.

Segundo Balaras et al. (2007) sistemas de refrigeração por absorção de duplo efeito podem atingir valores de COP na faixa de 1,0 a 1,2. Além disso, a temperatura da água refrigerada em sistemas de duplo efeito é a mesma para sistemas de simples efeito.

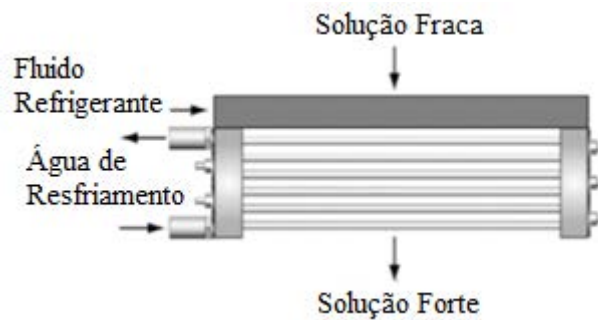
2.1.5 Componentes de um sistema de refrigeração por absorção

2.1.5.1 Absorvedor

O absorvedor é o equipamento responsável por coletar o fluido refrigerante que vem do evaporador, coletar a solução binária (fraca) que vem do gerador e promover a absorção do refrigerante pelo fluido absorvedor, tornando a mistura uma solução forte.

Para isso, o absorvedor é composto de um grupo de tubos que transportam água de resfriamento. A solução binária fraca é borrifada sobre os tubos, cedendo calor para a água de resfriamento, enquanto o refrigerante vaporizado é absorvido pela solução (WANG, 2000). A Figura 10 apresenta o esquema de um absorvedor.

Figura 10 – Esquema de um Absorvedor



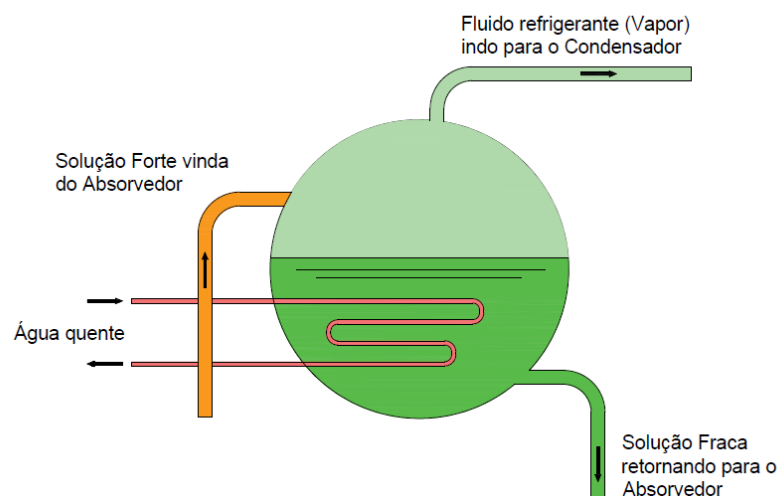
Fonte: Adaptado de Lee et al. (2012)

2.1.5.2 Gerador

Gerador é o componente do sistema no qual ocorre a transferência de calor da fonte de energia utilizada para alimentar o sistema de refrigeração por absorção para a solução binária utilizada. Nesse estudo, a fonte de energia utilizada é água quente produzida a partir da energia solar.

O gerador funciona então como um trocador de calor que transfere energia da água quente para a solução binária, com o objetivo de aquecer a mistura, fazendo com que o fluido refrigerante evapore e se separe da solução. O fluido, após esse processo, é enviado para o condensador, enquanto que a solução que permaneceu no gerador volta para o absorvedor. A Figura 11 apresenta o esquema de um gerador.

Figura 11 – Esquema de um Gerador

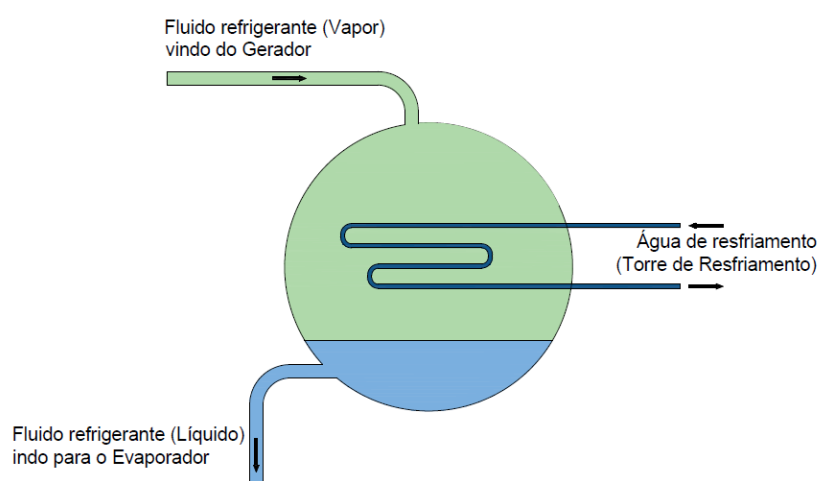


Fonte: Autoria Própria

2.1.5.3 Condensador

Condensador é o trocador de calor responsável por retirar o calor do fluido refrigerante, que foi aquecido no gerador durante o processo de separação da mistura binária. Para essa função, o condensador recebe água da torre de resfriamento, geralmente a uma temperatura em torno de 30 °C. A água da torre de resfriamento é transportada na parte interna dos tubos do condensador. Na parte externa dos tubos escoam o refrigerante vaporizado, que no contato com os tubos cede calor para a água de resfriamento e então condensa. A Figura 12 apresenta o esquema de um condensador.

Figura 12 – Esquema de um Condensador



Fonte: Autoria Própria

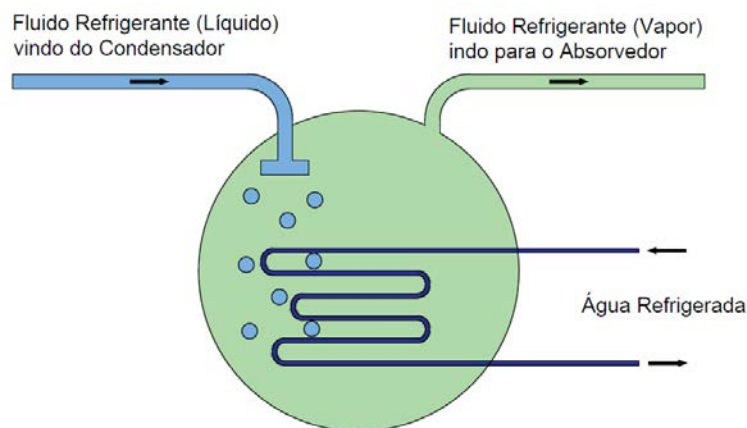
2.1.5.4 Evaporador

O evaporador é o componente do ciclo de refrigeração responsável por transferir a energia térmica do ambiente até o fluido refrigerante a baixa temperatura. Esse dispositivo recebe o fluido refrigerante vindo da válvula de expansão a baixa pressão e temperatura e o vaporiza a partir da absorção de calor de alguma substância vinda do meio ambiente. Essa substância pode ser água, ar ou outro fluido.

Um evaporador consiste de um conjunto de tubos que transportam o fluido que está sendo refrigerado. O fluido refrigerante é borrifado sobre os tubos, absorvendo calor do fluido interno ao tubo e vaporizando-se. Durante esse processo, vapor d'água presente no ar é

condensado e precisa ser drenado para evitar perda de eficiência do sistema (WANG, 2000). A Figura 13 apresenta o esquema de um evaporador.

Figura 13 – Esquema de um Evaporador



Fonte: Autoria Própria

2.1.5.5 Válvulas de expansão e redutoras de pressão

Válvulas de expansão e válvulas redutoras de pressão são usadas em sistemas de refrigeração por absorção com a função de reduzir a pressão do fluido refrigerante e da solução binária, respectivamente. Essas válvulas possuem princípios de funcionamento similares, onde a redução de pressão do sistema é obtida através da perda de carga imposta no sistema por esses componentes.

Válvulas de expansão têm a função de expandir o fluido refrigerante, reduzindo sua pressão da pressão de condensação para a pressão de vaporização do ciclo. Essa redução de pressão torna possível que o fluido refrigerante possa evaporar a baixa temperatura no evaporador do sistema (COSTA, 1982).

Válvulas redutoras de pressão têm a função de reduzir a pressão da solução binária fraca que, após o processo de separação da mistura, retorna do gerador para o absorvedor. Esse processo permite que a solução consiga ter maior capacidade de absorção do refrigerante vaporizado vindo do evaporador.

2.1.5.6 Recuperador de calor

O recuperador de calor é um trocador de calor instalado entre o gerador e o absorvedor. A função desse componente é a de utilizar o calor da solução fraca que está retornando do gerador para pré-aquecer a solução concentrada que vem do absorvedor (SRIKHIRIN; APHORN RATANA; CHUNGPAIBULPATANA, 2000).

Esse processo é benéfico para o gerador, pois como a solução é pré-aquecida antes de entrar no processo de separação, a quantidade de calor necessária a ser fornecida pela fonte térmica é menor do que no caso de um sistema sem o recuperador de calor. Esse processo é também benéfico para o absorvedor por resfriar a solução fraca que retorna do gerador, fazendo com que seja necessário rejeitar menos calor para o ambiente. Segundo Sriksirin, Aphornratana e Chungpaibulpatana (2000) um sistema com recuperador de calor pode ser até 60% mais eficiente que um sistema sem esse equipamento.

2.1.5.7 Retificador

Para a solução binária formada pelo par $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, é necessário utilizar o componente chamado retificador. Isso ocorre pois tanto a água quanto a amônia são soluções voláteis e, quando a solução recebe calor no gerador, para o processo de separação do refrigerante (amônia), uma parcela da água também evapora junto.

O papel do retificador é o de filtrar essa água que evapora junto com o refrigerante, retornando-a para o absorvedor, junto com a solução fraca. Sem esse componente no sistema, o vapor d'água seria direcionado ao condensador, e posteriormente direcionado ao evaporador, junto com o refrigerante, e começaria a acumular ali. Esse processo implicaria na redução da eficiência do sistema (SRIKHIRIN; APHORN RATANA; CHUNGPAIBULPATANA, 2000).

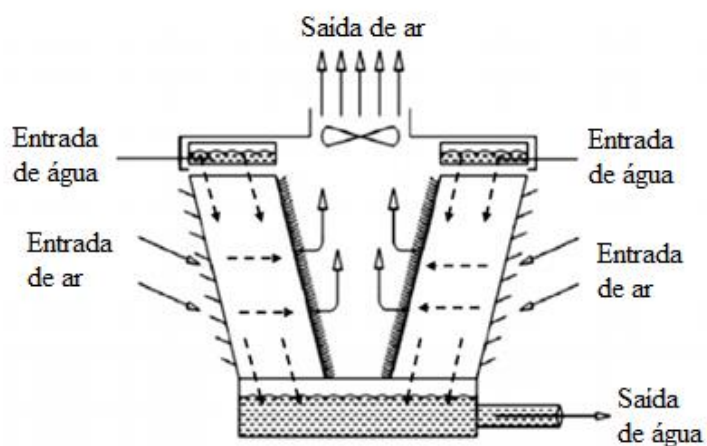
2.1.5.8 Torre de Resfriamento

No sistema de refrigeração por absorção, os componentes absorvedor e condensador passam por processos exotérmicos, onde há a necessidade de rejeitar calor para o meio ambiente. Para que isso seja possível, torres de resfriamento são utilizadas para fazer a retirada de calor do fluido de trabalho e transferir para a atmosfera.

O princípio de funcionamento desses equipamentos está no resfriamento evaporativo, onde a água quente vinda do condensador ou absorvedor é resfriada devido à transferência de

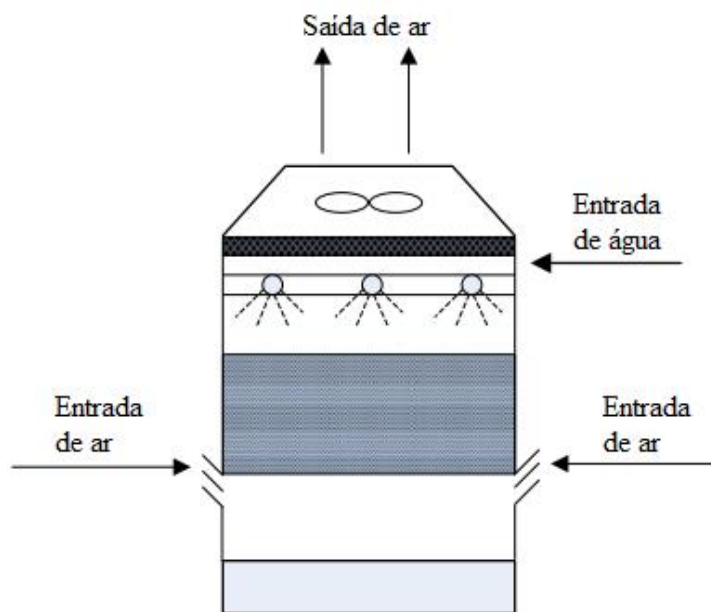
calor e de massa durante contato com o ar (NAIK; MUTHUKUMAR, 2017). As torres de resfriamento podem ser de fluxo cruzado ou de contracorrente. A Figura 14 apresenta um sistema de fluxo cruzado, enquanto a Figura 15 apresenta um sistema de fluxo contracorrente.

Figura 14 – Esquema de torre de resfriamento de fluxo cruzado



Fonte: Adaptado de Naik e Muthukumar (2017)

Figura 15 – Esquema de torre de resfriamento de fluxo contracorrente



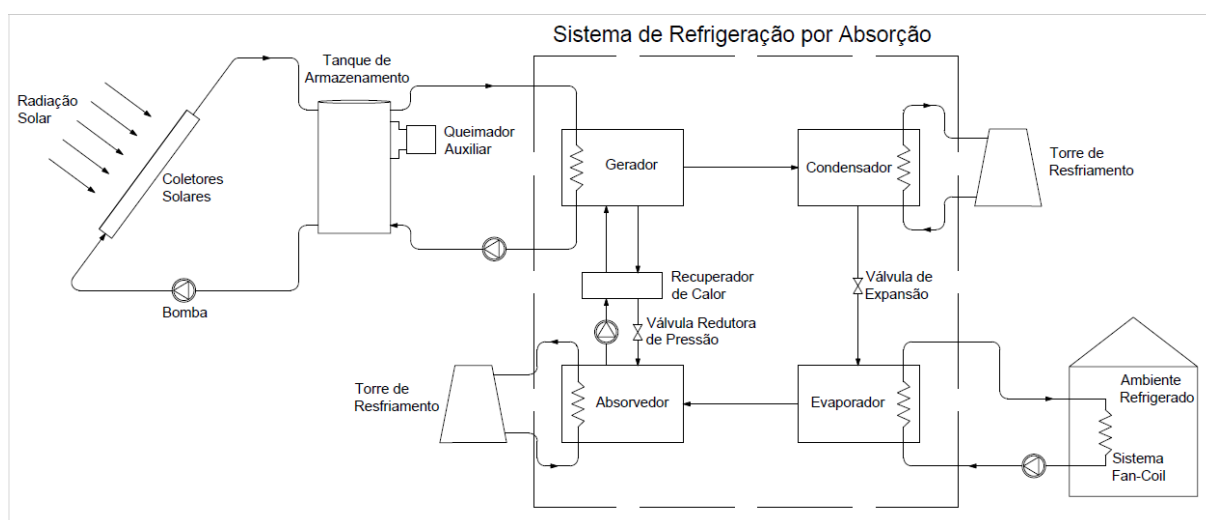
Fonte: Adaptado de Guo et al. (2017)

2.2 REFRIGERAÇÃO SOLAR

O termo refrigeração solar está relacionado a tecnologias que realizam a refrigeração de um determinado ambiente a partir da utilização de energia solar como fonte principal de energia de acionamento do sistema. Para Noro e Lazzarin (2014) esses sistemas podem ser divididos em dois grupos principais. No primeiro caso tem-se placas fotovoltaicas que podem ser utilizadas para gerar energia elétrica e acionar um equipamento de refrigeração por compressão. No segundo caso tem-se coletores solares que coletam a radiação solar e transferem calor para a água que é utilizada para acionar sistemas de refrigeração por absorção e adsorção.

Nesse projeto será estudado apenas sistemas de refrigeração solar constituído por coletores solares e sistemas de refrigeração por absorção. A Figura 16 apresenta o exemplo de um sistema de refrigeração solar completo.

Figura 16 – Sistema de Refrigeração Solar



Fonte: Autoria Própria

Além dos componentes do sistema de refrigeração por absorção, apresentados no tópico 2.1.5, um sistema de refrigeração solar completo também inclui os seguintes componentes:

- Coletores solares;
- Tanque de armazenamento;
- Queimador auxiliar;
- Sistema *Fan-Coil*.

2.2.1 Coletores Solares

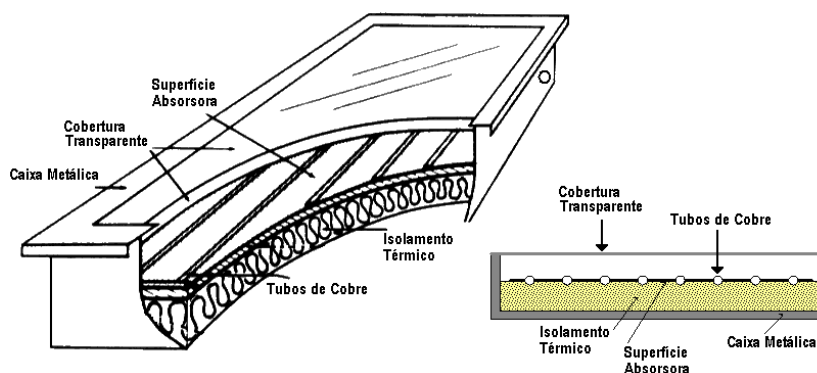
Um coletor solar é um tipo de trocador de calor que absorve a radiação solar incidente, transforma essa radiação em calor e transfere esse calor para um fluido de trabalho, geralmente ar, água ou fluidos térmicos, que circula através do coletor solar. A energia transferida para o fluido de trabalho pode ser armazenada em tanques ou ser utilizada diretamente em sistemas de aquecimento ou para acionar sistemas de refrigeração (KALOGIROU, 2009).

Coletores solares podem ser classificados principalmente em dois tipos: coletores concentrados e coletores não-concentrados (planos e tubos evacuados). Coletores concentrados utilizam superfícies cônicas que interceptam os raios solares e os direcionam para um ponto focal, onde fica localizada a superfície absorvedora do coletor. Coletores não-concentrados são coletores em que a área de interceptação dos raios solares é a mesma área de absorção da radiação.

2.2.1.1 Coletor Solar Plano

A radiação solar incidente sobre um coletor solar plano atravessa uma cobertura transparente que permite a entrada da radiação, mas bloqueia a saída da mesma. Uma placa absorvedora absorve essa radiação, transformando-a em calor e a transferindo para o fluido de trabalho que circula nos tubos de cobre do sistema. A parte inferior e as laterais da placa absorvedora são isoladas com isolantes térmicos a fim de se evitar perdas de calor por condução e convecção. Todos esses componentes do sistema são instalados dentro de uma placa metálica. A Figura 17 apresenta o esquema de um coletor solar plano.

Figura 17 – Coletor Solar Plano



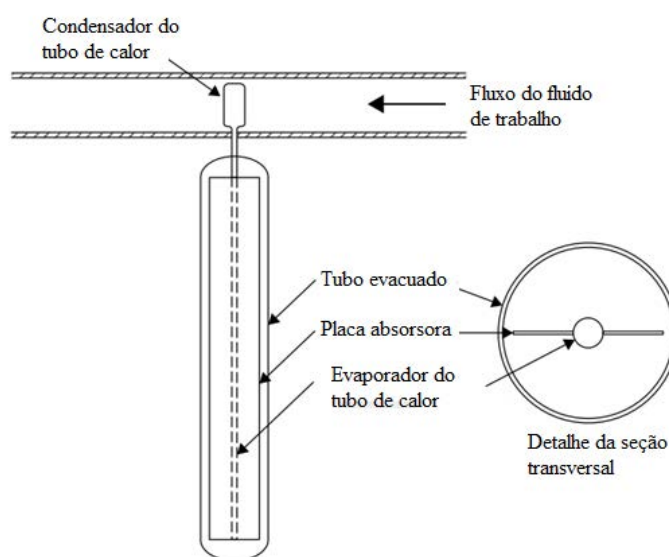
Fonte: Aqua Quente Solar (2017)

Coletores solares planos atingem temperaturas entre 30 e 80 °C, sendo que com 80 °C é possível acionar sistemas de refrigeração por absorção de simples efeito. As placas planas precisam ser instaladas orientadas diretamente para o equador, isso é, apontando para o norte no caso de a localização ser no hemisfério sul ou apontando para o sul no caso de a localização ser no hemisfério norte. Para aplicações de refrigeração, o ângulo de instalação de uma placa plana pode ser calculado subtraindo 10° da latitude da localização considerada (KALOGIROU, 2009).

2.2.1.2 Coletor Solar de Tubos Evacuados

A Figura 18 apresenta o esquema de um coletor solar de tubo evacuado. O principal componente desse tipo de coletor é um trocador de calor chamado de tubulação de calor, ou *heat pipe*, em inglês. Esse componente é um tubo evacuado de um material de alta condutividade térmica e possui uma pequena quantidade de fluido (geralmente água e etanol ou metanol) na parte interna. Quando há a incidência de calor, o fluido evapora no evaporador do *heat pipe*, causando um efeito de resfriamento daquela região. O vapor então se direciona para a ponta do tubo, chamada de condensador, e condensa, liberando calor para a vizinhança. Esse calor é absorvido por um fluido externo a partir do contato com o condensador do *heat pipe* (KALOGIROU, 2009).

Figura 18 – Esquema de um coletor solar de tubos evacuados



Fonte: Adaptado de Kalogirou (2009)

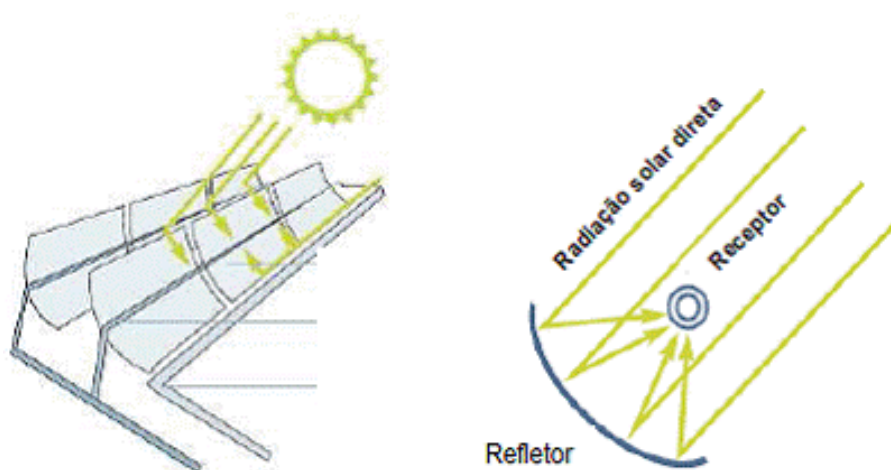
Envolvendo a tubulação de calor tem-se uma placa absorvedora que é responsável por absorver a radiação solar, transformá-la em calor e transferi-la para o *heat pipe*. Além disso, esse conjunto é instalado internamente a uma tubulação de parede dupla de vidro, sendo o espaço interno entre as paredes evacuado. Essa configuração faz com que esse coletor solar tenha menos perda de calor por processos de condução e convecção, quando comparado ao coletor solar plano.

Coletores solares de tubos evacuados atingem temperaturas entre 50 e 200 °C e podem ser utilizados para acionar sistemas de refrigeração por absorção de simples efeito e de duplo efeito (KALOGIROU, 2009; NORO; LAZZARIN, 2014).

2.2.1.3 Coletor Solar Parabólico

Um coletor solar parabólico utiliza uma placa refletora no formato parabólico (côncavo) que direciona os raios solares para um ponto focal, aumentando assim a radiação absorvida por esse tipo de equipamento. No ponto focal tem-se uma tubulação de metal que absorve a radiação solar, transferindo o calor para o fluido de trabalho. Essa tubulação é envolvida por uma placa de vidro para evitar perdas de calor. A Figura 19 apresenta o esquema de um coletor solar parabólico enquanto que a Figura 20 apresenta uma planta real instalada com coletores parabólicos.

Figura 19 – Esquema de um Coletor Solar Parabólico



Fonte: Malagueta (2012)

Figura 20 – Planta Solar com Coletores Solares Parabólicos



Fonte: Malagueta (2012)

Coletores solares parabólicos utilizam um sistema de rastreamento do sol que direciona o coletor durante o dia para intensificar a coleta de radiação solar. Para Kalogirou (2009) esses coletores atingem temperaturas entre 50 e 400 °C e podem ser utilizados para acionar sistemas de refrigeração por absorção de duplo efeito.

2.2.2 Tanque de Armazenamento

Tanques de armazenamento são equipamentos térmicos utilizados para armazenar água quente, proveniente dos coletores solares, ou água refrigerada no processo de refrigeração por absorção.

No caso de armazenamento de água quente, a importância da utilização desse equipamento está em manter uma temperatura constante da água, que é utilizada para alimentar o SRA. No caso de água refrigerada, com a utilização de um tanque de armazenamento é possível garantir a refrigeração do ambiente por períodos maiores, mesmo após a irradiação solar se tornar insuficiente para alimentar o sistema.

2.2.3 Queimador Auxiliar

Queimadores auxiliares são elementos que podem fornecer calor em casos onde a radiação solar não é suficiente para se atingir a temperatura desejada no fluido de trabalho. Esse calor extra é obtido através da queima de combustíveis como, por exemplo, gás natural, óleo diesel, gás liquefeito do petróleo, entre outros.

2.2.4 Sistema *Fan-Coil*

O sistema *Fan-Coil* é uma unidade de climatização que utiliza água gelada para refrigerar o ar do ambiente desejado. Uma unidade *Fan-Coil* consiste de um trocador de calor, geralmente do tipo serpentina, e de um ventilador. Os ventiladores auxiliam na circulação do ar, que entra em contato com a serpentina e é refrigerado. A Figura 21 apresenta um equipamento do tipo *Fan-Coil* da fabricante Carrier.

Figura 21 – Unidade *Fan-Coil* da empresa Carrier



Fonte: Carrier (2017)

3 REVISÃO DA LITERATURA

Diversos trabalhos sobre refrigeração solar têm sido divulgados por diversos autores que buscam estudar a viabilidade desses sistemas, visando principalmente a substituição de tecnologias que utilizam energias não renováveis por outras que utilizam energias renováveis, como a solar. Esses estudos têm demonstrado a viabilidade técnica desses sistemas de refrigeração, porém, ainda com grandes desafios quanto à viabilidade econômica dessa tecnologia.

Montagnino (2016) introduziu os conceitos de sistemas de refrigeração solar, estudando como a utilização desses sistemas têm crescido nos últimos anos, e discutiu tendências futuras de crescimento desse mercado. O autor mencionou que, para sistemas de refrigeração por absorção acionados por energia solar, é comum a utilização de coletores solares plano e de tubo evacuado devido ao custo-benefício desses equipamentos. O autor também mencionou que sistemas de refrigeração de simples efeito são geralmente acionados por temperaturas entre 80 e 100 °C, por isso são preferidos para esse tipo de aplicação. Como a temperatura do coletor varia com a irradiação solar, tanques de armazenamento de água quente são utilizados nesses sistemas para que a temperatura de entrada no *chiller* não sofra grandes variações, mantendo assim a eficiência do sistema.

Syed et al. (2005) reportaram um estudo experimental realizado na Espanha, na cidade de Madrid, onde uma planta solar de 49,9 m² de coletores solares planos alimentava um sistema de refrigeração por absorção de simples efeito utilizando o par H₂O-LiBr, com capacidade de refrigeração de 35 kW. O sistema também contava com um tanque de armazenamento de água quente de 2000 L enquanto que a água refrigerada pelo SRA era enviada para um sistema *Fan-Coil* responsável por fazer a refrigeração do ambiente desejado. O autor reportou que a capacidade máxima de refrigeração obtida foi de 7,5 kW, cerca de 21,4% da capacidade nominal do *chiller* de absorção. O autor também reportou que o COP médio do sistema de refrigeração foi de 0,42 e concluiu que esse tipo de tecnologia possui desempenho melhor em climas mais secos e quentes.

Praene et al. (2011) desenvolveram um estudo de um sistema de refrigeração solar instalado em Reunião, um departamento ultramarino Francês localizado no oceano Índico. O sistema utilizava um *chiller* de absorção de simples efeito, de 30 kW de capacidade de refrigeração, funcionando com par H₂O-LiBr. Simulações foram realizadas onde esse sistema era alimentado por coletores solares planos, de tubo evacuado e parabólicos. Coletores solares de tubo evacuado teriam sido inicialmente escolhidos devido ao seu custo benefício e facilidade

de instalação, porém, a decisão final foi pelos coletores planos, por serem economicamente mais viáveis que coletores de tubo evacuado. O sistema contava ainda com um tanque de armazenamento de água quente de 1500 L e um tanque de armazenamento de água gelada de 1000 L. O autor reportou que, depois do meio dia, a capacidade do sistema caía para 17 kW. Além disso, o autor concluiu que 20 kW da capacidade de refrigeração seria suficiente para garantir conforto térmico no ambiente estudado, por isso todo o sistema poderia ter sido planejado considerando essa carga térmica, o que elevaria a eficiência do sistema.

Ortiz et al. (2010) modelaram um sistema de refrigeração por absorção de 70 kW de capacidade de refrigeração para auxiliar na demanda de refrigeração de um prédio estudantil de 7000 m², localizado na cidade de Albuquerque, Novo Mexico – Estados Unidos. Esse sistema de refrigeração era alimentado por uma planta de coletores solares planos de 124 m² e uma planta de coletores solares de tubo evacuado de 108 m². A princípio a planta solar conteria somente coletores de tubo evacuado, mas coletores planos também foram utilizados por estarem disponíveis devido a outros sistemas antigos que deixaram de funcionar. O sistema também utilizava tanques de armazenamento de água quente e gelada e o autor reportou que, com esse sistema de refrigeração solar, foi possível reduzir a potência necessária no sistema de compressão do prédio entre 33% a 43%.

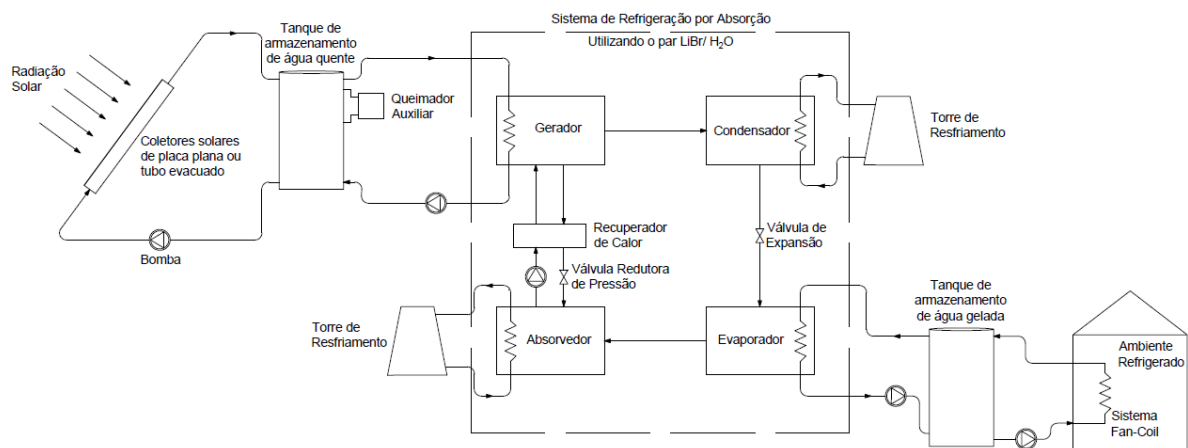
Agyenim, Knight e Rhodes (2010) estudaram um sistema de refrigeração solar com escala doméstica. O sistema estudado era constituído por 12 m² de coletores solares de tubo evacuado que alimentava um sistema de refrigeração por absorção com o par H₂O-LiBr e 4,5 kW de capacidade de refrigeração. Além disso, o sistema possuía um tanque de armazenamento de água gelada de 1000 L. O autor reportou que o COP médio do sistema foi de 0,58 enquanto que a temperatura ambiente atingida foi de 24 °C. O autor concluiu que o COP do sistema pode ser melhorado adicionando um tanque de armazenamento de água quente.

Pongtornkulpanich et al. (2008) projetaram um sistema de refrigeração solar na Tailândia, com 35 kW de capacidade de refrigeração, operando com um sistema de absorção utilizando o par H₂O-LiBr. O sistema era alimentado por 72 m² de coletores solares de tubo evacuado, que conseguiam fornecer 81% da energia necessária para alimentar o SRA. Os 19% restantes de energia era fornecida por um queimador auxiliar. O sistema possuía ainda um tanque de armazenamento de água quente de 400 L e de água gelada de 200 L. O autor realizou uma análise econômica e concluiu que esse sistema ainda é economicamente inviável quando comparado com sistemas de refrigeração por compressão.

A partir da análise dos trabalhos estudados, esse projeto tem como objetivo simular um sistema de refrigeração por absorção utilizando o par H₂O-LiBr, para conforto térmico,

alimentado por coletores solares de placas planas ou de tubos evacuados. O sistema também irá conter um tanque de armazenamento de água quente, visando estabilizar a temperatura de entrada no SRA, e um tanque de armazenamento de água gelada, visando manter a capacidade de refrigeração por um tempo prolongado, mesmo após o SRA parar de funcionar devido à falta de energia térmica. O sistema também contará com um queimador auxiliar para suprir possíveis déficits de energia térmica e por fim, um sistema *Fan-Coil* fará a refrigeração do ambiente desejado. Os parâmetros dos equipamentos serão avaliados durante a simulação para verificar o real impacto de cada um deles no sistema. A Figura 22 apresenta o sistema que será inicialmente estudado.

Figura 22 – Sistema de Refrigeração Solar estudado nesse trabalho



Fonte: Autoria Própria

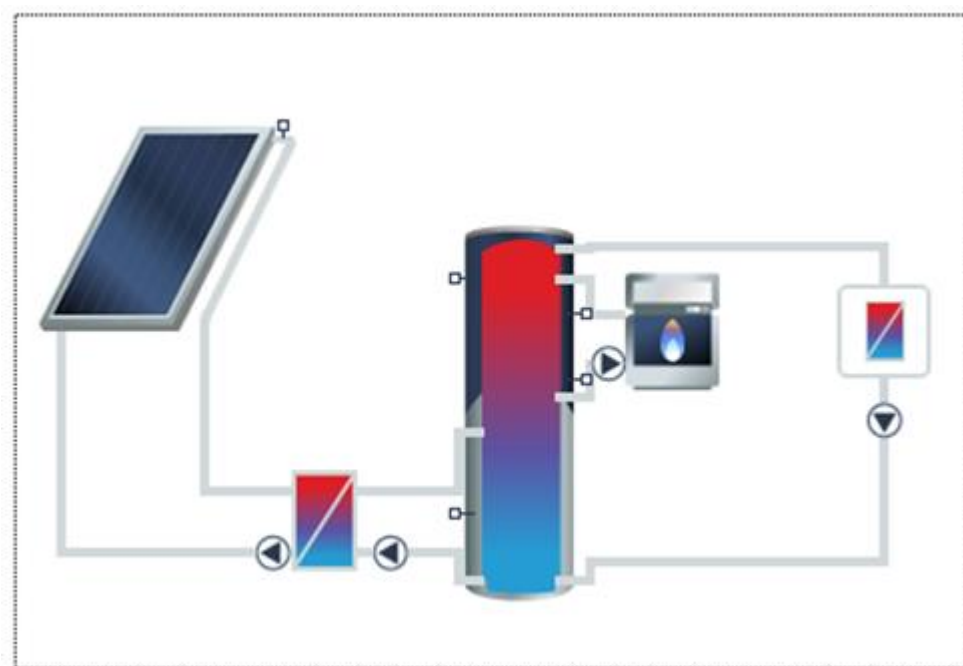
4 MATERIAL E MÉTODO

Para realizar a avaliação técnica de um sistema de refrigeração solar foi considerado nesse trabalho a carga térmica de refrigeração do auditório do prédio InovEE da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Atualmente esse ambiente é refrigerado utilizando dois equipamentos de refrigeração por compressão com 40 kW de capacidade de refrigeração cada um. Por isso, considerou-se uma carga térmica de 80 kW como parâmetro para o projeto do sistema solar. Não foram consideradas as características físicas e térmicas do prédio como, por exemplo, comprimento e largura do auditório, espessura das paredes e perdas de calor. Foi considerada apenas a carga térmica de refrigeração de 80 kW.

Além disso, foram considerados dados de temperatura ambiente e radiação solar para a cidade de Guaratinguetá-SP, onde o prédio está localizado. Esses dados são obtidos a partir de *softwares* de simulação de sistemas solares, que dispõem de banco de dados contendo informações sobre o clima de diversos locais.

Para realizar a simulação do sistema definido na Figura 22, utilizando a carga térmica conhecida e local do projeto como sendo Guaratinguetá, alguns *softwares* que possuem licença gratuita, versões de teste ou licença de estudante foram testados. A primeira tentativa foi com o *software* Homer Energy, porém, foi verificado que essa ferramenta é mais voltada para sistemas fotovoltaicos e não atendia à demanda desse projeto. Foi testada também a versão gratuita do *software* TRNSYS, um dos mais famosos para simulação de sistemas solares. O TRNSYS possui diversas ferramentas para simular o sistema da Figura 22, porém, a versão gratuita permite utilizar apenas cinco componentes, incluindo coletores, tanques, e outros componentes, o que tornou inviável a simulação do sistema nessa ferramenta. O *software* TSOL também foi testado. Essa ferramenta não possui sistemas de refrigeração por absorção, mas é possível projetar uma planta solar para alimentar um processo, sendo o processo o que simularia a carga necessária para alimentar o SRA. A Figura 23 apresenta o sistema testado no TSOL.

Figura 23 – Sistema testado no *software* TSOL

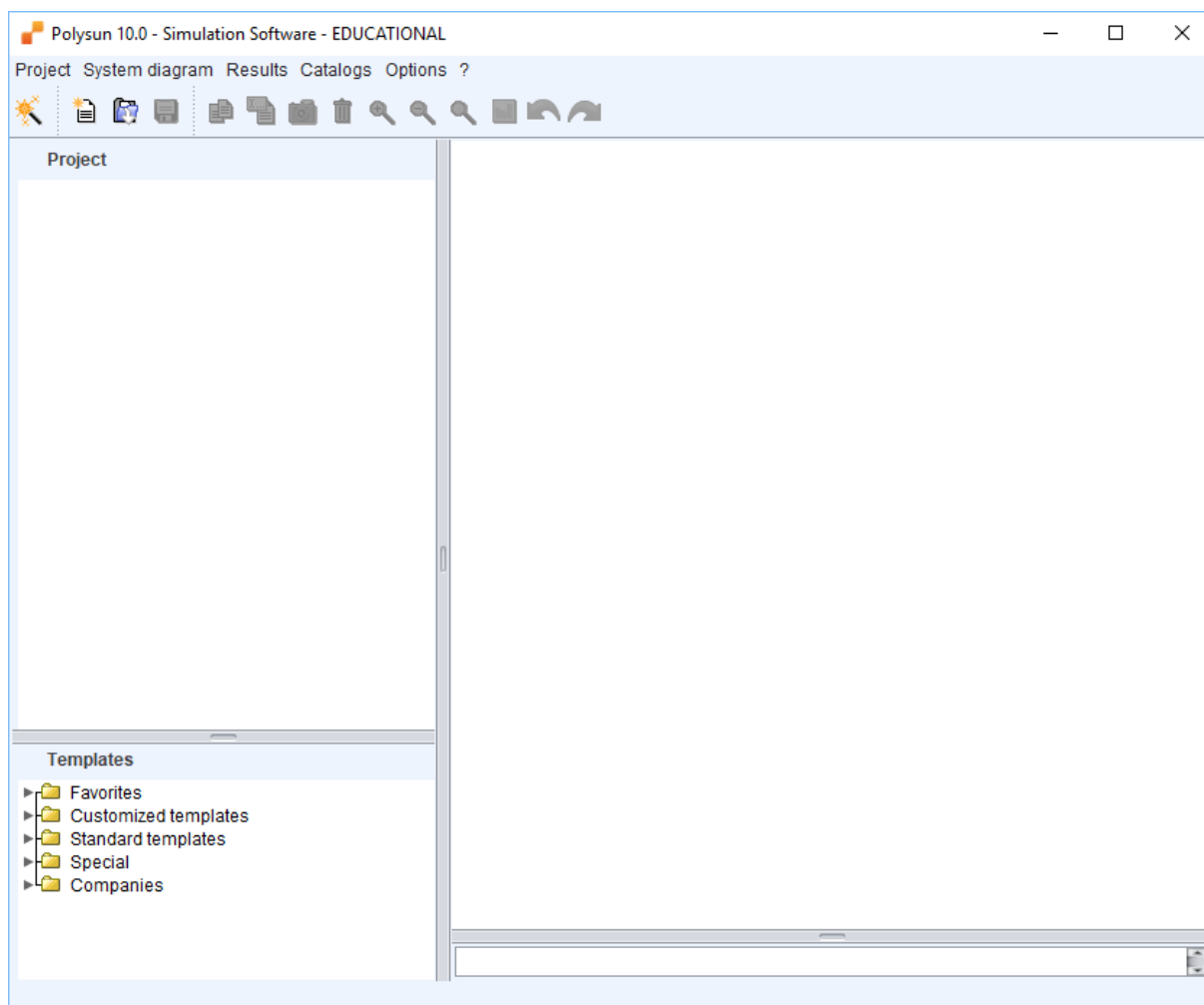


Fonte: *Print screen do software TSOL*

O modelo da Figura 23 permitiria simular os coletores solares e o tanque de armazenamento de água quente, porém, não foi possível ajustar a demanda no *software* de acordo com a necessidade de refrigeração do caso estudado. Isso é devido ao *software* TSOL ser focado em aplicações residenciais, com fornecimento de água quente.

O último *software* testado foi o Polysun, da empresa Vela Solaris. O Polysun é um *software* de simulação de sistemas que utilizam energias renováveis. Essa ferramenta contém diversos tipos de equipamentos, incluindo *chillers* de absorção, tanques de armazenamento e coletores solares. Para a utilização desse *software* uma licença de estudante foi solicitada a empresa, que liberou uma conta 100% gratuita para o desenvolvimento desse projeto. A Figura 24 apresenta a tela principal do Polysun.

Figura 24 – Tela inicial do Polysun



Fonte: *Print screen* do *software* Polysun

Ao criar um novo projeto no Polysun, o primeiro dado de entrada no sistema é o local onde o projeto será executado. Essa entrada no *software* pode ser feita escolhendo um local de um banco de dados, entrando com um arquivo externo com dados sobre o clima local, ou escolhendo o local no mapa. A Figura 25 apresenta a tela de definição do local da planta.

Figura 25 – Definindo o local do projeto no Polysun

Project Cooling System - Site data

Location of the system

☒ From database
 ☐ From map

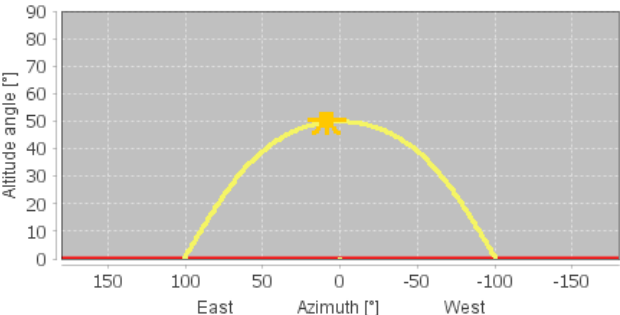
Continent	Country	Location of the system	Daylight saving time	Site description
Europe	Switzerland	Aadorf	ignore	Clear

Latitude [°]	Longitude [°]	Elevation [m]	Time zone [h]	Standard outdoor temperatur...
47.49	8.91	528	1	-11

Weather data

☒ from location (according to Meteonorm 7.2)
 ☐ Profile
 ☐ Webservice
☐ from location (according to Meteonorm 6)
 ☐ External monthly values

Horizon



Altitude angle [°]

Azimuth [°]

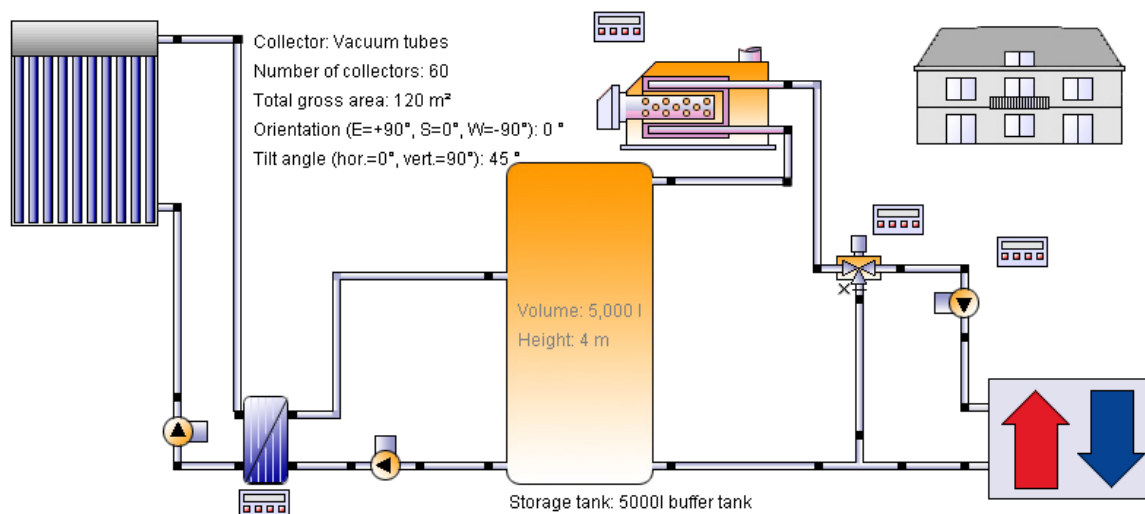
Edit

Fonte: *Print screen* do software Polysun

Após a definição do local, o sistema de refrigeração solar pode ser configurado no *software*. Para isso, o Polysun disponibiliza *templates* dos tipos de sistemas mais utilizados para que o usuário possa editá-los, sem precisar criar um sistema desde o início. A Figura 26 e a Figura 27 apresentam *templates* de sistemas solares que serão utilizados como base para se alcançar o modelo da Figura 22. O sistema da Figura 26 funciona principalmente para obter água quente de processo e será utilizado como base para projetar os coletores solares. Após isso, o sistema de refrigeração completo, apresentado na Figura 27, será utilizado como base para modelar a parte do SRA.

Figura 26 – Template disponível no Polysun

Project Cooling System - System diagram 58a: Process heat (solar thermal)

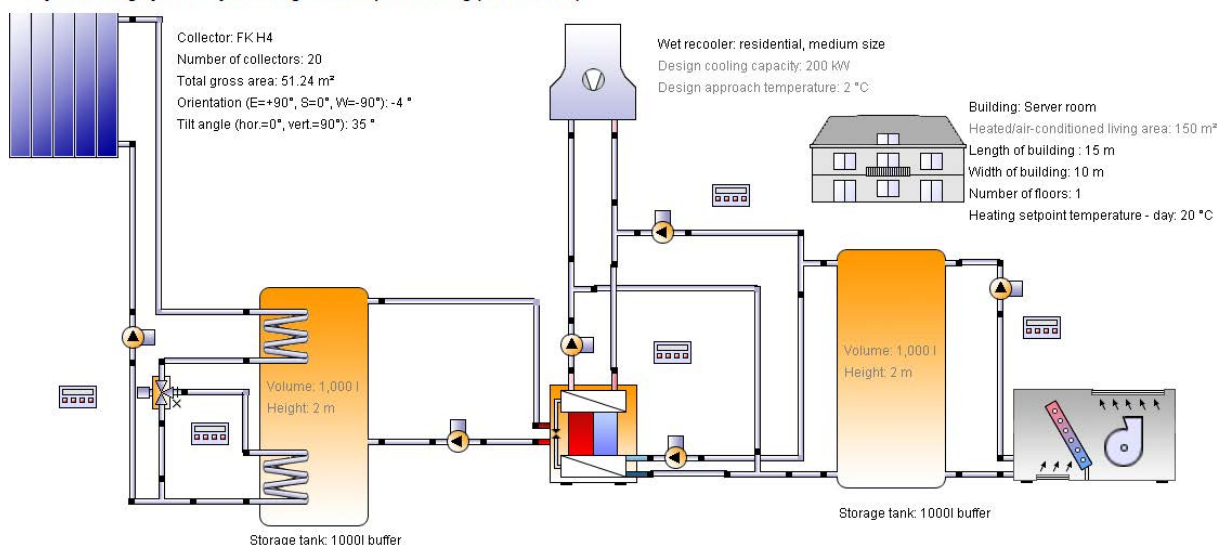


Fonte: Print screen do software Polysun

Figura 27 – Template disponível no Polysun

Project Cooling System - System diagram 70f: Space cooling (server room)

vela solaris



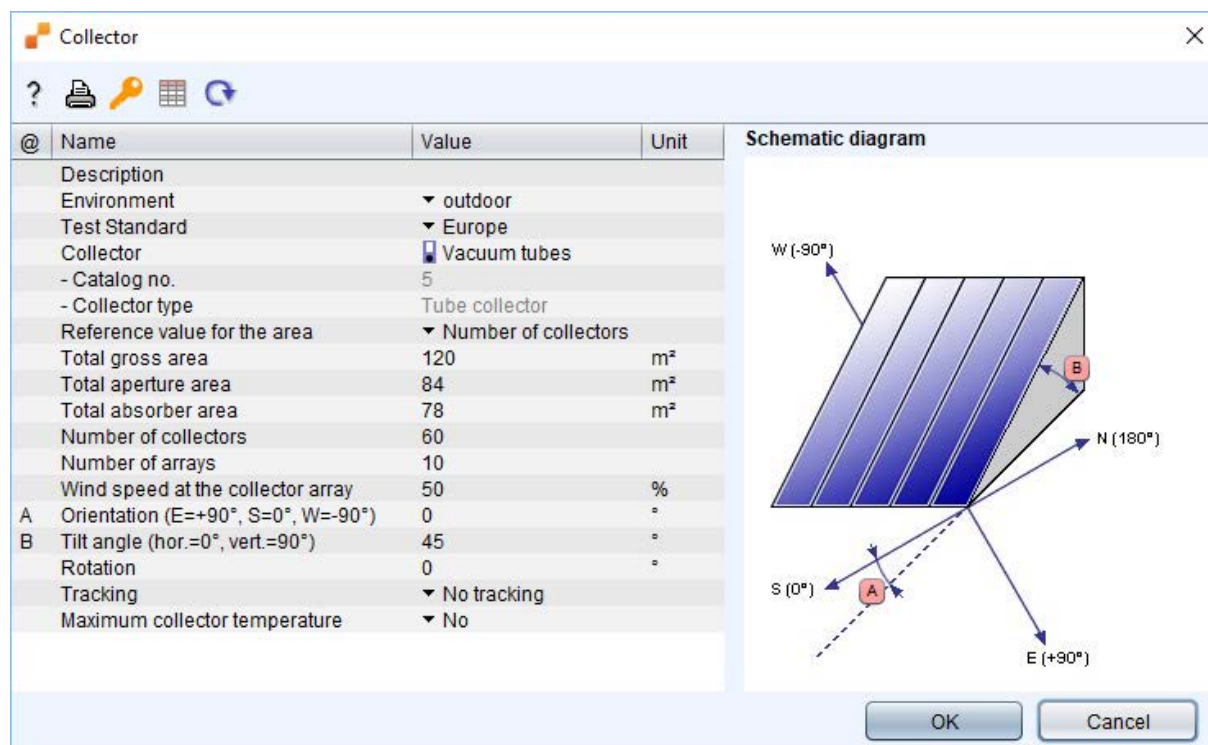
Fonte: Print screen do software Polysun

Para utilizar os *templates* da Figura 26 e da Figura 27 é necessário ajustar os parâmetros dos equipamentos para que eles se tornem mais próximos do desejado. Por exemplo, o SRA do *template* da Figura 27 é configurado para a potência de 11 kW, que pode ser alterado para 80 kW, que é a capacidade de refrigeração que esse projeto objetiva alcançar.

Para alterar os parâmetros de cada equipamento individualmente, é preciso acessar o ambiente onde é possível configurar as propriedades cada um. A Figura 28 apresenta, como

exemplo, as propriedades do coletor solar do *template* da Figura 26, onde é possível editar valores como quantidade ou área utilizada de coletores, ângulo de inclinação (*tilt angle*) do coletor, tipo de coletor, entre outros parâmetros.

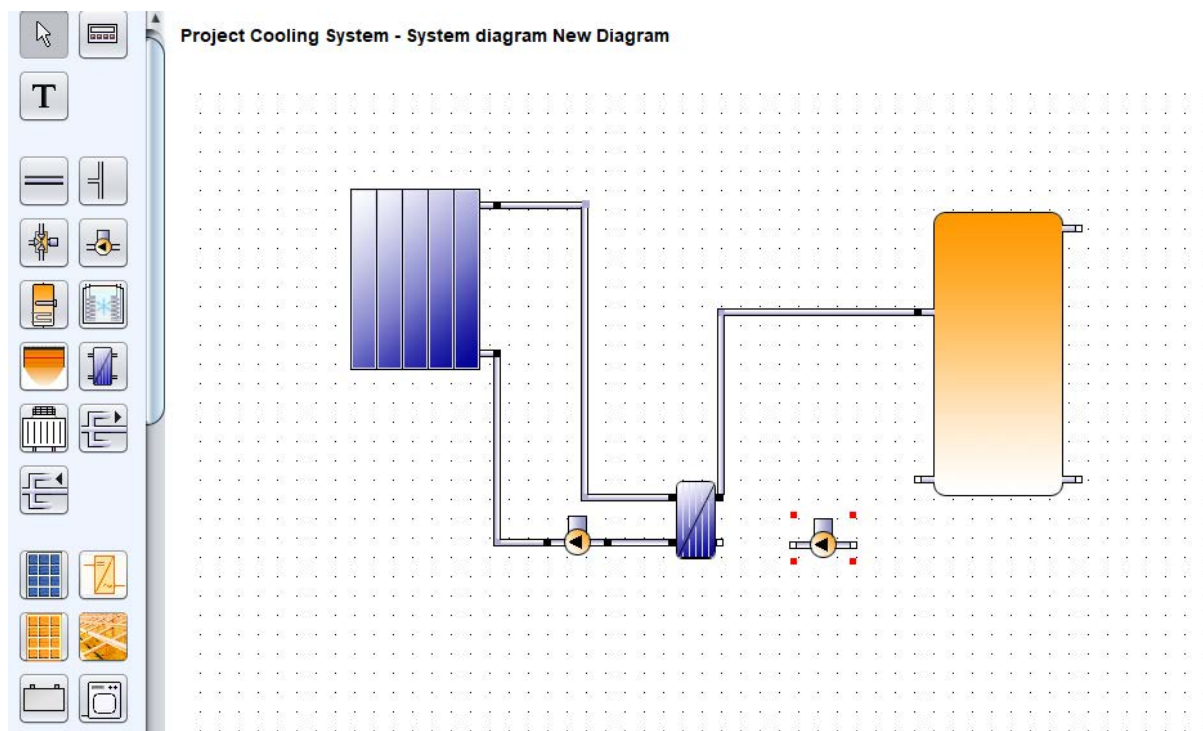
Figura 28 – Propriedades do coletor solar no *software* Polysun



Fonte: *Print screen* do *software* Polysun

Os equipamentos presentes nos *templates* disponíveis podem ser deletados do sistema, caso não sejam necessários. Além disso, novos equipamentos podem ser adicionados a partir da barra de ferramentas do Polysun, localizada no canto esquerdo da tela principal do programa. A Figura 29 apresenta um novo modelo sendo criado no *software*.

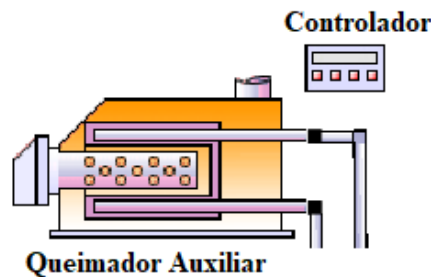
Figura 29 – Novo sistema sendo criado



Fonte: *Print screen do software Polysun*

Na criação de novos equipamentos e na edição dos *templates* disponíveis, além dos parâmetros de cada equipamento, é preciso também alterar os dados dos controladores do modelo. Controlador é um tipo de componente onde é configurado o modo de funcionamento dos demais equipamentos. Por exemplo, no caso do sistema coletor - tanque de armazenamento, o controlador é responsável por identificar quando a temperatura do coletor está maior que a temperatura no tanque e, assim, acionar as bombas do sistema para que ocorra a transferência de calor do coletor para o tanque. A Figura 30 apresenta parte do sistema da Figura 26, com o controlador do queimador auxiliar ao lado desse mesmo equipamento, e a Figura 31 apresenta as configurações desse controlador.

Figura 30 – Queimador auxiliar e seu controlador



Fonte: *Print screen do software Polysun*

Figura 31 – Configurações do controlador do queimador auxiliar

Auxiliary heating controller

? ? ?

@	Name	Value	Unit
	Description		
	Sign of output	▼ normal	
	Show input lines	▼ no	
	Show output lines	▼ no	
	Logic relation temperature sensor 1 ...	▼ None	
	Reference for temperature sensors 1	▼ Variable value	
	Cut-in differential 1	0	dT(°C)
	Cut-off differential 1	5	dT(°C)
	Minimum operation time	0	min
	Minimum downtime	0	min
	Maximum tank temperature	140	°C

Control inputs		
Name	Value	Unit
Layer temperature sensor on 1	Boiler: Temperature	°C
Layer temperature sensor off 1	Boiler: Temperature	°C
Temperature sensor 1 (optional)	Energy sink/source Discharge: In...	°C
Flow rate heat generator (optional)	Boiler: Flow rate	l/h
Inlet temperature heat generator (optional)	Storage tank Solar buffer tank: To...	°C
Flow rate setting 2nd switch on/off (optional)		l/h

Control outputs		
Name	Value	Unit
On/Off heating device	Boiler: On/Off	%
On/Off switch (optional)		
On/Off pump 1 (optional)		
On/Off pump 2 (optional)		
Controlled power heat generator (optional)	Boiler: Controlled power heat ge...	kWh
Controlled flow rate 2nd switch on/off (opti...		l/h

Availability times ☒ Timer ☐ Switching profile

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun																	
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec												
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

OK Cancel

Fonte: *Print screen do software Polysun*

No canto superior direito da tela de configurações do controlador, em *control inputs*, está a configuração das variáveis de entrada. Nesse local é possível determinar quais temperaturas, vazão e potência o controlador irá realizar a leitura. Com esses dados, o controlador realiza sua função, que é definida nos campos localizado no canto superior esquerdo da tela, onde é possível definir em qual temperatura o controlador irá acionar o sistema, em qual irá desligar, dentre outros. Definindo sua função, o controlador então tem saídas, que são definidas em

control outputs. No caso do controlador da Figura 31, o mesmo pode controlar, ao mesmo tempo, o *status* e a potência do queimador auxiliar, o *status* e a vazão de um segundo componente, além do *status* de duas bombas. O campo *availability times* indica em qual período do dia, semana e ano o sistema irá funcionar.

Além dos controladores disponíveis no Polysun para equipamentos específicos, como o da Figura 31, existe também o controlador programável, que pode ser utilizado em qualquer caso e apresenta grande importância para casos mais complexos, onde os controladores pré-definidos não possuem funcionalidade adequada. Esse controlador funciona a partir de uma lógica de programação e sua utilização é mais complexa que a dos anteriores. A Figura 32 apresenta as configurações do controlador da bomba que faz a circulação da água gelada do tanque para o sistema *Fan-Coil* no sistema da Figura 27.

Figura 32 – Controlador programável do sistema *Fan-Coil*

Programmable controller 3

? [Print] [Key]

@	Name	Value	Unit
	Description	3	
	Show input lines	▼ no	
	Show output lines	▼ no	
	Auxiliary variable 1	1	
	Auxiliary variable 2	1	
	Operating status 1	1	
	Operating status 2	1	

Control inputs

Name	Value	Unit
Controller input 1 (optional)	Storage tank Cold Water: Layer 3	°C
Controller input 2 (optional)	Weather data: Average outdoor temperature	°C
Controller input 3 (optional)	Pipe 16: Flow rate	l/h
Controller input 4 (optional)		

Control outputs

Name	Value	Unit
Controller output 1 (optional)	Pump SR: On/Off	%
Controller output 2 (optional)		

Availability times

☒ Timer ☐ Switching profile

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒
Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun																	
☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒																	
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec												
☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒												

OK Cancel

Fonte: *Print screen* do software Polysun

Além das variáveis de entrada (*input*) e saída (*output*), também é possível verificar nessas configurações a presença de variáveis auxiliares (*auxiliary variables*) e de *status* de operações (*operating status*). Variáveis auxiliares são lógicas de programação que utilizam as variáveis de entrada e/ ou outras variáveis auxiliares e entregam resultados intermediários. *Status* de

operações são lógicas de programação que utilizam as variáveis de entrada e/ou os resultados intermediários obtidos com as variáveis auxiliares e entregam como resultado o *status* das variáveis de saída, ou seja, definindo o *status* dos equipamentos associados a essas saídas. A Figura 33 apresenta a configuração da variável auxiliar 1 do controlador da Figura 32.

Figura 33 – Configuração da variável auxiliar 1

Description	1
Function	Cut-off delay
Duration [s]	900
Condition	IF(I2>17.5,1,0) & IF(I1>I2+1.75,1,0)

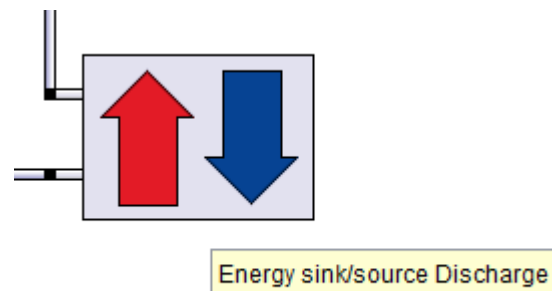
Fonte: *Print screen* do software Polysun

Na lógica da Figura 33, I1 representa a variável de entrada 1, temperatura da 3ª camada do tanque de armazenamento de água gelada, enquanto I2 representa a variável de entrada 2, temperatura externa média. Nessa condição, a variável auxiliar 1 retornará como resultado 1 se a temperatura externa média I2 for maior que 17,5 °C e, ao mesmo tempo, se a temperatura do tanque I1 for maior que I2 somando-se 1,75 °C. Em qualquer situação diferente, essa variável retorna 0 como resultado. O Polysun disponibiliza um manual com diversas funções que podem ser utilizadas na programação dos controladores. Essa funcionalidade do sistema amplia as opções de sistemas que usuários podem simular no *software*.

Para a definição de todos os parâmetros do sistema, utilizou-se primeiramente o sistema da Figura 26 com parâmetros similares ao dos trabalhos apresentados na Seção 3 e esses parâmetros foram sendo ajustados com o objetivo de se atingir a carga necessária para alimentar o sistema de refrigeração. Após isso, equipamentos foram inseridos a fim de se obter um sistema similar ao da Figura 27, e novamente os parâmetros foram alterados com o objetivo de atingir a potência de 80 kW de carga de refrigeração. Para configurar essa carga térmica, utilizou-se o

componente *Energy sink/source* e também o sistema *Fan-Coil* em conjunto com o componente *Building* (prédio), disponíveis no Polysun. O componente *Energy sink/source* é o componente que tem o objetivo de definir, de forma simples, necessidade ou fornecimento de energia térmica. A Figura 34 apresenta esse componente, enquanto a Figura 35 ilustra suas configurações.

Figura 34 – Componente *Energy sink/source*



Fonte: *Print screen* do software Polysun

Figura 35 – Configurações do *Energy sink/source*

@	Name	Value	Unit
	Description	Discharge	
	Model	▼ Standard model	
	Use profile	▼ No	
	Inlet temperature	100	°C
	Outlet temperature	80	°C
	Time constant	600	s
	Power	-50,000	W
	Design flowrate	2,153	l/h

Schematic diagram

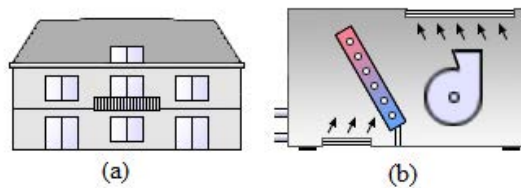
OK Cancel

Fonte: *Print screen* do software Polysun

Como pode ser observado na Figura 35, para a configuração desse equipamento é preciso inserir a temperatura de entrada e saída do fluido, assim como a potência necessária. Dessa forma, o *Energy sink/source* calcula a vazão necessária para atingir os parâmetros inseridos. A partir da temperatura de entrada e saída, o programa define se a utilização desse item será para consumo de energia térmica (*energy sink*) ou para fornecimento de energia térmica (*energy source*).

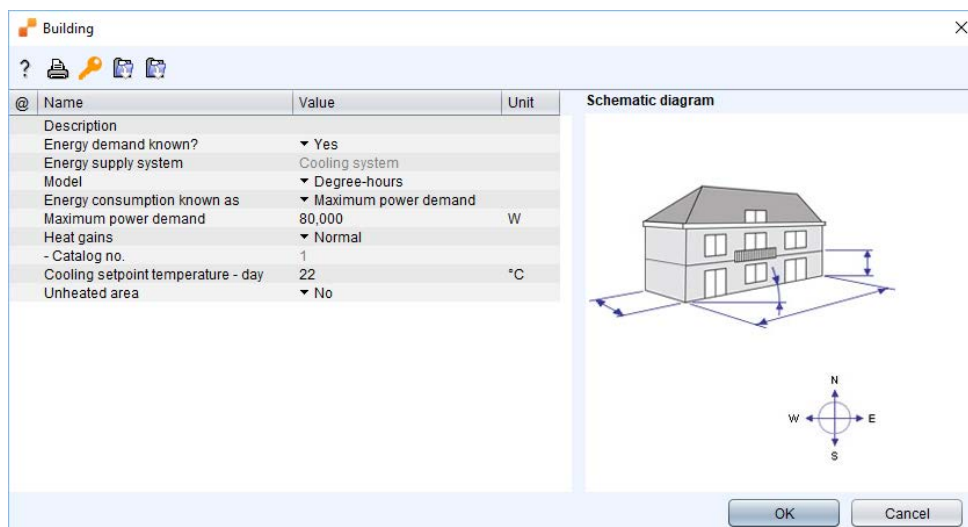
Assim como o componente da Figura 34 permite que seja definida qual a carga térmica necessária, o componente *Building* também permite que isso seja possível. Essa configuração pode ser realizada de duas formas principais. A primeira é para casos onde a demanda do prédio é conhecida, como a desse projeto. Sendo assim, é possível definir nesse item qual é a potência máxima requerida para a refrigeração do ambiente. Porém, esse componente precisa do sistema *Fan-Coil*, que fará de fato a refrigeração do ambiente desejado. A Figura 36 apresenta esses componentes, enquanto a Figura 37 apresenta a configuração considerando a carga térmica máxima.

Figura 36 – Componentes para configurar a carga térmica: (a) *Building*, (b) *Fan-Coil*



Fonte: *Print screen do software Polysun*

Figura 37 – Configuração do prédio para carga máxima



Fonte: *Print screen do software Polysun*

Além do sistema de configuração da Figura 37, outra opção de determinar a carga térmica do ambiente refrigerado é fornecer dados desse ambiente como, por exemplo, dimensões do espaço refrigerado, tipo de utilização, etc. Com esses dados o Polysun estima a carga térmica necessária para garantir o conforto térmico. A Figura 38 apresenta o componente configurado a partir dos dados do ambiente refrigerado.

Figura 38 – Configuração do prédio com detalhes do espaço refrigerado

@	Name	Value	Unit
	Description		
	Energy demand known?	▼ No	
	Heating system exists?	▼ No	
	Cooling system exists?	▼ Yes	
	Building according to EnEV standard	▼ no	
	Specific power demand known?	▼ No	
	Building	Server room	
	- Catalog no.	47	
	- U-value of the building	0.05	W/K/m²
A	Length of building	15	m
B	Width of building	10	m
	Number of floors	1	
	Heated/air-conditioned living area	150	m²
C	Floor height	3	m
D	Building orientation	0	°
	Shading	▼ Yes	
	Shading temperature	26	°C
	Natural ventilation	▼ Yes	
	Absences	Never	
	Heat recovery gain	0	%
	Cooling setpoint temperature - day	22	°C
	Cooling setpoint temperature - night	24	°C
	Unheated area	▼ Yes	
	Mean temperature	18	°C
	Temperature range	0	K
	Warmest month	▼ July	

Schematic diagram

The schematic diagram shows a 3D model of a building with a compass rose indicating orientation. The compass rose shows North (N) at the top, South (S) at the bottom, East (E) to the right, and West (W) to the left. The building is labeled with 'A' for length, 'B' for width, 'C' for floor height, and 'D' for building orientation.

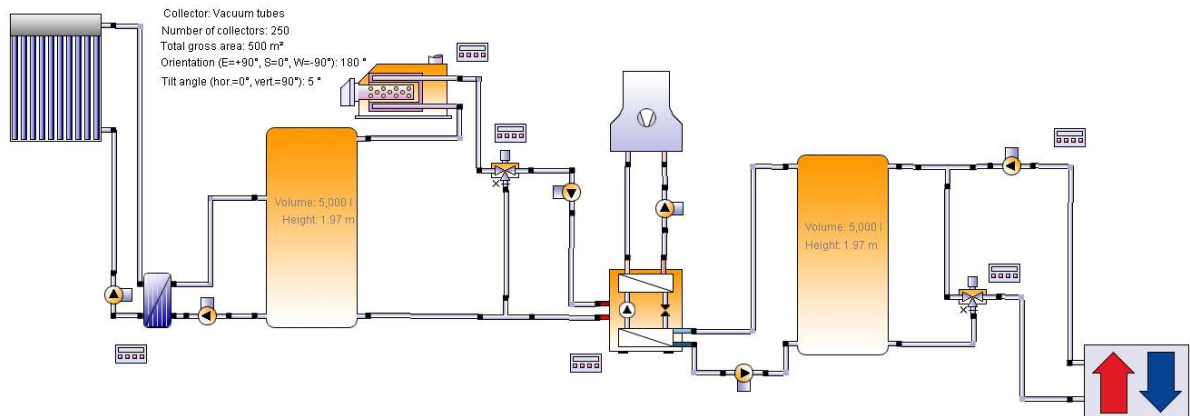
Fonte: *Print screen do software Polysun*

Realizando os ajustes necessários nos dois *templates* utilizados, como remoção e adição de equipamentos, ajuste dos parâmetros e ajuste dos controladores mencionados anteriormente, foi possível construir os sistemas das Figuras 39 e 40. A Figura 39 apresenta o sistema de refrigeração completo utilizando o equipamento *Energy sink/source* para simular a carga de refrigeração, enquanto que o sistema da Figura 40 utiliza o sistema *Fan-Coil* e o componente *Building* para esse mesmo propósito. Além disso, o modelo da Figura 40 foi estudado utilizando a configuração de carga máxima de refrigeração e, também, a configuração utilizando os dados físicos do ambiente refrigerado, conforme exemplo apresentado na Figura 38. Esses sistemas foram analisados a fim de se considerar aquele que mais se aproxima da realidade.

Figura 39 – Sistema completo com o componente *Energy sink/source*

Project New-Diagram - System diagram Cooling System - Energy Source

vela solaris

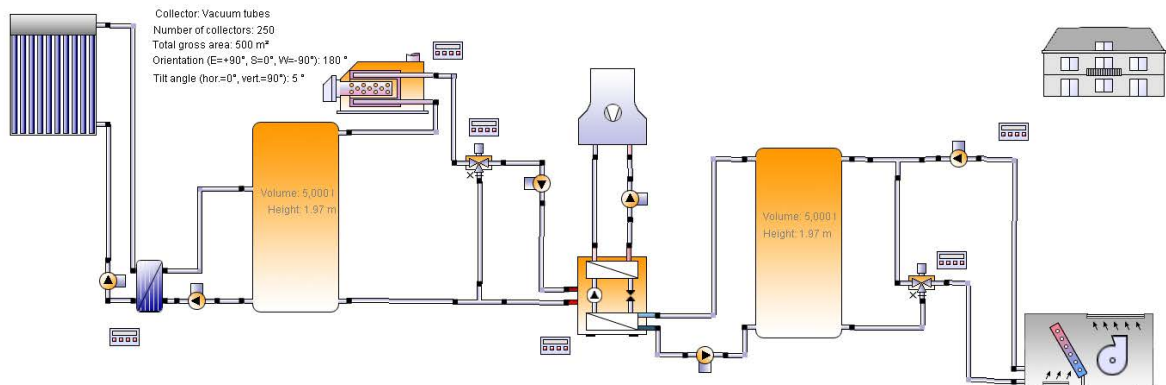


Fonte: Autoria própria

Figura 40 – Sistema completo com sistema *Fan-Coil*

Project New-Diagram - System diagram Cooling System - Energy Source

vela solaris



Fonte: Autoria própria

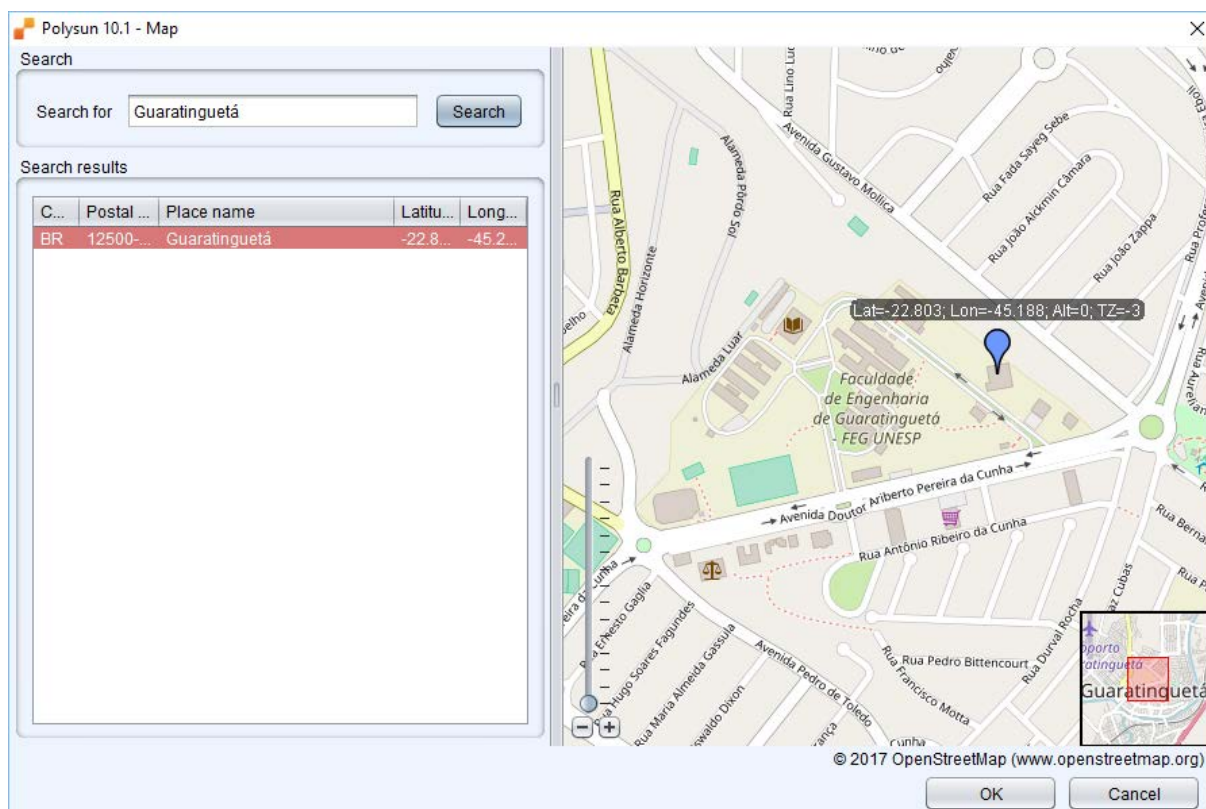
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos ajustes dos parâmetros de cada equipamento nos *templates* apresentados nas Figuras 26 e 27, e de análises da influência desses parâmetros nos resultados apresentados pelo *software* Polysun, definiu-se as configurações apresentadas nos tópicos seguintes, para que posteriormente fossem feitas análises mais aprofundadas.

5.1 CLIMA

Para a determinação do local do projeto no *software* Polysun, a cidade de Guaratinguetá foi escolhida no mapa disponível no *software*. O sistema utiliza a plataforma Meteonorm, um banco de dados online que disponibiliza a irradiação solar em qualquer lugar do planeta, sendo que, para locais onde não existe dados específicos de irradiação, o banco de dados faz uma interpolação dos dados dos locais mais próximos, obtendo assim os dados de acordo com o local escolhido. A Figura 41 apresenta a cidade de Guaratinguetá sendo escolhida no sistema.

Figura 41 – Escolha da cidade de Guaratinguetá no Polysun

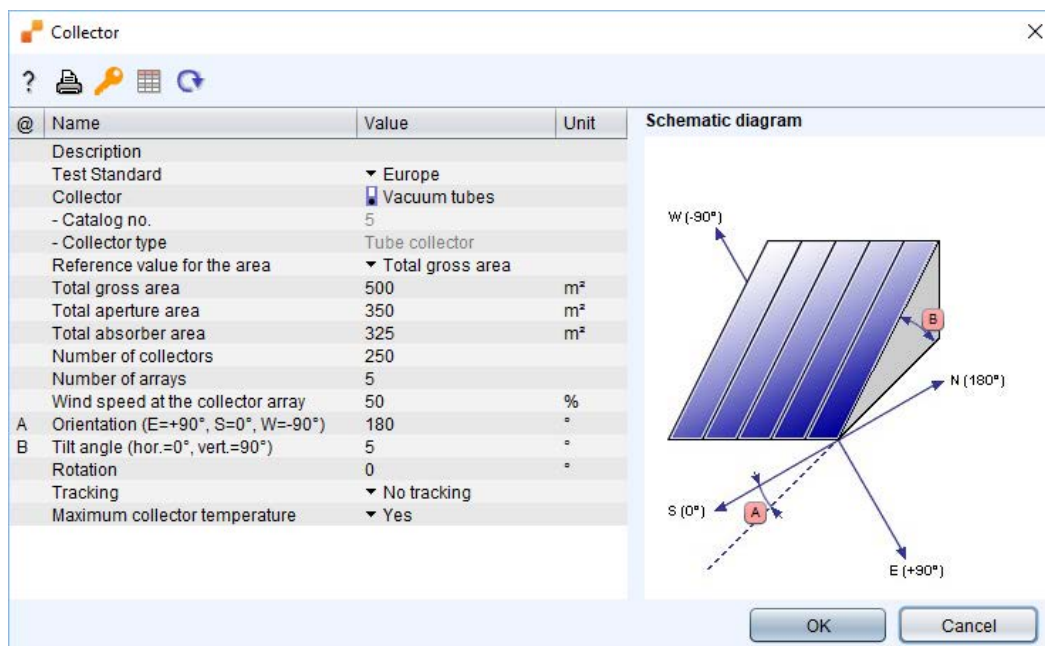


Fonte: Autoria própria

5.2 PLANTA SOLAR: COLETORES E TANQUE DE ÁGUA QUENTE

Nos testes realizados inicialmente decidiu-se utilizar coletores solares de tubo evacuado por atingirem temperaturas superiores aos coletores solares planos. A Figura 42 apresenta as configurações utilizadas no sistema simulado.

Figura 42 – Configurações utilizadas no coletor solar



Fonte: Autoria própria

Os principais campos que foram editados na configuração do coletor solar foram:

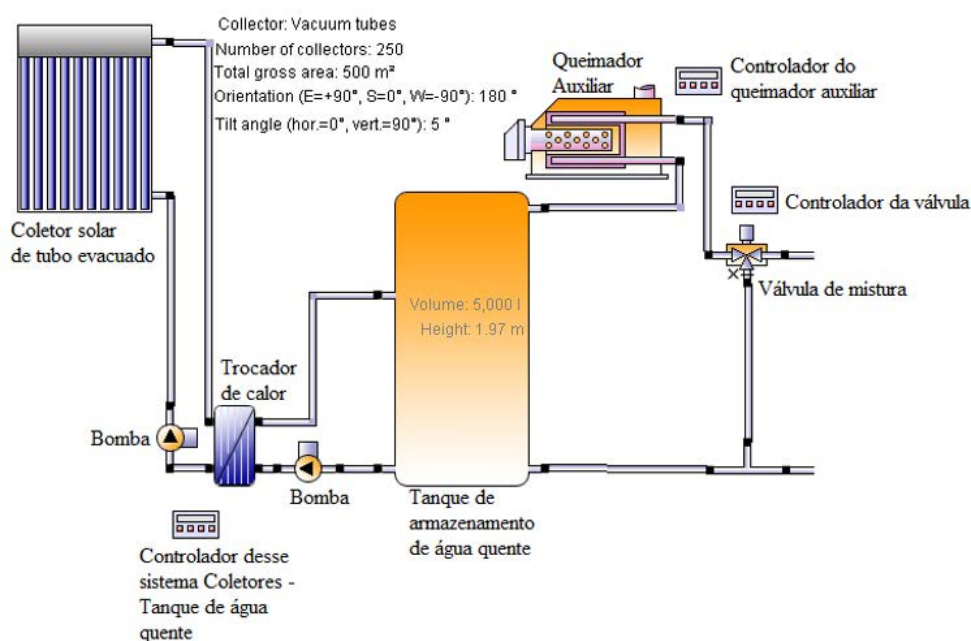
- Área total de coletores = 500 m²
- Número total de coletores = 250 unidades
- Ângulo de Orientação = 180° (direção norte)
- Ângulo de Inclinação = 5°

O ângulo de orientação é definido como 180° para que os coletores estejam direcionados para o hemisfério norte. Isso é devido ao fato do local do projeto estar situado no hemisfério sul, e para maior aproveitamento da irradiação solar é desejável que os equipamentos estejam direcionados para a linha do equador. O ângulo de inclinação do coletor influencia na irradiação solar que o coletor é capaz de absorver. Ângulos maiores fazem com que os coletores sejam melhores aproveitados no inverno, enquanto que ângulos próximos de 0° (plano) indica maior aproveitamento no verão. O ângulo de 5° foi definido como um ótimo ponto de equilíbrio, que consegue bom aproveitamento no inverno, sem perder eficiência no verão.

Utilizou-se um tanque de armazenamento de água quente de 5000 L. Além do tanque estabilizar a temperatura do sistema, ele ainda é capaz de manter o sistema funcionando por até aproximadamente 1 h em casos onde a irradiação solar não é suficiente. Um trocador de calor externo é utilizado para realizar a transferência de calor dos coletores solares para o tanque. Duas bombas são instaladas entre coletores, trocador de calor e tanque. Um controlador aciona essas bombas sempre que a temperatura no coletor estiver pelo menos 3 °C acima da temperatura da 7ª camada do tanque. O tanque possui um total de 12 camadas, sendo a 12ª a camada com água de maior temperatura.

Em conjunto com o tanque, utilizou-se também um queimador auxiliar queimando gás, com 200 kW de potência, e um sistema de válvula de mistura. O queimador auxiliar possui um controlador que o aciona sempre que a temperatura da camada superior do tanque estiver abaixo de 83 °C e o mantém funcionando, garantindo uma temperatura de saída de 85 °C, até que o tanque atinja essa mesma temperatura de 85 °C. A válvula de mistura é utilizada quando o tanque atinge temperaturas maiores que 95 °C. Nesse caso, a válvula mistura a água vinda do tanque a alta temperatura com água saindo do SRA, a baixa temperatura, para que a temperatura de 95 °C seja atingida. Com isso, a vazão de água sendo retirada do tanque é menor e a energia térmica armazenada se mantém por mais tempo. A Figura 43 apresenta essa parte do sistema.

Figura 43 – Planta solar com queimador auxiliar e válvula de mistura



Fonte: Autoria própria

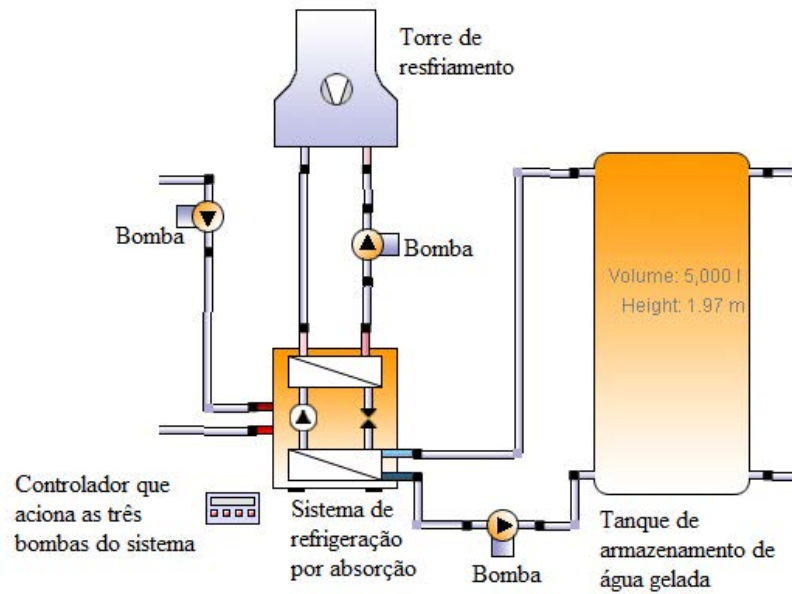
5.3 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO: SRA E TANQUE DE ÁGUA GELADA

Para o sistema de refrigeração por absorção utilizou-se um equipamento de refrigeração por absorção disponível no catálogo do *software* Polysun. Esse equipamento foi acoplado a uma torre de resfriamento de 200 kW de capacidade de refrigeração e a um tanque de armazenamento de água gelada de 5000 L. O SRA apresenta a seguinte configuração de projeto.

- Potência: 83 kW
- Temperatura de entrada de água quente: 95 °C
- Temperatura de saída de água quente: 86 °C
- Vazão de água quente: 11653 l/h
- Temperatura de entrada de água gelada: 12,2 °C
- Temperatura de saída de água gelada: 6,7 °C
- Vazão de água gelada: 12848 l/h
- Temperatura de entrada de água de resfriamento: 29,4 °C
- Temperatura de saída de água de resfriamento: 38,4 °C
- Vazão de água de resfriamento: 19422 l/h

Para o controle do sistema de refrigeração é utilizado um controlador programável. Esse controlador, primeiramente, garante que o sistema possa funcionar entre 9 h e 18 h. Essa restrição de horário é devido aos níveis de irradiação solar serem insuficientes em outros horários. O sistema pode funcionar fora desse período, porém, o fornecimento de calor seria exclusivamente do queimador auxiliar, e não de energia solar. Além disso, o controlador desliga o sistema de refrigeração sempre que a temperatura da parte inferior do tanque de água gelada atinge 4 °C. A Figura 44 apresenta o sistema de refrigeração e todos os componentes.

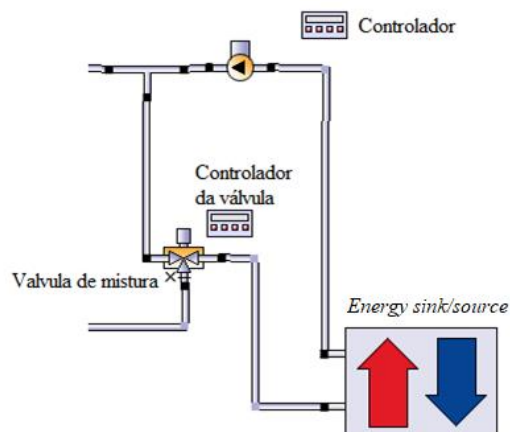
Figura 44 – Sistema de refrigeração



Fonte: Autoria própria

5.4 SISTEMA DE REPRESENTAÇÃO DA CARGA TÉRMICA

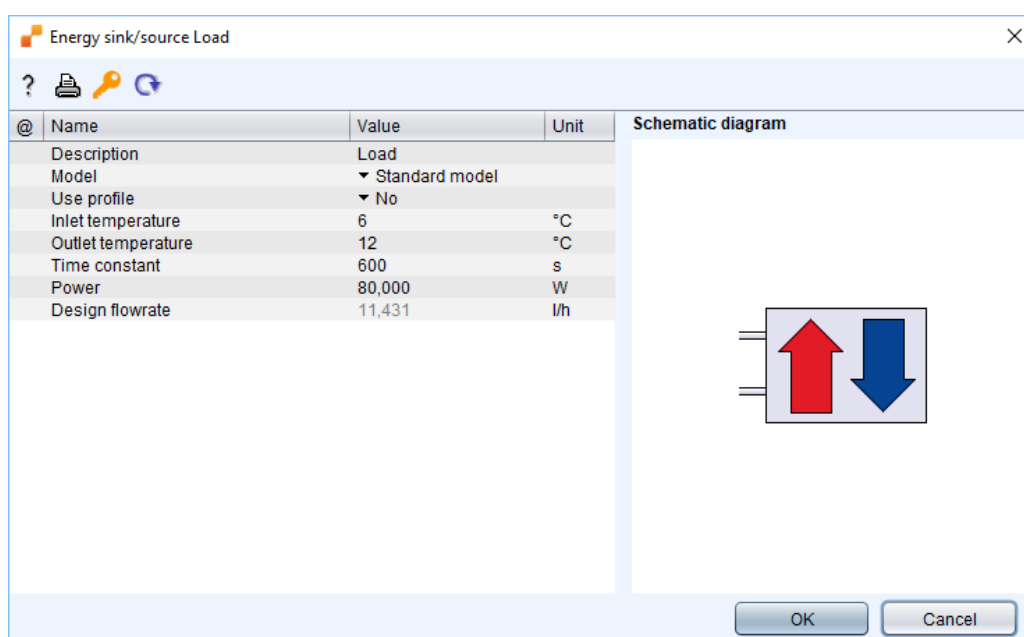
Conforme mencionado anteriormente, foram utilizadas três formas de configuração da carga térmica do sistema. A primeira delas foi utilizando o componente *Energy sink/source*, que simula de forma simples a necessidade térmica do sistema. A Figura 45 apresenta essa parte do sistema com os demais componentes.

Figura 45 – Sistema utilizando *Energy sink/source*

Fonte: Autoria própria

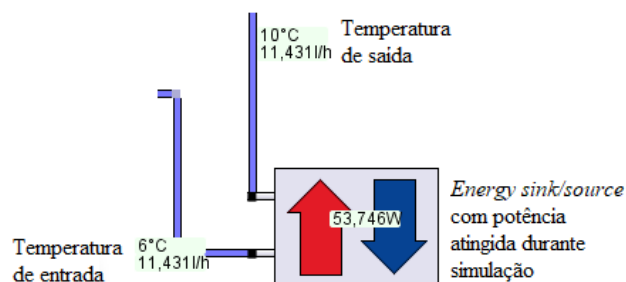
O sistema da Figura 45 também possui uma válvula de mistura, que sempre que o tanque atinge temperaturas abaixo de 6 °C a válvula utiliza a água de maior temperatura retornando do *Energy sink/source* para misturar com a água vinda do tanque para atingir a temperatura de 6 °C. Assim como no SRA, o controlador desse sistema garante que o mesmo funcione entre 9 h e 18 h. O *Energy sink/source* é configurado para uma temperatura de entrada de 6 °C e de saída de 12 °C, com uma potência de 80 kW, que simula a carga de refrigeração. A Figura 46 apresenta a configuração utilizada nesse componente.

Figura 46 – Configuração do *Energy sink/source*



Fonte: Autoria própria

Como o componente *Energy sink/source* tem a função de apenas funcionar como carga térmica, o objetivo desse trabalho seria utilizar somente esse componente para simular a carga térmica de refrigeração. Porém, apesar da simplicidade de configurar esse item, houve diversas dificuldades na simulação do modelo e obtenção dos resultados. Esse equipamento funciona com grandes variações em sua potência, mesmo com os parâmetros de entrada não variando, o que tornou inviável o *design* do sistema utilizando essa opção. A Figura 47 apresenta o *Energy sink/source* durante a simulação, onde a temperatura de entrada de 6 °C é garantida, assim como a vazão do sistema, porém, a temperatura de saída e, consequentemente, a potência do equipamento, não é atingida.

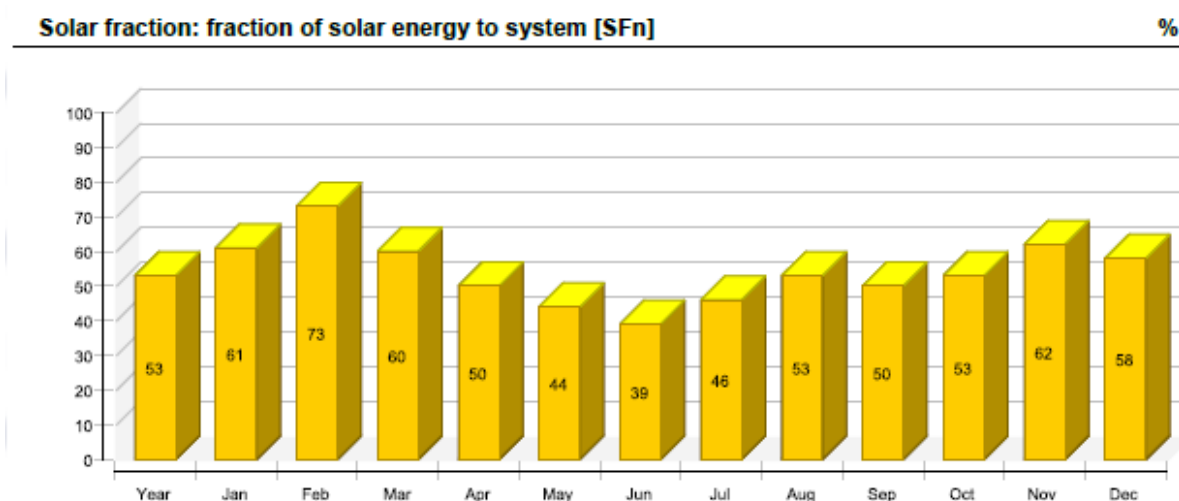
Figura 47 – *Energy sink/source* durante simulação

Fonte: Autoria própria

Devido a essas dificuldades encontradas com o *Energy sink/source*, esse modelo foi desconsiderado e a utilização do sistema *Fan-Coil* com o componente *Building* foi analisado em seguida. Inicialmente configurou-se esse componente com a informação da carga térmica máxima de 80 kW e o campo *cooling set point temperature* como sendo 22 °C, conforme é apresentado na Figura 37. Com os dados da carga térmica e ajuste dos parâmetros do sistema *Fan-Coil*, foi possível atingir o fornecimento dos 80 kW de refrigeração com um déficit de energia de 13,8%. A Figura 48 apresenta esse sistema durante simulação para o dia 12 de fevereiro, às 17 h 20 min, com os parâmetros de todos os equipamentos calculados para esse momento.

Apesar de a simulação do sistema da Figura 48 ter atingido o objetivo de 80 kW de carga de refrigeração, o Polysun apresenta a mensagem de que o sistema não atingiu a demanda necessária. Isso foi uma das dificuldades desse sistema, pois a demanda está configurada para 80 kW, e a simulação demonstra que essa demanda está sendo atingida. As configurações do componente *Building* foram feitas de forma que a temperatura desejada do prédio seja de 22 °C, porém, o Polysun não indica qual é a temperatura do prédio em cada etapa da simulação. O motivo de o *software* não indicar essa temperatura pode estar no fato de que, nesse caso, o sistema não permite que sejam inseridas as características físicas do prédio. Sem essas características seria impossível calcular a temperatura que um equipamento de 80 kW de capacidade de refrigeração conseguiria atingir. Porém, se essa análise está correta, o sistema não deveria então exigir que fosse definido uma temperatura a ser obtida pelo sistema de refrigeração. Independentemente da mensagem de erro, os resultados são fornecidos pelo Polysun. A Figura 49 apresenta a fração solar obtida com o sistema em cada mês, com uma média anual de 53%. Fração solar é a porcentagem da energia utilizada no sistema que provém dos coletores solares. O restante da energia é fornecido pelo queimador auxiliar.

Figura 49 – Fração solar do sistema estudado



Fonte: Autoria própria

Devido às dificuldades encontradas nesse sistema estudado, foi considerado então uma terceira modelagem, no qual características do prédio refrigerado foram inseridas no Polysun. Nesse terceiro sistema, considerou-se características aproximadas e considerou-se também a opção disponível do *software* denominada *normal school building*, que contém características térmicas estimadas, como perda de calor específica, carga térmica específica, dentre outras. Essa opção simula características de um prédio de uma escola ou universidade, porém, essas características não foram verificadas para garantir que sejam compatíveis com o auditório do InovEE. As características físicas utilizadas para o prédio foram 400 m² de área e 4 m de altura. Além disso, o sistema *Fan-Coil* foi ajustado para também fornecer 80 kW de capacidade de refrigeração. A Figura 50 apresenta a janela de propriedades do prédio com as informações inseridas.

Figura 50 – Componente *Building* preenchido com características do prédio

Building InovEE

@	Name	Value	Unit
	Description	InovEE	
	Energy demand known?	▼ No	
	Heating system exists?	▼ No	
	Cooling system exists?	Yes	
	Building according to EnEV standard	▼ no	
	Specific power demand known?	▼ No	
	Building	☒ School, normal buil...	
	- Catalog no.	10	
	- U-value of the building	0.5	W/K/m ²
A	Length of building	40	m
B	Width of building	10	m
	Number of floors	1	
	Heated/air-conditioned living area	400	m ²
C	Floor height	4	m
D	Building orientation	0	°
	Shading	▼ No	
	Natural ventilation	▼ No	
	Absences	☒ Never	
	Heat recovery gain	0	%
	Cooling setpoint temperature - day	22	°C
	Cooling setpoint temperature - night	25	°C
	Unheated area	▼ No	

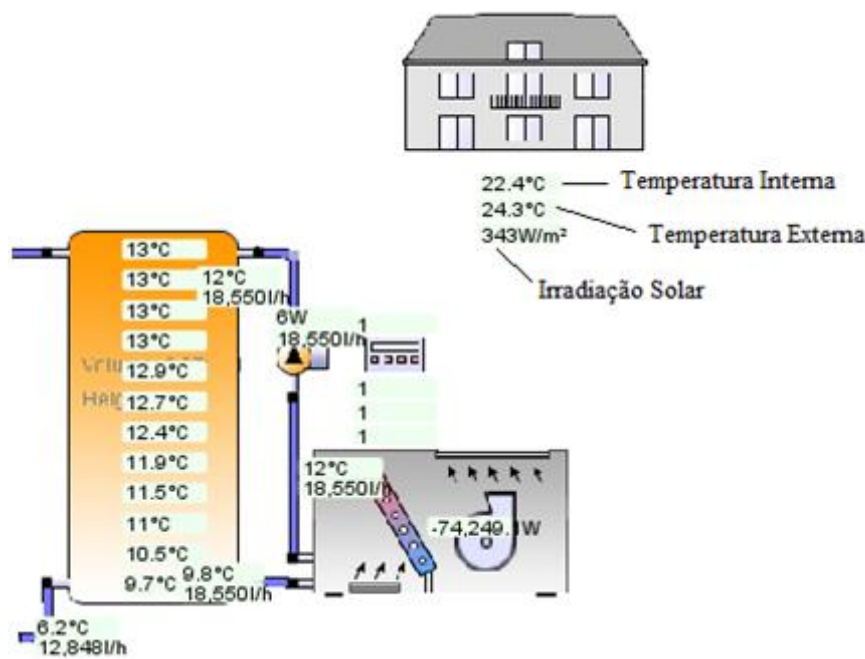
Schematic diagram

OK Cancel

Fonte: Autoria própria

Como agora as características do prédio foram inseridas no sistema, o Polysun consegue indicar qual é a temperatura do ambiente refrigerado. A vantagem disso é que é possível verificar se existem momentos em que a temperatura de 22 °C não consegue ser atingida e é possível também controlar o sistema de modo que o mesmo encerre o funcionamento em casos em que a temperatura está abaixo do desejado. Para esse estudo, além de alterar os componentes *Building* e *Fan-Coil*, foi alterado também o controlador do sistema *Fan-Coil*. Nesse modelo, o controlador garante que o sistema esteja funcionando sempre que a temperatura ambiente esteja acima de 22 °C, porém, o controlador desliga o sistema quando essa temperatura atinge 20 °C, economizando assim energia térmica. O funcionamento do resto do sistema não foi alterado. A Figura 51 apresenta o sistema *Fan-Coil* funcionando com 74 kW de potência e apresenta a indicação da temperatura ambiente.

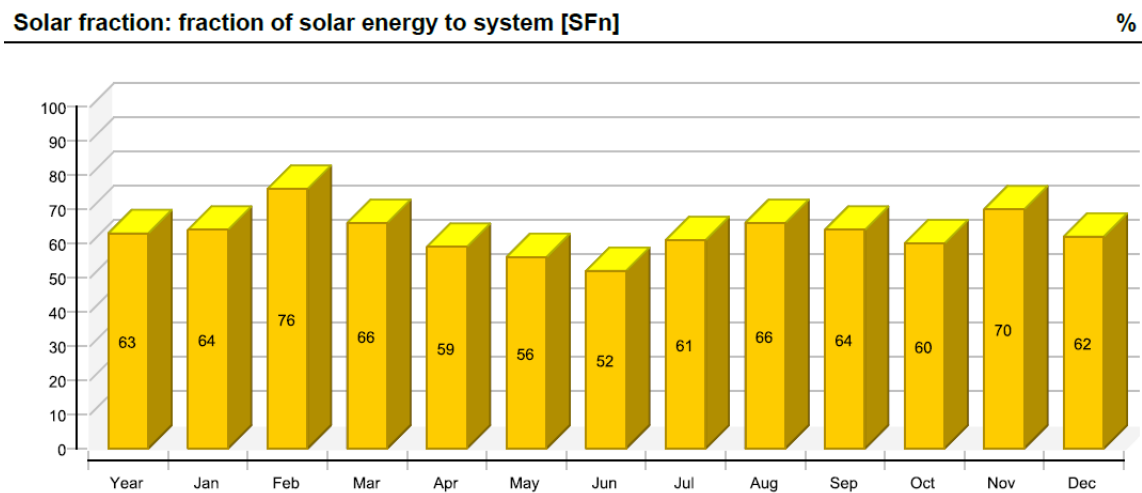
Figura 51 – Sistema *Fan-Coil* com temperatura do prédio



Fonte: Autoria própria

A Figura 52 apresenta a fração solar obtida com esse sistema, com uma média anual de 63%. É possível perceber um ganho de 10% para o sistema anterior, com a única diferença de que esse sistema desliga automaticamente quando uma determinada temperatura é atingida, economizando assim energia.

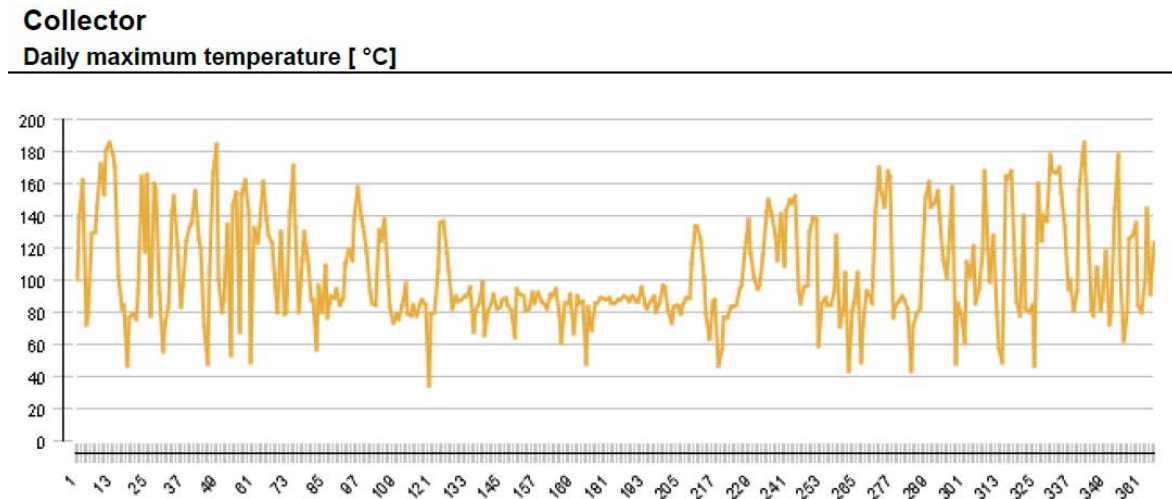
Figura 52 – Fração solar do sistema simulado



Fonte: Autoria própria

A Figura 53 apresenta a temperatura máxima diária no coletor solar durante todos os dias do ano. É possível perceber nessa curva uma similaridade com a fração solar máxima obtida em cada mês.

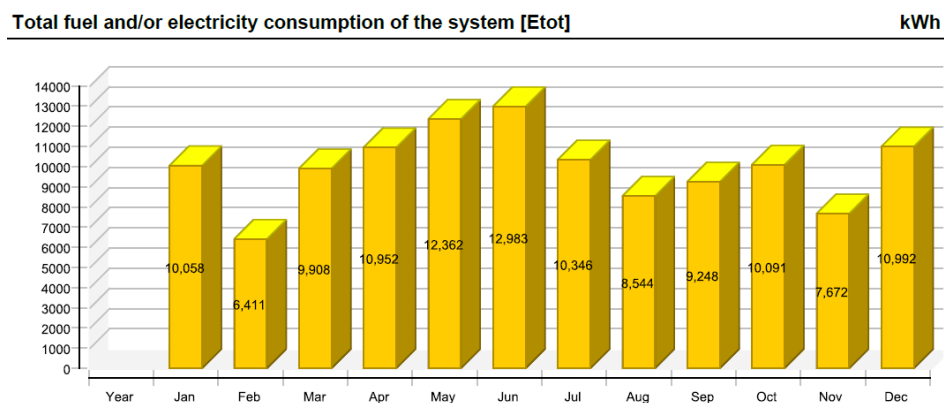
Figura 53 – Temperatura máxima diária no coletor solar



Fonte: Autoria própria

A Figura 54 apresenta a quantidade total de combustível e de energia elétrica consumidos pelo sistema. O consumo de combustível é maior em meses como maio e julho pois a fração solar nesses meses são menores. Como o sistema é configurado para consumir sempre 80 kW quando está ligado, isso pode levar a um consumo exagerado de energia durante meses com temperaturas mais baixas. Isso demonstra um potencial de melhoria no modelo de simulação que pode trazer melhores resultados.

Figura 54 – Total de combustível e energia elétrica consumidos



Fonte: Autoria própria

Apesar dos resultados apresentarem um sistema solar que consegue fornecer 63% da energia necessária para alimentar o sistema de refrigeração por absorção, é importante lembrar que esse sistema utiliza características do prédio similares ao auditório do prédio do InovEE, e não as características reais. Além disso, o sistema *Fan-Coil* está configurado para sempre utilizar a carga de 80 kW para refrigerar o ambiente, o que pode não ser sempre necessário, principalmente em meses durante o inverno, com temperaturas menores. Portanto, existe a possibilidade de mesmo, mantendo a planta solar de 500 m² de coletores de tubo evacuado, a fração solar real seja maior do que os 63% obtidos nesse trabalho.

6 CONCLUSÃO

O *software* Polysun possui importantes ferramentas que podem ser utilizadas para modelagem de sistemas de refrigeração solar. Essas ferramentas simulam sistemas complexos e torna mais simples, portanto, o estudo desses sistemas. Porém, apesar de a funcionalidade do *software* estar de acordo com a necessidade desse projeto, foram encontradas dificuldades em configurar a carga térmica de 80 kW utilizada no sistema que se deseja modelar. Essas dificuldades comprometeram a confiabilidade dos resultados obtidos devido à necessidade de se utilizar dados aproximados para a simulação do sistema.

Com esses dados aproximados, e utilizando o modelo *normal school building*, disponível no Polysun, foi possível modelar o SRA de 80 kW de capacidade de refrigeração, com a planta solar de 500 m² e conseguir manter a temperatura do prédio durante o ano entre 20 e 22 °C com uma fração solar média anual de 63%. O restante da energia foi proveniente da utilização do queimador auxiliar a gás de 200 kW. Esses resultados demonstram um grande potencial técnico desse sistema de refrigeração solar. Porém, uma análise mais aprofundada das características físicas e térmicas do auditório do InovEE pode ser necessária para a utilização do *software* Polysun e *design* da planta solar para alimentar o sistema de refrigeração.

Além disso, devido à alta capacidade do sistema de refrigeração, e devido ao tamanho da planta solar (500 m²), além do estudo técnico mais aprofundado, o próximo passo seria a análise da viabilidade econômica desse sistema, que pode se demonstrar economicamente inviável quando comparado ao sistema de refrigeração por compressão.

REFERÊNCIAS

- AGYENIM, F.; KNIGHT, I.; RHODES, M. Design and experimental testing of the performance of an outdoor LiBr/H₂O solar thermal absorption cooling system with a cold store. **Solar Energy**, v. 84, n. 5, p. 735–744, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X10000265>>. Acesso em: 27 nov. 2017.
- AQUA QUENTE SOLAR. **Coletor Solar Plano**. Disponível em: <<https://www.aguaquentesolar.com/FAQ/questao.asp?id=5>>. Acesso em: 02 dez. 2017.
- BALARAS, C. A. et al. Solar air conditioning in Europe-an overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 2, p. 299–314, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000456>>. Acesso em: 27 nov. 2017.
- CARRIER. **Equipamentos Fan-Coil**. Disponível em: <<https://www.carrier.com/commercial/en/us/products/airside/fan-coils/42c/>>. Acesso em: 02 dez. 2017.
- COSTA, E. C. **Refrigeração**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982. 321 p.
- GUO, Y. et al. Parallel hybrid model for mechanical draft counter flow wet-cooling tower. **Applied Thermal Engineering**, v. 125, p. 1379–1388, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116333749>>. Acesso em: 27 nov. 2017.
- KALOGIROU, S. **Solar energy engineering: processes and systems**. Burlington: Elsevier Inc., 2009. 760 p.
- LEE, S. et al. Measurement of absorption rates in horizontal-tube falling-film ammonia-water absorbers. **International Journal of Refrigeration**, v. 35, n. 3, p. 613–632, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700711002131>>. Acesso em: 27 nov. 2017.
- MALAGUETA, D. C. **Tutorial de Geração Heliotérmica**. Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB). Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=561>. Acesso em: 27 nov. 2017.
- MANZELA, A. A. et al. Using engine exhaust gas as energy source for an absorption refrigeration system. **Applied Energy**, v. 87, n. 4, p. 1141–1148, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909003080>>. Acesso em: 27 nov. 2017.
- MONTAGNINO, F. M. Solar cooling technologies. Design, application and performance of existing projects. **Solar Energy**, p. 1–14, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1730052X>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

NAIK, B. K.; MUTHUKUMAR, P. A novel approach for performance assessment of mechanical draft wet cooling towers. **Applied Thermal Engineering**, v. 121, p. 14–26, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117309535>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

NORO, M.; LAZZARIN, R. M. Solar cooling between thermal and photovoltaic: An energy and economic comparative study in the Mediterranean conditions. **Energy**, v. 73, p. 453–464, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214007336>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

OLABOMI, R. et al. Techno-economic analysis of innovative production and application of solar thermal chilled water for agricultural soil cooling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, n. January, p. 215–224, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117301120>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

ORTIZ, M. et al. Modeling of a solar-assisted HVAC system with thermal storage. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 4, p. 500–509, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778809002576>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

PONGTORNKULPANICH, A. et al. Experience with fully operational solar-driven 10-ton LiBr/H₂O single-effect absorption cooling system in Thailand. **Renewable Energy**, v. 33, n. 5, p. 943–949, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148107002960>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

PRAENE, J. P. et al. Simulation and experimental investigation of solar absorption cooling system in Reunion Island. **Applied Energy**, v. 88, n. 3, p. 831–839, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360261910003818>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

SANTAMOURIS, M. Cooling the buildings – past, present and future. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 617–638, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816306314>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

SRIKHIRIN, P.; APHORNRATANA, S.; CHUNGPAIBULPATANA, S. A review of absorption refrigeration technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 5, n. 4, p. 343–372, 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403210100003X>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

SYED, A. et al. A novel experimental investigation of a solar cooling system in Madrid. **International Journal of Refrigeration**, v. 28, n. 6, p. 859–871, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700705000277>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

WANG, S. K. **Handbook of Air Conditioning and Refrigeration**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2000. 1232 p.

WANG, Y.; WANG, C.; FENG, X. Optimal match between heat source and absorption refrigeration. **Computers and Chemical Engineering**, v. 102, p. 268–277, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135416303374>>. Acesso em: 27 nov. 2017

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 7. ed. São Paulo: Blucher, 2009. 461 p.

CHUA, K. J. et al. Achieving better energy-efficient air conditioning - A review of technologies and strategies. **Applied Energy**, v. 104, p. 87–104, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191200743X>>. Acesso em: 30 nov. 2017

DIANGELAKIS, N. A.; PISTIKOPOULOS, E. N. A multi-scale energy systems engineering approach to residential combined heat and power systems. **Computers & Chemical Engineering**, v. 102, p. 128–138, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098135416303313>>. Acesso em: 30 nov. 2017

GUPTA, A. et al. Economic and thermodynamic study of different cooling options: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 164–194, 2016. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116300521>>. Acesso em: 30 nov. 2017

ONOVWIONA, H. I.; UGURSAL, V. I. Residential cogeneration systems: Review of the current technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 10, n. 5, p. 389–431, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032104001340>>. Acesso em: 30 nov. 2017