

MARCELO FERREIRA JUNIOR

Energia solar aplicada em sistemas de refrigeração

Marcelo Ferreira Junior

Energia solar aplicada em sistemas de refrigeração

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: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

Guaratinguetá - SP
2017

F383e	Ferreira Junior, Marcelo Energia solar aplicada em sistemas de refrigeração / Marcelo Ferreira Junior – Guaratinguetá, 2017. 84 f: il. Bibliografia: f. 81-84
	Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017. Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna 1. Energia solar. 2. Refrigeração. 3. Energia elétrica – consumo. I. Título. CDU 620.91

MARCELO FERREIRA JUNIOR

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

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

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. FERNANDO HENRIQUE M. ARAÚJO
UNESP-FEG



Prof. Dr. THIAGO ALVERALDO BIMESTRE
Membro Externo

Novembro de 2017

De modo especial, à minha mãe Simone, que sempre me apoiou na faculdade, foi o grande incentivo para que eu continuasse no curso, e a toda minha família.

RESUMO

No presente trabalho é realizada análise econômica de um sistema de refrigeração assistido por energia solar em comparação com um ar condicionado convencional, para isso checou-se o investimento inicial e o tempo de retorno de seu investimento. O chiller de absorção assistido por energia solar é uma tecnologia limpa por operar primordialmente por conta da radiação do sol, outras tecnologias de resfriamento são alimentadas por energia elétrica e que tem um impacto ambiental maior que a tecnologia de absorção, além de ser grande consumidor da mesma, causando assim um aumento considerável no gasto total de energia elétrica de uma residência ou comércio. O Brasil é um país com elevada incidência solar o que caracteriza um excelente campo para a aplicação da tecnologia que utiliza esta energia.

PALAVRAS-CHAVE: Chiller de absorção. Energia solar. Incidência solar. Ciclo de refrigeração.

ABSTRACT

In this work, analysis a refrigeration cycle system assisted by solar energy are compared to a conventional air conditioning, for this was checked the first investment and the pay back. The absorption chiller by solar energy is a clean technology because the fuel is solar energy, other technologies for refrigerator are powered by electrical energy which have a great environment impact, beyond a high consumer, been responsible to increase the price with electrical consume at homes and companies. Brazil have high solar radiation that make us a good field to apply this technology.

KEYWORDS: Absorption chiller. Solar energy. High solar radiation. Refrigeration cycle system.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	DEMANDA ENERGÉTICA	7
1.2	FONTES RENOVÁVEIS	9
1.3	CONFORTO TÉRMICO	10
1.4	OBJETIVOS DO TRABALHO	11
1.5	SINOPSE DO TRABALHO	11
2	CONCEITOS BÁSICOS	13
2.1	HISTÓRIA	13
2.2	ENERGIA SOLAR	16
2.3	RADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL.....	17
3	CICLOS TERMODINÂMICOS DE REFRIGERAÇÃO	20
3.1	LEIS DA TERMODINÂMICA	20
3.2	CICLOS DE REFRIGERAÇÃO.....	20
3.3	CICLO DE COMPRESSÃO	23
3.3.1	Evaporador	25
3.3.2	Condensador.....	26
3.3.3	Compressores	27
3.3.4	Válvula de expansão.....	29
3.3.5	Fluidos refrigerantes.....	29
3.3.6	Afastamento do ciclo ideal para o real	30
3.4	SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO	31
4	SISTEMA DE AQUECIMENTO	37
4.1	TRANSFERÊNCIA DE CALOR	37
4.1.1	Condução.....	38
4.1.2	Convecção	38
4.1.3	Radiação	38
4.2	PAINÉIS SOLARES.....	43
4.3	TIPOS DE PAINÉIS SOLARES	47
4.4	RESERVATÓRIO TÉRMICO.....	54
4.5	SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR POR CIRCULAÇÃO NATURAL	57
4.6	CIRCULAÇÃO FORÇADA.....	59
4.7	ASSOCIAÇÃO DE RESERVATÓRIOS TÉRMICOS	60
4.8	ASSOCIAÇÃO DOS COLETORES SOLAR	62

5	SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO ALIMENTADO POR ENERGIA SOLAR.	64
5.1	SISTEMA PROPOSTO E DESENVOLVIMENTO	65
5.2	ANÁLISE ECONÔMICA.....	67
5.3	SISTEMA UTILIZADO	68
5.4	SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO CONVENCIONAL	73
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
7	CONCLUSÃO	80
	REFERÊNCIAS	81

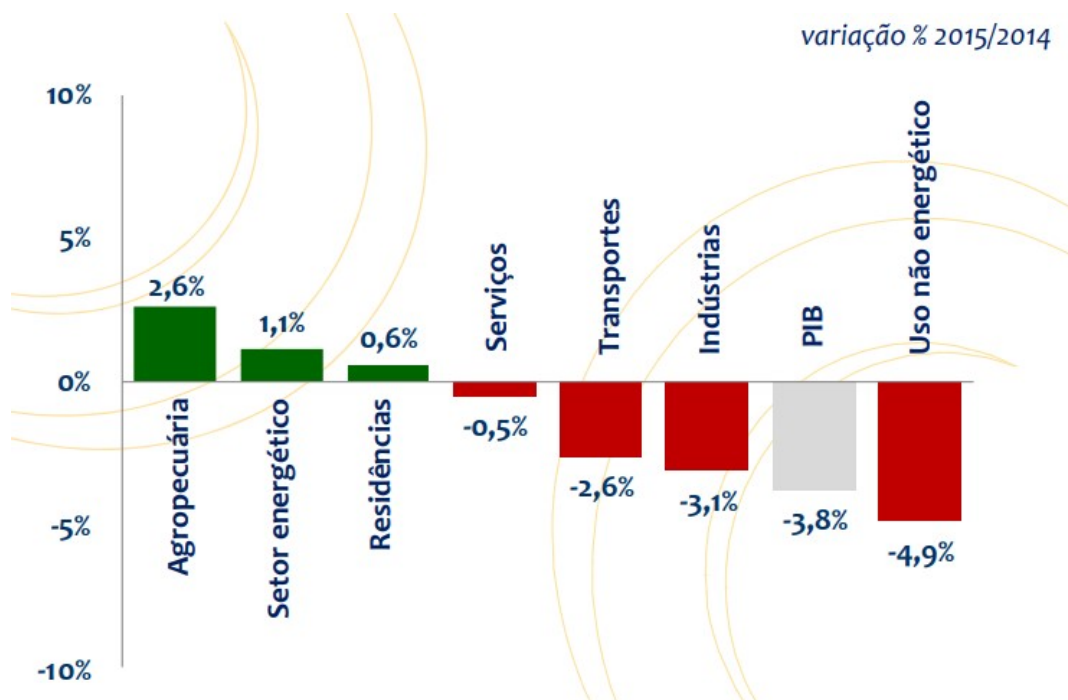
1 INTRODUÇÃO

1.1 DEMANDA ENERGÉTICA

Com o aumento do uso de energia em todo o mundo chega-se em um estado de alerta. Os impactos que são gerados por fontes de energias “não limpas” prejudicam ainda mais o nosso planeta, pode-se citar como impacto alguns fenômenos como o aquecimento global, a destruição da camada de ozônio, mudanças climáticas entre outros. (CHUA et al., 2012).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) do Ministério de Minas e Energia, o uso de energético no Brasil se divide em 32,5% para as indústrias, 32,2% em transportes, 9,6% nas residências, 10,7% do setor energético, 4,4% na agropecuária, 4,8% de serviços e 5,8% de outras fontes. Também com a apresentação da figura 1.1 a seguir temos a variação percentual do consumo de energia entre 2015 e 2014. Sendo que nesse período o Brasil encontra-se em uma crise, na qual seu PIB (produto interno bruto) caiu cerca de 3,8% e em meio a esse cenário algumas áreas consumiram mais energia, como exemplo a área de residências que teve um crescimento de 0,6% e a agropecuária com um crescimento de 2,6% e os setores que tiveram uma retração no uso da energia fizeram isso em quantidade menor que a queda do PIB, mostrando assim que em alguns setores a curva de crescimento energético tende somente a subir mesmo em situações adversas.

Figura 1.1 – Variação do Consumo de Energia no Brasil:



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2016).

Temos no Brasil um elevado uso de energias renováveis na matriz elétrica, sendo em torno de 75,5% em 2015 segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2016), em comparação com a média no mundo que está em torno de 21,2% em 2013, entretanto a maior fonte dessa energia renovável está na energia hidráulica que por sermos um país com grandes bacias hidrográficas essa fonte de energia é muito explorada, entretanto tem um limite para se explorar essa fonte e estamos esbarrando em seu limite por termos explorado grande parte dos rios com vazão mínima para a produção de energia. Não podendo acompanhar assim a demanda energética com sua elevada tendência de crescimento somente com a exploração unicamente de fontes hidráulicas, mesmo sendo uma fonte renovável de energia muitas vezes tem impactos elevados em sua concepção, podemos citar a perda de solos, perda de espécies e plantas e como a própria translocação de populações para a viabilidade de um empreendimento de um grande porte, como cita Palz (2002).

Devemos buscar fontes alternativas para esse crescente da demanda energética com pesquisas voltadas para buscar soluções energéticas, suprir as necessidades e algumas para diminuir os gastos energéticos sem diminuir a comodidade ou a evolução da tecnologia. Dessas pesquisas surgem diversas tecnologias novas e outras não tão recentes, mas que em sua época por razões de custo e tecnologia não tiveram a sua capacidade aproveitada.

1.2 FONTES RENOVÁVEIS

Muitas fontes novas de obtenção de energia elétrica surgiram de pesquisas, como a energia eólica e solar, que com o tempo vem ganhando espaço nas fontes de energia, o crescimento em energia derivadas de eólicas de 2014 para 2015 foi de 77,1% e a solar teve um crescimento ainda maior de 266,4%, mostrando a preocupação do Brasil na busca por novas fontes. (Empresa de Pesquisa Energética, 2016)

Pode-se utilizar a energia solar além da geração de energia elétrica diretamente, que é feito com as placas fotovoltaicas, mas também na utilização para a energia térmica. Como já é muito estudado e utilizado na tecnologia Heliotérmica que tem funcionamento muito semelhante a uma usina termoelétrica, sendo que sua principal diferença ser que na primeira não se usa carvão ou qualquer tipo de gás para o aquecimento e sim o próprio calor do sol, (Energia Heliotérmica, 2017).

As regiões desérticas do mundo são as mais bem-dotadas de recurso solar. Assim a região da cidade de Dongola, localizada no Deserto Árábico, no Sudão, e a região de Dagget no Deserto de Mojave, Califórnia, Estados Unidos, são exemplos de localidades excepcionalmente bem servidas de radiação solar. Para efeito de comparação, são mostradas na Tabela 1.1, os valores da radiação solar, médias, máximas, mínimas e anuais para estas duas localidades e algumas outras do Brasil. Como pode ser visto nesta tabela, as áreas localizadas no Nordeste do Brasil, têm valores da radiação solar diária, média anual comparáveis às melhores regiões do mundo. Além disso, as variações sazonais para o NE são menores, o que poderá resultar em importantes vantagens técnicas e econômicas dos sistemas solares instalados nesta região. (Atlas Solarimétrico do Brasil, 2000).

Tabela 1.1 – Dados de radiação solar, médias, máxima, mínima e medias anuais para diversas localidades do Mundo:

Localidade	Latitude	$H_{h(\text{mínimo})}$ (MJ/m ²)	$H_{h(\text{máximo})}$ (MJ/m ²)	$H_{h(\text{anual})}$ (MJ/m ²)	$H_{h(\text{max.})}/H_{h(\text{min})}$
<i>Dongola-Sudão</i>	19°10'	19,1(Dez)	27,7(Mai)	23,8	1,4
<i>Dagget - USA</i>	34°52'	7,8(Dez)	31,3(Jun)	20,9	4,0
<i>Belém-PA-Brasil</i>	1°27'	14,2(Fev)	19,9(Ago)	17,5	1,4
<i>Florianópolis-PI-Brasil</i>	6°46'	17,0(Fev)	22,5(Set)	19,7	1,3
<i>Petrolina-PE-Brasil</i>	9°23'	16,2(Jun)	22,7(Out)	19,7	1,4
<i>B. J, da Lapa -BA-</i>	13°15'	15,9(Jun)	21,1(Out)	19,7	1,3
<i>Cuiabá-MT-Brasil</i>	15°33'	14,7(Jun)	20,2(Out)	18,0	1,4
<i>B. Horizonte-MG-Brasil</i>	19°56'	13,8(Jun)	18,6(Out)	16,4	1,3
<i>Curitiba-PR-Brasil</i>	25°26'	9,7(Jun)	19,4(Jan)	14,2	2,0
<i>P. Alegre-RS-Brasil</i>	30°1'	8,3(Jun)	22,1(Dez)	15,0	2,7

Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil (2000).

1.3 CONFORTO TÉRMICO

Ar Condicionado é essencial para o conforto térmico em residências, comércio e mesmo no transporte, em particular para climas quentes e úmidos. Atualmente o ar condicionado esfria e desumidifica o ambiente, se tornando uma necessidade nas construções comerciais e residenciais, também muito importante em diversos processos industriais. Assim então o maior responsável pelo consumo de energia desses estabelecimentos. Em climas tropicais, como o Brasil, o gasto com aquecimento, ventiladores e ar condicionados pode passar de 50% do total da energia consumida no estabelecimento. (CHUA et al., 2012).

Baseado na comprovação apontada pelo Atlas Solarimétrico do Brasil de que o nosso país se encontra em uma posição geográfica estratégica que o leva a ser suficientemente apto ao uso de energia solar, devido ao nível elevado de incidência que proporciona condições ideais para seu uso, o que leva as tecnologias solares de arrefecimento de sistemas de absorção serem as mais vantajosas comercialmente, através da produção de frio por ciclos de calor aproveitados na energia solar térmica.

Conforme Sá (2010), o panorama energético atual exige que a sociedade moderna inclua o conceito de sustentabilidade nos padrões de desenvolvimento atuais. Isso significa que o desenvolvimento deve ser obtido minimizando-se o impacto negativo ao meio ambiente e na escassez de recursos. Assim a utilização de uma tecnologia de resfriamento por absorção que reduz drasticamente o uso de energia elétrica em detrimento da energia térmica que pode ser proveniente do próprio sol, caracteriza um avanço para a sustentabilidade.

1.4 OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo o estudo de um ciclo de refrigeração por absorção que será acionado por meio do calor fornecido por radiação solar. Realizando assim o estudo econômico em comparação com o valor inicial e seus gastos com energia elétrica de todo o sistema de refrigeração mais os aparatos necessários para o acionamento solar com um sistema de refrigeração por compressão, para isso será necessário o estudo do ciclo de refrigeração por absorção, do ciclo por compressão, o estudo de coletor solares para o aquecimento da água, o estudo de radiação solar e sua incidência no planeta e um estudo sobre reservatórios térmicos para a conservação da temperatura da água, assim podendo acionar o ciclo de refrigeração sem a necessidade de sol no instante.

1.5 SINOPSE DO TRABALHO

No capítulo 1 apresentam-se as motivações para a realização do trabalho como o aumento do consumo energético, as buscas por fontes renováveis, a necessidade de conforto térmico, os objetivos do trabalho e a sinopse.

No capítulo 2 apresentam-se uma introdução histórica, conceitos básicos, irradiação solar no Brasil e uma introdução sobre energia solar.

No capítulo 3 apresentam-se os conceitos de ciclos de refrigeração, ciclo de refrigeração por compressão e o ciclo de refrigeração por absorção.

No capítulo 4 apresentam-se um aprofundamento em energia solar, transmissão de calor, radiação, painéis solares, convecção natural o sistema de aquecimento e aparatos necessários para aquecer a água e se chegar à temperatura necessária ao sistema de resfriamento.

No capítulo 5 apresenta-se o sistema de refrigeração por absorção alimentado por energia solar, os equipamentos necessários para todo o sistema seus valores e principais características.

No capítulo 6 apresenta-se a análise econômica do sistema comparando-o a um sistema de ar condicionado Split de compressão, que é comumente mais utilizado, coletando os resultados de consumo energético elétrico de ambos e seus custos iniciais, calculando então assim, quando o sistema proposto se torna economicamente viável e qual seu *payback*.

No capítulo 7 apresenta-se as conclusões do trabalho.

2 CONCEITOS BÁSICOS

Deve-se fazer uma revisão bibliográfica para o melhor entendimento da origem dos equipamentos de refrigeração. Com isso compreendendo a presente situação do sistema de refrigeração utilizado nesse trabalho. Também deve-se fazer uma introdução da fonte de energia utilizada, solar, para alimentar o sistema proposto. E por fim uma compreensão de como a energia solar se comporta no Brasil, demonstrando a irradiação solar incidente no território brasileiro.

2.1 HISTÓRIA

Um dos maiores problemas do Homem foi a conservação dos alimentos, primeiramente eram utilizadas especiarias para fazer a conservação, mas essa pratica era muito dependente das especiarias e dos seus comerciantes, com isso sempre se buscou uma alternativa para conservar os alimentos sem depender de outros comércios.

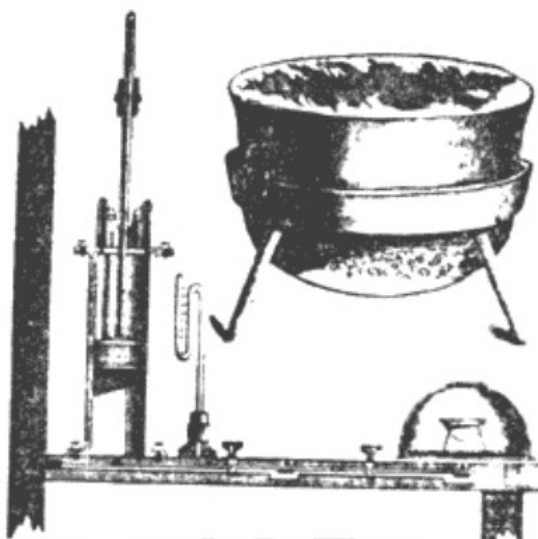
A primeira alternativa veio com a produção do gelo e as caixas de gelos, na qual um caminhão vinha para encher a caixa de gelo para assim manter os alimentos a uma temperatura mais baixa que a ambiente dentro da mesma, possibilitando assim a conservação a um longo prazo sem necessitar de outros produtos, entretanto essa alternativa era pouco viável devido a necessidade de ser constantemente abastecida de gelo, mas as configurações de isolamento que a caixa apresentavam eram muito próximas as de um refrigerador que viria a sucedê-la.(Miller,2008).

Já o princípio básico da absorção, a evaporação, foi utilizada pelos antigos egípcios para resfriamento de vinho e outros líquidos em pleno clima desértico. Os mesmos expunham as cerâmicas às brisas frescas da noite que aceleravam a evaporação e resfriavam seus conteúdos. No entanto, a evolução científica da refrigeração por absorção não começou antes de 1774 com o isolamento dos gases amônia, oxigênio e dióxido de carbono pelo cientista inglês Joseph Priestly. (Encarta Encyclopedia, 2007).

Em 1777, Gerald Nairne, realizou vários estudos teóricos sobre a absorção, base para o desenvolvimento de equipamentos de refrigeração. Construiu um sistema de absorção usando o par água – ácido sulfúrico. O equipamento era constituído por dois reservatórios interligados e evacuados. A água contida em um reservatório absorvia o ácido sulfúrico contido no outro (Encarta Encyclopedia, 2007).

Em 1810, Sir John Leslie criou um dispositivo de absorção e refrigeração a vácuo, no qual era colocado um prato com água suspenso acima de uma bacia chata contendo ácido sulfúrico, ambos eram isolados por uma redoma de vidro, como mostra na figura 2.1, que era posteriormente evacuada através de uma bomba. Com o auxílio de estar no vácuo a água começava a ferver rapidamente, uma temperatura abaixo de seu ponto de congelamento era conseguida não só pela ação do vácuo, mas também pelo efeito da absorção do vapor de água e pelo ácido sulfúrico. (EncyclopediaBritannica, 2007).

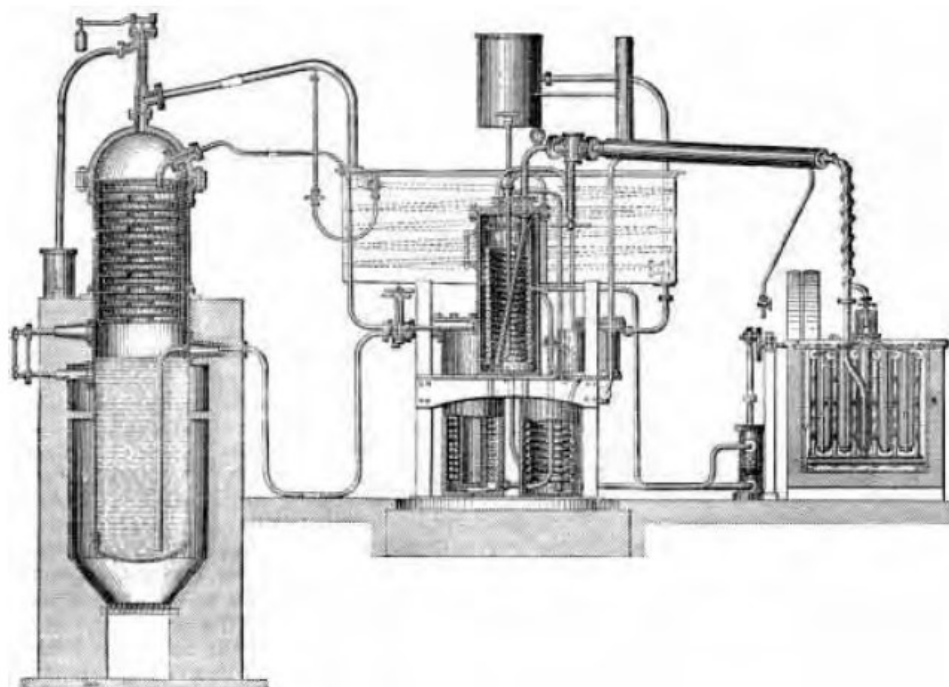
Figura 2.1 – Dispositivo de Absorção e Refrigeração a Vácuo de John Leslie.



Fonte: MARTINELLIJÚNIOR (2008).

O Sistema de absorção foi criado em seguida por Ferdinand Carré, como vemos na figura 2.2 sua máquina, em 1823, baseado em estudos de Nairne utilizando uma mistura amônia-água, registrando uma patente nos Estados Unidos. Junto com seu irmão Edmond utilizaram o sistema para suprir gelo para os Estados Confederados durante a Guerra Civil, devido ao corte no fornecimento do gelo natural dos estados do Norte. (ABREU, 1999).

Figura 2.2 – A Máquina de Refrigeração de Ferdinand Carré.



Fonte: MARTINELLI JÚNIOR (2008).

Um ano após Ferdinand Carré patentear sua máquina, Michael Faraday, utilizando um tubo em U selado, observou que o cloreto de prata possuía uma singular tendência de absorver a amônia. Faraday aqueceu o braço do tubo que continha amônia. O mesmo demonstrou que a amônia ao evaporar migrava para o cloreto de prata em pó, provocando um efeito de resfriamento dentro do tubo selado. (Robur, 2017)

Foram construídos vários sistemas de refrigeração por absorção intermitentes para aplicações domésticas baseados na experiência de Faraday. (ABREU, 1999)

Atualmente, uma das maneiras mais vantajosas de se aplicar os equipamentos de absorção é utilizando a cogeração, ou seja, reaproveitar uma fonte quente gerada por um processo industrial para refrigeração e aquecimento ao mesmo tempo. (Martinelli Júnior, 2008)

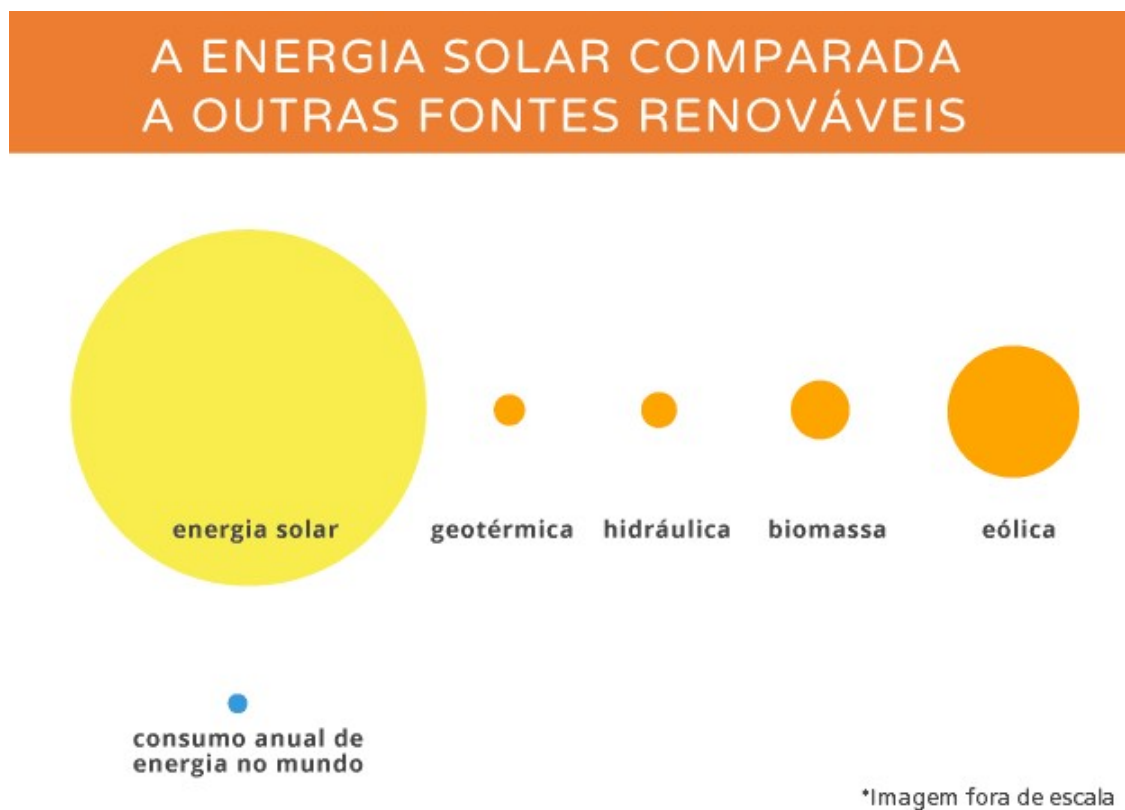
No mercado brasileiro existem sistemas de absorção funcionando como chiller de simples efeito, de duplo efeito ou com queimador, a escolha do equipamento adequado deve ser feita de acordo com a fonte de calor a ser utilizada e com o desempenho que se deseja (Martinelli Júnior, 2008).

2.2 ENERGIA SOLAR

O Sol é a fonte de energia com maior potencial para suprir a crescente demanda energética em todo o mundo. Podemos aproveitar diretamente a sua oferta, o que ajuda, inclusive, a enfrentarmos os efeitos adversos causados pelas mudanças – um fenômeno acelerado pela queima de combustíveis fósseis, como carvão e petróleo. (Energia Heliotérmica, 2017).

Em um ano, a Terra recebe 80 mil vezes mais energia do Sol do que todas as outras fontes renováveis somadas podem produzir no mesmo período, como apresentado na figura 2.3. (Sandia National Laboratories, 2006).

Figura 2.3 – A Energia Solar Comparada a Outras Fontes Renováveis.



Fonte: Energia Heliotérmica (2017).

Não existiam muitas pesquisas sobre energia solar antes de 1972, por isso era difícil se encontrar equipamentos específicos para a utilização em resfriamento com a energia solar, já hoje em dia, com a busca por energias renováveis e alternativas para a redução de energia elétrica utilizada, que teve início devido à crise energética de 1970, temos diversos equipamentos que com uma simples conversão podemos utilizar para ar condicionado. (Miller, 2008).

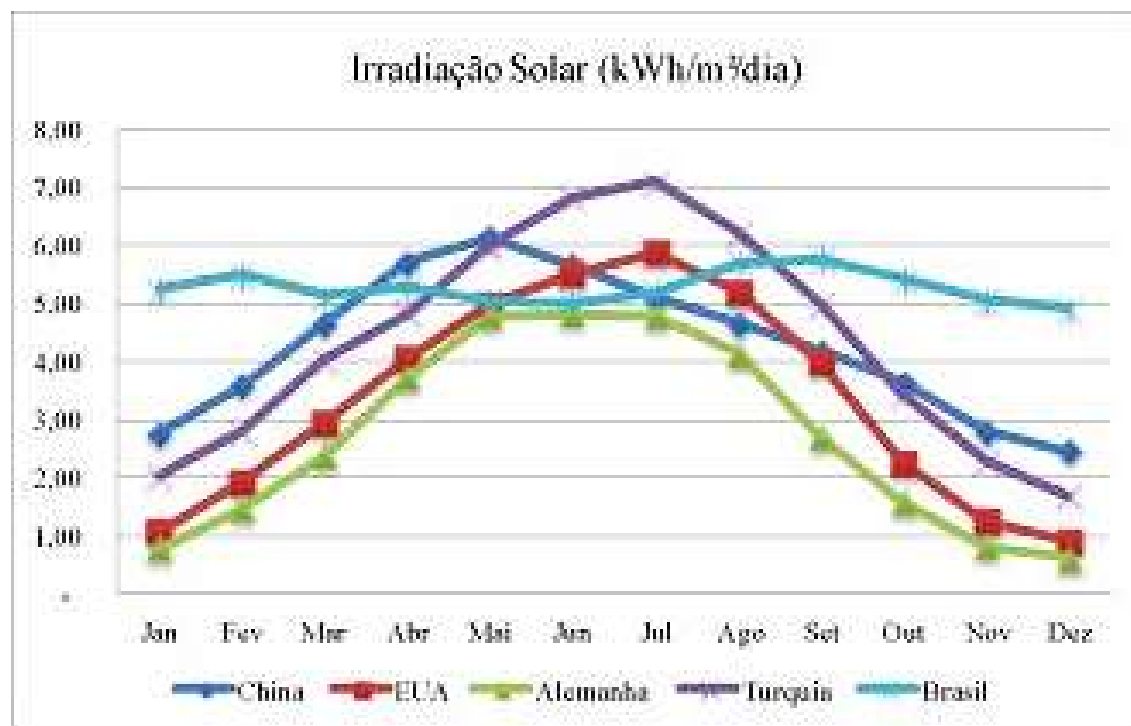
Podemos dividir os tipos de utilização de energia solar em Diretos e Indiretos e também em Passivos e Ativos. Os diretos são aqueles em que a energia solar só sofre uma transformação antes de ser utilizados pelo Homem, exemplo as Células Fotovoltaicas. Os indiretos são aqueles em que a energia solar precisa de mais de uma transformação para que ocorra uma energia utilizável. Sistemas passivos são muitas vezes diretos e neles não ocorre a utilização de outros meios de energia para a melhora da captação solar. Já em sistemas ativos temos o auxílio de equipamentos mecânicos, elétricos ou químicos para que assim melhore a efetividade da coleta solar. (Miller, 2008).

2.3 RADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL

A radiação solar que chega à terra pode ser dividida em duas componentes: radiação direta e difusa. A radiação direta é a parte da radiação solar que não sofre nenhum desvio pela atmosfera, vindo diretamente do sol. Ela pode ser concentrada com uma lupa e é devido a sua presença que existem sombras bem definidas em dias ensolarados. A radiação difusa, por sua vez, é aquela que alcança a superfície da Terra vindo de todas as direções, após ter sido dispersada pelas moléculas, partículas e nuvens presentes na atmosfera. A radiação difusa pode ser interpretada como a claridade do céu quando o sol está totalmente encoberto por nuvens e é aproveitada pela tecnologia fotovoltaica. (Energia Heliotérmica, 2017).

O Brasil é um país que tem média de irradiação solar constante e elevada em comparação com outros países que utilizam com maior frequência e em maior escala essa fonte de energia, como podemos ver na figura 2.4. Com ela também identificamos que a energia solar no Brasil sofre uma variação ínfima durante o ano, o que significa que o país tem o cenário ideal para uma boa captação constante ao longo de todo o ano.

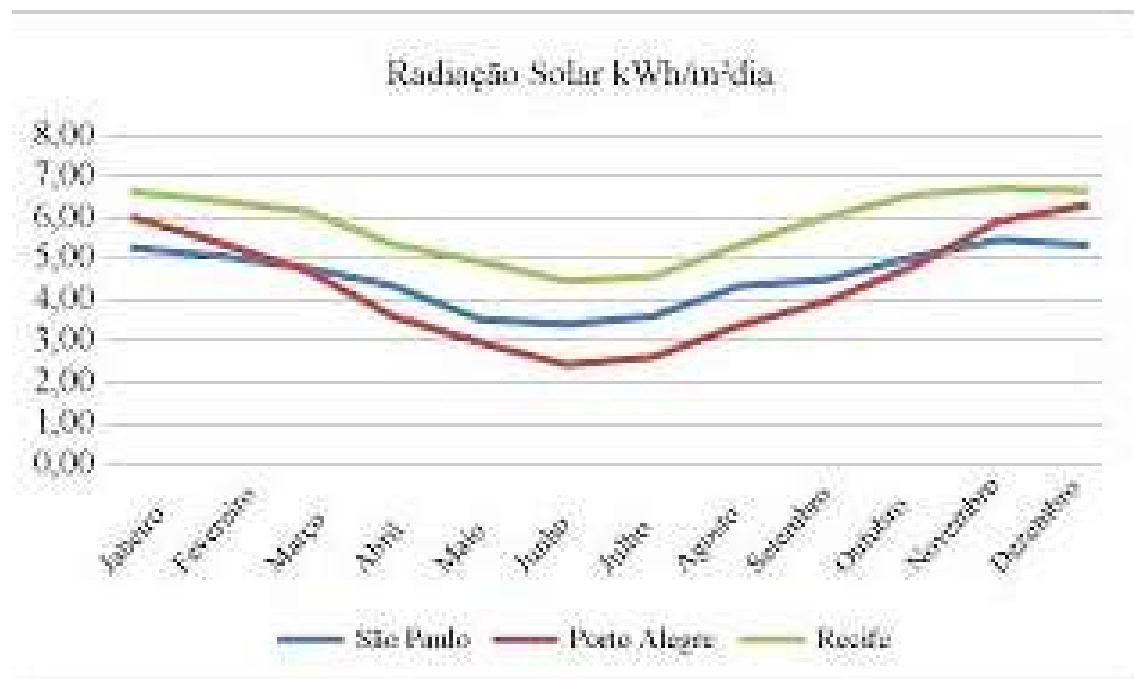
Figura 2.4 – Média mensal de irradiação solar para os cinco países que mais possuem coletores solares de aquecimento instalados:



Fonte: Silva e Moreira (2015).

Se analisarmos algumas capitais do Brasil notaremos que a radiação solar é constante em diversos pontos do Brasil e mesmo em áreas com radiação menor ela ainda é alta o suficiente para que o uso de energia solar seja viável, visto na figura 2.5.

Figura 2.5 – Radiação solar nas capitais selecionadas:



Fonte: Silva e Moreira (2015).

3 CICLOS TERMODINÂMICOS DE REFRIGERAÇÃO

3.1 LEIS DA TERMODINÂMICA

Os conceitos que os antecedem os ciclos de refrigeração decorrem do conhecimento adquiridos com as leis da termodinâmica.

A Primeira Lei da Termodinâmica relaciona as mudanças de estado detectadas num dado sistema às quantidades de energia, na forma de calor e trabalho, que são transferidas no processo analisado: esta é considerada a Lei da conservação de energia.

A Segunda Lei da Termodinâmica indica que todos os processos conhecidos ocorrem num certo sentido e não no oposto. Sabe-se que é impossível construir uma máquina no qual o único efeito seja transferir calor espontaneamente de um corpo de temperatura mais baixa a um outro cuja temperatura é mais alta. (Van Wylen, 2003)

Para realizarmos a transferência de calor de um corpo com uma temperatura mais baixa para um com temperatura mais elevada deve-se fornecer energia a esse sistema de forma ao sistema funcionar no sentido não natural.

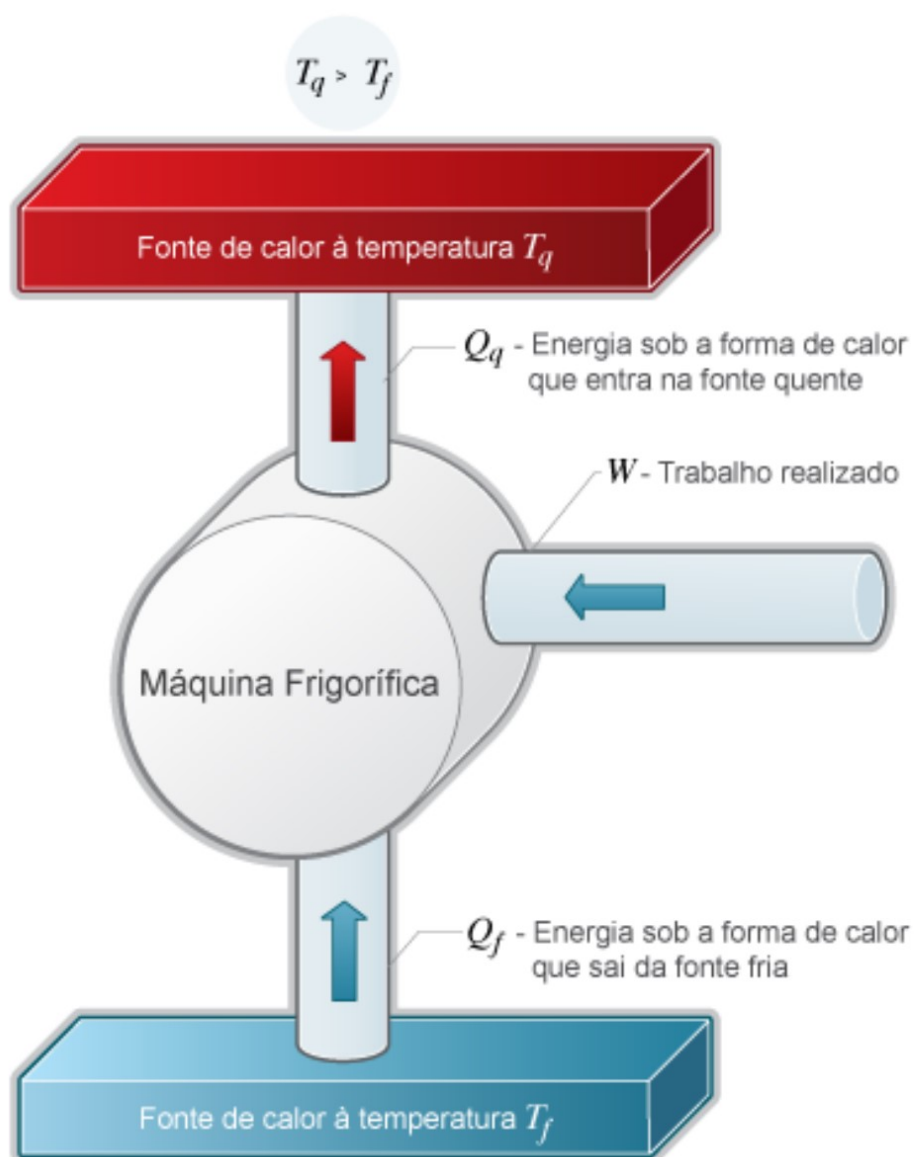
3.2 CICLOS DE REFRIGERAÇÃO

A refrigeração é o processo de remoção de calor de onde ele não é desejado. O calor é removido dos alimentos para preservar suas qualidades e sabor. É removido do ambiente para conforto humano. Existem infinitas aplicações na indústria nas quais o calor é removido de certo local ou de um material de forma a alcançar um efeito desejado. (Miller, 2008)

Durante a refrigeração, o calor indesejado é transferido para uma área onde não seja prejudicial. Um exemplo disso é o condicionador de ar de janela que resfria o ar numa sala e descarrega o ar quente no ambiente externo. (Miller, 2008)

O esquema representado na figura 3.1 apresenta o conceito de resfriar um ambiente no qual com a adição de trabalho podemos enviar não naturalmente o calor da fonte fria para a fonte quente.

Figura 3.1 – Esquema termodinâmico de uma máquina frigorífica



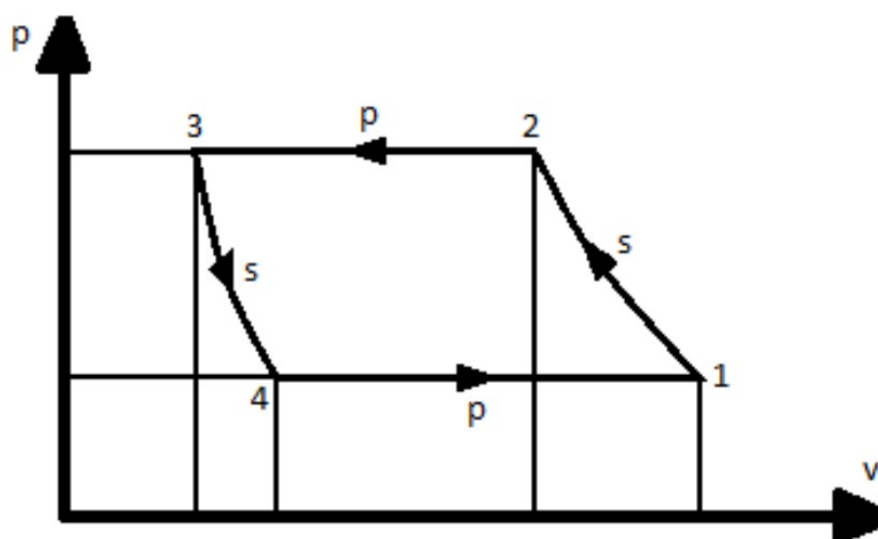
Fonte: E-Escola (2016).

O fluxo de energia visto na figura 3.1 pode ser descrito com a equação (3.1) na qual a transferência do calor do meio frio para o meio quente é igual ao trabalho realizado.

$$|Q_q| = W + |Q_f| \quad (3.1)$$

O ciclo frigorífico é uma aplicação da Segunda Lei da Termodinâmica, e é representado por um ciclo termodinâmico composto por quatro processos, comumente chamados de Ciclo de Carnot inverso, com o objetivo de retirar calor de um corpo com temperatura mais baixa para outro corpo cuja temperatura esteja maior, assim acrescentando energia ao sistema (Van Wylen, 2003)

Figura 3.2 – Ciclo de refrigeração baseado em quatro processos



Fonte: Mendonça (2010).

O ciclo ideal de refrigeração pode ser representado pela figura 3.2 é composto por dois processos isobáricos e isotérmicos (4-1 e 2-3), intercalados por dois adiabáticos (1-2 e 3-4). O trabalho líquido requerido pelo ciclo é igual a área limitada pelas linhas que correspondem aos processos 1-2-3-4, independentemente de o processo ocorrer em regime permanente ou em conjunto cilindro-pistão. (Mendonça, 2010)

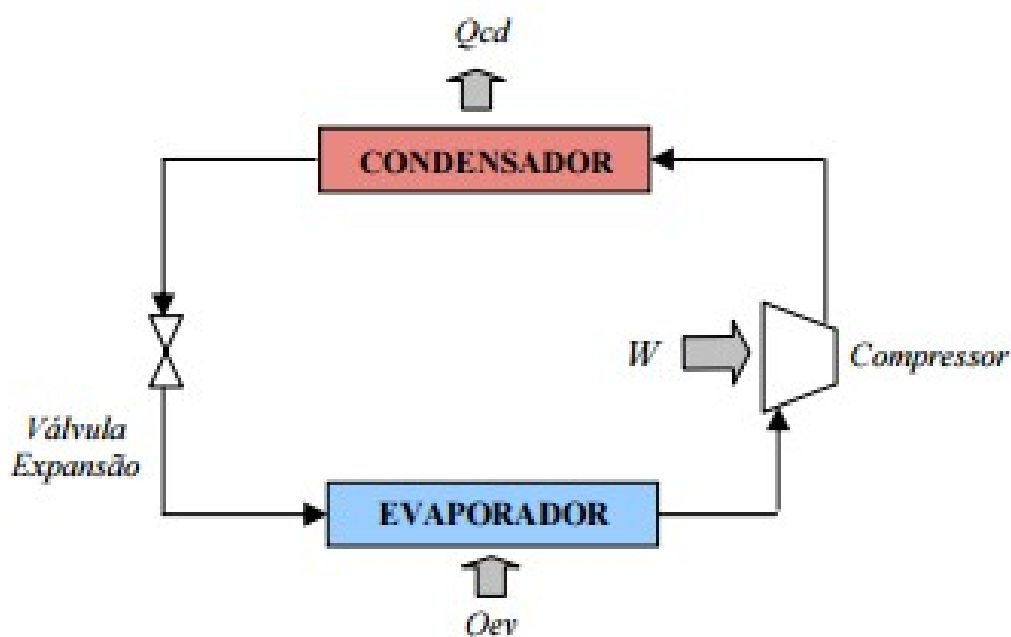
A capacidade de uma usina frigorífica é usualmente dada em toneladas de refrigeração. Esse termo teve sua origem na indústria de gelo, onde a capacidade de resfriamento era dada em toneladas de gelo fundido por dia. A unidade agora é definida como:

$$\begin{aligned}
 1 \text{ t de refrigeração} &= 72\,576 \text{ kcal de refrigeração por dia} \\
 &= 3\,024 \text{ kcal de refrigeração por hora} \\
 &= 288\,000 \text{ Btu de refrigeração por dia} \\
 &= 12\,000 \text{ Btu de refrigeração por hora}
 \end{aligned}$$

3.3 CICLO DE COMPRESSÃO

O ciclo de Compressão é o mais simples e de maior aplicabilidade para o resfriamento de alimentos e de conforto humano, sua função consiste na retirada de calor de um ambiente e o seu transporte para um local exterior ao primeiro, o ciclo é composto de evaporador, compressor, condensador, dispositivo de expansão e outros componentes. Como podemos observar na figura 3.3. (Garcia, 2006).

Figura 3.3 - Ciclo de Compressão:



Fonte: Garcia (2006).

O fluido refrigerante é o responsável pelo transporte de energia térmica, é por meio dele com sua evaporação que o calor é retirado do meio desejado, por isso os fluidos refrigerantes devem evaporar em temperaturas relativamente baixas, já quando ele sofre a condensação ocorre a rejeição de calor para o meio externo.

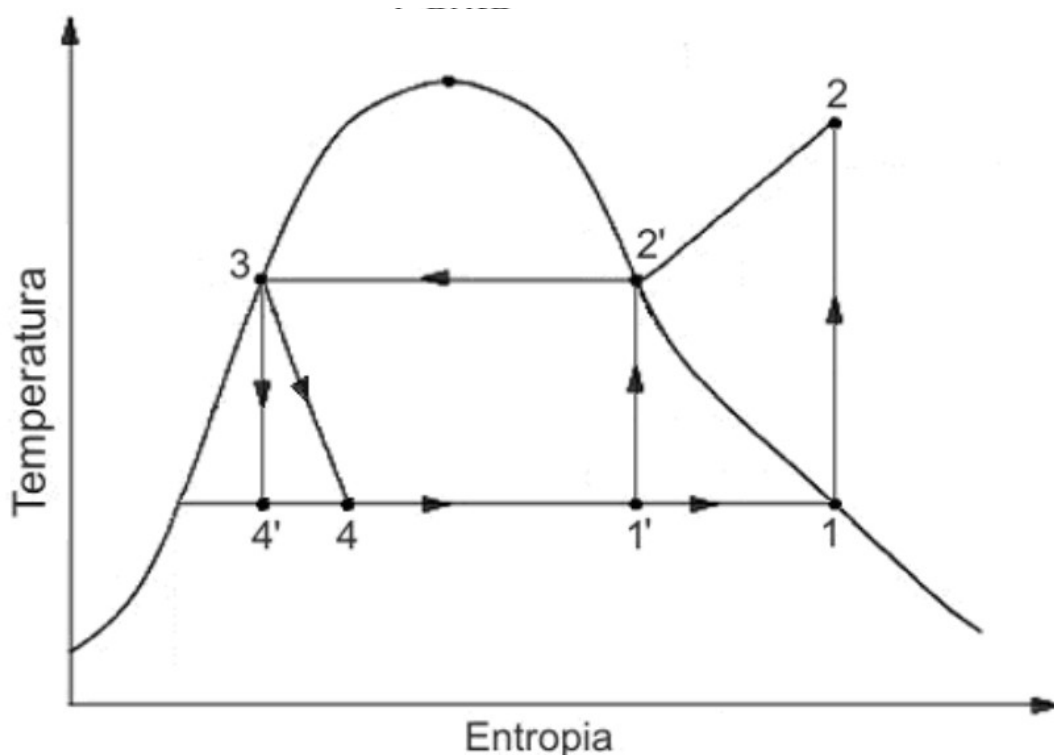
Pode-se analisar o ciclo saindo do compressor no qual o fluido é comprimido no estado de vapor superaquecido, tendo pressão e temperaturas aumentadas, seguindo para o condensador onde ele rejeitara calor para o ambiente externo e se tornará líquido superesfriado, seguindo assim para a válvula de expansão na qual ele tem uma queda de pressão e temperatura, em seguida ele vai para o evaporador onde ele troca calor com o ambiente resfriando assim o mesmo e retornando para o início do ciclo. (Garcia, 2006).

O ciclo ideal para a refrigeração por compressão, a vapor, é mostrado na figura 3.3 com o gráfico da figura 3.4 segundo o ciclo 1-2-3-4-1. Vapor saturado a baixa pressão entra no compressor e sofre uma compressão adiabática reversível 1-2. O Calor é então rejeitado à pressão constante no processo 2-3 e o fluido de trabalho deixa o condensador como líquido saturado. Segue-se um processo de estrangulamento adiabático, processo 3-4, e o fluido de trabalho é então evaporado à pressão constante, processo 4-1, para completar o ciclo. (Van Wylen, 2003).

A semelhança com o ciclo Rankine é evidente, pois é essencialmente o mesmo ciclo ao inverso, com exceção da válvula de expansão que substitui a bomba no primeiro ciclo. Sendo esse processo de estrangulamento irreversível, enquanto que o processo de bombeamento do ciclo Rankine é reversível. (Van Wylen, 2003).

Pode-se notar o afastamento do ciclo ideal com o ciclo de Carnot, que fica evidente com a figura 3.4 sendo o ciclo de Carnot representado pelo 1'-2'-3-4'-1'. A razão do afastamento entre os ciclos apontado por Van Wylen se deve a conveniência de se ter um compressor que opere apenas com vapor e não somente com uma mistura de líquido e vapor, que seria necessária para o processo 1'-2', sendo virtualmente impossível comprimir uma mistura tal como a representada pelo estado 1' e manter o equilíbrio entre o líquido e vapor, porque deve-se haver transferência de calor e de massa através das fronteiras das fases. Também se é mais simples ter uma válvula de expansão sendo um processo irreversível do que se ter um dispositivo de expansão que receba líquido saturado.

Figura 3.4 – Diagrama Temperatura – Entropia do ciclo ideal de refrigeração:



Fonte: Van Wylen (2003).

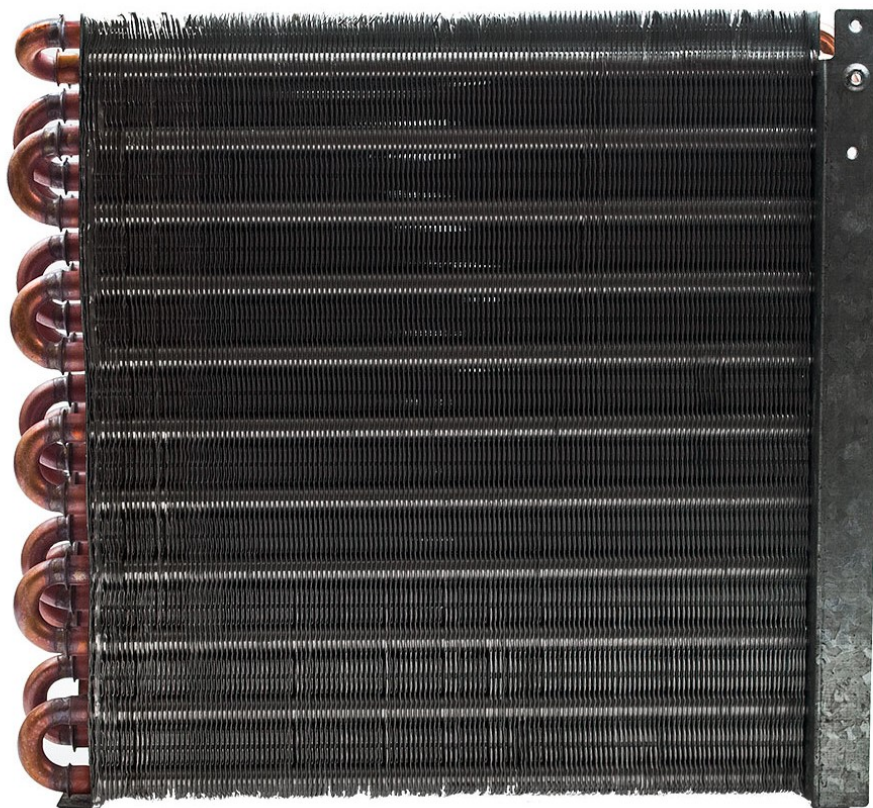
A medida de desempenho deste ciclo de refrigeração é dada em função do coeficiente de eficácia (β), definido pela equação 3.1:

$$\beta = \frac{q_L}{|w_c|}; \quad (3.2)$$

3.3.1 Evaporador

A função do evaporador é remover calor do ambiente que deve ser resfriado, assimtemosa condensação no sistema, deve-se ater ao congelamento da água, pois isso é ruim para o sistema do evaporador que com isso será forçado a trabalhar mais, pois o gelo forma uma camada isolante dificultando a troca de calor com o ambiente. Temos um exemplo de evaporador na figura 3.5. (Miller, 2008).

Figura 3.5- Evaporador dejanela:



Fonte: Polipartes (2016).

Basicamente um evaporador consiste de um trocador de calor para aquecer o fluido até atingir a temperatura de evaporação e um separador do vapor formado pela fase líquida em ebulição.

3.3.2 Condensador

O Condensador tem a função de retirar calor do fluido refrigerante quente para o meio externo ao qual se deseja refrigerar, essa rejeição de calor ocorre de maneira ao vapor quente ser resfriado até virar líquido. Temos um exemplo de condensador na figura 3.6. (Miller, 2008).

Figura 3.6– Condensador:



Fonte: Polipartes (2016).

Ele pode ser resfriado a ar ou a água, o mais amplamente utilizado em residências e indústrias é o a ar, pois a outra demanda de uma fonte grande de água limpa para fazer o resfriamento do gás do condensador. (Miller, 2008).

3.3.3 Compressores

Os compressores para refrigeração podem ser classificados de acordo com o número de cilindros, método de compressão, tipo de acionamento e localização da força de acionamento ou do motor. (Miller, 2008).

O método de compressão pode ser alternativo, centrífugo ou rotativo. A localização da fonte de energia elétrica também classifica os compressores. Os compressores independentes são acionados por correias. Os compressores semi-herméticos possuem acionamento direto, em alojamentos diferentes de motor e compressor, já os herméticos são diretos e nos mesmos alojamentos. Na figura 3.7 temos um exemplo de compressor rotativo. (Miller, 2008).

Figura 3.7 – Compressor Rotativo:



Fonte: REFRIGÁS (2016).

As unidades alternativas possuem um pistão dentro de um cilindro. O pistão atua como uma bomba para aumentar a pressão do refrigerante do lado de baixa até o lado de alta do sistema. O compressor alternativo mais usado é feito para os refrigerantes R-22 e R-134a. (Miller, 2008).

3.3.4 Válvula de expansão

A válvula de expansão ou tubo capilar tem como principal função baixar a pressão do fluido que vem do condensador, que por sua vez também reduzindo a temperatura do mesmo. Temos um exemplo desse equipamento na figura 3.8.

Figura 3.8 – Válvula de Expansão Termostática:



Fonte: REFRIGÁS (2016).

Ela tem o formato de um tubo com um diâmetro reduzido em seu centro servindo assim para diminuir a pressão do fluido e sua temperatura por conta do primeiro, sendo muito importante para manter a pressão do ciclo e um processo irreversível.

3.3.5 Fluidos refrigerantes

Os fluidos refrigerantes são muito importantes para o ciclo, pois o fluido é o responsável pelas trocas de calor entre os ambientes, um bom fluido refrigerante absorve calor latente quando evapora, que em geral ocorre em temperaturas e pressões muito baixas. O refrigerante também deve liberar calor latente quando condensa, o que geralmente ocorre em temperaturas e pressões elevadas.

O Fluido mais utilizado nos dias de hoje é o R-134a que foi desenvolvido para substituir o R-12 que como outros hidrofluorocarbonetos (HFC) causam danos à camada de ozônio, com isso causando um grande impacto ambiental que foi a causa para a busca de uma alternativa para esse fluido largamente utilizado na maioria dos equipamentos refrigerantes antigos devido as suas excelentes características. Já o R-134a apresenta características semelhantes ao R-12 mesmo não sendo um HFC o tornando um bom substituto, embora tenha algumas características inferiores para certos casos específicos necessitando assim de outros substitutos.

Como o refrigerante sofre uma mudança de fase durante o processo de troca de calor, a pressão do refrigerante será maior que a pressão de saturação durante os processos de fornecimento e rejeição de calor. Baixas pressões significam grandes volumes específicos e, correspondentemente, grandes equipamentos. Altas pressões significam equipamentos menores, porém estes devem ser projetados para suportar maiores pressões. Em particular, as pressões devem ser bem menores do que a pressão crítica. Para aplicações a temperaturas extremamente baixas, pode ser usado um sistema fluido binário, colocando-se em cascata dois sistemas distintos. (Van Wylen, 2003).

3.3.6 Afastamento do ciclo ideal para o real

O ciclo real se afasta do ideal principalmente devido às perdas de carga associadas com o escoamento do fluido e à transferência de calor para ou do meio envolvente. O vapor que entra no compressor estará provavelmente superaquecido. Durante o processo de compressão ocorrem irreversibilidade e transferência de calor para ou do meio, dependendo de suas temperaturas. Portanto, a entropia pode aumentar ou diminuir durante esse processo, pois irreversibilidade e transferência de calor para o refrigerante aumenta a sua entropia, e a transferência de calor do refrigerante provoca diminuição de entropia. A pressão do líquido que deixa o condensador será menor que a pressão do vapor que entra, e a temperatura do refrigerante, no condensador, será um pouco acima daquela do meio para a qual o calor é transferido. Usualmente a temperatura do líquido que deixa o condensador é inferior à temperatura da saturação e pode cair mais um tanto na tubulação entre o condensador e a válvula de expansão. Isso, entretanto, representa um ganho porque, em consequência dessa troca de calor, o refrigerante entra no evaporador com uma entalpia menor, permitindo assim mais transferência de calor para o refrigerante no evaporador. Há uma queda de pressão quando o refrigerante escoar através do evaporador; ele pode ser levemente superaquecido

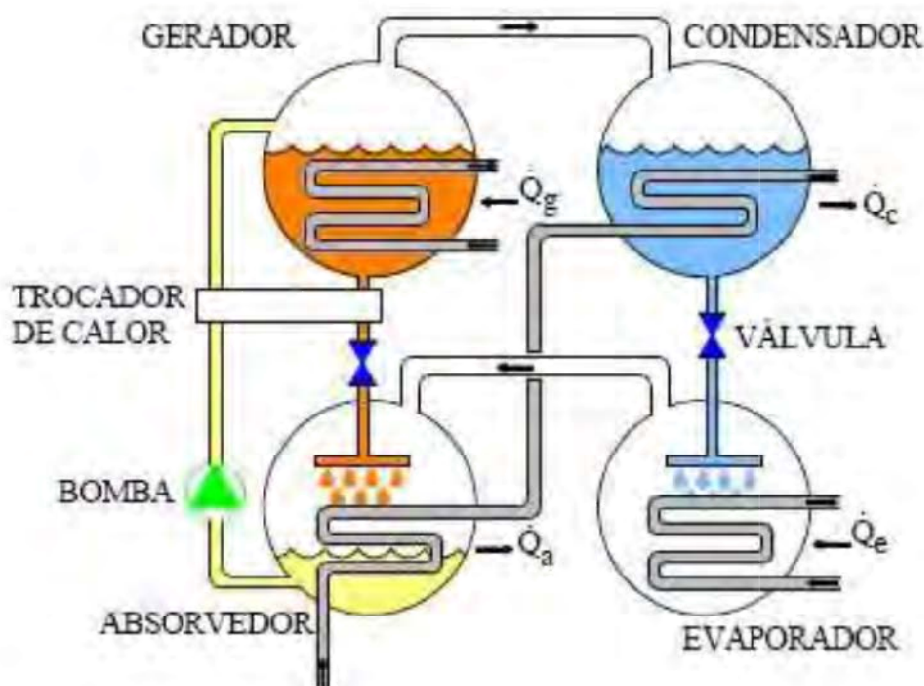
quando deixa o evaporador e, devido à transferência de calor do meio, a temperatura pode aumentar na tubulação entre o evaporador e compressor. Essa troca de calor representa uma perda, porque ela aumenta o trabalho do compressor, em consequência do aumento do volume específico do fluido que entra no compressor. (Van Wylen, 2003).

3.4 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO

O ciclo de refrigeração por absorção é bem semelhante ao de compressão, a grande diferença entre os ciclos é que o de compressão se utiliza de um compressor para entregar vapor de alta pressão para o condensador, com o de absorção primeiro absorve vapor de baixa pressão em um líquido absorvente apropriado. Incorporado no processo de absorção há a conversão de vapor em líquido, desde que esse processo é similar ao de condensação, o calor deve ser rejeitado durante o processo. O passo seguinte é elevar a pressão do líquido com uma bomba, e o passo final é liberar o vapor do líquido absorvente por adição de calor. (Miller, 2008).

O ciclo frigorífico de absorção difere do de compressão na maneira pela qual a compressão é conseguida. No ciclo de absorção, o vapor de amônia a baixa pressão é absorvido pela água e a solução líquida é bombeada a uma pressão superior por uma bomba em sua fase líquida. A Figura 3.9 mostra o arranjo esquemático dos elementos essenciais desse sistema. (Van Wylen, 2003).

Figura 3.9 – Esquema do ciclo de refrigeração por absorção de simples estágio:



Fonte: Carvalho (2007).

O ciclo de absorção é classificado como um ciclo que opera a calor cedido. Seu custo de operação associado com o fornecimento de calor que libera o vapor do líquido de alta pressão. O trabalho elétrico necessário nesse ciclo é consumido somente pela bomba de acionamento que perto do trabalho de um compressor no ciclo de compressor é ínfimo. (Miller, 2008).

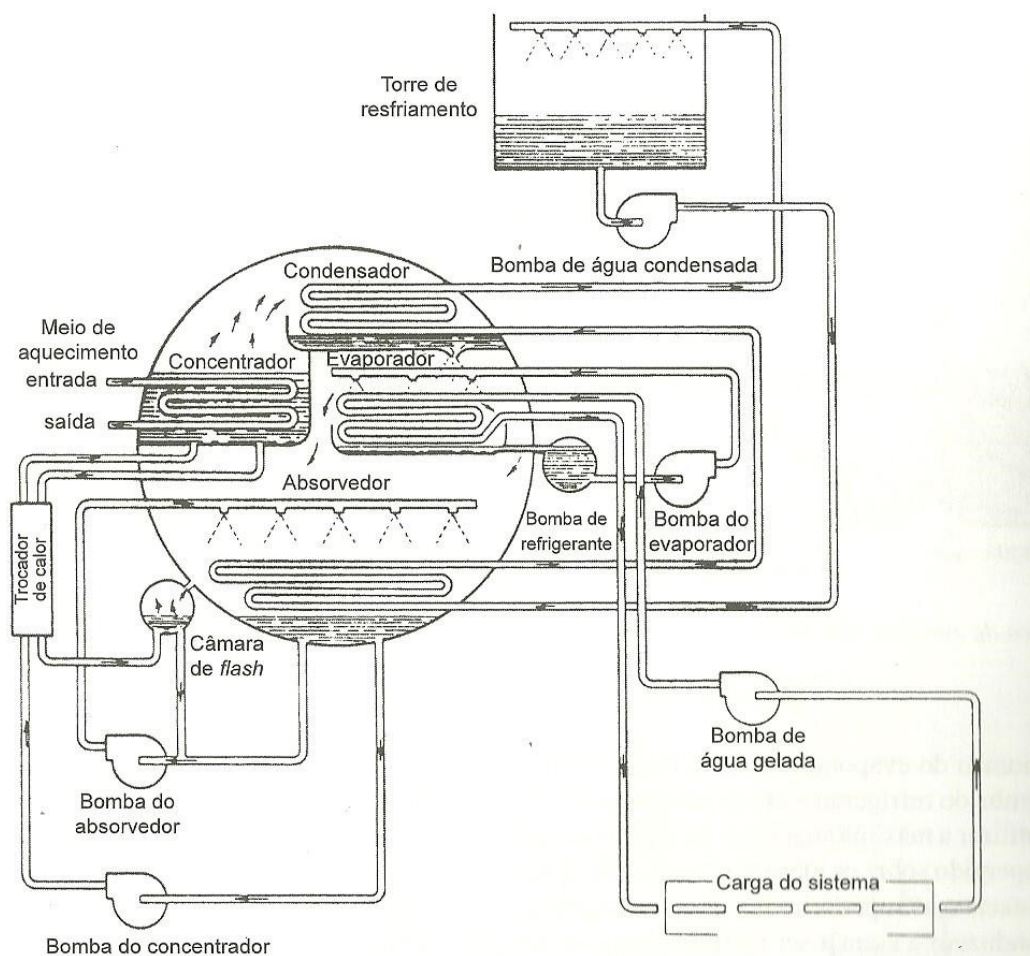
A Característica particular do sistema de absorção consiste em requerer um consumo muito pequeno de trabalho, porque o processo de bombeamento envolve um líquido. Isso resulta do fato que, para um processo reversível em regime permanente com variações desprezíveis de energia cinética e potencial, o trabalho é igual a integral do produto entre o volume e a variação infinitesimal da pressão. (Van Wylen, 2003).

$$W = - \int v \cdot dp ; \quad (3.3)$$

A máquina de refrigeração por absorção é utilizada principalmente para aplicações em condicionamento de ar. Por ser um sistema em geral livre de vibrações, não muito grande e pode ser colocada bem próximas da fonte de água quente ou vapor esteja localizado.

A figura 3.10 tem um diagrama esquemático de um gerador de frio por absorção. Note que o evaporador, o absorvedor, o concentrador e o condensador estão embutidos em um único compartimento.

Figura 3.10 - Esquema de um gerador de frio por absorção:



Fonte: Miller (2008).

No evaporador circula o refrigerante desde a bomba do refrigerante até as ramificações dos aspersores, assim utilizando a máxima superfície para a evaporação. Conforme os jatos tocam a superfície quente dos tubos do líquido a ser resfriado cria-se um vapor. Desta maneira o calor é extraído do tubo, esse vapor criado no processo passa por eliminadores até o absorvedor. (Miller, 2008).

No absorvedor a solução de brometo de lítio mantém a pressão baixa na seção do absorvedor para puxar o refrigerante em forma de vapor de alta pressão. Conforme o vapor escoar para o interior do absorvedor, ele se mistura com a solução absorvente que está sendo aspergida sobre o feixe de tubos. (Miller, 2008).

O trocador de calor é empregado apenas como um economizador. A solução diluída fria da bomba do concentrador é aquecida pela solução concentrada mais quente que se move do concentrador para o absorvedor de vapor e a água quente é conservada. A transferência de calor no trocador leva a temperatura da solução próxima ao ponto de ebulição, que também é próxima a temperatura do absorvedor. (Miller, 2008).

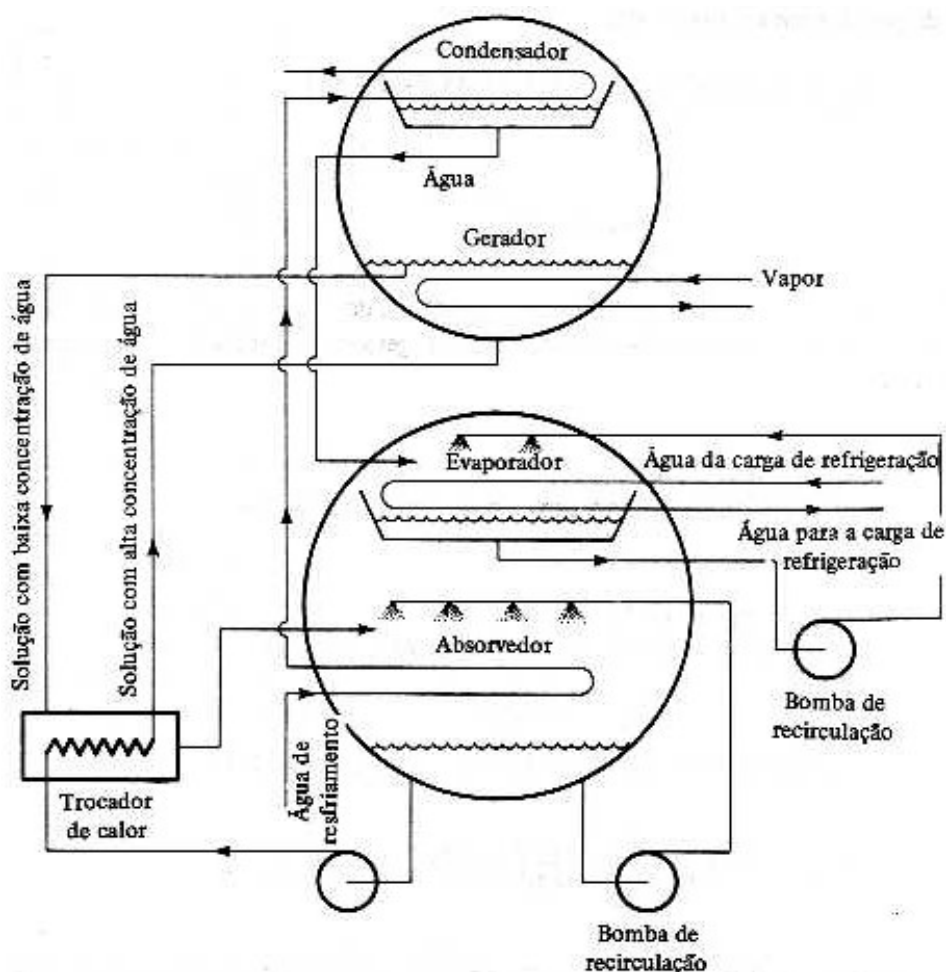
No concentrador vapor ou água a uma temperatura que entra no concentrador é controlada de modo a vaporizar a mesma quantidade de refrigerante que é recebida pelo absorvedor. O refrigerante na fase vapor é entregue fervendo a solução no concentrador. O vapor passa pelos eliminadores até a superfície do tubo do condensador. (Miller, 2008).

Por fim no condensador o refrigerante na fase vapor que vem do concentrador é condensado na superfície do tubo do condensador e cai em uma bandeja abaixo do feixe de tubos. (Miller, 2008).

A construção de uma instalação de absorção comercial tira proveito do fato de que o condensador e o gerador operam à mesma pressão e combinam estes componentes em um mesmo vaso. Similarmente, desde que o evaporador e o absorvedor operam a mesma pressão, estes componentes também podem ser instalados em um mesmo vaso, como mostrado na Figura 3.11. No vaso de alta pressão o vapor de água do gerador deriva para o condensador, onde é liquefeito, enquanto que no vaso de baixa pressão o vapor de água liberado no evaporador escoar para baixo para o absorvedor. (STOECKER; JONES, 1985).

Para aumentar a taxa de transferência de calor no evaporador uma bomba de recirculação pulveriza a água a ser evaporada sobre os tubos do evaporador para resfriar a água da carga de refrigeração. Note-se que a água gelada que serve a carga de refrigeração é um circuito separado da água que serve como refrigerante na unidade de absorção. A manutenção de circuitos separados de água ajuda a manter uma maior pureza na unidade de absorção e permite a água que serve a carga de refrigeração operar a pressões acima da atmosfera. Um outro aspecto mostrado na Figura 3.11 é que a água da torre de resfriamento passa em série pelo absorvedor e condensador, extraíndo calor de ambos os componentes. (STOECKER; JONES, 1985).

Figura 3.11 – Arranjo de componentes em uma unidade de absorção comercial:



Fonte: Stoecker e Jones (1985).

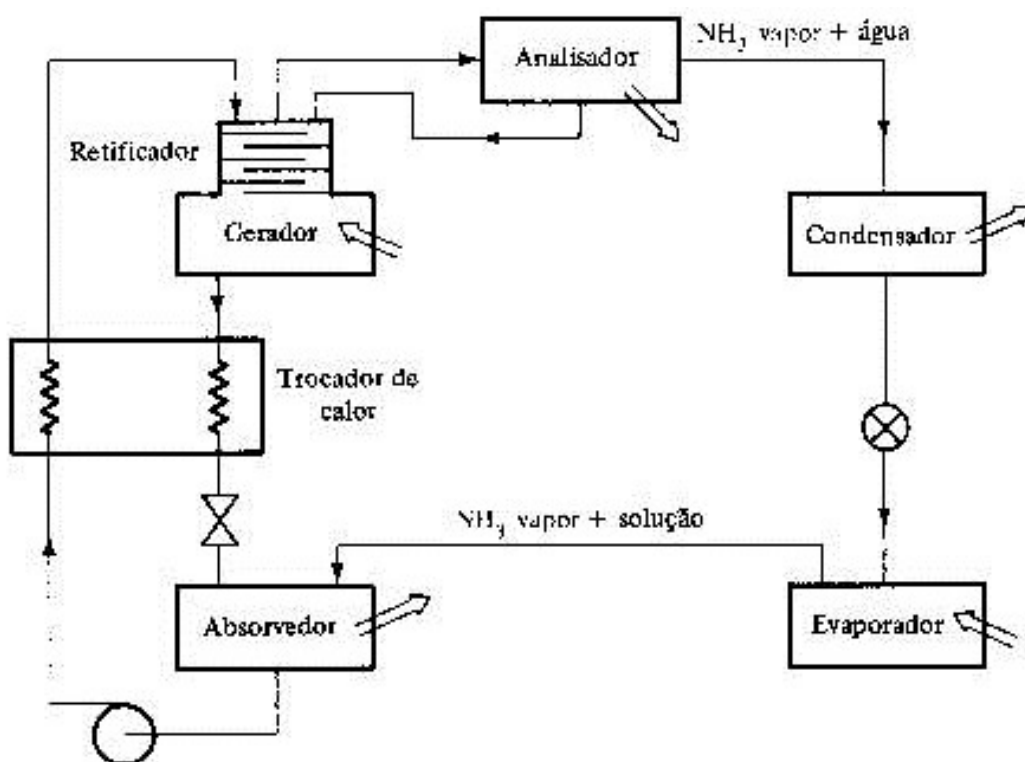
Podem ser utilizadas diversas misturas no ciclo, e dentre as mais utilizadas, pode-se citar:

- A solução de brometo de lítio em água ($\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$), na qual o brometo de lítio faz o papel de absorvente, enquanto a água é o fluido refrigerante (só pode ser utilizado para temperaturas de refrigeração maiores do que 0°C);
- A mistura de água e amônia ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$), na qual a água é o absorvente e a amônia é o refrigerante (pode ser utilizado para temperaturas menores que 0°C).

Sendo para o estudo desse trabalho, abordado apenas o sistema que utiliza a solução de amônia e água ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$). Pois foi a tecnologia empregada no equipamento que se adequa aos parâmetros do ambiente a ser resfriado e com a temperatura de entrada da água mais adequada ao coletor solar essa solução tem o mesmo funcionamento descrito para a solução de brometo de lítio em água.

A combinação chamada de água e amônia foi usada em sistemas de absorção anos antes do brometo de lítio em água torna-se popular. O sistema água-amônia, mostrado esquemático na figura 3.12, consiste em todos os componentes previamente descritos: gerador, absorvedor, condensador, evaporador e trocador de calor da solução, mais um retificador e um analisador. A necessidade deles é ocasionada pelo fato de que o vapor do refrigerante liberado no gerador (a amônia) contém também vapor de água. Quando essa água se encaminha ao evaporador eleva a temperatura ali reinante. Para remover o máximo de vapor de água possível, o vapor retirado do gerador primeiro flui em contracorrente para a solução que entra no retificador. Em seguida a solução passa através do analisador, que é um trocador de calor resfriado a água que condensa algum líquido rico em água, o qual é drenado de volta ao retificador. Uma pequena quantidade de vapor de água escapa ao analisador e deve finalmente passar como líquido do evaporador para o absorvedor. (STOECKER; JONES, 1985).

Figura 3.12 – Sistema de absorção água-amônia:



Fonte: Stoecker e Jones (1985).

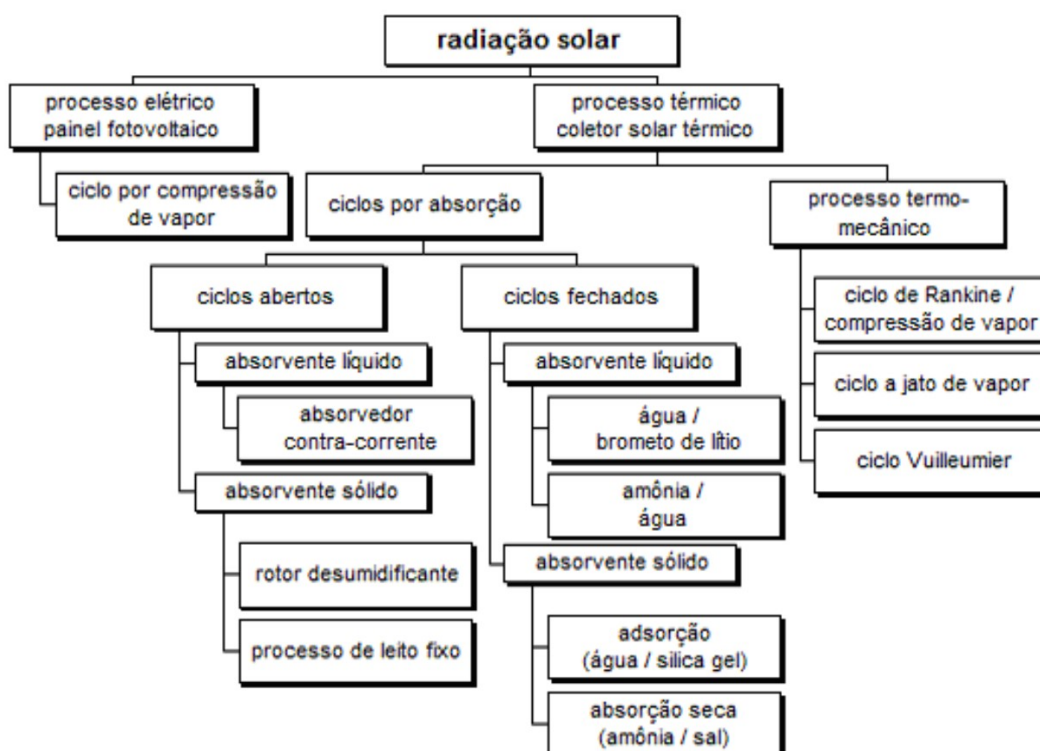
4 SISTEMA DE AQUECIMENTO

4.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

O objeto de estudo deste trabalho é um sistema de absorção alimentado por coletores solares. Dessa forma, é necessário à descrição dos fenômenos que ocorrem nos coletores solares.

A radiação solar pode ser convertida de diversas formas, como demonstrado no fluxograma desenvolvido por MARLA (2016), exposto na figura 4.1.

Figura 4.1 – Fluxograma com transformações da radiação solar para a refrigeração:



Fonte: MARLA (2016).

A transferência de calor ocorrer no painel solar por fenômenos de condução, convecção e radiação. Todos esses fenômenos foram apresentados por Incropera (2011) sendo fundamental o estudo desses fenômenos para o maior entendimento de como a energia é transmitida do sol para o fluido, sendo essencial para descrever os fenômenos da radiação solar.

4.1.1 Condução

A condução é o fenômeno com o qual a energia é transportada na matéria, isso ocorre em decorrência de um gradiente de temperatura, o qual de forma natural vai do meio mais quente para o mais frio, buscando um equilíbrio térmico com essa transferência. Ela ocorre por meio de atividade atômica ou molecular aleatória, sendo que no ponto mais quente as moléculas e átomos estão com uma energia maior, por tanto vibram e se movimentam mais, passando esse movimento para seus vizinhos assim transmitindo a energia. Para esse fenômeno não é necessário um gradiente de velocidade. Para nosso estudo esse fenômeno é visto quando o calor atravessa o tubo devido a diferença de temperatura dentro e fora do mesmo.

4.1.2 Convecção

A convecção é o fenômeno com a qual a energia se transporta por dois mecanismos o da difusão (que é o princípio da condução com movimento aleatórios de moléculas e átomos) e também através de um movimento global de um fluido com gradiente de velocidade, portanto para que tenha o fenômeno de convecção é necessário ter um fluido em movimento, que com esse movimento grande número de partículas passara por outra superfície fazendo que assim uma contribuição grande para a transferência de calor, sendo o termo de advecção usado para relacionar a transferência pela movimentação global e convecção a transferência pela superposição da advecção e da difusão. Esse fenômeno ocorre no interior dos tubos com a água em movimento, sendo esse o gradiente de velocidade, em relação à superfície fixa do tubo, tendo seu gradiente de temperatura entre o tubo e a água.

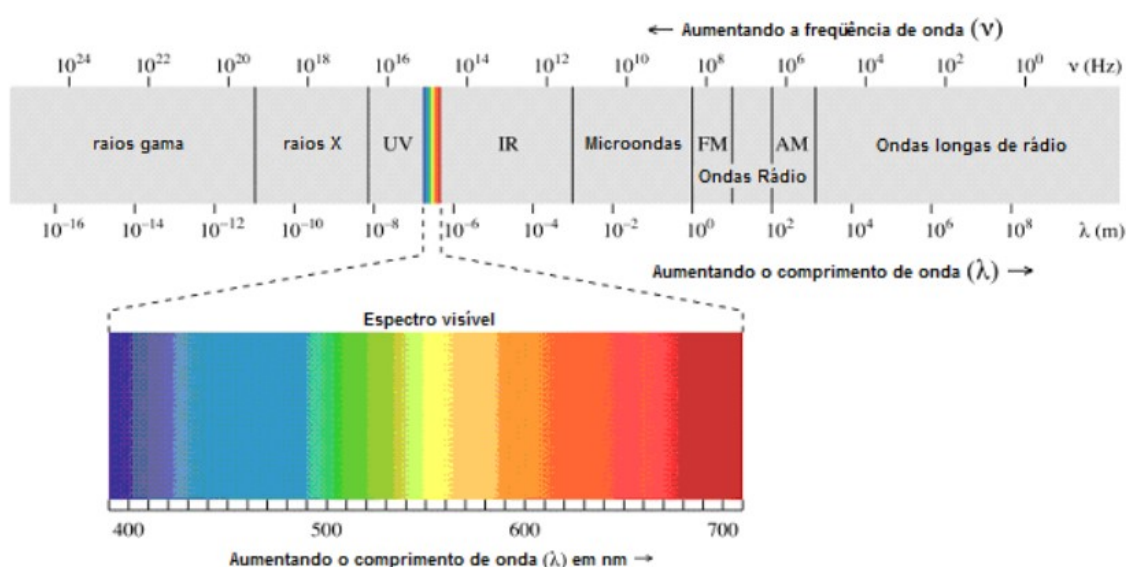
4.1.3 Radiação

O fenômeno da radiação é o mais importante para o sistema de aquecimento. Ele se difere dos anteriores por não necessitar de um meio para se propagar, por esse motivo o calor do sol chega a Terra mesmo atravessando o espaço que é teoricamente vacu. A radiação térmica é transmitida por todas as matérias que tenham temperatura superior ao zero absoluto, essa emissão pode ser atribuída por mudanças nas configurações dos átomos ou moléculas que estão nas matérias. Essa energia é transportada por ondas eletromagnéticas (fótons) por

esse motivo não necessitam do meio para se propagar, sendo até mais eficiente no vácuo por não ter interferência.

Na figura 4.2 está representado todo o espectro eletromagnético, sendo o importante para a radiação térmica o que se encontra aproximadamente entre 0,1 até 100 μm , denominada de porção intermediária, contendo todo o espectro visível e o infravermelho e uma fração do ultravioleta.

Figura 4.2 – Espectro eletromagnético:

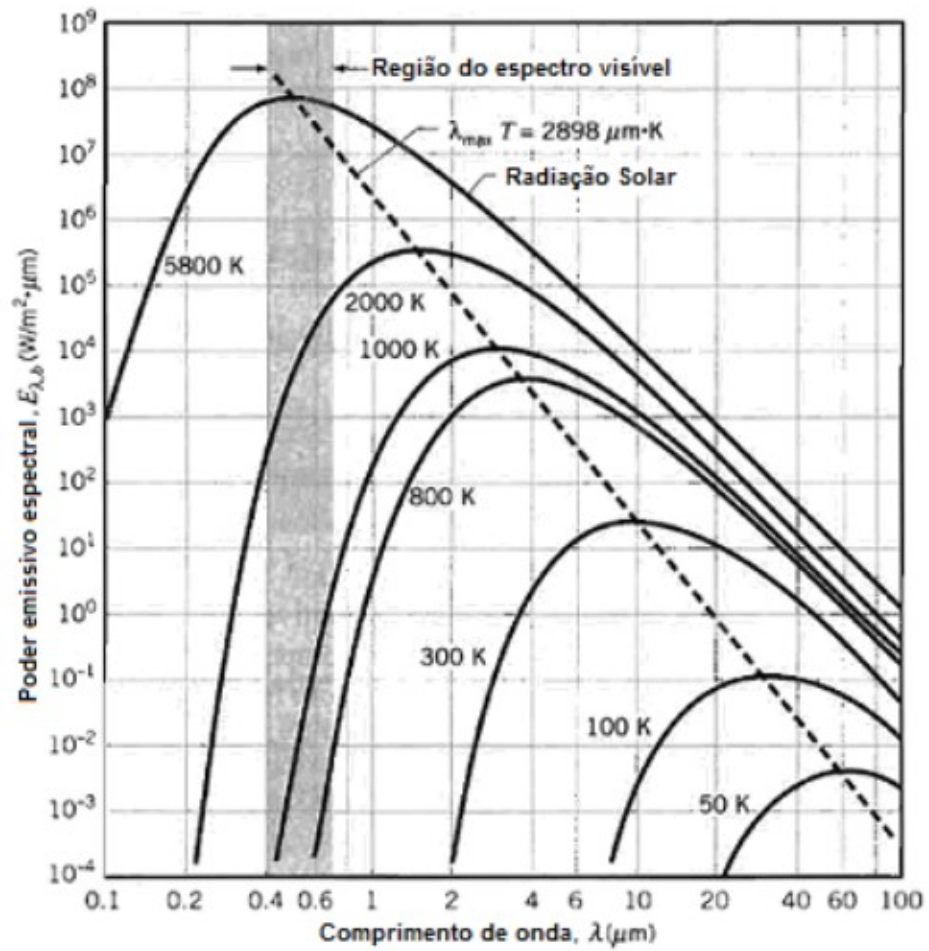


Fonte: Incropera (2011).

A radiação emitida pelo sol pode ser aproximada a radiação de um corpo negro que é mantido a aproximadamente 5800 K em sua superfície, apresentado na figura 4.3, sendo um corpo negro definido por:

1. Um corpo que absorve toda a radiação incidida nele, independentemente de seu comprimento de onda ou direção, um absorvedor perfeito.
2. Que para uma dada temperatura e comprimento de onda a maior emissão possível é de um corpo negro, sendo assim um emissor perfeito.
3. Sendo sua radiação independente de direção, sendo emitida em todas as direções, ou seja, um emissor difuso.

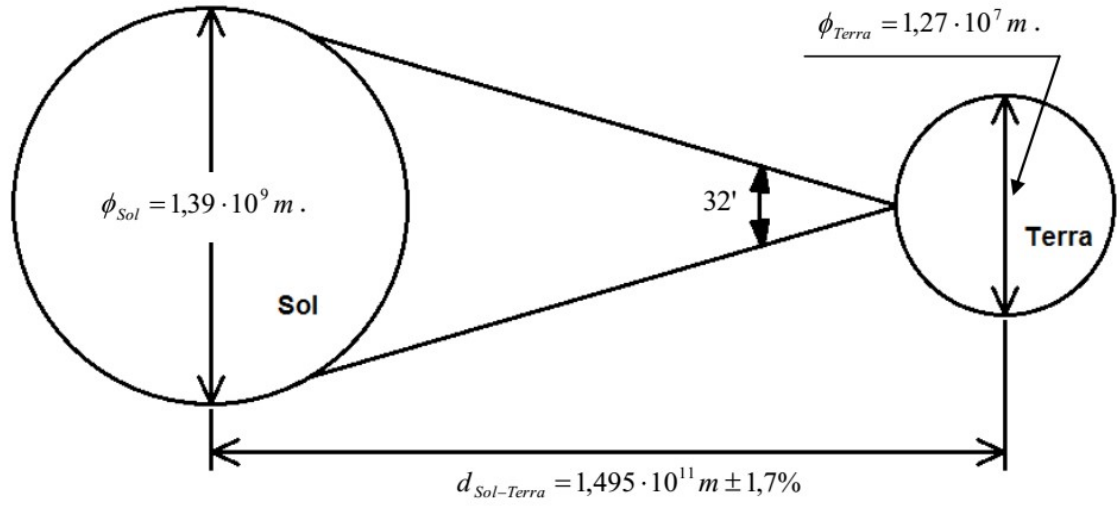
Figura 4.3 – Poder emissivo espectral de corpos negros:



Fonte: Incropera (2011).

A radiação total do sol é aproximadamente igual a $G_{\text{sol}} = 1367 \text{ W/m}^2$, que representa a taxa de incidência por unidade de área. E as dimensões do Sol e da Terra podem ser descritas pela figura 4.4.

Figura 4.4 – Relação geométrica do Sol e da Terra

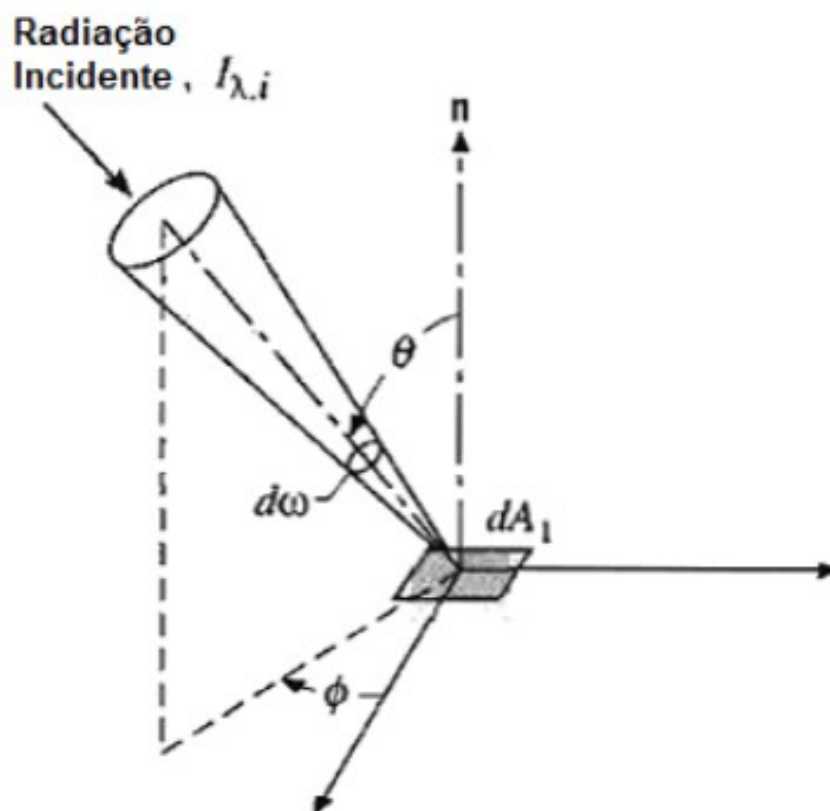


Fonte: Mendonça (2010).

A radiação total $G(\lambda)$ é dada pela equação 4.1 (Incropera, 2011), sendo ela a intensidade da radiação incidente que se relaciona com a irradiação como apresentado na figura 4.5.

$$G = \int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi) \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi d\lambda ; \quad (4.1)$$

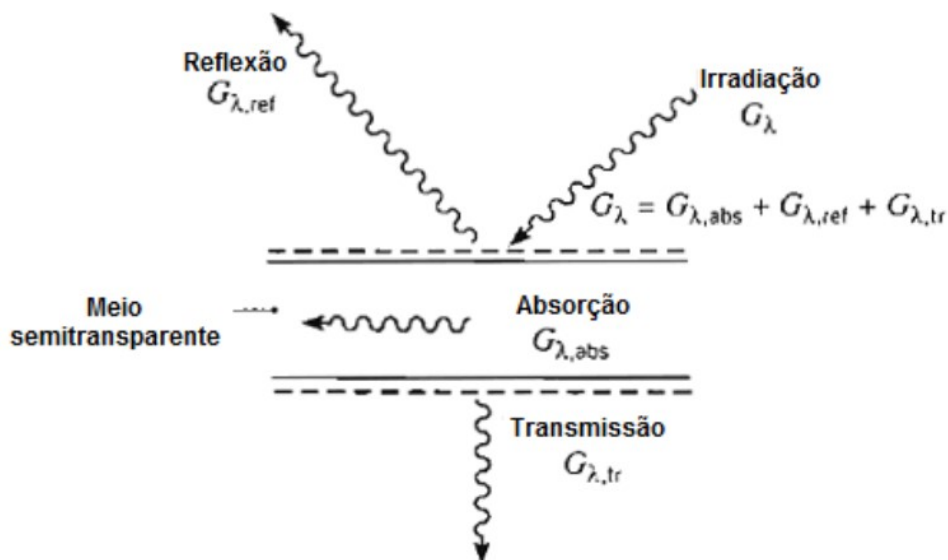
Figura 4.5 – Natureza direcional da radiação incidente:



Fonte: Incropera (2011).

Quando ocorre a irradiação (radiação interceptada) em um meio sólido e semitransparente, deve-se separar em radiação transmitida, que consiste na radiação que atravessou o objeto, a radiação refletida, que é a radiação que é refletida pelo objeto com ângulo de volta a vizinhança (meio exterior ao objeto) e a radiação absorvida, que consiste na radiação absorvida pelo corpo, sendo ela a que é responsável por seu aquecimento. Que é exemplificado na figura 4.6.

Figura 4.6 – Processo de absorção, reflexão e transmissão espectrais associados a um meio semitransparente:



Fonte: Incropera (2011).

Sendo a radiação absorvida a que necessariamente transfere a maior quantidade térmica para o fluido no painel solar, por esse motivo o painel deve ter mecanismos como vidros que diminuam a reflexão para minimizar as perdas por radiação refletida e matérias isolantes no entorno para minimizar as perdas tanto por condução tanto por radiação de transmissão para o meio externo.

4.2 PAINÉIS SOLARES

Painéis solares são equipamentos que captam a luz solar e a utilizam para esquentar água que passa em canos no seu interior, transformando assim a energia solar em energia térmica, esse equipamento é muito utilizado para aquecer água para residências e prédios, algumas vezes tem a necessidade de aquecer mais a água por outra forma de energia, entretanto em um local de incidência solar favorável esse pós-aquecimento não é necessário. (Findley, 2010).

Existem diversos tipos de painéis solares térmicos, entretanto seus princípios de funcionamento são os mesmos, o fluido absorvedor circula dentro de tubos no interior do painel que aquecem o líquido por meio da energia solar, esse fluido se movimenta bem lentamente e após fazer seu aquecimento ele é transportado para um permutador de calor no qual o fluido passa seu calor para a água aquecendo e após esse aquecimento ela é armazenada em um tanque térmico que garante um maior tempo de aproveitamento desse calor. (Painéis solares fotovoltaicos, 2016).

A escolha de um tipo de coletor solar depende basicamente da temperatura de operação requerida em determinada aplicação prática. Por exemplo, para temperaturas elevadas ou produção de vapor é necessário o emprego de coletores concentradores. Como apresentado na figura 4.7 que mostra a usina solar de Barstow- Califórnia composta por espelhos planos, orientados de modo a concentrar os raios solares no alto da torre (foco), onde é produzido vapor a alta pressão e temperatura superior a 550°C. (REDE BRASIL DE CAPACITAÇÃO EM AQUECIMENTO SOLAR, 2011).

Figura 4.7 – Usina Solar de Barstow- Califórnia:

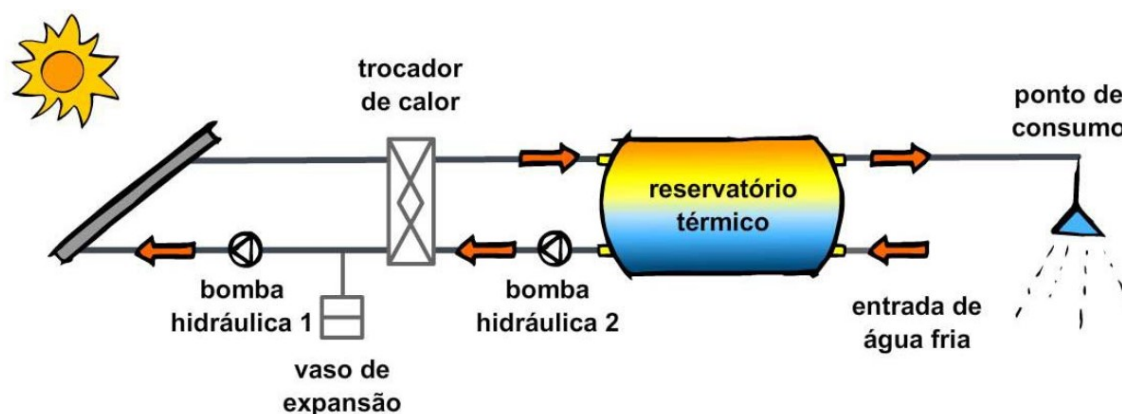


Fonte: IEA (2016).

Tem dois tipos de sistema de aquecimento solar térmico o direto e o indireto, no primeiro a água é aquecida diretamente no coletor solar e essa mesma água é utilizada para o tanque térmico e outras atividades, já no sistema indireto um fluido qualquer, podendo ser também água, é aquecida e por meio de um permutador de calor ocorre o aquecimento da água que será empregada nas atividades. O sistema mais empregado para uso a baixas temperaturas e que será abordado por esse trabalho é o sistema de aquecimento solar térmico direto.

Quando ocorre a impossibilidade de se implantar um sistema de aquecimento convencional, utiliza-se o sistema de aquecimento indireto através do uso de trocadores de calor, como exemplificado na figura 4.8.

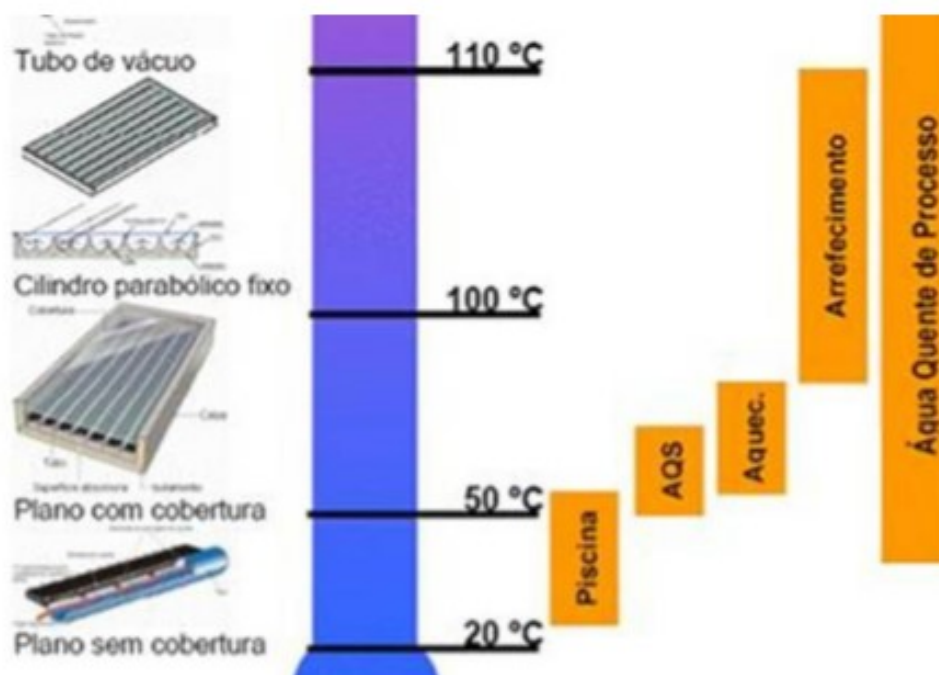
Figura 4.8 – Representação esquemática de um sistema de aquecimento solar com trocador de calor:



Fonte: REDE BRASIL DE CAPACITAÇÃO EM AQUECIMENTO SOLAR (2011).

Com a figura 4.9 tem-se a faixa de temperatura entregue por cada coletor solar e qual o coletor recomendado para dadas utilizações. Sendo esses processos necessários, como nosso coletor trabalhara para suprir temperaturas entre 100 a 50°C podemos utilizar um coletor de placa plana com cobertura. Por ser o mais comum e com preços mais atraentes economicamente.

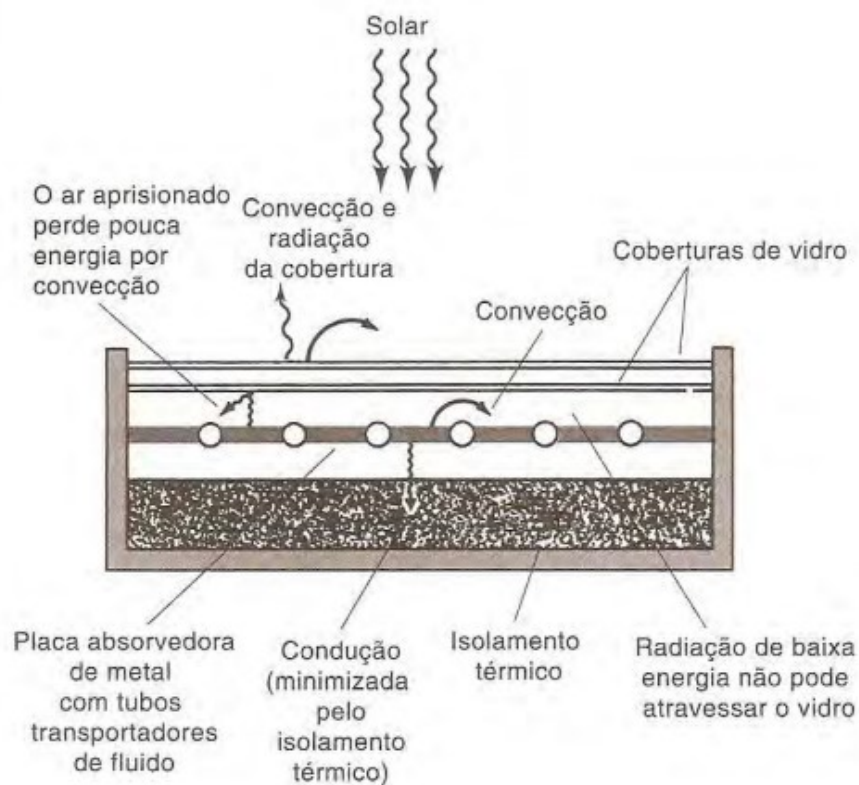
Figura 4.9 - Coletores solares por aplicação e por níveis de temperatura:



Fonte: ABRAVA (2008).

Pode-se ver um coletor de placa plana (figura 4.10). Na qual nota-se os fenômenos da convecção, de radiação e de condução explicados anteriormente, tais fenômenos causam o aquecimento do fluido dentro do coletor solar. Sendo que a radiação proveniente do sol penetra através do vidro da placa plana, tendo uma leve perda por conta da reflexão sofrida e da convecção na superfície, no interior da placa a radiação de baixa energia não atravessa o vidro para o meio externo aproveitando assim mais de sua energia, faz-se assim a compensação das perdas na entrada do vidro, com o aquecimento interno do ar a energia passa por convecção no fluido, sendo que a perda por convecção para o ar é mínima por estar isolado dentro da placa, já para minimizar o efeito da condução a placa é isolada termicamente no seu interior, evitando assim que esse fenômeno cause perdas de energia relevantes para o sistema.

Figura 4.10 - Corte lateral de uma placa plana:



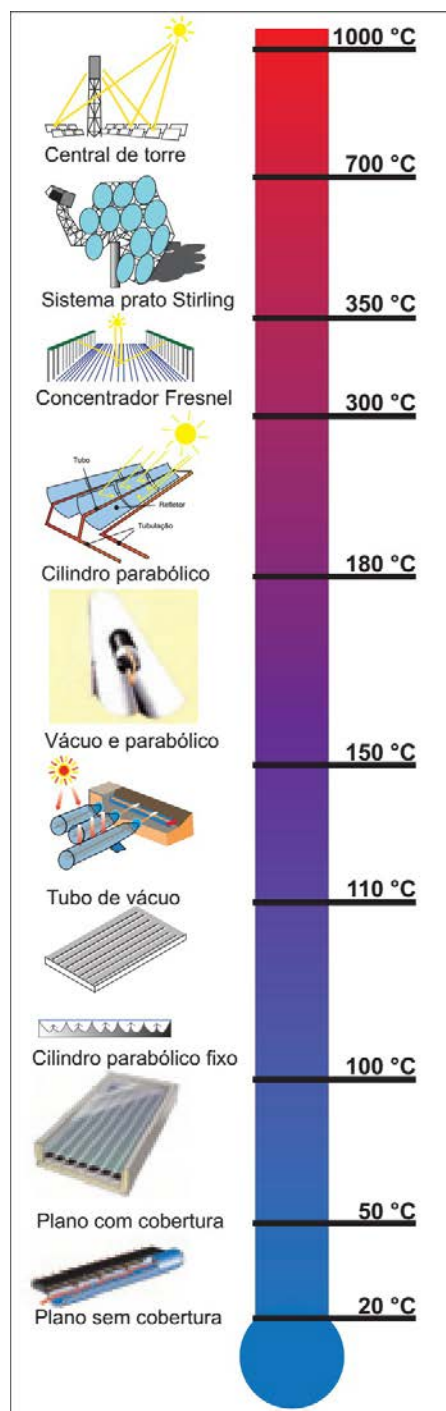
Fonte: Hinrichs, Kleinbach, dos Reis (2011).

Tem-se como principal forma de transferência de calor para o fluido a radiação, pois, os outros processos têm contribuições pequenas para o aquecimento do fluido, sendo que a convecção é muito pequena por não ter movimento do ar dentro do painel solar, e já a condução é desprezível pela espessura do cano que passa o fluido ser muito pequena, podendo assim ser desprezível essa forma de transferência.

4.3 TIPOS DE PAINÉIS SOLARES

Existem diversos tipos de coletores solares, com diferentes funções e complexidade, esses coletores podem ser escolhidos pelo processo a ser utilizada a energia captada ou pela temperatura necessária de saída, como vemos na figura 4.11 mostrando os diferentes tipos de coletores para diversas faixas de temperatura.

Figura 4.11 – Temperatura de trabalho das diferentes tecnologias que fazem uso da energia térmica solar:



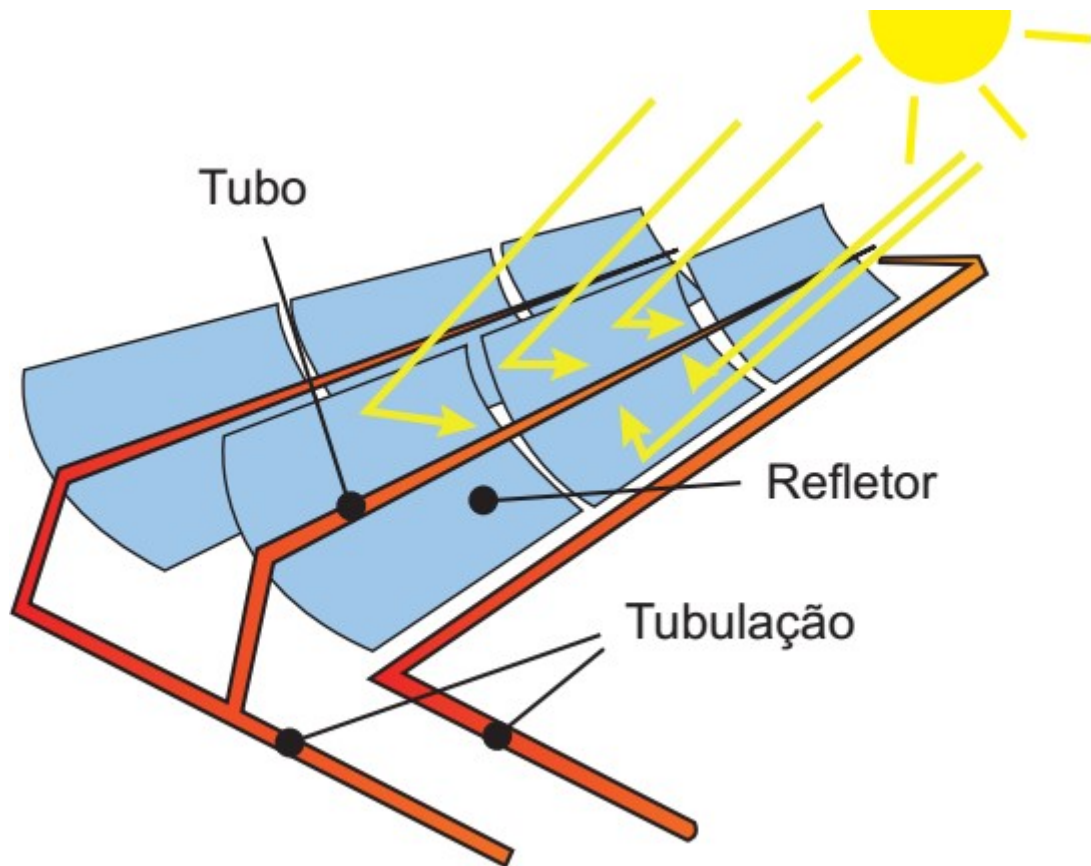
Fonte: Ekos Brasil (2010).

Pela figura 4.11 apresenta as faixas de temperatura e os respectivos coletores solares recomendados para o uso, descreveremos em seguida alguns desses coletores e suas principais características.

A torre solar é uma tecnologia que aproveita a energia térmica para gerar energia elétrica a partir de vapor a alta pressão. A torre solar é formada por um conjunto de espelhos, denominados heliostatos, que acompanham o movimento do Sol durante todo o ano e refletem seus raios para um receptor na torre localizada no centro do conjunto de espelhos. A incidência de todos os raios em um único ponto possibilita que o fluido térmico armazenado na torre atinja temperaturas entre 1500 e 2000°C, podendo assim produzir vapor que é aproveitado para acionar uma turbina e gerar energia elétrica. Assim usando a central solar com o mesmo princípio de uma termoeletrica convencional, só que no caso o “combustível” é a energia solar, em vez do habitual de carvão ou gás natural. (EKOS Brasil, 2010). Um exemplo dessa torre já foi apresentado na figura 4.7 sendo a usina solar de Barstow-Califórnia.

Os concentradores parabólicos são compostos de painéis ou espelhos parabólicos tem o mesmo princípio de funcionamento da central solar: produzindo vapor para acionar turbinas e gerar energia elétrica, porém operam a temperaturas menores que 1.000°C. Nessa tecnologia um fluido térmico, que pode ser água, óleo ou ainda outras substâncias, circula no sistema e por meio da incidência dos raios solares no foco dos espelhos tem sua temperatura elevada. (EKOS Brasil, 2010).

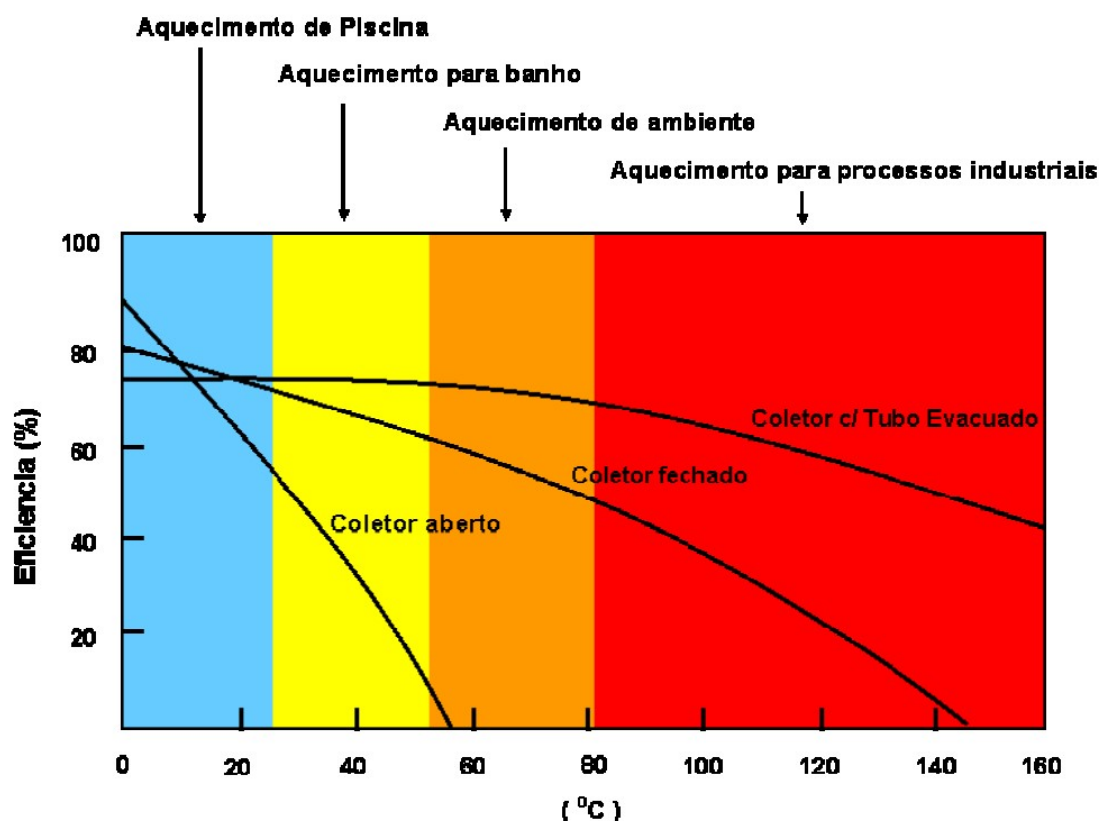
Figura 4.12 – Espelhos e Sistema de fluido do painel solar parabólico:



Fonte: EKOS Brasil (2010).

Os coletores solares de placas planas são os que tem a maior aplicabilidade em baixas temperaturas tendo diferentes eficiências de acordo com o modelo e sua faixa de temperatura, como vemos na figura 4.13 que demonstra os tipos de coletores, aberto, fechado e c/ tubo evacuado e suas faixas de atuação com diferentes eficiências.

Figura 4.13 – Correlação entre tipos de coletores planos e temperatura de operação:



Fonte: REDE BRASIL DE CAPACITAÇÃO EM AQUECIMENTO SOLAR (2011).

Segundo a Rede Brasil de Captação em Aquecimento Solar (2011), o aquecimento de piscinas a temperaturas entre 26 e 30°C é feito por coletores solares abertos, que não possuem uma cobertura transparente nem mesmo um isolante térmico, que com base no gráfico da figura 4.13 tem um excelente desempenho a baixas temperaturas, mas decai para temperaturas mais elevadas. São de materiais poliméricos como polipropileno e epdm. O coletor aberto é apresentado como exemplo na figura 4.14.

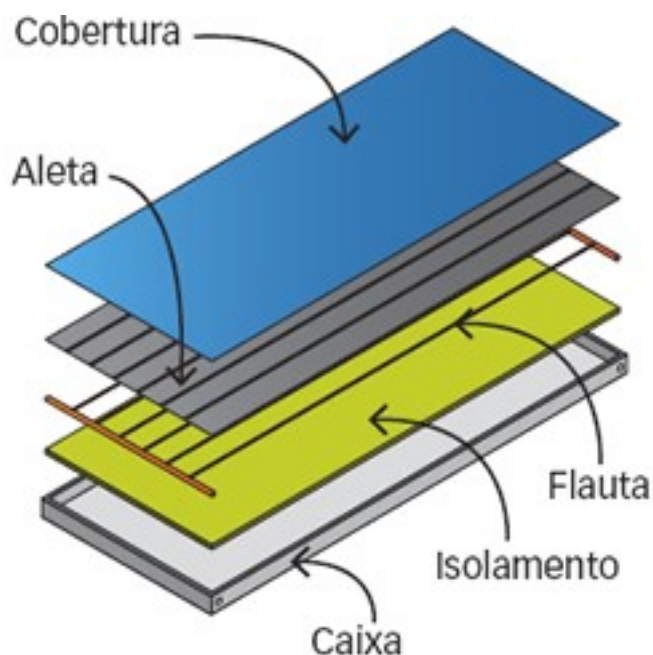
Figura 4.14 – Coletor solar aberto:



Fonte: GREEN, 2016.

Coletores solares fechados são utilizados para uma faixa mais ampla de temperaturas, basicamente da ordem de 70 a 80°C, sendo a temperatura ideal para o modelo escolhido se consideramos uma perda de temperatura pequena entre a saída do coletor e a entrada no equipamento de resfriamento por absorção, é apresentado um esquema de coletor solar fechado na figura 4.15, sendo tipo de coletor empregado nesse trabalho.

Figura 4.15 – Coletor solar fechado:



Fonte: Técnica (2017).

O coletor apresenta alguns equipamentos básicos, descritos a seguir:

- **Caixa externa:** Chapa dobrada em alumínio ou material plástico e que suporta todo o conjunto.
- **Isolamento térmico:** Fica em contato com a caixa externa, tem função de isolar termicamente o conjunto evitando assim as perdas por condução para o meio externo.
- **Flauta (tubos / calhas superior e inferior):** tubo pelo qual o líquido, a água no caso desse trabalho, escoar no interior do coletor, sendo feito de um material com elevada condutividade para intensificar a transferência de energia.
- **Aletas (placa absorvedora):** são as responsáveis por absorver a energia proveniente do sol e transferir para o fluido de trabalho. Elas são geralmente pintadas de preto fosco para melhorar a absorção da energia.
- **Cobertura transparente:** Em geral é de vidro, policarbonato ou acrílico, assim permitindo a passagem da radiação solar e minimizando ao máximo as perdas por convecção e refração da radiação.
- **Vedação:** Serve para manter o equipamento separado da umidade externa.

Os coletores de tubo evacuados, mostrados na figura 4.16, são recomendados para as temperaturas mais elevadas. Por utilizarem uma tecnologia com tubos evacuados para uma absorção maior, podendo assim chegar em temperaturas mais elevadas para o fluido de trabalho, que passa somente na parte superior do coletor, sendo transferida a energia absorvida pelos tubos para eles nessa região realizadas por um trocador de calor condensado.

Figura 4.16 - Coletores de tubos evacuados:



Fonte: MARK (2016).

4.4 RESERVATÓRIO TÉRMICO

O reservatório térmico tem como função armazenar a água aquecida nos coletores evitando ao máximo a perda de calor do fluido para o meio externo. Os reservatórios térmicos de acumulação da água quente em instalações de aquecimento solar são dimensionados para garantirem a demanda diária de água quente do consumidor final na temperatura requerida pela aplicação. (ABRAVA, 2008).

O primeiro passo na escolha do reservatório adequado a cada projeto consiste na determinação de seu volume, o que é feito a partir do dimensionamento da demanda diária do volume de água quente necessário. Tal dimensionamento será visto com detalhes em unidade posterior. Nesta etapa, é também previsto o sistema de aquecimento auxiliar, objetivando a garantia de fornecimento de água quente em períodos de baixa insolação ou consumo excessivo de água quente. (ABRAVA, 2008).

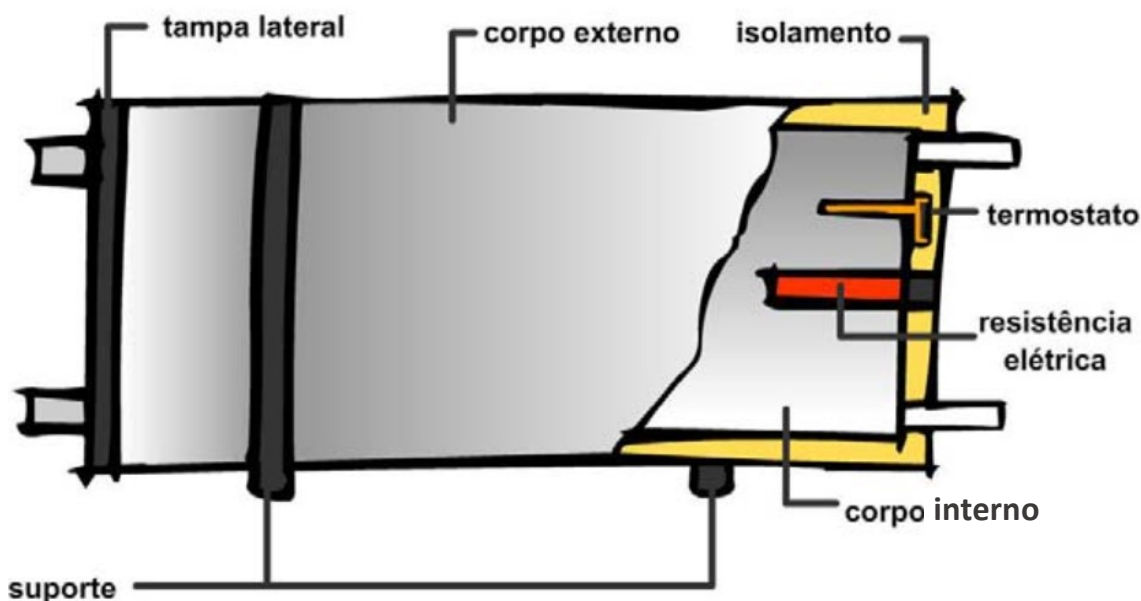
Estudos recentes realizados na Inglaterra estabelecem os cuidados básicos no armazenamento de água (quente e fria). Tais critérios, que visam evitar a proliferação de bactérias como a *Legionella*, são enumerados:

1. O volume armazenado de água quente e fria deve ser reduzido ao mínimo necessário. Reservatórios devem ser fechados para prevenir a entrada de material orgânico.
2. Isolamento dos componentes para que as temperaturas permaneçam fora da faixa crítica de crescimento das bactérias, entre 20 e 50°C.
3. Emprego de materiais metálicos e inorgânicos nas conexões e acessórios das tubulações.
4. Limpeza regular das partes vulneráveis do sistema.

Como apresentado na figura 4.17, os reservatórios térmicos no mercado brasileiro são constituídos, basicamente, por um corpo isolado termicamente, recoberto por uma proteção externa.

O corpo interno, é produzido com material anticorrosivo, como cobre, aço inoxidável entre outros por ficar em contato direto com a água. Além disso, seu corpo interno deve suportar variações de pressão que porventura ocorram, devido às flutuações na rede de abastecimento e à expansão da água resultante do aumento da temperatura. Quanto maiores às pressões de trabalho previstas, maiores deverão ser as espessuras da parede do corpo interno. Por exemplo, no mercado brasileiro, essa espessura varia entre 0,4 e 0,8mm para aço inoxidável, aproximadamente. (REDE BRASIL DE CAPACITAÇÃO EM AQUECIMENTO SOLAR, 2011).

Figura 4.17 – Reservatório Térmico:



Fonte: ABRAVA (2008).

A função do isolamento térmico é minimizar a transferência de calor da água para o ambiente. Desta forma, similarmente ao que acontece nas placas coletoras, o isolamento deve oferecer alta resistência à passagem do calor. Geralmente, os materiais mais usados são o poliuretano expandido, lã de vidro e a lã de rocha. (REDE BRASIL DE CAPACITAÇÃO EM AQUECIMENTO SOLAR, 2011).

O corpo externo tem a finalidade de proteger o isolante de danos decorrentes de intempéries, transporte, instalação, etc. Nos reservatórios com corpo interno metálico, essa proteção normalmente feita de chapas de alumínio, aço galvanizado ou aço carbono pintado. (REDE BRASIL DE CAPACITAÇÃO EM AQUECIMENTO SOLAR, 2011).

Já o termostato e a resistência elétrica são utilizados para um aquecimento auxiliar, podendo ter mais de uma resistência elétrica dependendo da temperatura a ser alcançada e do tamanho do reservatório, essa resistência tem o acionamento remoto automático feito pelo monitoramento do termostato, assim garantindo a temperatura ideal para o processo.

4.5 SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR POR CIRCULAÇÃO NATURAL

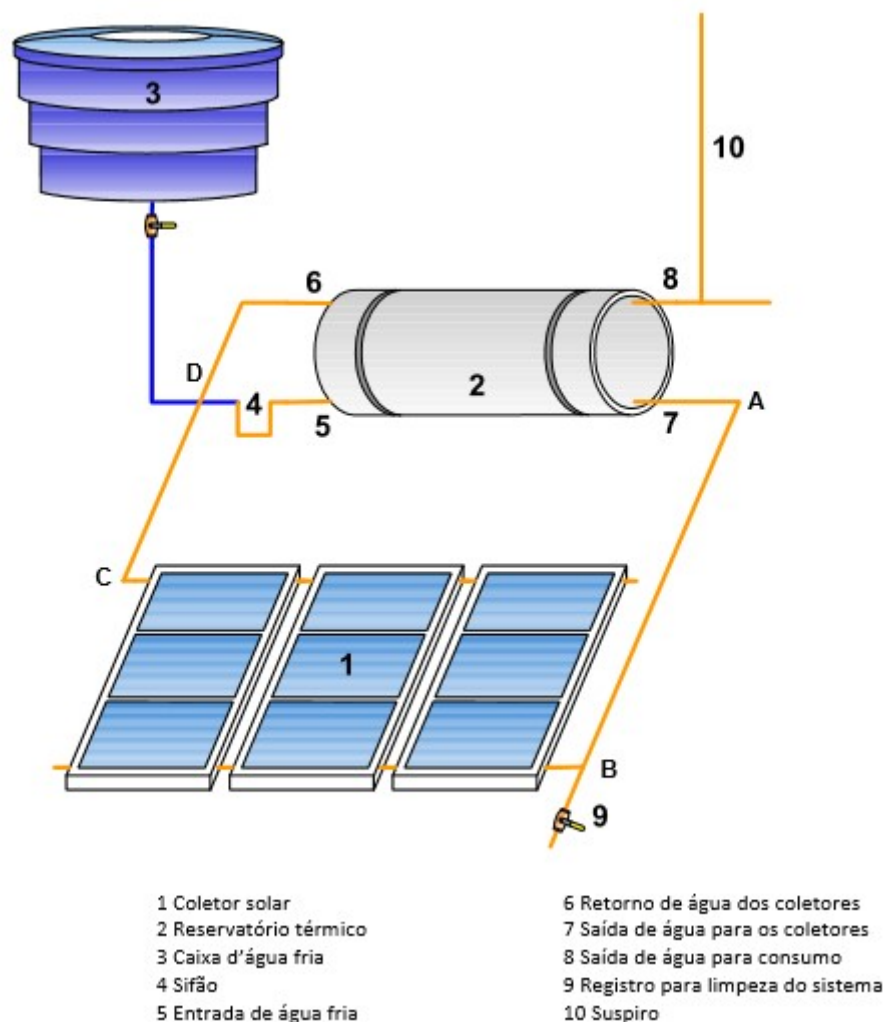
Os sistemas de aquecimento solar com princípio de funcionamento por circulação natural ou termossifão são os mais utilizados em obras de pequeno porte, apesar de simples, seu correto funcionamento é função de diversos fatores interligados, que vamos avaliar nesta unidade. (ABRAVA,2008).

Podemos ver na figura 4.18 os componentes e a configuração desse sistema de aquecimento solar.

Nesse sistema é utilizado o princípio de convecção natural, na qual o líquido, no caso a água, ao ser aquecido por meio da radiação solar incidente na placa coletora altera levemente sua densidade, ocasionando assim um movimento natural de elevação ao líquido mais quente e com uma densidade menor, assim sendo primordial se manter o reservatório térmico em uma posição mais elevada que a placa coletora solar, o líquido com densidade menor fará o movimento do sistema, com a descida do líquido mais frio proveniente da caixa d'água para ser aquecido e a elevação do líquido mais quente, que deve ser armazenado no reservatório térmico para manter assim por maior tempo a temperatura ideal.

A convecção natural também ocorre dentro do reservatório térmico, como podemos ver na figura 4.18 com a entrada da água quente pela parte superior esquerda dele (ponto 6) e a retirada para o processo na parte superior direita (ponto 8) e o exemplo oposto da entrada de água com uma temperatura inferior na parte inferior esquerda (ponto 5) vinda da caixa d'água e a saída na parte inferior direita (ponto 7) da água que está com temperatura inferior a desejada para a placa solar que irá aquecer o líquido novamente a temperatura desejada.

Figura 4.18 – Apresentação dos componentes básicos de uma instalação tipo termossifão:

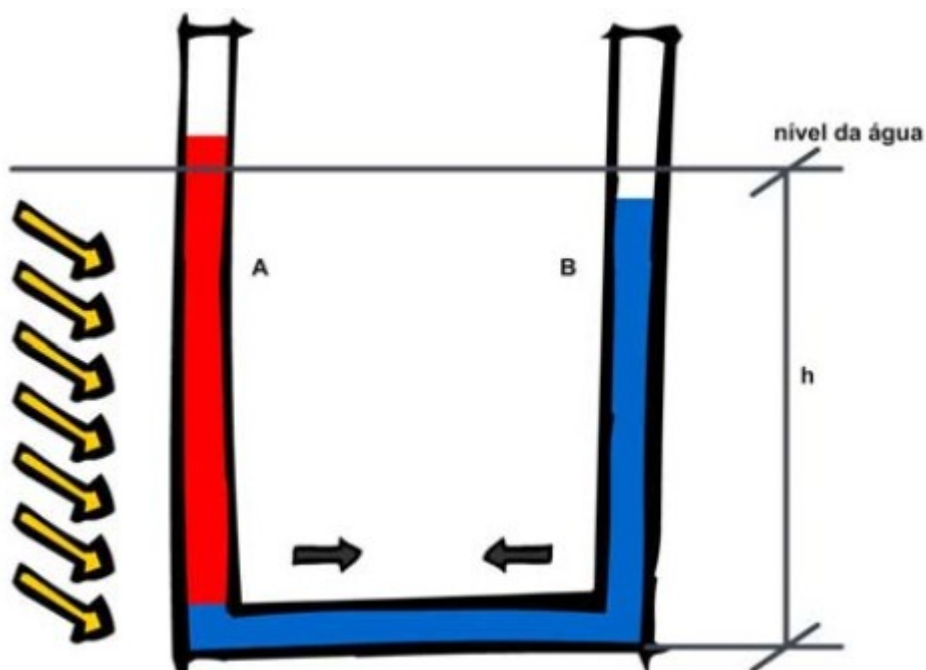


Fonte: ABRAVA (2008).

Também se pode instalar um aquecedor elétrico para se manter a temperatura de trabalho necessária, evitando assim a impossibilidade de uso do sistema de refrigeração quando as condições climáticas impedirem o aquecimento do líquido.

A tecnologia empregada nesse sistema de termossifão é exemplificada com a figura 4.19, sendo um tubo com igual pressão nos dois lados, mas quando o tubo é aquecido de um lado, temos a água com uma densidade menor desse lado, criando assim uma diferença de pressão nos tubos, fazendo com que o lado mais frio, lado b exerça uma pressão maior e assim “empurre” o fluido mais quente, lado a ocorrendo assim o movimento em todo o sistema.

Figura 4.19 – Princípio do funcionamento do termossifão:



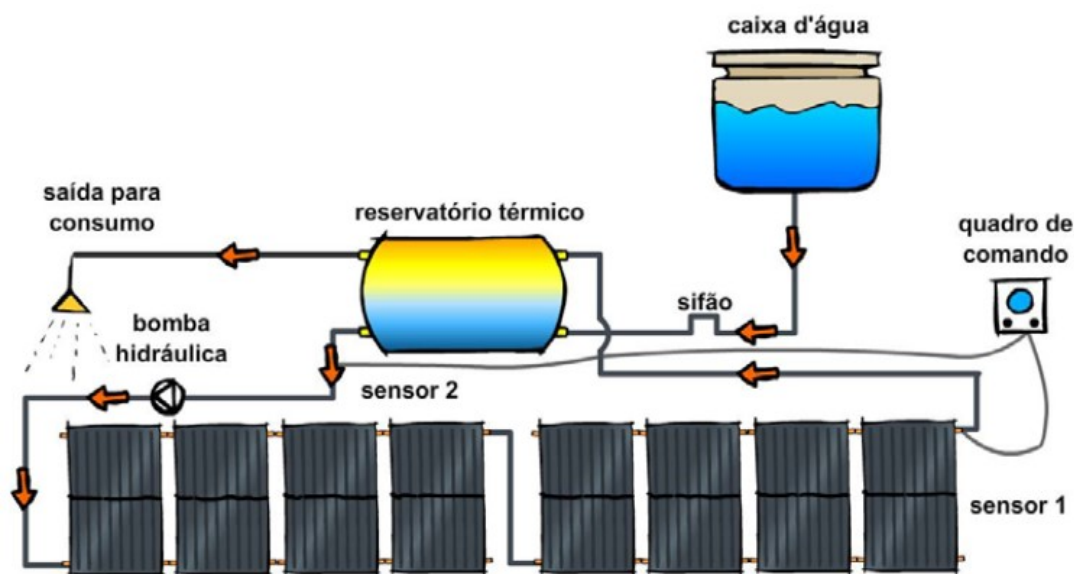
Fonte: REDE BRASIL DE CAPACITAÇÃO EM AQUECIMENTO SOLAR (2011).

4.6 CIRCULAÇÃO FORÇADA

Na instalação por circulação forçada tem-se uma bomba para fazer a circulação da água por todo o sistema, essa instalação é recomendada para sistema com demandas elevadas de água por dia, como é o caso do nosso trabalho, ou para um local onde o sistema de termossifão não possa ser devidamente instalado com suas características específicas de altura na ordem dos equipamentos.

Na figura 4.20 observa-se um sistema de circulação forçada, no qual a principal alteração em relação ao sistema de circulação natural é a implementação de uma moto bomba e um controlador diferencial de temperatura, esse controlador monitora a temperatura na saída das placas solares, sensor 1, e na entrada do reservatório térmico, sensor 2, sendo ajustado para operar a bomba quando atingir uma diferença de “x” °C que é definido pelo projeto, sendo o recomendado de 5°C e para o acionamento e 2°C para desligar o equipamento, já a moto bomba deve ser projetada para vencer as perdas de carga do sistema, que não será visto nesse trabalho por depender de variáveis do local a ser instalado.

Figura 4.20 - Sistema de circulação forçada:



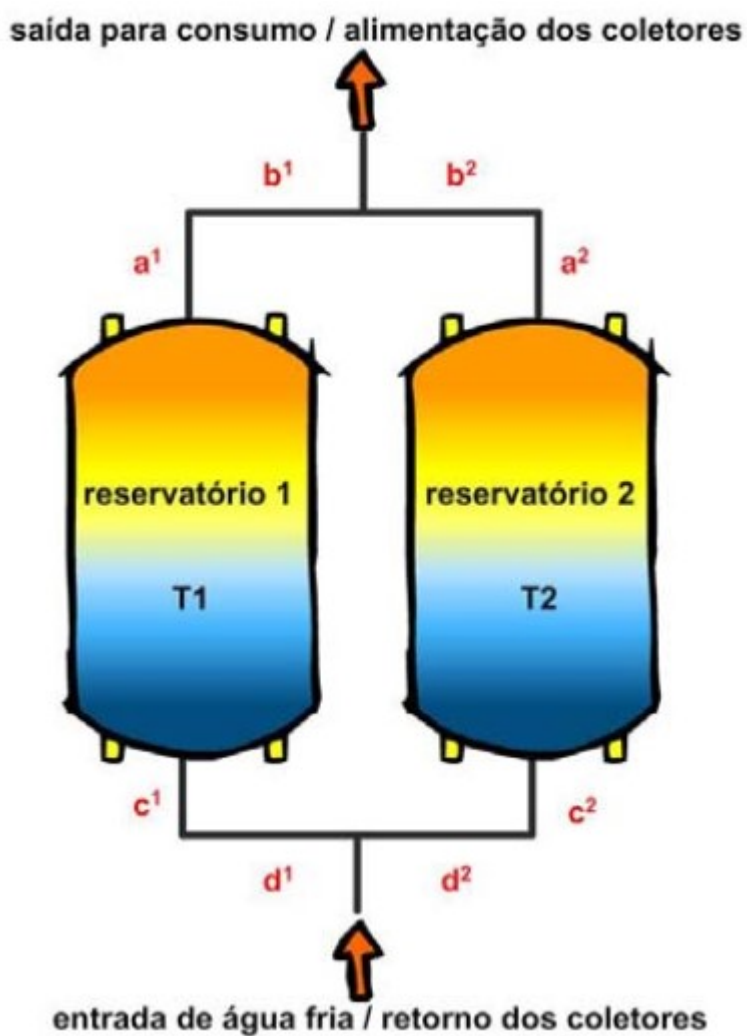
Fonte: REDE BRASIL DE CAPACITAÇÃO EM AQUECIMENTO SOLAR (2011).

4.7 ASSOCIAÇÃO DE RESERVATÓRIOS TÉRMICOS

Para instalações que demandam um volume de água quente grande para se armazenar é necessário a associação de reservatórios térmicos para ter assim o volume desejado de armazenamento. Para isso deve-se fazer a associação desses reservatórios de duas maneiras:

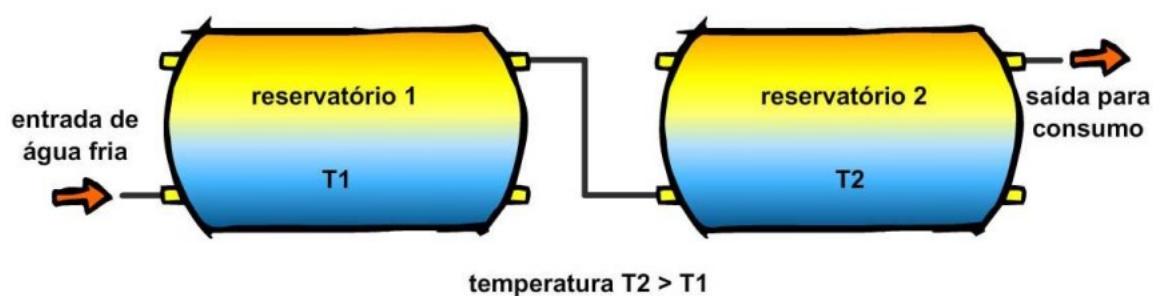
- **Associação em série:** Na qual são utilizadas em casos muito específicos, por serem muito restritivas com a montagem e se tornarem tecnicamente mais complexas com o aumento do número de reservatórios, essa associação é apresentada na figura 4.21;
- **Associação em paralelo:** É a associação mais utilizada para reservatórios por sua fácil instalação e o favorecimento da estratificação térmica, na qual se deve ater a saída de água fria que deve ser feita do reservatório mais frio para os coletores e retornar para o mais quente, sendo esse seu subsequente. Tem o exemplo dessa associação na figura 4.22.

Figura 4.21 – Associação em paralelo dos reservatórios:



Fonte: REDE BRASIL DE CAPACITAÇÃO EM AQUECIMENTO SOLAR (2011).

Figura 4.22 – Associação em serie dos reservatórios:



Fonte: REDE BRASIL DE CAPACITAÇÃO EM AQUECIMENTO SOLAR (2011).

4.8 ASSOCIAÇÃO DOS COLETORES SOLAR

A Associação dos coletores é uma importante etapa do projeto de instalação, por garantir com essa associação os parâmetros desejados de saída da água no final da sua associação, temos basicamente três tipos de associação para coletores solares, a associação em série, a associação em paralelo e a associação mista:

- **Associação em paralelo:** Nesse caso as baterias de coletores são dispostas em paralelo umas com as outras tendo assim a mesma temperatura de entrada e a mesma de saída, apresentado na figura 4.23;
- **Associação em série:** Essa Associação tem o fluido de entrada da bateria subsequente igual à do fluido de saída da próxima bateria, apresentada na figura 4.24;
- **Associação mista:** Essa associação é a mais utilizada por limitações de espaço no local, sendo uma associação de arranjos em serie e em paralelo, apresentada na figura 4.25.

Figura 4.23 - Associação em paralelo de coletores:

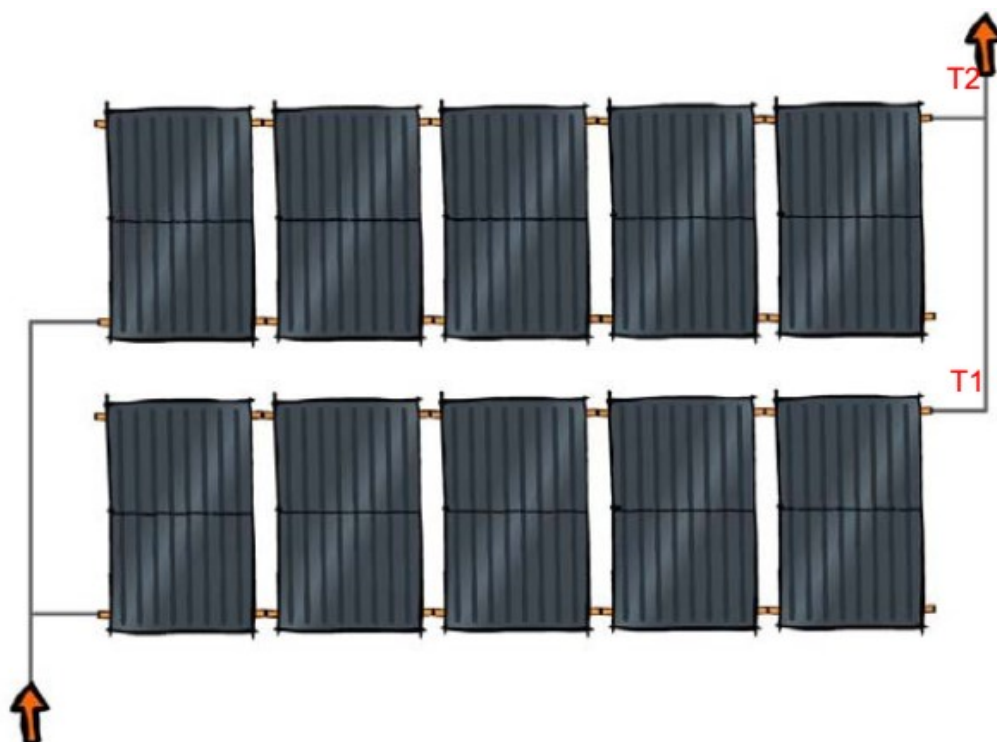
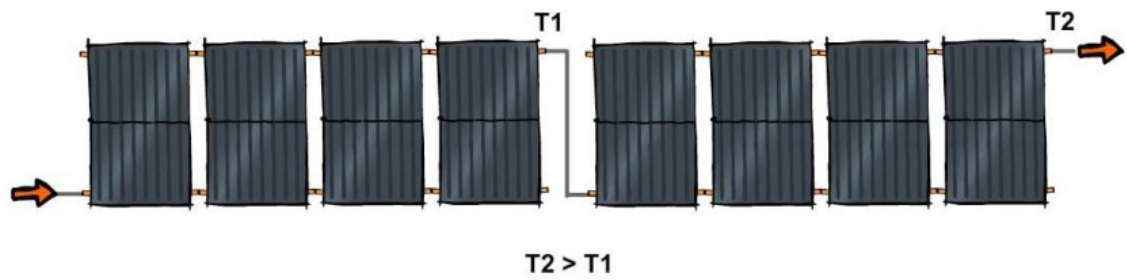
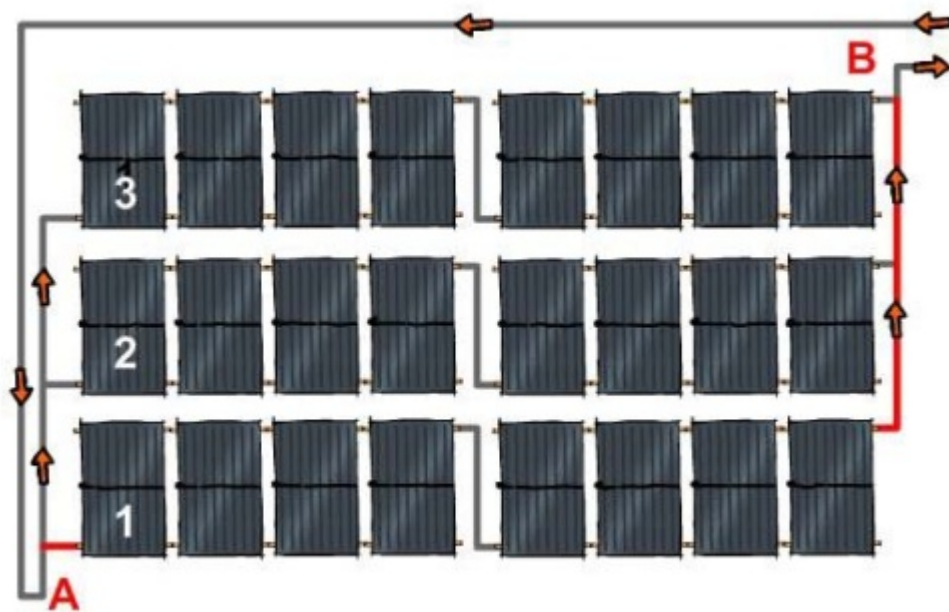


Figura 4.24 - Associação em série de coletores:



Fonte: REDE BRASIL DE CAPACITAÇÃO EM AQUECIMENTO SOLAR (2011).

Figura 4.25 – Associação mista de coletores:



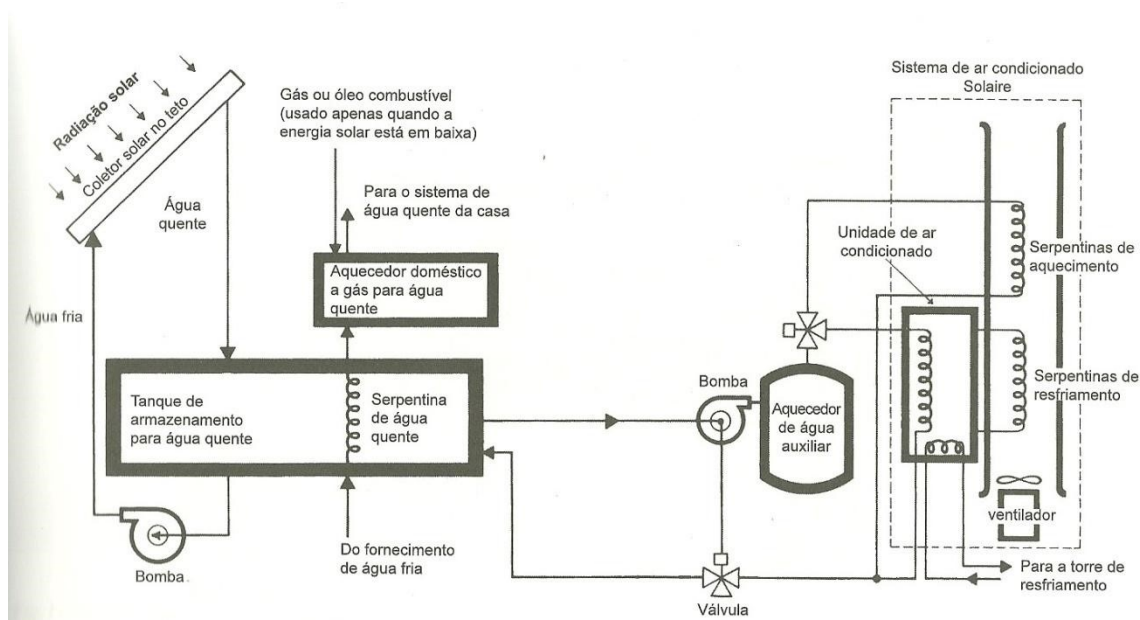
Fonte: REDE BRASIL DE CAPACITAÇÃO EM AQUECIMENTO SOLAR (2011).

5 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO ALIMENTADO POR ENERGIA SOLAR

Temos dois sistemas de refrigeração por energia solar. O sistema direto e o sistema indireto.

No sistema direto emprega o sistema de refrigeração por absorção. Esse sistema fornece maiores temperaturas de acionamento da água diretamente dos tanques de armazenamento para o gerador de unidade. (Miller, 2008).

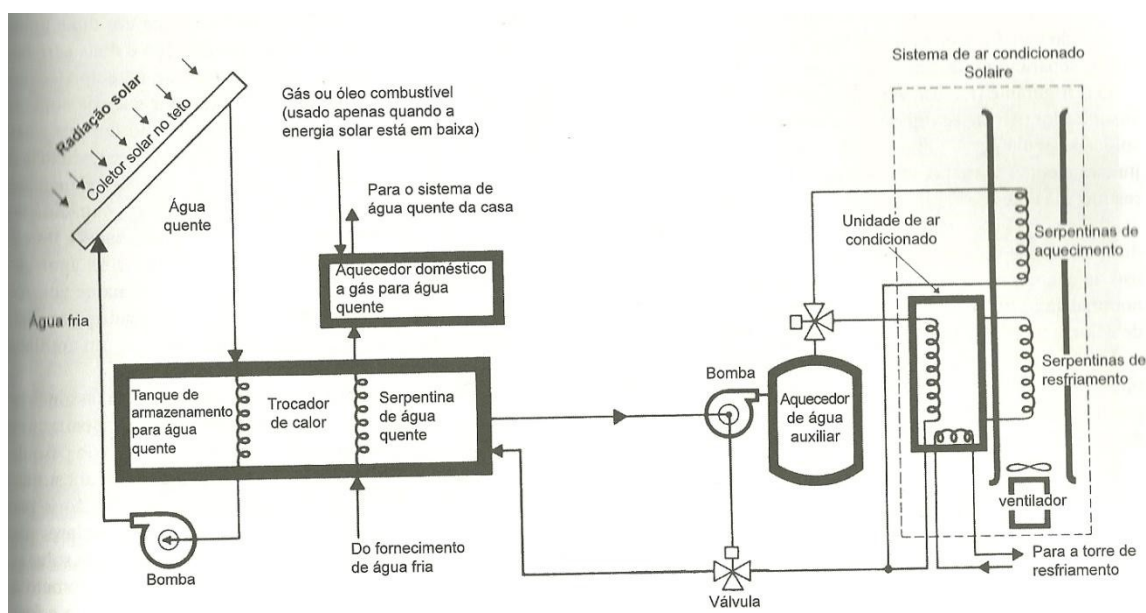
Figura 5.1 - Unidade de ar condicionado por energia solar – Sistema direto:



Fonte: Miller (2008).

O Indireto é um sistema fechado, no qual um trocador de calor transfere o calor da água nos tanques de armazenamento que é aquecida pelo sol. Isto permite o uso de um fluido anticongelante.

Figura 5.2 - Unidade de ar condicionado por energia solar- sistema indireto:

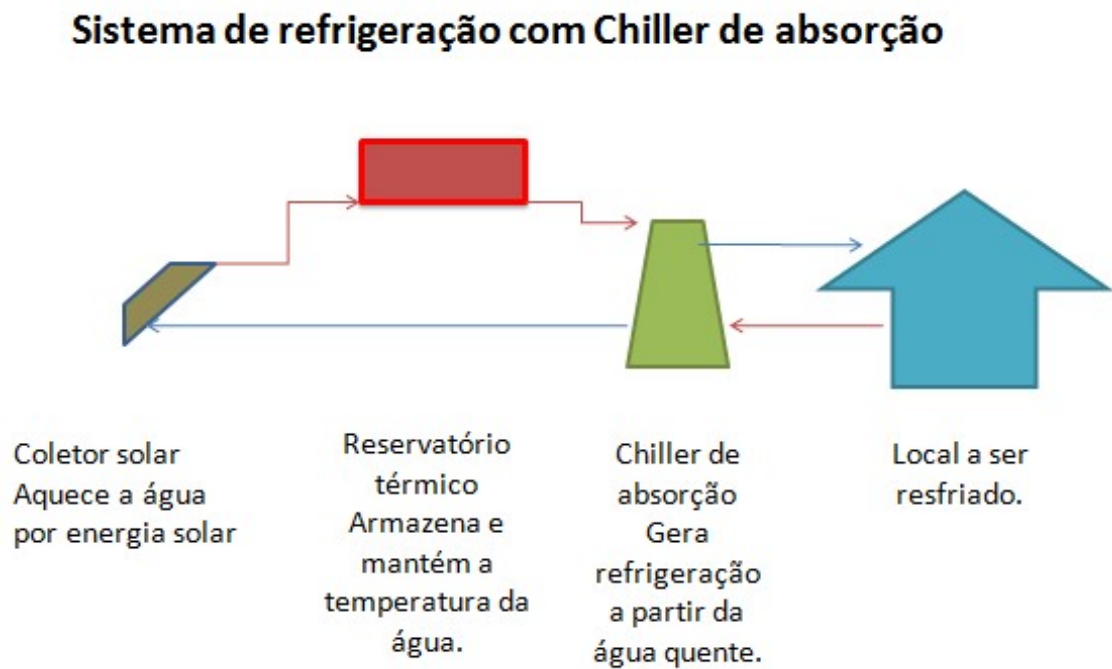


Fonte: Miller (2008).

5.1 SISTEMA PROPOSTO E DESENVOLVIMENTO

O sistema a seguir ilustra a configuração base para o sistema de resfriamento por meio de um chiller de absorção.

Figura5.3 - Sistema com chiller de absorção e um painel solar:



Fonte: Autor (2017).

O sistema proposto deve resfriar um ambiente de aproximadamente 70 m², segundo a tabela fornecida pelo site da Leroy Merlin, para o cálculo de Btu/h utilizando a tabela 5.1 temos que a potência de resfriamento deve ser de 42.000 Btu/h.

Tabela 5.1 – Relação entre área (m²) e potência de resfriamento (Btu/h):

Área (m ²)	Ambiente residencial	Ambiente comercial
9 m ²	7.000 BTUs	7.000 BTUs
12 m ²	7.000 BTUs	9.000 BTUs
15 m ²	9.000 BTUs	12.000 BTUs
20 m ²	12.000 BTUs	16.000 BTUs
25 m ²	15.000 BTUs	20.000 BTUs
30 m ²	18.000 BTUs	24.000 BTUs
35 m ²	21.000 BTUs	28.000 BTUs
40 m ²	24.000 BTUs	32.000 BTUs
45 m ²	27.000 BTUs	36.000 BTUs
50 m ²	30.000 BTUs	40.000 BTUs
60 m ²	36.000 BTUs	48.000 BTUs
70 m ²	42.000 BTUs	56.000 BTUs

Fonte: Leroy Merlyn (2017).

5.2 ANÁLISE ECONÔMICA

Foi realizado a comparação econômica de dois modelos de refrigeração, um de *split* de ar condicionado tradicional e o outro o modelo com o a placa solar e o *chiller* de absorção, comparando seus custos iniciais e seus consumos de energia ao longo do tempo.

Nessa análise teremos os custos iniciais dos equipamentos, que consiste para o ar condicionado convencional no seu preço sem o custo de instalação, já para o *chiller* de absorção temos o preço do próprio equipamento, da placa solar, da bomba d'água, se necessária, e sem seus custos de instalação.

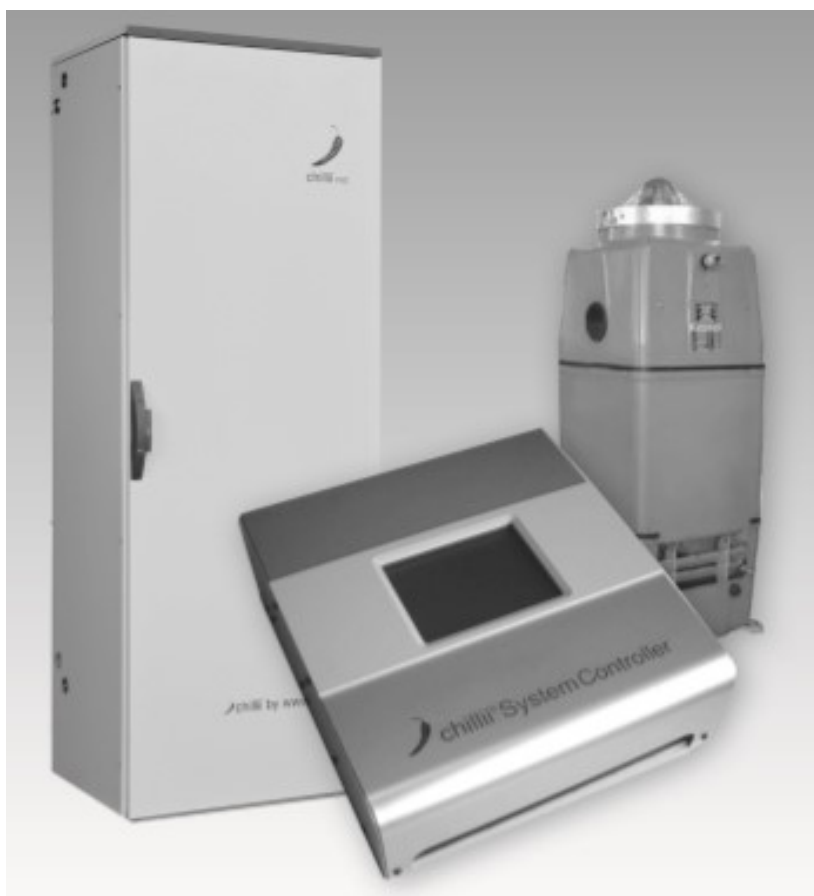
Já na análise de custo ao longo do tempo levamos em conta para uma mesma quantidade de uso, seu consumo elétrico e com base no preço da energia elétrica calculamos seu preço por tempo.

5.3 SISTEMA UTILIZADO

Utilizando um sistema da fabricante Solarnext o Chiller Chillii PSC12 que trabalha com o fluido refrigerante amônia-água com aproximadamente 3,4 TR (12 kW) de capacidade de resfriamento, com custo aproximado de 2500 Euros retirados do site do fabricante a Solarnext em 2016 (R\$9125,00) convertido utilizando os dados do Banco Central do Brasil da figura 6.1, o qual já inclui o trocador de calor interno ao ambiente (água fria – ar) e sem o custo da instalação dos equipamentos, seus dados são apresentados na tabela a seguir.

O sistema Chiller Chillii PSC12 é ilustrado na figura 5.4 na qual é apresentado o *kit* completo para a instalação na residência, contando com o *Chiller* e o *Split* interno para a residência. Sendo ele um sistema de alimentação indireta no qual água aquecida passa por um trocador de calor para entregar a energia ao sistema.

Figura 5.4- kit Chiller Chillii PSC12:



Fonte: Solarnext (2016).

Tabela 5.2- Características do chiller de absorção:

Modelo	Chiller Chillii PSC12
Par de Trabalho	amônia e água
Capacidade de Resfriamento [kW]	12
COP	0,63
Consumo Eletrico [kW]	0,3
Entrada de água quente [°C]	75
Saída de água quente [°C]	68
Entrada de água fria [°C]	18
Saída de água fria [°C]	15
Dimensões[m]	0,8x0,6x2,2
Peso[kg]	350

Fonte: Catalogo Solarnext (2016).

Para a água gelada (entra a 18 e sai a 15 °C):

$$\dot{m} = \frac{Pot}{h_{18^{\circ}C} - h_{15^{\circ}C}} = \frac{12}{75,55 - 62,98} = 0,954 \frac{kg}{s}; \quad (5.1)$$

$$\dot{v} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{0,954}{1000} \times 3600 = 3,43 \frac{m^3}{h} = 57,17 \frac{l}{min}; \quad (5.2)$$

Para a água quente (entra a 75°C e sai a 68°C):

$$COP = \frac{Quantidadefrio}{Q_H + W_{Bomba}} = \frac{12}{Q_H + 0,3} = 0,63; \quad (5.3)$$

$$Q_H = 18,7 [kW]; \quad (5.4)$$

$$\dot{m} = \frac{Q_H}{h_{75^{\circ}C} - h_{68^{\circ}C}} = \frac{18,7}{313,91 - 276,22} = 0,496 \frac{kg}{s}; \quad (5.5)$$

$$\dot{v} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{0,496}{1000} \times 3600 = 1,78 \frac{m^3}{h} \cong 30 \frac{l}{min}; \quad (5.6)$$

Com os cálculos podemos selecionar a minibomba TP40 G3 (figura 5.5) que consegue a vazão necessária e consome 120 W de potência, com o preço de R\$ 358,90.

Figura 5.5- minibomba TP40 G3:



Fonte: Komeco (2016).

Para selecionar o reservatório térmico devemos seguir a regra recomendada para reservatórios térmicos, que consiste em ter um volume igual ou maior que a vazão diária requerida. No nosso caso:

$$\dot{v} = 30 \frac{l}{min} = 30 \frac{l}{min} \times 60 \frac{min}{h} \times 8 \frac{h}{dia} = 14400 \frac{l}{dia}; \quad (5.7)$$

Se seguirmos essa orientação serão necessários 14 sistemas com reservatórios de 1000l cada, sendo essa recomendação feita para um sistema de aquecimento residencial, tornando assim o projeto inviável, por isso devemos considerar que o sistema será utilizado somente quando estivermos com condições climáticas desfavoráveis, pois a necessidade de resfriamento se deve ao calor no ambiente, que em geral é associado ao clima favorável para as placas produzirem água com as características desejadas para o funcionamento do sistema, assim necessitamos de um reservatório para suprir uma hora de funcionamento para suprir em um uso extra:

$$\dot{v} = 30 \frac{l}{min} = 30 \frac{l}{min} \times 60 \frac{min}{h} \times 1 \frac{h}{dia} = 1800 \frac{l}{dia}; \quad (5.8)$$

Selecionamos um reservatório térmico do fornecedor Center Sol para 2000 l (figura 5.6). Com apoio elétrico com resistências de 3000w ou 5000w, que são controladas por um termostato de fácil ajuste, ficando responsável em atingir a temperatura previamente ajustada caso não haja iluminação suficiente, esta função pode ser desativada pelo cliente, mantendo assim a água aquecida em dias com pouca incidência solar, com preço aproximado de R\$ 6.528,60.

Figura 5.6 - Reservatório térmico:



Fonte: Solaresol (2017).

Para os coletores solar devemos calcular a área necessária com base no valor dado pelo fornecedor sendo esse o valor de produção mensal de energia, leva em conta a eficiência fornecida pelo fabricante do coletor, esse cálculo é um dimensionamento prévio, para uma análise inicial. Os dados do fornecedor Komeco são apresentadas na tabela 5.3.

Nesse trabalho será utilizado um coletor solar do tipo plano aberto do fabricante Komeco, figura 5.7, o qual é de cobre e tem especificações técnicas que atendem o exigido para esse projeto.

Figura 5.7 – Coletor Solar plano aberto:



Fonte: Komeco (2016).

Tabela 5.3 – Produção mensal do coletor solar:

ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA	COLETORES						
	Linha Princess						
	10 tubos						
		Código	Modelo	Dimensão	Material	Classificação	Produção/Energia
		601860005	KOCS PR 1.0	1,0 x 1,0 m	Cobre	A	87,8 Kwh/mês
		601860002	KOCS PR 1.5	1,5 x 1,0 m	Cobre	A	131,7 Kwh/mês
		601860003	KOCS PR 2.0	2,0 x 1,0 m	Cobre	A	175,6 Kwh/mês
	Linha Ambient						
	10 tubos Inox						
		Código	Modelo	Dimensão	Material	Classificação	Produção/Energia
		601860016	KOCS AB 1.0	1,0 x 1,0 m	Inox	B	73,4 Kwh/mês
		601860017	KOCS AB 1.5	1,5 x 1,0 m	Inox	B	110,2 Kwh/mês
		601860018	KOCS AB 2.0	2,0 x 1,0 m	Inox	B	146,9 Kwh/mês
	Linha Maxime						
	7 tubos						
		Código	Modelo	Dimensão	Material	Classificação	Produção/Energia
		601860024	KOCS MX 1.0	1,0 X 1,0 m	Cobre	B	77,6 Kwh/mês
		601860022	KOCS MX 1.5	1,5 x 1,0 m	Cobre	B	115,3 Kwh/mês
		601860025	KOCS MX 2.0	2,0 x 1,0 m	Cobre	B	153,7 Kwh/mês

Fonte: Komeco (2016).

Utilizando o modelo Princess com classificação A e de dimensões 1x2m temos uma produção de energia mensal por m² igual a 87,8 kwh/mês. Para a nosso caso temos que a necessidade de água quente é de 18,7 kW e consideramos que ele trabalhe 20 dias uteis por mês temos:

$$L = 18,7 \text{ kw} \times 8 \frac{\text{h}}{\text{dia}} \times 22 \frac{\text{dias}}{\text{mês}} = 3291,2 \frac{\text{kwh}}{\text{mês}} ; \quad (5.9)$$

$$A = \frac{L}{W} = \frac{2992 \frac{\text{kwh}}{\text{mês}}}{175,5 \frac{\text{kwh}}{\text{mês} \cdot 2\text{m}^2}} \cong 34 \text{ m}^2; \quad (5.10)$$

Sendo assim necessário preliminarmente 17 coletores de 1x2 m no valor aproximado de R\$ 700,00 cada assim tendo um custo aproximado para o projeto de R\$11.900,00.

5.4 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO CONVENCIONAL

Este esquema é o equivalente a aproximadamente um ar condicionado *split* de 42.000 BTU/h, capaz de resfriar um ambiente de aproximadamente 70 m² como vimos anteriormente.

Comercialmente podemos utilizar o ar condicionado *Split*Teto Inverter Fujitsu 42000 BTU/h Quente/Frio 220v monofásico, seu preço é de R\$10.299,00 mais a instalação do sistema. Seguem na tabela 5.4 as características do produto.

Na figura 5.8 é apresentado o sistema de ar condicionado convencional com seu trocador no ambiente interno e externo. Todos os dados foram retirados da internet do catalogo Multi-ar.

Figura 5.8 – Sistema de ar condicionado convencional:



Fonte: Multi-ar (2016).

Tabela 5.4 - Características do ar condicionado comercial:

Capacidade de Resfriamento [BTU/h]	42000
Potência Elétrica [W]	4260
Gás Refrigerante	R-410 ^a
Peso[kg]	132

Fonte: Catalogo Multi-ar (2016).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização dos cálculos deve-se unificar os valores dos equipamentos em uma única moeda, para esse trabalho a precificação será estabelecida em dólar americano. Essas conversões ocorreram com base na tabela extraída do banco do central do Brasil figura 6.1.

Figura 6.1 – Cotação dia 20/11/2017:

Câmbio		
Dólar EUA	compra	venda
20/11 (PTAX)	3,2608	3,2623
20/11-13:00	3,2613	3,2628
euro		
20/11 (PTAX)	3,8334	3,8361
20/11-13:00	3,8340	3,8367

Fonte: Banco Central do Brasil (2017).

Considera-se que custo do kWh é para o estado de São Paulo à bandeira tarifaria verde. A figura 6.2 foi tirada do site da distribuidora AES Eletropaulo responsável pela distribuição de energia elétrica em grande parte do estado de São Paulo e de sua capital, temos que a tarifa para a energia elétrica é de R\$ 0,41961 por kWh

Sabendo que em 6 horas por dia temos radiação solar suficiente para manter o equipamento funcionando sem o auxílio do armazenamento ou de outros meios para aquecer a água, deve-se considerar um período de 8 horas para o funcionamento do sistema de refrigeração, assim para as 2 horas remanescentes devem ser supridas de outra maneira, uma hora será suprida pela água armazenada no reservatório termino e a outra será considerado a resistência elétrica contida no reservatório de 3000 W para operar por uma hora.

Considerando que o ar condicionado trabalhe 8 horas por dia e que trabalhará 300 dias por ano. Conforme tabela 6.1 nessa tabela o custo do equipamento de absorção alimentado por energia solar conta com o coletor, a bomba, o reservatório, o chiller de absorção e o trocador de calor (água fria/ ar).

Figura 6.2 – Tarifa da energia elétrica:

Tarifas Aplicadas a clientes atendidos em Baixa Tensão (Grupo B)		
MODALIDADE TARIFÁRIA CONVENCIONAL		
SUBGRUPO / CLASSE / SUBCLASSE (R\$/kWh)	Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) (R\$/kWh)	Tarifa de Energia TE (R\$/kWh)
B1 - RESIDENCIAL	0,18074	0,23887
B1 - RESIDENCIAL - BAIXA RENDA		
Consumo mensal até 30kWh	0,05427	0,08360
Consumo mensal entre 31 e 100kWh	0,09304	0,14332
Consumo mensal entre 101 e 220kWh	0,13956	0,21498
Consumo mensal superior a 220kWh	0,15506	0,23887
B2 - RURAL	0,12652	0,16721
B2 - COOPERATIVA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL	0,12652	0,16721
B2 - SERVIÇO PÚBLICO DE IRRIGAÇÃO	0,10844	0,14332
B3 - DEMAIS CLASSES	0,18074	0,23887
B4 - ILUMINAÇÃO PÚBLICA		
Iluminação Pública (B4a)	0,09941	0,13138
Iluminação Pública (B4b)	0,10844	0,14332

Fonte: AES Eletropaulo, (2017).

Tabela 6.1 - Comparação entre os modelos:

	Sistema de Absorção	Sistema de Compressão
Custo aproximado [US\$]*	8.562,12	3.159,20
Demanda de energia [kW]	0,42	4,26
Custo do kWh [US\$] + Imposto **		0,12871
Horas trabalhas por dia	7	8

*sem o preço a instalação incluído.

**Considerando Bandeira verde.

Fonte: Autor (2017).

$$\begin{aligned}
C_1(d) = & \\
& 8562,12 + \\
& \left(0,42[kW] \times 7 \left[\frac{h}{dia} \right] + \right. \\
& \left. 3,42[kW] \times 1 \left[\frac{h}{dia} \right] \right) \times 0,12871 \left[\frac{US\$}{kwh} \right] \times d[dia]; \quad (6.1)
\end{aligned}$$

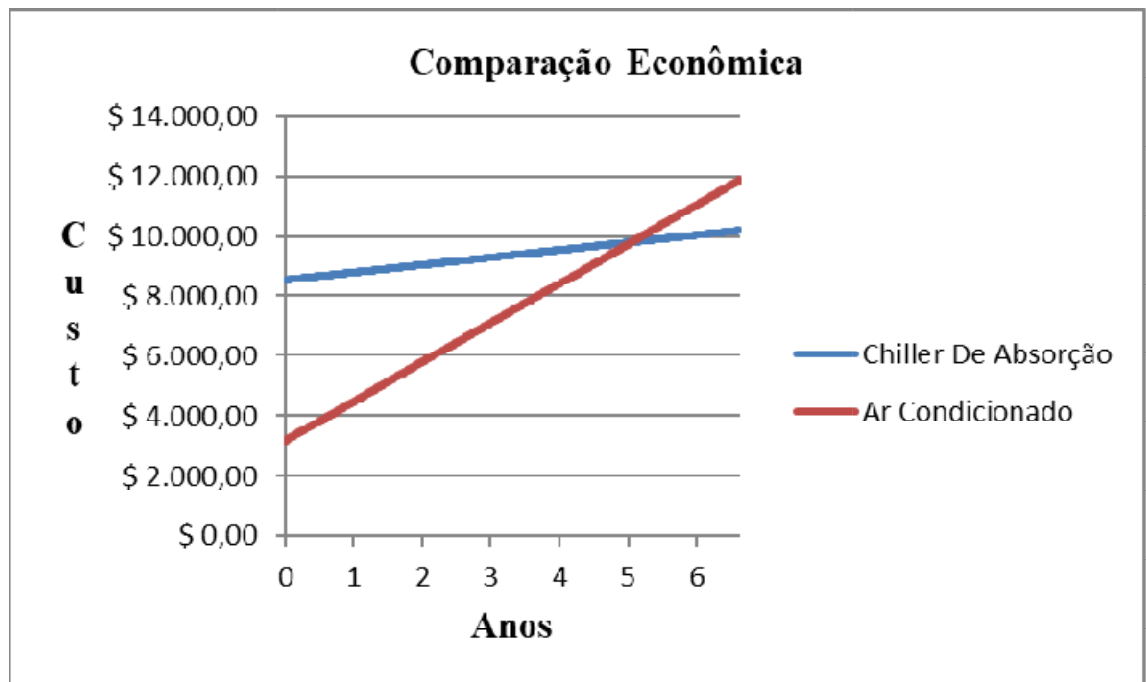
$$C_2(d) = 3159,20 + 4,26[kW] \times 8 \left[\frac{h}{dia} \right] \times 0,12871 \left[\frac{US\$}{kwh} \right] \times d[dia]; \quad (6.2)$$

A equação 6.1 apresenta o custo inicial do equipamento a absorção e seu funcionamento por 7 horas (considerando 1 sem o sol) e considerando 1 hora de funcionamento da resistência elétrica de 3kW mais o funcionamento do equipamento de 0,42kW.

A equação 6.2 nos apresentam o conjunto de resfriamento por compressão sem contar sua instalação, sendo que trabalha 8 horas por dia com o mesmo preço da energia elétrica.

Com base nas equações 6.1 e 6.2 e igualando elas, temos que a partir do dia 1512, ou aproximadamente 5 anos (considerando que o ar condicionado trabalhe 300 dias por ano), começa a ser vantajoso o ciclo por absorção, esses dados foram incorporados no gráfico apresentado na figura 6.3, que ilustra esse ponto de intersecção.

Figura 6.3- Gráfico de comparação econômica para adquirir ambos os sistemas:



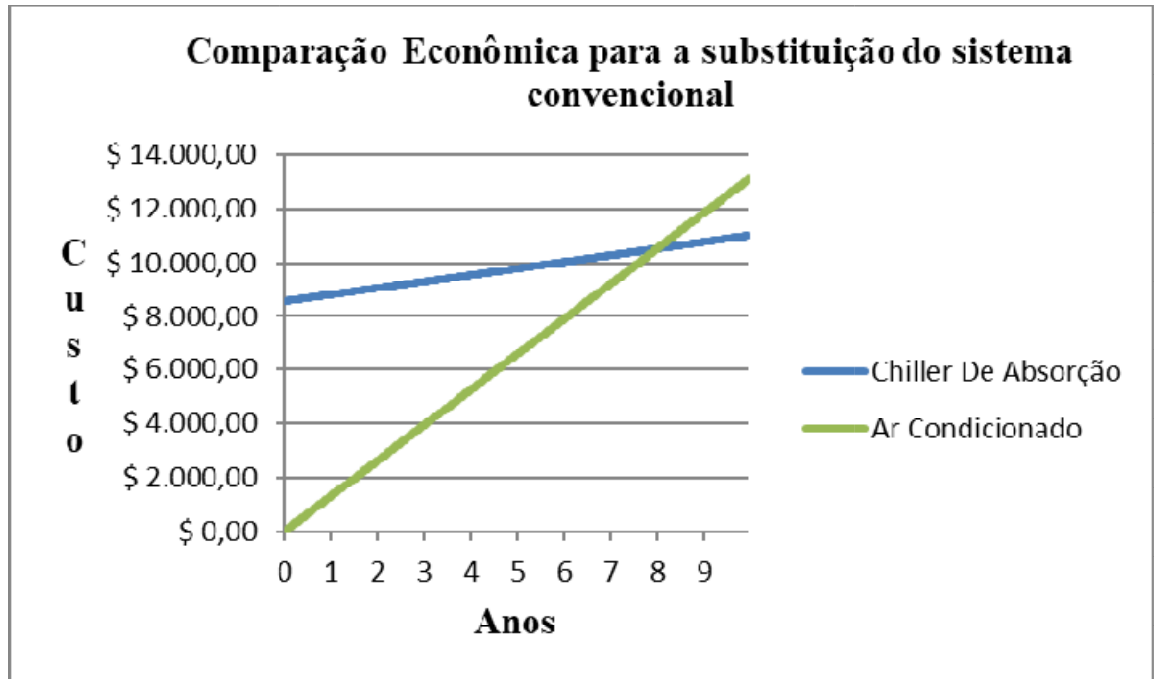
Fonte: Autor (2017).

Pode-se também comparar a substituição de um ar condicionado convencional pelo sistema de absorção, a única diferença se encontra no cálculo do custo do ar condicionado por compressão de vapor em que não terá o custo inicial do aparelho. Assim chegando na equação 6.3.

$$C_3(d) = 4,26[kW] \times 8 \left[\frac{h}{dia} \right] \times 0,12871 \left[\frac{US\$}{kwh} \right] \times d[dia] \quad (6.3)$$

Igualando a equação (6.3) com a (6.1) nota-se que o ciclo de absorção começa a ficar viável aproximadamente no dia 2400, ou seja, (considerando que trabalho 300 dias por ano), aproximadamente 8 anos, sendo ilustrado pelo gráfico na figura 6.4.

Figura 6.4- Gráfico de comparação econômica para uma troca de um sistema já existente:



Fonte: Autor (2017).

7 CONCLUSÃO

Nesse trabalho compara-se um ciclo de resfriamento por alimentação de energia solar e um ciclo de refrigeração convencional, para isso estudou-se as tecnologias empregadas em ambos e seus desafios, sendo o ciclo de refrigeração por compressão mais compacto, porém com um consumo de energia elétrica elevado, já o ciclo de condensação sendo mais econômico, porém ocupa um espaço muito maior e é mais complexo para sua instalação. Com a comparação de gastos iniciais e consumo de energia feita por esse trabalho pode-se afirmar que é viável trocarmos o ciclo de refrigeração de compressão comum por um ciclo de absorção abastecido com energia solar, sendo que para um investimento inicial temos um retorno mais imediato em optarmos por um ciclo de refrigeração assistido por energia solar, sendo essa a opção que tem o melhor retorno econômico, além de ser o ciclo com menor impacto ambiental.

Os resultados obtidos estão de acordo com o esperado com a teoria, mostrando a viabilidade do chiller de absorção utilizando energia solar para alimentar o mesmo, que com a incidência solar elevada no Brasil torna essa aplicação mais viável.

Temos em teoria que o sistema proposto começa a ser vantajoso a partir do 5º ano mostrando que o sistema é excelente em médio ou longo prazo para uma aplicação inicial, entretanto para a troca de um sistema tradicional por de energia solar só teremos resultados positivos após 8 anos que para um uso residencial ou empreendimento de pequeno porte pode ser uma data muito longa para tal investimento, já para um uso comercial e de longo prazo não é um resultado tão inviável.

REFERÊNCIAS

ABRAVA (Associação brasileira de refrigeração, ar condicionado, ventilação e aquecimento); **“manual de capacitação em projetos de sistemas de aquecimento solar.”** Edição abril de 2008. Disponível em: <http://www.forumclima.pr.gov.br/arquivos/File/manual2008.pdf>. Acesso em 15/05/2016. Acesso em: 10 fev. 2016.

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

AES Eletropaulo **“Tarifa de energia elétrica”**. Disponível em: <https://www.aeseletropaulo.com.br/para-sua-casa/prazos-e-tarifas/conteudo/tarifa-de-energia-eletrica>. Acesso em: 20 nov. 2017.

ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL. **Universidade Federal de Pernambuco**. (2000). Recife: Editora Universitária da UFPE.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL: **Relatório Síntese**. Rio de Janeiro, Rj: Empresa de Pesquisa Energética - Epe, 2016. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Síntese do Relatório Final_2016_Web.pdf>. Acesso em: 15 set. 2017.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Cotação**. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/pt-br#!/home>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

CARVALHO, E. N. **Modelagem e simulação de unidade resfriadoras de líquido por absorção h₂o-libr de simples e duplo efeito, incluindo o efeito de aditivos e clima local**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Brasília, 2007.

CHUA, K.j. et al. ACHIEVING BETTER ENERGY-EFFICIENT AIR CONDITIONING: A review technologies and strategies. **Applied energy**. [s.i], p. 87-104. dez. 2012.

E-ESCOLA. **Sistemas de refrigeração**. Disponível em: <<http://www.e-escola.pr.gov.br/>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENÉRGETICA. RIO DE JANEIRO. (Org.). **Relatório síntese - ano base 2015**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2016. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Síntese do Relatório Final_2016_Web.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2017.

ENCARTA ENCYCLOPEDIA. Disponível em: <http://encarta.msn.com/encyclopedia_761568448/Priestley_Joseph.html>. Acesso em fev. 2016.

ENCYCLOPEDIA BRITANNICA. Disponível em: <<http://www.britannica.com>>. Acesso em fev. 2016.

ENERGIA HELIOTERMICA. **Sol fonte de energia.** Disponível em: <<http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/o-sol-fonte-de-energia>>. Acesso em: 20 mar. 2017

EKOS, Instituto. **Energias renováveis.** 2010. Disponível em: <<http://www.ekosbrasil.org/default.asp>>. Acesso em: 15 maio 2016.

FADEDPAGES. **Selfinger.** Disponível em: <<http://selfinger.com/fp/art/ice1875.htm>>. Acesso em: nov. 2016.

FINDLEY, David S. **Solar power for your home.** New York: Mc Graw Hill, 2010. 208 p. (Green Guru Guides).

GARCIA, F.E.M. **Estudo experimental de um controle adaptativo para um sistema de refrigeração,** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

(GREEN), Grupo de Estudos em Energia. **Como funciona o aquecimento solar.** Disponível em: <http://portal.pucminas.br/green/index_padrao.php?pagina=3480>. Acesso em: 30 out. 2016.

(IEA), International Energy Agency. **Clean energy technologies.** Disponível em: <<https://www.iea.org/topics/cleanenergytechnologies/>>. Acesso em: 20 dez. 2016.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P., **Fundamentos de transferência de calor e de massa,** 5ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 2002

JAKOB, DrUli. Solar cooling in Europa. In: AUSTRALIAN SOLAR COOLING INTEREST GROUP CONFERENCE, 2009, Newcastle. **CSIRO energy centre.** [s.l.]: SolarNext AG, 2009. p. 30 - 37. Disponível em: <http://www.solarnext.eu/pdf/ger/publications_presentations/jakob/09ausSCIG_conference_2009_Solar_Cooling_Europe.pdf>. Acesso em: 7 mar. 2016.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M.; DOS REIS, L. B. **Energia e meio ambiente.** Tradução da 4ª edição norte-americana: CENGAGE Learning, 2011. 708 p.

KOMECO. **Coletor solar:** dados do coletor. 2016. Disponível em: http://www.komeco.com.br/?c=produtos_aquecedores_aguas_solares&m=exibir&id=3. Acesso em 07 dez. 2016.

LEROY MERLIN. **Tabela de cálculo de btu/h x área:** dados para cálculo de área por quantidade de refrigeração. 2017. Disponível em: <http://www.leroymerlin.com.br/dicas/aprenda-a-calcular-os-btus-do-ar-condicionado> Acesso em 20 mar. 2017.

MARLA ENERGIAS. **Fonte de dados para painéis solares e radiação solar.** 2016. Disponível em: <http://www.marla.pt/>. Acesso em 10 de março de 2016.

MARTINELLI JÚNIOR, L. C. **Sistema de ar condicionado por absorção para ônibus**. 2008. 192 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2008.

MENDONÇA, A. L. Z. L. G. **Ar condicionado solar: modelagem e simulação**. 2010. 117 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo - Escola Politécnica, São Paulo, 2010.

MILLER, R.; MILLER, M. R. **Refrigeração e ar condicionado**. [São Paulo]: Ltc - Livros Técnicos e Científicos, 2008. 540 p.

MULTIAR. **Ar condicionado split teto inverter Fujitsu 42000 btus quente-frio-220v: dados do aparelho de ar condicionado e preço**. 2016. Disponível em: <http://www.multiar.com.br/ar-condicionado-split-teto-inverter-fujitsu-42000-btus-quente-frio-220v-monofasico-abbg45lrta-aobg45lbta/p>. Acesso em 07 dez. 2016.

PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas**. [s.i.]: Hemus, 2002. 358 p.

PAINÉIS SOLARES E FOTOVOLTAICOS. “**Como funcionam os painéis solares térmicos, 2012**” Disponível em: <http://www.paineissolaresfotovoltaicos.com/como-funcionam-os-paineis-solares-termicos/>. Acesso em: 12 set. 2015.

POLIPARTES. **Evaporador ar condicionado de Janela Brastemp**. Disponível em: <http://www.polipartes.com.br/evaporador-ac-4192168/p>. Acesso em: 20 dez. 2016.

PROINFA, Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. **Proinfa**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/>. Acesso em: 20 fev. 2017.

REDE BRASIL DE CAPACITAÇÃO EM AQUECIMENTO SOLAR. **Noções iniciais sobre o aquecimento solar**. Brasil: Rede Brasil de Capacitação em Aquecimento Solar, 2011.

REFRIGÁS. **Válvula de expansão termostática**. Disponível em: <http://www.refrigas.com.br/ProdutoDetalhes?prodID=684&produto;=+Válvula+Expansão+Termostática+TEX+R22+s/Orifício+c/Rosca>. Acesso em: 12 dez. 2016.

ROBUR. **Technology history**. Disponível em: http://www.robur.it/us/pag_technology_history.jsp. Acesso em: 10 abr. 2017.

SÁ, A. C. B. **Parede de trombe: Análise Experimental e Simulação de Desempenho Térmico**. 2010. 178 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior Engenharia, Covilhã, 2011. Disponível em: <https://cmadeubi.files.wordpress.com/2013/05/2011-thesis-ana-briga-sc3a1.p>. Acesso em: 25 jun. 2017.

SANDIA NATIONAL LABORATORIES. **Solar FAQs**. Disponível em: <http://www.sandia.gov/~jytsao/SolarFAQs.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2016.

SILVA, F. D. J.; MOREIRA, José R. Simões. Climatização Solar em Hipermercados. **Energia solar**, [s.i.], v. 0, n. 0, p.44-50, jan. 2015.

SOLAR TECLA MARK. **Evacuado do tubo coletor de energia solar aquecedor de água.** Disponível em: <<https://portuguese.alibaba.com/product-detail/evacuated-tube-solar-energy-collector-water-heater-solar-key-mark-and-srcc-certificate--270116148.html>>. Acesso em: 15 nov. 2016.

SOLARESOL. **Boilers - alta ou baixa pressão 1000l:** dados do boiler. 2017. Disponível em: <http://www.solaresol.com.br/loja/kit-completo-grande-porte-2000-litros.html#fancy-zoom-gallery-image-3>. Acesso em 07 fev. 2017.

SOLARNEXT **Chillii PSC12:** dados do chiller de absorção. 2009. Disponível em: http://www.solarnext.eu/pdf/eng/products/081121_chillii_PSC12_e.pdf. Acesso em 07 dez. 2016.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W. **Refrigeração e ar condicionado.** São Paulo: Mcgraw-hill do Brasil, 1985.

TÉCHNE. **Sistemas de aquecimento solar de água.** Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/177/artigo286882-1.aspx>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

UOL. **Website da Uol:** cotação do Euro.2016 Disponível em: <http://economia.uol.com.br/cotacoes/>. Acesso em: 07 dez. 2016.

VAN WYLEN, J. G.; BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E., **Fundamentos da Termodinâmica**, tradução da 5ª ed. americana, Edgard Blücher, São Paulo, 2003