

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

REVISÃO TEÓRICA E ANÁLISE ECONÔMICA DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO
SOLAR COM CHILLER A ABSORÇÃO

André Kawae Suzuki

São Paulo

2009

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

REVISÃO TEÓRICA E ANÁLISE ECONÔMICA DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO
SOLAR COM CHILLER A ABSORÇÃO

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

André Kawae Suzuki

Orientador: José R. Simões Moreira

Área de Concentração:

Engenharia Mecânica

São Paulo

2009

FICHA CATALOGRÁFICA

Suzuki, André Kawae

Revisão teórica e análise econômica de sistemas de refrigeração solar com chiller a absorção / A.K. Suzuki. – São Paulo, 2009.

47 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Energia solar 2. Energia térmica 3. Sistemas de refrigeração e ar condicionado I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

RESUMO

A preocupação com a disponibilidade de energia tem marcado o início deste milênio. Pelo fato de, no verão, a demanda energética aumentar drasticamente devido ao uso generalizado do ar condicionado, a inovação das tecnologias que dominam a área de refrigeração, atualmente, é uma maneira bastante interessante de se economizar energia. Neste trabalho serão analisadas duas possibilidades de se aproveitar a energia solar em sistemas de ar condicionado: células fotovoltaicas e chillers de absorção alimentados por coletores solares. Foi desenvolvida uma pesquisa de tecnologias e práticas que já existem no mercado para se tirar conclusões acerca das suas aplicações e viabilidade.

ABSTRACT

Concern about the availability of energy has marked the beginning of this millennium. Because, in the summer, the energy demand increase dramatically due to widespread use of air conditioning, the innovation of technologies in the field of refrigeration, now is a very interesting way to save energy. This work will consider two possibilities to use solar energy in air-conditioning: Chillers powered by solar collectors and photovoltaic cells. There has been research of technologies and practices that already exist in the market to draw conclusions about its feasibility and applications.

Sumário

Introdução.....	1
1. Células Fotovoltaicas	4
2. Ciclo de Refrigeração com Chillers por Absorção.....	5
2.1. Chillers por Absorção	8
2.1.1. Múltiplos Efeitos	11
2.1.2. Configuração em série e em paralelo	14
2.1.3. Configuração em série.....	14
2.1.4. Configuração em paralelo	15
2.1.5. Pares de trabalho.....	16
2.2. Coletores Solares.....	18
2.2.1. Coletor de placas planas.....	19
2.2.2. Coletor de tubos a vácuo.....	20
2.2.3. Coletor parabólico em desenvolvimento no SISEA.....	23
2.3. Tanque de armazenamento	24
2.4. Câmara de Combustão	24
2.5. Recuperador.....	25
2.6. Integração do sistema e outros componentes	25
2.6.1. Água do coletor com temperatura abaixo da do tanque.....	26
2.6.2. Temperatura da água de alimentação do chiller abaixo da necessária.....	26
2.6.3. Temperatura de entrada da água do chiller no tanque menor que a de saída	27
2.7. Análise da eficiência do sistema	27

3.	Análise dos casos.....	28
3.1.	Hospital Universitário.....	28
3.1.1.	Situação atual.....	28
3.1.2.	Aplicação do sistema com chiller de absorção.....	32
3.2.	Frigorífico.....	33
4.	Conclusões.....	35
5.	Referências.....	36

Lista de figuras e tabelas

Figura 1: Média da temperatura mundial desde 1900 até 2008	1
Figura 2: Composição do consumo de energia elétrica em um escritório e em um hotel.....	2
Figura 3: Coletores de uma instalação de refrigeração solar	5
Figura 4: Teaser da Solid sobre um projeto em Lisboa.....	6
Figura 5: Esquema simplificado do sistema de refrigeração com chiller de absorção.....	7
Figura 6: Chiller por absorção	8
Figura 7: Esquema teórico simplificado de um Chiller por absorção	9
Figura 8: Esquema de um Chiller por absorção	10
Figura 9: Ciclo de absorção de efeito simples	12
Figura 10: Ciclo de absorção de efeito duplo.....	13
Figura 11: Ciclo de absorção de efeito triplo.....	14
Figura 12: Configuração em série.....	15
Figura 13: Configuração em paralelo	16
Figura 14: Retificador presente quando se trabalha com par água-amônia	18
Figura 15: Coletor solar de placa plana.....	20
Figura 16: Coletor de tubos a vácuo	21
Figura 17: Tubos a vácuo	21
Figura 18: Funcionamento de uma bomba de calor de tubo a vácuo	22
Figura 19: Termosifão de tubo a vácuo	23
Figura 20: Esquema do coletor solar parabólico.....	23
Figura 21: Configuração do sistema por absorção.....	26

Figura 22: Condensadores no terceiro andar do HU	30
Figura 23: Chiller de compressão de 70 TRs	31
Tabela 1: Propriedades dos ciclos de LiBr e de amônia.....	17
Tabela 2: Comparativo entre o sistema convencional e a absorção no HU	32
Tabela 3: Comparativo entre o sistema convencional e a absorção no Pescados Cabral.....	34

Introdução

Atualmente, a matriz energética mundial é composta, em cerca de 80%, por usinas termelétricas que utilizam combustíveis fósseis. Após o desenfreado avanço tecnológico do último século, defronta-se agora com uma preocupação ambiental generalizada, que tem dirigido as pesquisas em todo o mundo para atender às demandas da sustentabilidade. Por conta disso, há uma grande busca por novas fontes de energia que sejam limpas ou renováveis; já existe uma vasta gama de tecnologias e opções para serem aplicadas.

Caminhando paralelamente a este quadro está o problema das altas temperaturas registradas em muitas partes do mundo. Pode-se observar na Fig. 1 que a média da temperatura mundial tem crescido acentuadamente nos últimos 10 anos. Apesar de em 2008 ter havido uma certa desaceleração neste ritmo, não é certo que as temperaturas, futuramente, serão mais baixas. Na Europa, em 2003, a onda de calor trouxe temperaturas de até 50°C (França) e deixou cerca de 40 mil mortos no continente, causando uma enorme preocupação.

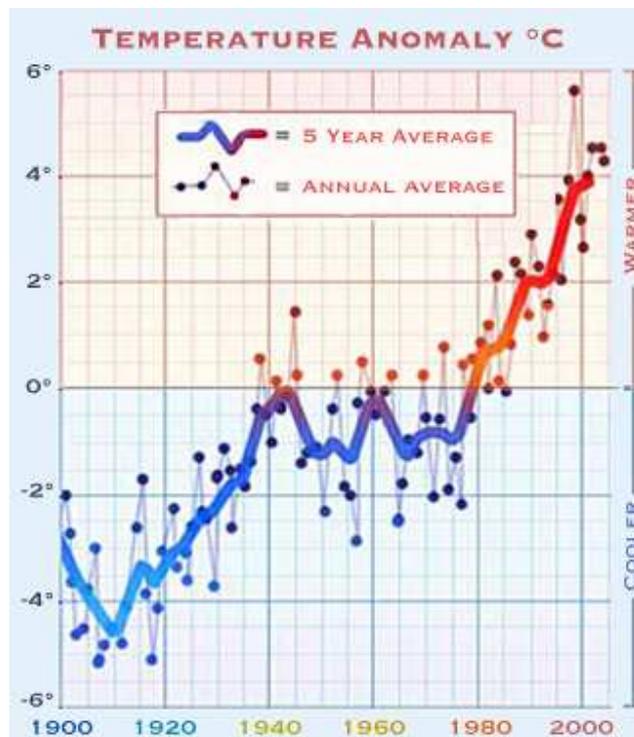


Figura 1: Média da temperatura mundial desde 1900 até 2008 (Fonte: Climate4You)

Com este perceptível aquecimento, a necessidade de se adotar soluções em climatização para se manter as condições de conforto se torna ainda mais relevante. Principalmente em ambientes de trabalho (escritórios, fábricas, lojas, hospitais, etc), o emprego de sistemas de ar condicionado é essencial para que o rendimento das pessoas que estão trabalhando não caia e para que o cliente não se sinta desconfortável. Um ambiente climatizado pode também ser imprescindível quando se trata de um hospital, que precisa manter condições salubres nas suas dependências, controlando com rigor a temperatura e a umidade.

Entretanto, sabendo que o mundo tem seguido as linhas da sustentabilidade em prol do meio-ambiente, é coerente empregar, de maneira compulsiva, os sistemas convencionais de ar condicionado? Os aparelhos mais modernos e que estão na moda hoje consomem, em um escritório num dia de calor, cerca de 2,1kW (para carga térmica de 20000BTU/h ou 6,4kW ou 2,5 TRs). São os chamados *Splits*. Eles funcionam utilizando um compressor elétrico, o qual é responsável pela

maior parte do consumo de energia. A Fig. 2 mostra como o ar condicionado é um grande responsável pelo aumento do consumo de energia, principalmente em estabelecimentos comerciais.

No começo de 2009, devido ao calor do verão em São Paulo, houve episódios de *blackout* em alguns prédios da Avenida Paulista por causa do grande número de aparelhos de ar condicionado ligados ao mesmo tempo. E isso não é raro. No mundo inteiro esse problema aparece quando as temperaturas se elevam. Por esse motivo, novas soluções estão sendo procuradas para que se diminua a demanda de eletricidade para ar condicionado. Apesar da energia no Brasil ser proveniente, em grande parte, de geração hidrelétrica, o uso da energia elétrica precisa ser mais consciente. Lembrando, 80% da matriz energética mundial é termoelétrica, o que implica em milhões de toneladas de hidrocarbonetos sendo queimadas diariamente para atender a demanda energética.

Além de todo o viés ambiental, existe também o custo financeiro da energia elétrica, que é uma forma “nobre” e relativamente cara de energia. Considerando que o preço do kilowatt-hora (kWh) é de R\$0,30, se o ar condicionado split, citado anteriormente, ficar ligado 12 horas por dia, durante 25 dias por mês, ele trará um custo mensal de 189 reais.

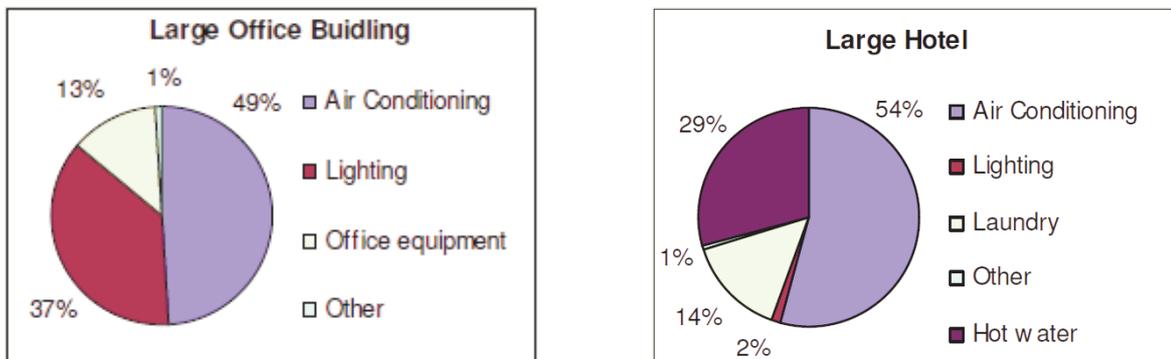


Figura 2: Composição do consumo de energia elétrica em um escritório e em um hotel (Fonte: SOLID)

Tendo tudo isso em vista, surge o objetivo principal deste trabalho que é estudar a viabilidade de um sistema de ar condicionado que utilize a luz solar como principal fonte energética. Para tanto, serão analisadas duas tecnologias já existentes: as células fotovoltaicas (FV) e os chillers de absorção.

As células FV são mais conhecidas por aparecerem com frequência na mídia. Elas estão alcançando maiores níveis de eficiência e, em muitas aplicações, se mostram bastante viáveis. Aqui

será falado um pouco apenas sobre a eficiência e economia da aplicação de células FV, sem entrar no mérito técnico e nem aprofundar uma análise de caso.

Por outro lado, instalações que fazem uso de chillers de absorção são raríssimas no Brasil. Apesar de não ser uma tecnologia recente, e sim bastante antiga e conhecida, não há fabricantes em território nacional e sua aplicação não é difundida. Além disso, qualquer um que resolva adotar um chiller de absorção em sua estrutura é rapidamente desmotivado por conta da ausência quase absoluta de empresas de manutenção que tenha conhecimento nesse tipo de equipamento.

Assim, este trabalho terá como principal meta a avaliação da eficiência e da viabilidade dos sistemas de produção de frio a partir do chiller de absorção alimentado por água aquecida por luz solar.

1. Células Fotovoltaicas

Velhas conhecidas dos engenheiros e bastantes populares, as células FV apresentam o melhor conceito quando se fala de aproveitamento de energia solar: a conversão direta de energia solar em energia elétrica. Basta que a célula esteja sob a incidência de luz que corrente elétrica passará a ser gerada. Isso ocorre por conta da energia dos fótons que fornece energia para os elétrons presentes na banda de valência da zona de depleção do semicondutor.

Entretanto, esse processo não realiza uma conversão plena de energia. Na realidade, a eficiência que esse tipo de sistema apresenta, atualmente, é relativamente baixa. Ou seja, apenas uma pequena parte da energia solar incidente é transformada em energia elétrica. Já existem trabalhos de pesquisa que alcançaram níveis bastante elevados de aproveitamento chegando aos 40%; o recorde mundial é 42%. O grande porém é que esse tipo tecnologia ainda não tem condições de chegar ao mercado por conta do alto preço.

Assim, faz mais sentido falar sobre os produtos já existentes para comercialização, os quais possuem, em média, eficiência de 25%. Em 2006, a média do watt instalado ficava em torno de US\$5,00.

Considerando que em São Paulo a insolação de um dia ensolarado seja de 600W/m^2 , pode-se admitir que a célula FV receberá essa irradiação e produzirá 150W/m^2 (considerando os 25% de eficiência). Sabendo que o consumo de um ar condicionado de 85kW de efeito útil é de 23kW, serão, portanto, necessários, 153m^2 de área ocupada pelas células.

2. Ciclo de Refrigeração com Chillers por Absorção

Ao contrário do que a intuição leva a imaginar, é possível produzir “frio” a partir de calor sem a necessidade de uma conversão prévia em energia elétrica. É justamente esta a grande vantagem dos chillers por absorção em relação às células FV, pois as perdas apresentadas são reduzidas.

Neste trabalho, a idéia é que o chiller tenha como fonte de calor água quente ou vapor provenientes de um coletor solar. A água quente ficaria armazenada num tanque termicamente isolado para ser consumida de acordo com a demanda por refrigeração. A Fig. 3 mostra uma forma de disposição dos coletores solares.



Figura 3: Coletores de uma instalação de refrigeração solar (Fonte: Solar Cooling Recommendations)

Haverá também uma câmara de combustão auxiliar que será ligada caso a irradiação solar não seja suficiente para atender a demanda num determinado momento. Isso poderia ocorrer caso uma nuvem tapasse o sol durante muito tempo ao passo que a temperatura permaneceria elevada devido à inércia térmica do ambiente.

Este tipo de sistema já é usado e há exemplos de grandes investimentos neste sentido. Entretanto, essas iniciativas ainda não chegaram significativamente ao Brasil. Aqui, mais frequentes em instalações industriais, os chillers são alimentados por fontes de calor que seriam desperdiçadas, como por exemplo, a água quente que sai de uma turbina a vapor.



CGD Bank Headquarter, Lisbon

SOLID
solarinstallation+design

Solar system for:
545 kW / 155 tons
Cooling
Reheating, Heating,
DHW

Solar Panels:
1.580 m² / 17,000 ft²

In operation since
February 2008

Figura 4: Teaser da Solid sobre um projeto em Lisboa

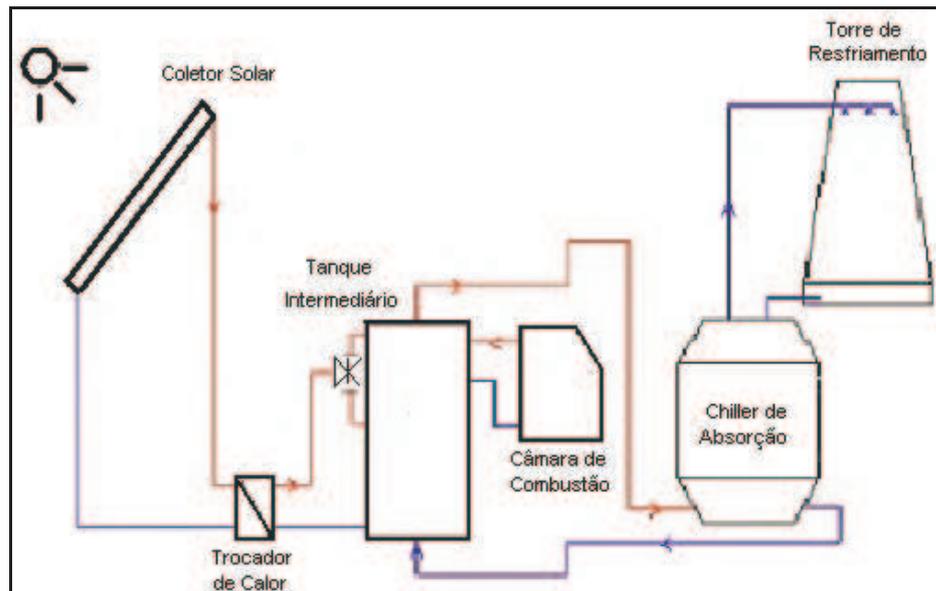


Figura 5: Esquema simplificado do sistema de refrigeração com chiller de absorção

A Fig. 4 faz parte de um teaser da Solid, empresa de tecnologias que fazem uso de energia solar para aquecimento de água. Nela, são mostrados dados de um sistema que segue exatamente a mesma configuração que foi descrita anteriormente: coletores solares que aquecerão água, ficando esta armazenada num tanque para posterior uso em chillers de absorção de acordo com a demanda por refrigeração. Segundo estes dados, com 1580m² de coletores de placas planas, foram alcançados 545kW ou 155TRs (toneladas de refrigeração). Assim, instalando coletores na área que seria ocupada por um telhado, foi possível gerar uma grande economia de energia, já que trata-se de um prédio comercial de 5000 funcionários. Vale lembrar que mesmo assim, a demanda total não é totalmente atendida, principalmente quando a insolação diminui de intensidade. Por conta disso, é necessário utilizar uma câmara de combustão para que a água atinja os patamares de temperatura e vazão desejados.

A Fig. 5 mostra, de maneira simplificada, como o sistema será disposto. A seguir serão detalhados cada componente e também serão analisadas as configurações possíveis para se melhorar o desempenho do ciclo. A otimização do sistema é muito importante principalmente para se reduzir a área ocupada pelos coletores solares para uma dada potência.

2.1. Chillers por Absorção

Os chillers têm como função produzir água gelada, como sugere o nome. Entretanto, como consequência do processo, eles também produzem água quente, a qual pode ser aproveitada num outro sistema. Este tipo de equipamento possui diversas variações na estrutura do ciclo de refrigeração. Como o escopo do trabalho é fazer uso de energia solar, os únicos chiller abordados serão os de absorção.

Os chillers por absorção são equipamentos bastante robustos e caros. Eles são os principais alavancadores dos custos deste sistema de refrigeração. Por outro lado, possuem alta confiabilidade e durabilidade. Podem trabalhar normalmente com cargas parciais são bastante silenciosos por não possuírem um compressor. A Fig. 6 mostra um chiller de 70 anos ainda em condições de operação.



Figura 6: Chiller por absorção

Os chillers por absorção são equipamentos que, diferentemente dos ciclos convencionais de ar condicionado, não dispõem de um compressor para transformar o vapor de baixa pressão em vapor de alta pressão. Eles utilizam, em vez de trabalho mecânico, calor retirado de água quente ou de vapor d'água (na maioria dos casos), os quais podem ser produzidos através de queima de combustível, calor residual de algum processo industrial, energia geotérmica ou então, como no nosso caso, energia solar.

No ciclo por absorção, o condensador e o evaporador também estão presentes e desempenham exatamente a mesma função que no ciclo convencional. Entretanto, o compressor é substituído por dois reservatórios de calor: o absorvedor e o gerador, conforme mostra a Fig. 7.

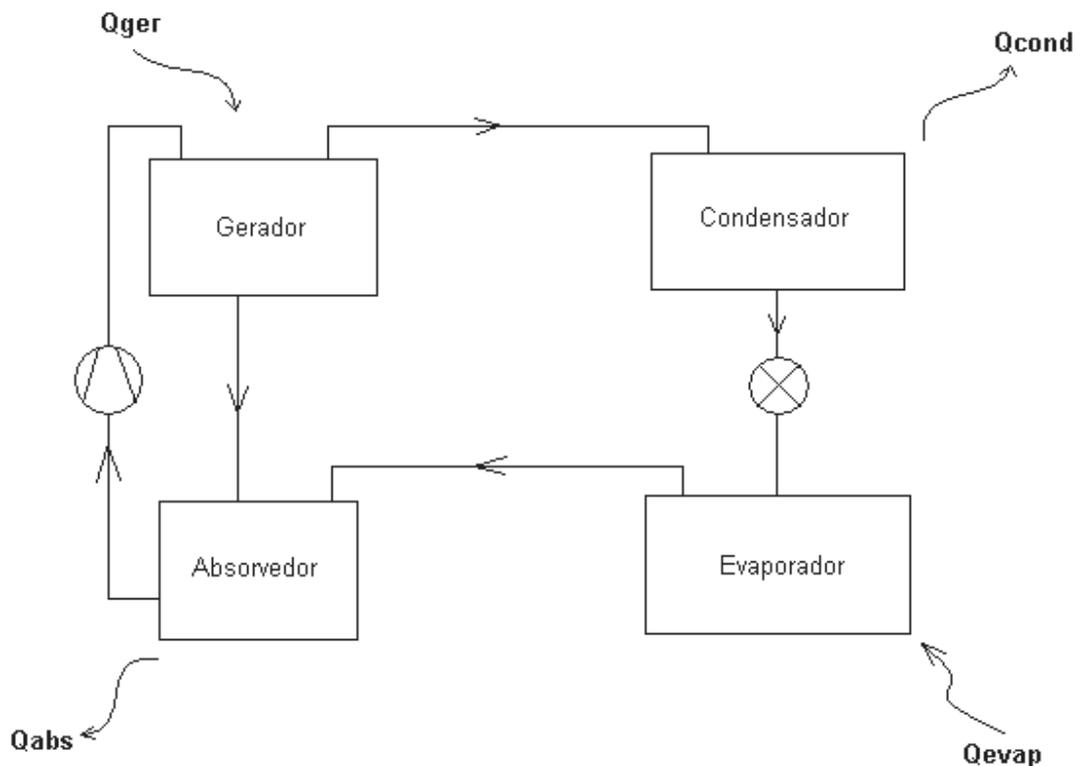


Figura 7: Esquema teórico simplificado de um Chiller por absorção

Um fluido de trabalho volátil (refrigerante) é parcialmente separado da solução transportadora por meio do calor fornecido no gerador. Subseqüentemente, o refrigerante e a solução se misturam novamente no absorvedor num processo exotérmico. Assim, o absorvedor funciona como uma unidade de rejeição de calor, de modo que o ciclo não tenha sua temperatura

a diferença de pressão entre o gerador e o absorvedor seja mantida, a solução é expandida por uma válvula antes de chegar ao absorvedor.

Um trocador de calor (regenerador) é introduzido entre o gerador e o absorvedor para que o fluxo de alta temperatura proveniente do gerador troque calor com o fluxo de baixa temperatura proveniente do absorvedor. Dessa forma, o calor necessário a ser fornecido para o gerador é menor e a eficiência do ciclo aumenta.

Quando se trata de ciclos de refrigeração, é comum se utilizar o COP (coeficiente de performance) para quantificar a eficiência. Este índice é, simplesmente, a relação entre o calor recebido pelo evaporador e o calor recebido no gerador. Em outras palavras, é o efeito útil dividido pelo calor injetado. Assim, um COP elevado significa que o chiller é eficiente; é necessário injetar pouco calor para se obter uma determinada potência de refrigeração. A Eq. 1 mostra a definição matemática do COP.

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{ger}} = \frac{\text{Efeito Útil}}{\text{Calor Injetado}}$$

Equação 1: Definição do COP

2.1.1. Múltiplos Efeitos

Os chillers podem ser classificados como de efeito simples, duplo ou triplo. Até a década de 50, só existiam os chillers de efeito simples. Entretanto, após essa época, foram introduzidos ciclos mais elaborados para que o COP atingisse valores maiores e, conseqüentemente, o ciclo apresentasse menor custo operacional.

2.1.1.1. Efeito simples

O ciclo de efeito simples é o mais simples e possui o mesmo arranjo do chiller simplificado que foi apresentado anteriormente. Ele possui apenas um gerador, um condensador, um evaporador e um absorvedor. Esse tipo de ciclo possui COPs que ficam entre 0,6 e 0,8. Justamente por causa desta baixa eficiência, os chillers de efeito simples têm se mostrado economicamente inviáveis. Entretanto, quando os ciclos possuem baixas potências nominais e quando há calor de rejeito

disponível, o efeito simples ainda é aplicado. Muitos chillers modernos de baixa potência trabalham com este ciclo. A Fig. 9 mostra o esquema do ciclo de efeito simples.

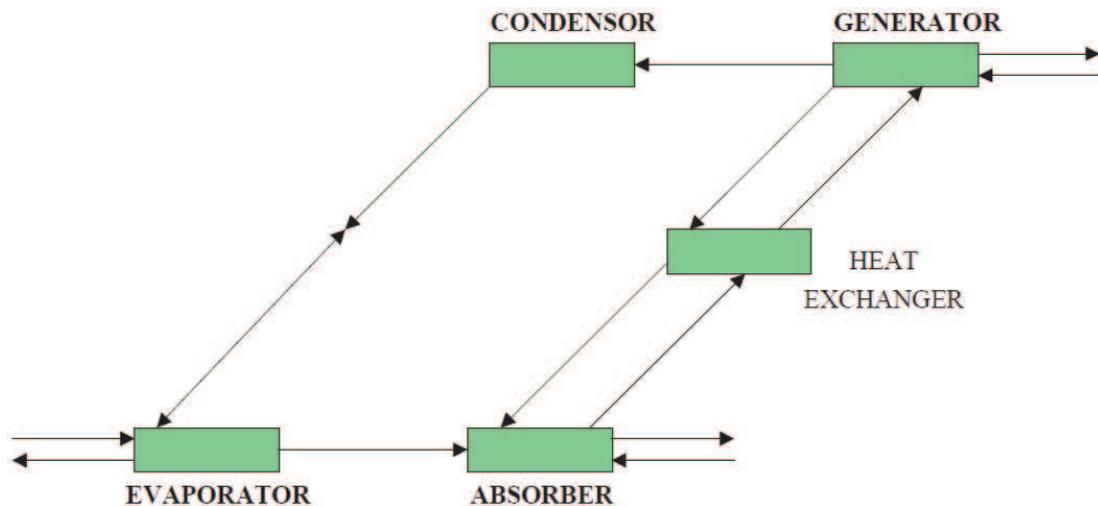


Figura 9: Ciclo de absorção de efeito simples (Fonte: Absorption Chillers Guidelines)

2.1.1.2. Efeito Duplo

O chiller de efeito duplo apresenta eficiências bem maiores que o de efeito simples. A grande diferença está na presença de dois geradores, conforme mostra a Fig. 10, um de alta temperatura e outra de baixa temperatura, o que permite que uma maior quantidade de refrigerante (água) se separe da solução.

O vapor de alta pressão produzido no gerador de alta temperatura é condensado e o calor de condensação é rejeitado para o gerador de baixa temperatura. Este, por sua vez, também produzirá vapor a ser condensado num segundo condensador. Desta forma, o ciclo de efeito duplo é capaz de produzir quase duas vezes mais vapor de refrigerante que o ciclo convencional de efeito simples. Conseqüentemente, o COP também aumenta, ficando em torno de 1,0.

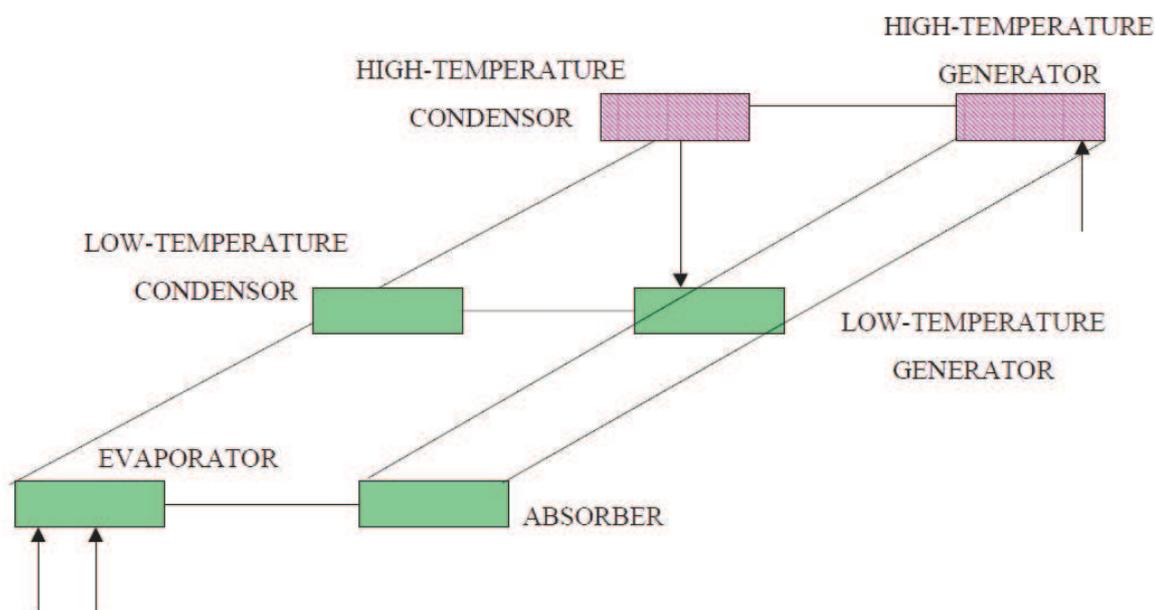


Figura 10: Ciclo de absorção de efeito duplo (Fonte: Absorption Chillers Guidelines)

Com esse adicional, o ciclo de efeito duplo pode aproveitar temperaturas de entrada maiores. Em casos onde o chiller é acionado por queima de combustível (fogo direto) ou há disponibilidade de calor de rejeito de temperaturas altas (de 160 a 200°C), este ciclo se mostra ideal já que o custo operacional é bastante reduzido. Entretanto, é intuitivo que o investimento inicial para esse tipo de chiller é bem mais elevado pois são necessários sistemas de controle mais complexos, trocadores de calor de áreas bem maiores e materiais mais resistentes a corrosão (devido às altas temperaturas).

2.1.1.3. Efeito Triplo

Os chiller de efeito triplo seguem a mesma lógica do de efeito duplo. Ou seja, são adicionados mais um gerador e mais um condensador, os quais, em cascata, vão repetir mais uma vez o processo de rejeição de calor de um condensador de temperatura alta para um gerador de temperatura mais baixa. A Fig. 11 ilustra o esquema do ciclo de efeito triplo.

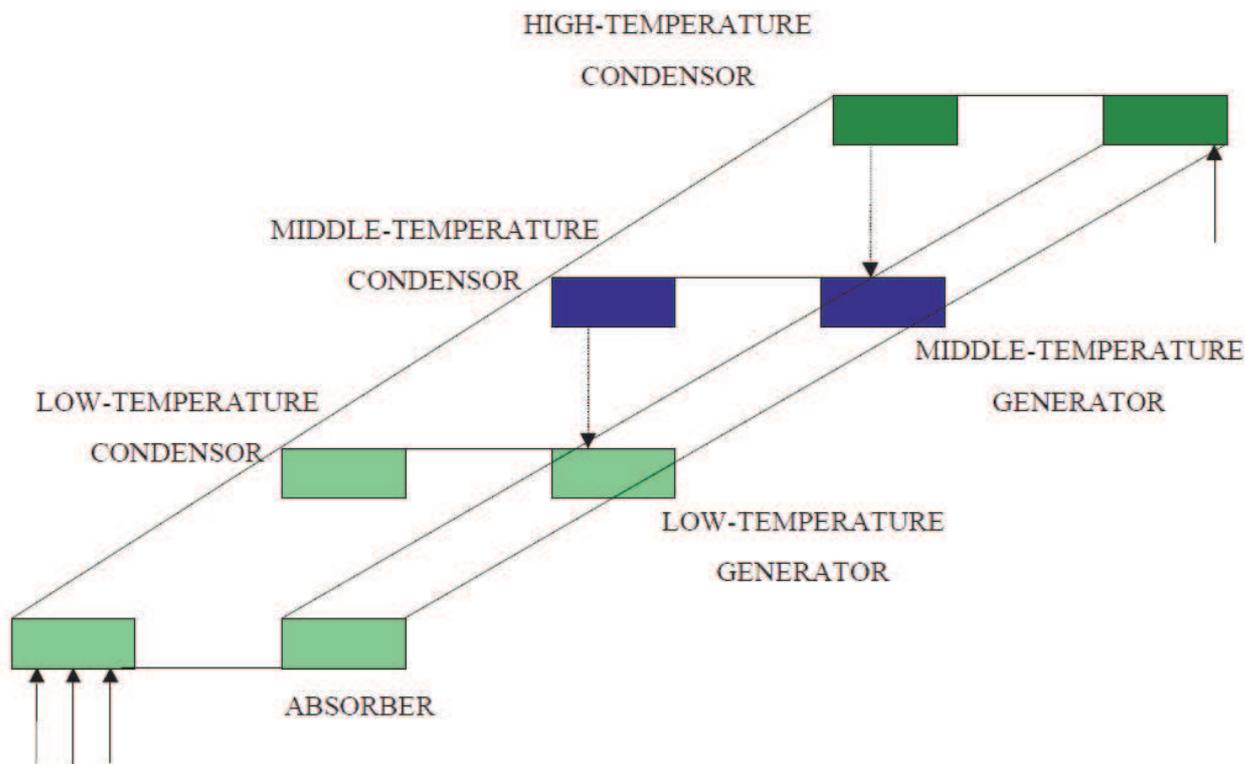


Figura 11: Ciclo de absorção de efeito triplo (Fonte: Absorption Chillers Guidelines)

Os ciclos de efeito triplo apresentam um COP que varia entre 1,4 e 1,6. Mais uma vez, entretanto, essa maior eficiência operacional eleva o custo inicial. A viabilidade comercial dessa tecnologia ainda não foi estabelecida.

2.1.2. Configuração em série e em paralelo

Os ciclos de efeito duplo ou triplo ainda podem ser dispostos em duas configurações diferentes: em série ou em paralelo. A diferença entre as duas configurações reside na maneira como a solução que sai do absorvedor faz as trocas calor e é distribuído entre os geradores de alta e baixa temperatura.

2.1.3. Configuração em série

Como o nome da configuração sugere, a solução que sai do absorvedor troca calor em série com a solução forte proveniente dos geradores de baixa e alta temperatura e se dirige toda para o gerador de alta temperatura, conforme mostra a Fig. 12.

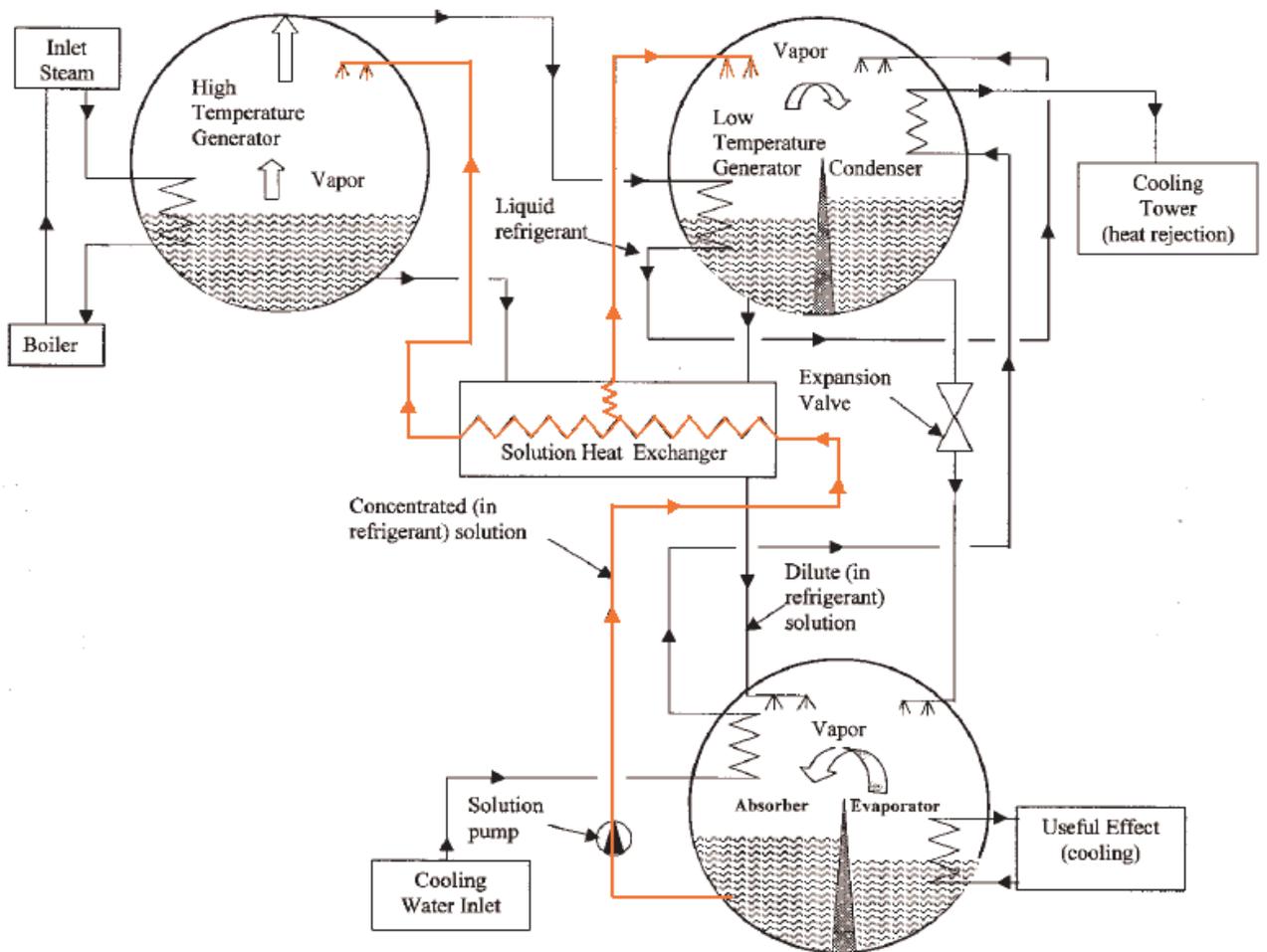


Figura 13: Configuração em paralelo (Fonte: Cool Thermodynamics)

A vantagem da configuração em paralelo é o maior COP e a menor chance de ocorrer cristalização quando o par de trabalho é o LiBr-água.

2.1.5. Pares de trabalho

Os sistemas de absorção utilizam, basicamente, dois pares de trabalho: o par amônia-água, onde a amônia é o refrigerante, e o par brometo de lítio-água, onde a água é o refrigerante. Cada par possui suas vantagens e desvantagens; algumas características relevantes estão listadas na Tab. 1.

Vale lembrar que nenhum dos pares danifica a camada de ozônio e não contribuem para o aquecimento global. Os chillers apresentam alta durabilidade e não têm problemas em funcionar com carga parcial.

<i>LiBr</i>	<i>Amônia</i>
Só trabalha com temperaturas acima de 5°C (problema da cristalização)	Pode trabalhar com temperaturas abaixo de zero
Apresenta uma alta entalpia de evaporação	Precisa do retificador (separa o vapor de água do de amônia)
Não é tóxico	Em altas concentrações, irrita os olhos
Maior COP (em comparação ao ciclo de amônia)	Alta volatilidade
Trabalha a pressões muito baixas (vácuo parcial)	Trabalha a altas pressões (menos problemas de vedação)

Tabela 3: Propriedades dos ciclos de LiBr e de amônia

Para o par BrLi-Água, a cristalização é um fenômeno que ocorre quando a solução de LiBr congela dentro da tubulação devido às baixas temperaturas. Isso deve ser evitado a todo custo pois os danos causados são bastante graves e, muitas vezes, irreparáveis. Este problema não acontece quando o fluido refrigerante é a amônia, pois a sua temperatura de solidificação em pressão atmosférica fica por volta de -80°C.

Uma alta entalpia de evaporação implica na maior transferência de calor latente. Sabe-se que as trocas de calor durante a mudança de fase são elevadas e ocorrem a temperatura constante, o que também é vantajoso.

O fato do par de brometo de lítio e água trabalhar em pressões muito baixas acarreta em problemas de infiltração. A vedação e manutenção desses equipamentos é complicada, ainda mais no Brasil onde a mão-de-obra especializada é praticamente inexistente.

Para o par Amônia-Água, apesar de a amônia não ser tóxica, um vazamento em demasia pode causar irritabilidade dos olhos e do nariz. Dessa forma, é importante que o chiller de par água-amônia fique num lugar ventilado e que a manutenção seja feita de maneira regular para que um

energia incidida sobre o coletor é transferida para a água com apenas 5% de perdas. O aumento da eficiência é fundamental, pois permite que, para uma dada potência, a área necessária seja minimizada.

O número 95%, por sua vez, foi escolhido, pois é nessa faixa que os coletores europeus mais modernos estão trabalhando. Há diversas tecnologias no mercado, das mais eficientes (quando se trata de aplicações de grande porte) até as mais “humildes” (usada, por exemplo, para aquecimento de água doméstico).

Na Europa, existe uma grande preocupação com as questões da sustentabilidade e da eficiência energética em prol do ambiente. A seriedade em relação ao assunto pode ser relacionada com este trabalho e percebida pela existência do SOLCO Project, uma iniciativa governamental que incentiva e auxilia o mercado de soluções em refrigeração solar. Por conta disso, surgiram muitas empresas altamente especializadas neste ramo, em vários países da União Européia, as quais são muito procuradas para prestar serviços.

Com isso, o avanço tecnológico está sendo bastante rápido. Eficiências cada vez maiores estão sendo alcançadas tornando os projetos solares mais viáveis. Serão citadas a seguir as duas tecnologias de coletores muito utilizadas, atualmente: uma para uso doméstico e outra para aplicações comerciais e industriais e que demandem excelentes níveis de eficiência. Em seguida será mostrado o coletor solar parabólico em desenvolvimento por outro aluno do SISEA.

2.2.1. Coletor de placas planas

Os coletores de placas planas são os mais comuns e também os mais conhecidos por serem usados em instalações de aquecimento de água doméstico. Eles consistem em um absorvedor, uma cobertura transparente e uma caixa termicamente isolada, como ilustra a Fig. 15.

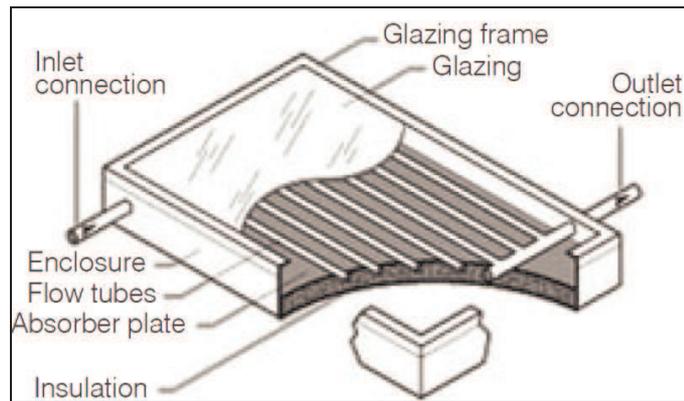


Figura 15: Coletor solar de placa plana (Fonte: Solar Cooling Recommendations)

O absorvedor (absorber plate) é uma placa de material de alta condutividade térmica (como cobre ou alumínio) com tubos fixados em sua superfície (flow tubes). A superfície, por sua vez, é pintada de modo a maximizar a absorção e a minimizar a emissão da irradiação solar. A cobertura transparente (glazing) permite a passagem de luz solar e impede que haja perdas por convecção devido a fluxos de ar.

Esses coletores possuem uma vasta gama de eficiências. Os de uso doméstico trabalham numa eficiência média de 50% já que são usados apenas para o aquecimento de água dos chuveiros ou torneiras. Por conta dessa baixa eficiência, esses coletores não são indicados para uma instalação de refrigeração solar.

2.2.2. Coletor de tubos a vácuo

Estes coletores estão sendo cada vez mais utilizados devido à sua alta eficiência. A sua construção é mais complexa e consegue reduzir ao máximo as perdas de calor. A Fig. 16 mostra como é a construção deste coletor.

O grande diferencial nos coletores de tubos a vácuo são os tubos de vidro evacuados. Cada tubo evacuado (evacuated tube) é composto de dois tubos de vidro. O tubo externo (outer glass tube) é feito de borossilicato altamente transparente para reduzir a reflexão da luz solar. O tubo interno (inner glass tube) também é feito de borossilicato, mas é pintado com uma tinta de alta absorção de irradiação solar (absorbing coating). Entre os dois tubos há vácuo (evacuated space), o que minimiza as perdas por condução e convecção.

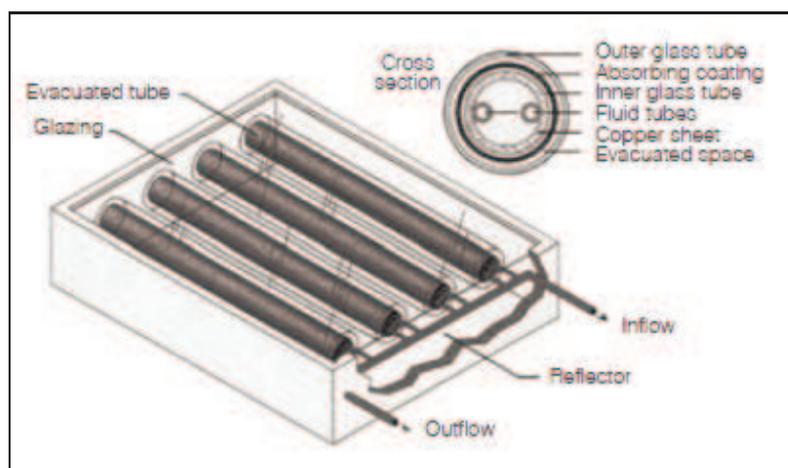


Figura 16: Coletor de tubos a vácuo (Fonte: Solar Cooling Recommendations)

Dessa forma, é possível se utilizar o coletor mesmo quando a temperatura ambiente está baixa, o que é impossível para um coletor de placas planas. Num dia ensolarado, é possível alcançar, facilmente, 250°C.



Figura 17: Tubos a vácuo (Fonte: Sunmaxx)

Com essas implementações, a eficiência pode alcançar até 95%. Por conta deste número, que pode ser traduzido em alto rendimento operacional, é bastante recomendável a utilização dos coletores de tubos evacuados em sistemas de refrigeração solar. É bastante plausível pensar no

aquecimento de água doméstico, já que é muito interessante ter água quente disponível mesmo em dias bem frios. A Fig. 17 mostra como esses coletores podem ser aplicados.

Há diversas tecnologias que fazem uso dos tubos a vácuo. A mais comum delas é a bomba de calor (Fig. 18). Usando a luz solar para evaporar a água dentro dos tubos evacuados, o vapor sobe para o topo do tubo, área que funciona como um condensador. Água fria passa pelo condensador e é aquecida para ser utilizada no processo desejado. O vapor que estava no condensador volta ao estado líquido para ser vaporizado novamente.



Figura 18: Funcionamento de uma bomba de calor de tubo a vácuo (Fonte: Sunmaxx)

Outro mecanismo interessante é o termosifão (Fig. 19), o qual funciona de maneira análoga à bomba de calor mas possui um reservatório de água quente no topo do próprio tubo.

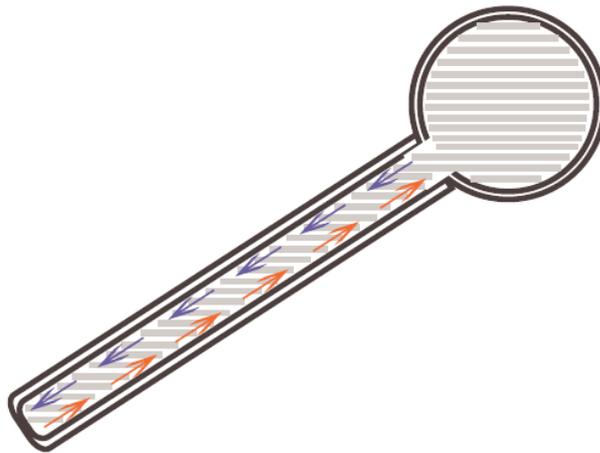


Figura 19: Termosifão de tubo a vácuo (Fonte: Sunmaxx)

A água aquecida no tubo sobe para o reservatório e a água mais fria desce para ser aquecida novamente.

2.2.3. Coletor parabólico em desenvolvimento no SISEA

O coletor em desenvolvimento apresentará uma geometria parabólica, de modo que os raios solares incidentes reflitam para o seu foco, onde haverá um tubo evacuado semelhante ao utilizado nos coletores de tubos a vácuo (Fig. 20). Pretende-se, dessa forma, obter as vantagens de redução de perdas e aumento significativo da eficiência. Para se aumentar a temperatura da água, serão utilizados passes múltiplos em vários coletores. Também há a possibilidade de se ligar coletores em paralelo para que maiores vazões de água possam ser utilizadas.

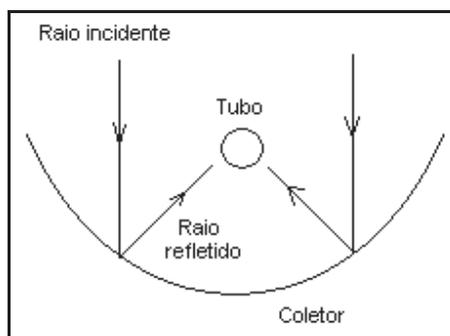


Figura 20: Esquema do coletor solar parabólico

2.3. Tanque de armazenamento

Com o sistema em funcionamento, em determinados momentos a água quente proveniente do coletor solar pode não ser suficiente ou pode ser abundante demais para a operação naquele instante. Com isso, se a água quente sair dos coletores e se dirigir diretamente para o chiller, poderá haver falta de calor ou desperdício. Para se evitar esses contratempos, utiliza-se um tanque de armazenamento entre o coletor e o chiller.

Por conta disso, o tanque funciona como se fosse um filtro que ameniza as oscilações de insolação. Ou seja, mesmo que os coletores permaneçam por algum tempo sem receber a luz do sol, devido a uma nuvem, por exemplo, o tanque, por possuir uma certa quantidade de energia armazenada, pode continuar provendo o calor necessário para que o chiller se mantenha em operação. Uma outra situação é o momento em que a insolação é bastante elevada; mesmo que o chiller não utilize toda a energia coletada, o tanque pode armazená-la para ser usada depois.

A água quente, em vez de se dirigir diretamente para o chiller, passará pelo tanque em serpentinas. O tanque, por sua vez, deve estar inundado com um óleo que trabalhará como armazenador térmico. Assim, o calor coletado do sol ficará armazenado dentro do tanque, o qual deve, obviamente, ser termicamente isolado.

Para que o chiller possa fazer uso desta energia armazenada, outro circuito é instalado de maneira análoga. Neste outro circuito, a água passa pelo tanque de armazenamento em serpentinas, aumenta sua temperatura e segue para o chiller. Depois de alimentá-lo (o chiller), a água retorna para o tanque de armazenamento onde vai ser aquecida novamente.

2.4. Câmara de Combustão

Pode haver ocasiões em que o coletor solar, nem mesmo acoplado ao tanque de armazenamento, não conseguirá fornecer água para o chiller nas condições adequadas, por conta de níveis de insolação muito baixos. Neste caso, antes de entrar no chiller, a água deverá passar por uma câmara de combustão a gás natural que garantirá temperatura e vazão adequadas para o funcionamento do chiller.

2.5. Recuperador

O recuperador é simplesmente um trocador de calor que possibilita transferência de energia entre a água de saída do chiller e o fluido de entrada do coletor solar. Com isso, é possível aumentar a eficiência do sistema.

2.6. Integração do sistema e outros componentes

Os principais componentes do sistema de refrigeração solar foram apresentados anteriormente. Agora, falta juntá-los e analisar a maneira como ele vai trabalhar.

A integração do sistema vai precisar ainda de outros componentes para que o ciclo entre em operação. Assim, basicamente, serão necessárias bombas para promover a circulação dos fluidos e trocadores de calor para melhorar o rendimento do sistema. Além disso, também será adicionada uma câmara de combustão em paralelo com o tanque de armazenamento para que, caso os coletores não consigam fornecer energia suficiente, o aquecimento do fluido que alimentará o chiller seja garantido.

Na literatura, existem algumas configurações básicas de integração deste sistema. Entretanto, acredita-se que por motivos didáticos, não são apresentados arranjos mais complexos em prol do aumento de eficiência. Por esse motivo, foi necessário criar e aperfeiçoar um arranjo, visando a otimização do sistema. Assim, chegou-se à configuração da Fig. 21.

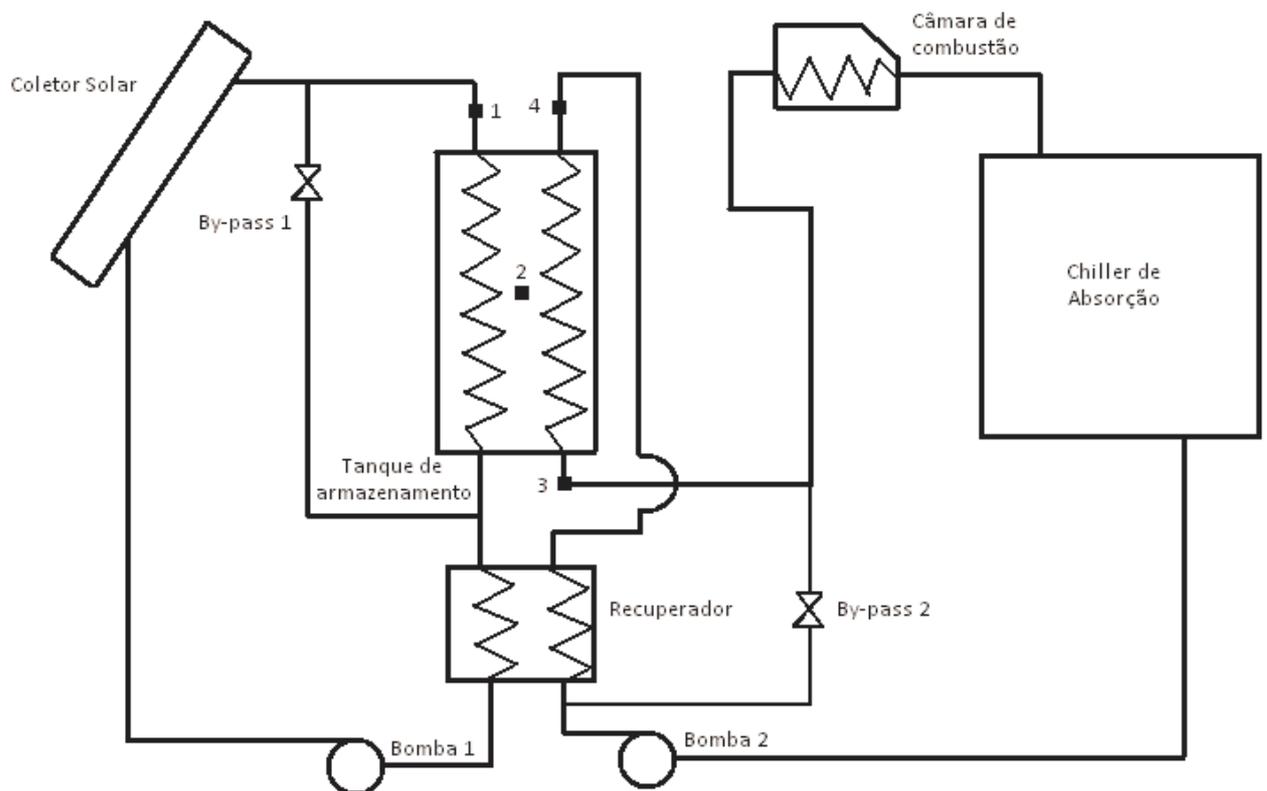


Figura 21: Configuração do sistema por absorção

Para que o sistema tenha um funcionamento adequado, com menos perdas, devem ser introduzidas leis de controle em algumas partes do sistema.

2.6.1. Água do coletor com temperatura abaixo da do tanque

Se a temperatura da água proveniente do coletor for menor que a temperatura do tanque de armazenamento, o bypass deve ser acionado para que o tanque de armazenamento não perca calor para a água do coletor. Para isso, devem ser instalados termômetros que meçam a temperatura na entrada (1) e dentro do tanque (2). Assim, é possível usar estes sinais para controlar o by-pass 1.

2.6.2. Temperatura da água de alimentação do chiller abaixo da necessária

Se a temperatura da água que sai do tanque e segue para o chiller estiver abaixo da demandada para a operação naquele momento, é necessário ligar a câmara de combustão de

maneira controlada para que a água atinja a temperatura necessária. Outro termômetro é necessário na saída do tanque (3).

2.6.3. Temperatura de entrada da água do chiller no tanque menor que a de saída

Em situações em que a câmara de combustão estiver funcionando, é possível que a temperatura do tanque esteja tão baixa que a temperatura de entrada (4) pode ser maior que a de saída (3). Neste caso o recuperador também não estará contribuindo em nada e o by-pass 2 deverá ser acionado para que não haja perdas. É necessário analisar se é viável manter o chiller funcionando só com a câmara de combustão fazendo o aquecimento, afinal não é esse o objetivo do sistema, mas sim aproveitar a energia solar.

2.7. Análise da eficiência do sistema

Como exemplo de aplicação e comprovação da viabilidade do sistema com chiller de absorção, existe o projeto da SOLCO em Chipre para a padaria industrial L'Amour Rouge Bakery. A instalação inteira tem 627m².

Com uma área de 120 m² de coletores solares eles conseguiram obter 70,3 kW de efeito útil. Foram usados tubos a vácuo e um chiller de LiBr-água. A economia com energia da empresa chega a 60%.

Analisando a razão entre o efeito útil e a área, tem-se um valor de 0,25kW/m² para as células fotovoltaicas e de 0,58kW/m² para o sistema com chiller de absorção. Conforme o esperado, a utilização dos chillers para refrigeração é bastante atrativa por conta da eficiência e da economia operacional proporcionada. O projeto da SOLCO em Chipre teve um investimento inicial de 134.489 euros com tempo previsto de retorno de 8 anos, que é um prazo bastante atraente.

3. Análise dos casos

Após comparar os funcionamentos do chiller de absorção alimentado por coletores solares e das células fotovoltaicas alimentando um chiller de compressão, foi possível notar a viabilidade da aplicação dessas soluções, já que o tempo de retorno do investimento é curto, pelo menos na Europa, onde esses equipamentos têm grande notabilidade.

A partir deste ponto, o foco será voltado para o chiller de absorção, pois a idéia inicial é a utilização de coletores solares de alta eficiência que o próprio SISEA está desenvolvendo.

Serão analisadas duas aplicações do sistema: uma num hospital e outra num frigorífico. Para cada local, verificar-se-á a área necessária de coletores solares, o tipo mais adequado de chiller a absorção e a potência de refrigeração necessária. Além disso, entrará no escopo do estudo o tipo de instalação que é utilizado atualmente no local escolhido e qual seria o tempo de retorno do investimento, considerando a diferença dos custos operacionais, os quais serão calculados com base nas variações de intensidade da insolação em São Paulo, nos preços da eletricidade ao longo do dia e nos preços do gás natural

Com isso, pretende-se mostrar que a aplicação de um sistema mais sustentável e econômico pode atender à demanda do estabelecimento, além de diminuir custos operacionais, trazendo melhores resultados financeiros para o proprietário, no médio/longo prazo.

3.1. Hospital Universitário

3.1.1. Situação atual

O hospital escolhido para a análise de caso foi o HU da USP, devido à acessibilidade e à disponibilidade de dados já existentes. O trabalho de formatura realizado por Marcus D'Emílio, 2005, mostra como era a estrutura de condicionamento de ar do HU na época e apresenta o levantamento das cargas térmicas do local, apresentando, conclusivamente, uma sugestão dos equipamentos a serem adotados para uma melhor operacionalidade do sistema de ar condicionado.

Em 2005, conforme D’Emílio esclarece em seu trabalho, o HU já apresentava diversos problemas como as instalações obsoletas e sem manutenção, o que gerava grande ociosidade de equipamentos de alta potência, como dois chillers de mais de 80 TRs fora de operação.

Na visita realizada neste ano, foi possível notar ainda mais inadequações no sistema de condicionamento de ar. O Engenheiro Marcos, da manutenção do hospital, informou que mais um chiller, de 90 TRs, havia saído de operação. Além disso, por conta da precariedade das tubulações de água gelada e de ar frio e da conseqüente impossibilidade do uso do sistema central de ar condicionado, diversos Splits foram instalados de maneira desordenada. A Fig. 22 mostra a área externa do terceiro andar; dela foi feito “campo” de unidades condensadoras, as quais não foram nem ao menos protegidas da radiação solar, aumentando ainda mais o consumo de energia.



Figura 22: Condensadores no terceiro andar do HU

Ao visitar a área da farmácia, é interessante notar como não há janelas e nem qualquer sistema de ventilação artificial, por conta do abandono das redes de dutos. Tudo que existe, são alguns ventiladores que os próprios funcionários levaram por conta própria e um split instalado na seção onde os medicamentos são estocados e manuseados.

A iniciativa mais sensata, feita recentemente, foi a instalação de um novo sistema central de água gelada para condicionar a área da radiologia, no segundo andar. Nessa obra, foram instalados um chiller de 70TRs (Fig. 23), novos fan-coils e nova rede de tubulação. Ainda assim, esse investimento parece um pouco precipitado, considerando que há outros chillers, com quase a mesma potência do novo, inutilizados. Infelizmente, não foi possível tirar fotos dos fan-coils pois eles foram posicionados sobre o forro.



Figura 23: Chiller de compressão de 70 TRs

Semelhantemente, há uma casa de máquinas inteira só para condicionar o centro cirúrgico do hospital.

3.1.2. Aplicação do sistema com chiller de absorção

Tendo em vista o sistema instalado para suprir a demanda de condicionamento da área de radiologia, será estudado, como alternativa, o uso de um sistema com chiller de absorção para a mesma aplicação.

Para efeito de comparação, será considerado que o ar condicionado opera durante 14 horas e permanece desligado no restante do dia. Dessa forma, será possível estabelecer uma medida para analisar o tempo de retorno do investimento para se instalar o sistema de absorção.

O chiller convencional utilizado no HU, de 70 TRs, possui uma potência nominal de 77 kW, já incluindo bombas e ventiladores. O sistema deverá trabalhar por 14 horas, das 7 às 21 horas.

A tabela 2 mostra um comparativo entre a instalação de um sistema convencional e o sistema com chiller a absorção. A conta Investimento Inicial foi estimada já considerando a instalação de dutos, fan coils e outros equipamentos inerentes ao sistema central de ar condicionado. Para o sistema a absorção, também está incluso o custo com coletores solares, para os quais foi admitido o custo de 250 euros por metro quadrado. Foi considerado que o euro valendo R\$2,54 e por conta da importação da Europa, o custo dos coletores foi multiplicado por 1,5.

Tabela 2: Comparativo entre o sistema convencional e a absorção no HU

	Convencional	Absorção
Investimento Inicial	R\$ 234.750,00	R\$ 829.875,00
Eletricidade		
Demanda ponta (kW)	77	15
Demanda fora de ponta (kW)	77	15
Consumo ponta (kWh)	231	45
Consumo fora de ponta (kWh)	847	165
Custo ponta (R\$/kWh)	0,7	0,7
Custo fora de ponta (R\$/kWh)	0,25	0,25
Custo anual com EE (R\$)	R\$ 134.442,00	R\$ 26.190,00
Gás Natural		
Consumo anual (m ³)	0	81.655,99
Custo do GN para refrigeração (R\$)	0	R\$ 0,28
Custo anual com GN	0	R\$ 22.863,68
Outras despesas		
Manutenção (anual)	R\$ 12.000,00	R\$ 36.000,00
Custo Operacional anual	R\$ 146.442,00	R\$ 85.053,68
Tempo de retorno	REFERÊNCIA	12

O cálculo do consumo de gás natural foi feito com base na demanda por água quente do chiller a absorção da BROAD de 66TRs, modelo BH20, que é um chiller de duplo estágio e utiliza água a 170/155°C (entrada e saída da água quente de alimentação) com uma vazão de 10,2m³/h. Admitindo que a insolação média em São Paulo, ao longo do ano, é de 16MJ/m².dia (segundo Atlas Solarimétrico – ver referências), distribuindo essa potência ao longo de 11 horas de “claridade”, tem-se uma insolação média de 404 W/m².

Com essa insolação, seriam necessários mais de 750m² de coletores solares de alta eficiência para que o chiller operasse apenas com energia solar. Como isso não é viável, até porque a insolação é uma variável muito instável e imprevisível, foi admitido que apenas 350m² de coletores serão instalados e o resto da energia será proveniente da queima de gás natural na câmara de combustão.

Dessa forma, é possível calcular um tempo aproximado de retorno do investimento de 12 anos. É um prazo longo, mas, com a manutenção feita de maneira adequada, a economia com energia elétrica poderá ser prolongada por mais vários anos, já que os equipamentos a absorção costumam ter longa vida, já que não há partes móveis.

3.2.Frigorífico

O frigorífico tomado como caso de estudo foi o Pescados Cabral, o qual armazena e comercializa frutos do mar congelados. O local possui 4 câmaras frias para congelamento e resfriamento de produtos que requerem condições de ambiente variadas. É interessante lembrar que no frigorífico, por conta das temperaturas abaixo de zero, é necessário utilizar um chiller de absorção com par de trabalho água-amônia, pois este não apresentar problemas de congelamento no interior das tubulações de água gelada.

Atualmente, o local trabalha com um sistema de condensadores, tanque de gás de flash, evaporadores e compressores. A potência de refrigeração do sistema é de 15 TRs com uma potência nominal de 18 kW. As câmaras frias operam 24 horas por dia, ininterruptamente.

Para este caso, onde há uma baixa demanda de refrigeração, fica bastante interessante substituir o sistema convencional pelo a absorção empregando o chiller da SolarNext, empresa

alemã, de 12kW, modelo *chillii® Cooling Kit PSC12*. Ele utiliza o par água-amônia e, por isso, pode operar a temperaturas negativas. Dessa forma, são necessários 5 chillers desse tipo para atender a demanda do Pescados Cabral.

A área necessária de coletores solares, para que o sistema funcionasse apenas com energia solar (assumindo os mesmos 404W/m² que foram utilizados para o HU) seria de 228m². Como para um estabelecimento comercial essa área é extensa demais, considerou-se que serão instalados apenas 100m². Os custos dos coletores solares, novamente, estão embutidos na conta Investimento Inicial, e foram estimados em 250 euros por metro quadrado.

A Tabela 3 mostra um comparativo entre o sistema convencional e o com chiller a absorção.

Tabela 3: Comparativo entre o sistema convencional e a absorção no Pescados Cabral

	Convencional	Absorção
Investimento Inicial	R\$ 56.250,00	R\$ 200.250,00
Eletricidade		
Demanda ponta (kW)	18	1
Demanda fora de ponta (kW)	18	1
Consumo ponta (kWh)	54	3
Consumo fora de ponta (kWh)	198	21
Custo ponta (R\$/kWh)	0,7	0,7
Custo fora de ponta (R\$/kWh)	0,25	0,25
Custo anual com EE (R\$)	R\$ 31.428,00	R\$ 2.646,00
Gás Natural		
Consumo anual (m ³)	0	54.528,82
Custo do GN para refrigeração (R\$)	0	R\$ 0,26
Custo anual com GN	0	R\$ 14.177,49
Outras despesas		
Manutenção (anual)	R\$ 6.000,00	R\$ 18.000,00
Custo Operacional anual	R\$ 37.428,00	R\$ 34.823,49
Tempo de retorno	REFERÊNCIA	81

Um tempo de retorno de 81 anos com certeza não é nada atrativo. Foi possível notar nesta análise que o COP de 0,6 do equipamento, valor bastante baixo, pesou no consumo de gás, o qual elevou os custos operacionais do chiller a absorção a patamares inviáveis.

4. Conclusões

Apesar de, conceitualmente, os chillers a absorção estarem totalmente a favor da sustentabilidade e da economia, os tempos de retorno de investimento ainda são muito longos, principalmente pelo fato de não serem fabricados no Brasil. Eles são importados principalmente da Europa, onde muitos países têm investido pesado em tecnologias sustentáveis. Isso acaba onerando demais o consumidor final por conta do câmbio e dos impostos.

Vê-se que no HU, onde um equipamento de porte médio seria instalado, o investimento retornaria em 12 anos. É um prazo longo mas que ainda mostra a viabilidade do projeto.

Por outro lado, para o frigorífico de pequeno porte, a utilização de pequenas unidades não vale a pena. O único significado do prazo de 81 anos é que, absolutamente, o projeto é inviável.

Os coletores solares europeus, de altíssimos rendimentos, também são os responsáveis pelos projetos ficarem tão caros. Foi adotado, de maneira conservadora, o valor de 250 euros por metro quadrado, o qual depois dos impostos, se converte em R\$950,00 por metro quadrado. Assim, quando o custo dos coletores solares é muito significativo no investimento inicial, o projeto tende a ficar inviável pois se está investindo muito em coleta de energia solar e pouco em capacidade de refrigeração. Junto a isso, como este trabalho está comparando o chiller a absorção com o chiller convencional, quanto maior a demanda de refrigeração, mais o chiller convencional gasta com eletricidade e mais o chiller a absorção tem a vantagem de economizar empregando o gás natural.

5. Referências

- AES Eletropaulo, <http://www.eletropaulo.com.br/portal/interna/?idConteudo=640>, acesso em 18/11/2009
- ATLAS Solarimétrico do Brasil. Recife : Editora Universitária da UFPE, 2000.
- Climate4You, www.climate4you.com, acesso em 13/04/2009
- D'Emilio, M. V. B., “Auditoria energética dos sistemas de ar condicionado no hospital universitário da Universidade de São Paulo”, São Paulo, 2005, Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Desideri, U., Proietti, S., Sdringola, P., “Solar-powered cooling systems: Technical and economic analysis on industrial refrigeration and air-conditioning applications”, Applied Energy 86, 2008
- EREC, “Renewable energy technology roadmap: up to 2020”, 2005.
- Gordon, J.M., Ng, K.C., “Cool Thermodynamics”, Cambridge International Science Publishing, Cambridge, UK, 2001.
- New Buildings Institute, “Absorption Chillers Guideline”, Fair Oaks, 1998.
- Pauliello, R.J., “Análise técnica do aproveitamento eólico e solar para a conversão em energia elétrica”, São Paulo, 2006, Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Re-FOCUS, “Concentrator Photovoltaic Technologies: Solar Review and Market Prospects”, www.re-focus.net, July/August 2005.
- Silicon Solar Inc, “SunMaxxTM Information Guide: Evacuated Tube Solar Collectors”, Bainbridge, 2008, www.siliconsolar.com, acesso em 05/05/2009
- SOLCO, “Solar Cooling: Overview and Recommendations”, 2009, www.solcoproject.com, acesso em 05/05/2009

- SOLID, “Solare Klimatisierung”, 2009, www.solid.at, acesso em 13/04/2009
- Stoecker, W.F.; Jones, J.W. "Refrigeração e Ar Condicionado", McGraw-Hill, 1985
- Sunmaxx, “Information Guide: Evacuated Tube Solar Collectors”, www.sunmaxxsolar.com, acesso em 20/04/2009
- Tassou, S.A., Chaer, I., Sugiarta, N., Ge, Y.-T., Marriott, D., “Application of tri-generation systems to the food retail industry”, Energy Conversion and Management 48, 2007
- TUMA, www.empresastuma.com.br, acesso em 10/11/2009