

AR CONDICIONADO SOLAR: MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Antonio Luiz Zambelli Loyola Gonzaga Mendonça

antoniolmendonca@yahoo.com.br

Resumo

Atualmente, o ser humano vive em um mundo movido a fontes não-renováveis de energia: estas são geralmente ineficientes, e acabam sendo a causa principal da poluição na Terra. O uso de energia renovável para atividades produtivas ainda é muito limitado: o custo da tecnologia também é muito alto e pouco acessível.

A pesquisa em torno das fontes renováveis e limpas vem sendo cada dia mais importante para encontrar soluções mais baratas e de menor impacto ambiental. Sendo assim, o foco deste trabalho é a aplicação da energia solar (fonte primária de energia limpa e renovável, e de essencial importância para a vida no planeta) para o condicionamento de ambientes (que em geral consome uma boa parcela da conta de energia nas casas, escritórios, centros comerciais, galpões, CPD's, hospitais, hotéis, etc).

Para este trabalho, foram feitas a modelagem e a simulação de um ciclo de refrigeração por absorção a partir da solução de brometo de lítio em água (LiBr/H₂O): o sistema foi analisado com a ajuda do software EES (Engineering Equation Solver). Para este modelo, assumiu-se como fonte de calor a radiação do Sol sobre um painel solar de placas planas, e foi avaliado o comportamento do sistema como um todo quando são modificadas as variáveis de entrada no mesmo. A aplicação estudada para este ciclo foi um centro de processamento de dados (CPD), e foi considerada a possibilidade de localização do mesmo nas cidades de Recife, PE (Brasil), São Paulo, SP (Brasil) e Turim, TO (Itália).

Palavras chave: refrigeração, absorção, energia solar.

1. Introdução

Atualmente, o homem vive em um mundo de máquinas e equipamentos movidos a fontes não-renováveis de energia, a partir da ingênua idéia de que estas são as menos dispendiosas: geralmente são máquinas ineficientes, e as principais causadoras da poluição na Terra. O uso da energia renovável para atividades produtivas ainda é muito limitado: o custo da tecnologia também é muito alto e pouco acessível. A pesquisa em torno das fontes renováveis está sendo cada dia mais importante: este trabalho foca justamente a utilização dos recursos energéticos mais básicos à vida na Terra: a energia solar.

Dentre outras formas de energia ecologicamente viáveis, a solar é uma fonte primária de energia por excelência. Anualmente, o Sol irradia sobre a terra 19 trilhões de TEP (tonelada equivalente de petróleo), enquanto a demanda mundial de energia é de cerca de 8 bilhões de TEP. Praticamente toda a energia que é utilizada hoje se originou a partir de radiação solar, incluindo os combustíveis fósseis. O calor resultante da radiação solar pode ser “capturado” de muitas maneiras, e utilizado para as necessidades de energia diferentes, tais como uma simples forma de energia térmica, útil para a produção de água quente sanitária e aquecimento, mas também para o resfriamento de um ambiente (através de um ciclo de absorção), energia elétrica ou energia mecânica.

As tecnologias atuais permitem ainda mais tipologias energéticas, e pode-se acumular energia térmica de muitas maneiras e para diversos usos. O potencial obtido pelo calor do Sol é capaz de satisfazer uma quantidade considerável da necessidade térmica e elétrica, podendo até mesmo ser utilizada para a produção de biocombustíveis. Ainda assim, existe um mito de que nosso padrão de vida deve ser reduzido a fim de evitar os efeitos das alterações climáticas, mas a realidade é que as alternativas não envolvem o sacrifício de conforto.

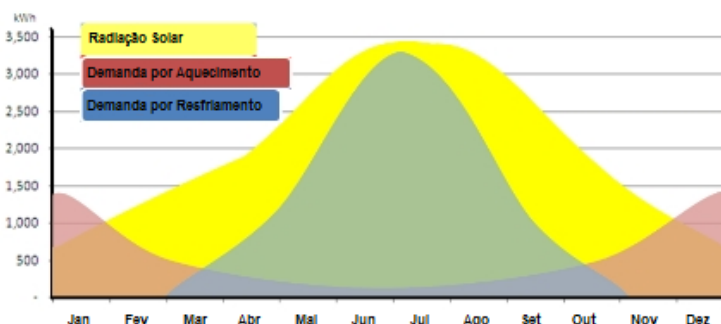


Figura 1. Consumo médio de energia em residência de uma família, e energia solar disponível na Europa (Fonte: ANNUAL ENERGY DEMAND).

O conforto térmico nos edifícios onde passamos a maior parte dos dias e noites é geralmente mantido com altos custos ambientais. O problema é que o consumo de eletricidade na Europa provém quase totalmente dos combustíveis fósseis, com grande potencial de poluição, sem ainda mencionar que eles são fontes não-renováveis. Já no Brasil, a grande dependência da energia proveniente de hidroelétricas faz com que, em tempos de longa estiagem, ocorram racionamentos e “apagões” de eletricidade.

Assim, o problema recai nas mãos do setor energético para encontrar soluções inovadoras e realistas. Estas soluções viáveis devem reduzir as emissões de CO₂ e poluição sem sacrificar o conforto. Para isso, é necessário pensar em novas

formas, saindo das fontes convencionais de energia e começar a desenvolver novas fontes de energia renováveis: quebrar paradigmas e, em seguida, demonstrar os paradoxos. A idéia proposta neste trabalho é a de explicar como o Sol pode ser usado para resfriar os nossos edifícios, e como esse paradoxo pode ser modelado e demonstrado.

Existem quatro categorias principais de tecnologias que exploram o potencial do Sol para fornecer soluções de aquecimento:

- Tecnologia solar térmica;
- Energia elétrica, através da célula fotovoltaica (PV);
- Concentração de energia solar (CSP);
- Tecnologia de torre de energia solar.

Um mito que se manteve por muito tempo é baseado no fato de que a energia solar pode ser utilizada apenas para o aquecimento ou eletricidade. Existe a possibilidade de explorar a luz solar para obter a refrigeração: é possível utilizar os raios solares de maneira inovadora, sendo neste contexto que o resfriamento solar entra em jogo, usando um coletor solar para captar energia térmica e, em seguida, transformando-a em refrigeração com uso mínimo de energia elétrica através de um ciclo por absorção.

Além disso, o Sol fornece mais energia para aquecimento durante o verão, justamente quando a demanda por aquecimento é muito baixa. A época do ano quando o resfriamento é necessário é quando o Sol fornece mais energia. Portanto, o potencial de refrigeração a partir da radiação obtida do Sol será grande, a qual não é usada nos dias de hoje: o "resfriamento solar" oferece consideráveis benefícios ambientais, financeiros e sociais, em comparação com o resfriamento utilizando energia não-renovável, fornecida para os ciclos convencionais de refrigeração.

O Sol pode ser a maior fonte de energia à nossa disposição hoje, prometendo até a independência de combustíveis fósseis: a tecnologia solar é muito promissora, mas o acúmulo de energia durante a noite e o mau tempo ainda é um problema de ordem técnica deste sistema. Enquanto isso, os sistemas convencionais têm desvantagens nos seguintes componentes:

- Compressores: pouco eficientes, consomem muita eletricidade;
- Fluido refrigerante utilizado pode danificar a camada de ozônio da atmosfera.

Devido aos altos preços da eletricidade, e alta demanda de refrigeração em alguns países, seu uso torna ainda maior o custo. O uso extensivo de sistemas de energia com alto consumo durante o horário de pico também pode levar a uma sobrecarga de energia e possível blecaute nas distribuidoras elétricas.

Uma combinação inovadora de aquecimento, água quente e tecnologia de resfriamento é uma das soluções possíveis de serem implantadas: energia solar para aquecimento durante o inverno e resfriamento no verão, utilizando todo o potencial ao longo do ano. Desenvolver sistemas de energia solar para uso em ciclos de refrigeração por absorção pode levar à conseqüente redução de energia e emissão de dióxido de carbono, sem sacrificar o conforto. Os sistemas que utilizam fontes solares atualmente promovem o aquecimento do ambiente, de piscinas, arrefecimento de ambientes climatizados e água de reuso para moradias, condomínios, hotéis, prédios de escritórios e hospitais em todo o mundo. Os edifícios são servidos com sistema de ar condicionado no verão, aquecimento no inverno, e água de reuso durante o dia e a noite.

Um investimento em um sistema de climatização solar poderia poupar energia ao longo do tempo, que culmina na redução das emissões de dióxido de carbono. Os picos de energia e a possibilidade de blecaute são também menos prováveis nos horários de pico. O paradoxo utiliza a tecnologia já comprovada (ciclo de refrigeração) aproveitando a maior fonte de energia disponível ao homem sem gerar a poluição das fontes de energia convencionais: isso mostra que o conforto pode ser alcançado sem custos elevados.

2. Objetivos

O objetivo proposto para este trabalho é o estudo de um ciclo de refrigeração por absorção que possa aproveitar os raios solares como fonte de energia. Por meio do *software* EES (*Engineering Equation Solver*), pretende-se realizar a modelagem e a simulação de um ciclo por absorção de brometo de lítio em água (LiBr/H₂O) utilizando com fonte de calor vapor gerado por meio de coletores solares. Foram identificados parâmetros do sistema em análise que poderiam ser modificados, de modo a avaliar o comportamento do sistema, e tornar possível a utilização da radiação do Sol sobre um painel solar como fonte de calor. Fez-se um detalhamento teórico relativo ao ciclo de refrigeração por absorção em questão, fundamental para a compreensão do mesmo.

A partir de um modelo semi-empírico de um painel solar, fez-se uma análise da aplicação do sistema, como um todo, para algumas cidades e suas respectivas condições climáticas, a fim de determinar temperaturas ideais de funcionamento e obter respectivas potências de saída e coeficientes de rendimento (representado pela sigla em inglês COP, *coefficient of performance*). Sendo assim, é possível avaliar a parcela correspondente à energia solar que pode ser realmente aproveitada pelo ciclo, provocando uma economia energética e incentivando futuros trabalhos que possam aumentar a eficiência do sistema como um todo, de modo a preservar recursos energéticos poluentes e não-renováveis.

3. Descrição do Sistema

3.1. Ciclo de Refrigeração por Absorção

O ciclo frigorífico por absorção difere do ciclo por compressão de vapor na maneira pela qual a compressão é efetuada. Ao invés de comprimir um gás, uma solução é bombeada a uma pressão superior no ciclo de absorção, que é assim chamado por utilizar uma substância para absorver o fluido refrigerante. Isto é feito para que se possa elevar a pressão de vapor do refrigerante em uma solução líquida.

Uma vez que o trabalho de compressão é proporcional à variação de volume, elevar a pressão de um líquido, que é incompressível, com uma bomba requer muito menos trabalho do que elevar a pressão de um vapor com um compressor. Para um processo reversível, em regime permanente e com variações desprezíveis de energias cinética e potencial, o trabalho é igual à integral do produto entre o volume e a variação infinitesimal de pressão.

$$W = - \int v \cdot dp \quad (1)$$

Como o volume específico do líquido é muito menor que o volume específico do vapor, o sistema de absorção consome muito menos trabalho. Entretanto, para funcionar, este tipo de ciclo requer uma fonte térmica de temperatura relativamente alta para separar a solução entre refrigerante e absorvente. A Figura 2 mostra o esquema de um ciclo de refrigeração por absorção e seus componentes.

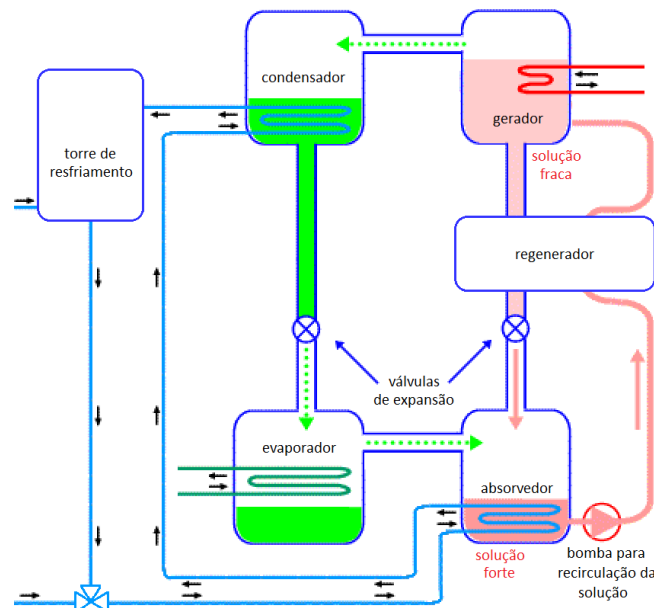


Figura 2. Representação esquemática do ciclo de refrigeração por absorção de simples estágio.

Podem ser utilizadas diversas misturas no ciclo: para o escopo deste trabalho, será abordado o sistema que utiliza a solução de brometo de lítio em água (LiBr/H₂O), 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). O ciclo principal da máquina de absorção pode ser dividido em quatro componentes, cujo funcionamento neste ciclo de refrigeração está descrito a seguir:

- Gerador: por meio de uma fonte de calor externa (como, por exemplo: a queima de combustível, a absorção da radiação solar através de um painel solar, a transferência de calor de fonte geotérmica, etc.), a mistura entre absorvente e fluido refrigerante é aquecida. Em um dado momento, o fluido refrigerante (que é sempre a espécie química mais volátil da mistura) evapora, deixando neste compartimento uma solução fraca em fluido refrigerante. Em outras palavras, através da transferência de calor para o gerador, a água da mistura LiBr/H₂O sofre transformação de fase para se tornar vapor, a qual é enviada ao condensador, enquanto o concentrado de brometo de lítio se deposita no fundo do gerador, sofrendo uma queda de pressão em uma válvula de expansão, podendo assim passar para o absorvedor.
- Condensador: a água pura no estado gasoso entra no condensador, onde se condensa, transferindo energia ao meio externo (neste caso, sendo dissipada na torre de resfriamento). Desta forma, após condensar-se, a água no estado líquido vai para a válvula de expansão, onde tem a pressão reduzida, e é enviada ao evaporador.
- Evaporador: a água, após passar pela válvula de expansão, tem a sua temperatura e pressão reduzidas, de modo a receber calor do meio no qual se deseja efetuar o resfriamento. Sendo assim, o evaporador tem a função de trocar o calor do ambiente para a água, tendo como consequência a evaporação da mesma. Após sofrer uma completa transformação de fase, a água na forma de vapor saturado é transferida para o absorvedor.
- Absorvedor: o vapor d'água produzido no evaporador chega ao absorvedor, onde também chega a solução fraca em fluido refrigerante (solução concentrada de brometo de lítio), que passou por uma válvula de

expansão após sair do gerador. As duas entradas do absorvedor completam o ciclo: como o brometo de lítio é altamente higroscópico, absorve a água que chegou do evaporador. Este processo é exotérmico, liberando energia ao circuito de água que vai à torre de resfriamento. A dissolução da água no brometo de lítio enriquece novamente esta solução com o refrigerante (solução forte em água), e a mistura é bombeada para o gerador, de modo a iniciar outro ciclo.

Além dos componentes já citados, inclui-se um regenerador de calor, para que a solução fraca em água (temperatura alta) possa ceder calor à solução forte em água, além do calor já cedido na torre de resfriamento. Esta troca de calor adicional é essencial para aproveitar o potencial de energia dissipada pelo ciclo por absorção (como pode ser visto na Figura 2). No caso da válvula de expansão, ocorre a redução da pressão do fluido no tubo em um processo isoentálpico, por considerar-se que não há troca de calor durante o processo de expansão.

As duas pressões de trabalho do ciclo (alta e baixa) são definidas através das condições da água nas transformações de estado (obtidas, respectivamente, com a temperatura no condensador e no evaporador, assumindo que as transformações de fase ocorrem a temperaturas constantes). Modificando estas condições, pode-se chegar a condições favoráveis de operação do ciclo: temperaturas moderadas (da ordem de 100°C) na fonte de calor externo já podem ser suficientes para a operação adequada do sistema, e tornando o mesmo muito vantajoso quando existe a possibilidade de se extrair uma quantidade de calor que está sendo rejeitada por um dado processo.

Fez-se uso do ciclo de refrigeração por absorção de simples estágio: sabe-se que é possível atingir temperaturas acima de 150°C através da energia solar (através de concentradores), e assim atender as exigências do ciclo de duplo estágio com alto rendimento. Porém, a modelagem do sistema com duplo estágio é mais complexa, o que exigiria um tempo de elaboração muito maior, ficando assim fora do escopo deste trabalho. Portanto, o ciclo analisado neste trabalho será o de simples estágio que permite também o uso de painéis solares de montagem mais simples e de menores custos (tudo isso implicaria menores temperaturas de entrada no sistema).

3.2. Painel Solar



Legenda:	
1	Superfície de absorção em cromo negro
2	Rede de tubos
3	Conexão entre tubos
4	Folha de alumínio refletível
5	Vidro solar
6	Isolante de espuma em poliuretano (30mm) e fibra de vidro
7	Caixa de aço galvanizado
8	Selado com junta adaptável a dilatações
9	Superfície absorvedora

Figura 3. Coletor solar de placa plana e seus componentes (Fonte: MARLA)

3.3. Termo-acumulação

Em um sistema de climatização, a capacidade deve ser baseada no horário de maior carga térmica do ambiente, o que conseqüentemente faz com que os equipamentos fiquem superdimensionados e ociosos na maior parte do tempo. Sendo assim, faz-se o uso da termo-acumulação: um tanque de armazenamento de água isolado termicamente é utilizado para conservar a temperatura desejada deste fluido para a posterior transferência de calor ao sistema.

3.4. Ciclo Economizador

O ciclo economizador é uma técnica que tem por base a utilização do ar exterior para efetuar o arrefecimento do ambiente, diminuindo (ou até eliminando) a utilização do ciclo de ar condicionado. Neste caso, a única energia suplementar para movimentar esta técnica é aquela necessária para fazer movimentar o ar e/ou “água gelada”. Pode-se utilizar este sistema de modo a complementar a energia necessária para retirar a carga térmica do ambiente considerado, de modo a diminuir a potência necessária no evaporador do ciclo de refrigeração em questão. Preferencialmente, esta técnica deve ser utilizada em cidades com médias de temperatura mais baixas, de modo a favorecer a retirada do calor do ambiente, ou de modo que o sistema possa trabalhar nas horas em que a temperatura é menor que aquela estipulada para o ar interior.

Sendo assim, estudou-se o potencial desta técnica nas cidades de Recife, PE (Brasil), São Paulo, SP (Brasil) e Turim, TO (Itália). A partir dos dados climáticos disponibilizados pelos centros meteorológicos de cada cidade, é possível calcular as temperaturas e radiação solar em cada hora do dia (ao longo do ano), de modo a obter cada parcela

de energia do sistema como um todo. A modalidade de ciclo economizador estudada neste trabalho será o sistema a ar, no qual o ar externo é diretamente inserido no ambiente (chamado ciclo economizador simples).

3.5. Ambiente Interno

O ciclo de refrigeração aqui estudado será dimensionado para atender a demanda de climatização de um centro de processamento de dados (CPD, também conhecido como *datacenter*), que é um local onde são concentrados equipamentos (*hardware*) que processam e armazenam informações de uma dada organização. O ambiente deve funcionar com um sistema de climatização acionado durante todo o dia (mantendo a temperatura de bulbo seco do local a 24°C, e umidade relativa de 50%), por gerar uma carga térmica ligada essencialmente à potência térmica dissipada continuamente pelos equipamentos (estes funcionam 24 horas por dia). O perfil da carga térmica para o ambiente em estudo foi fornecido para este trabalho, pois se trata de um CPD já em operação. A Figura 4 apresenta o perfil da carga térmica requisitada ao ciclo de absorção.

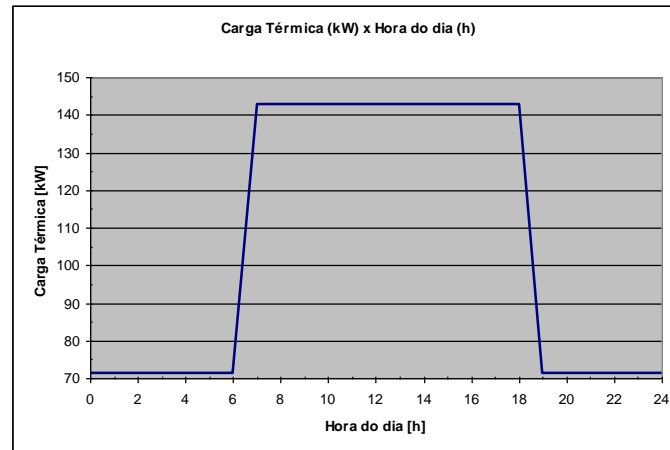


Figura 4. Gráfico da Carga Térmica no CPD ao longo do dia.

4. Modelagem

4.1. Ciclo de Refrigeração por Absorção

A modelagem do ciclo de refrigeração foi feita por meio do equacionamento de cada componente do sistema. A princípio, foram feitos os balanços de massa e os balanços de energia para os equipamentos mais importantes do ciclo, e as equações obtidas foram introduzidas no ambiente do *software* EES. O esquema do ciclo modelado no *software* pode ser visto na Figura 5, na qual as temperaturas estão dadas em [°C], as pressões em [kPa], e as concentrações de LiBr/H₂O em porcentagem mássica.

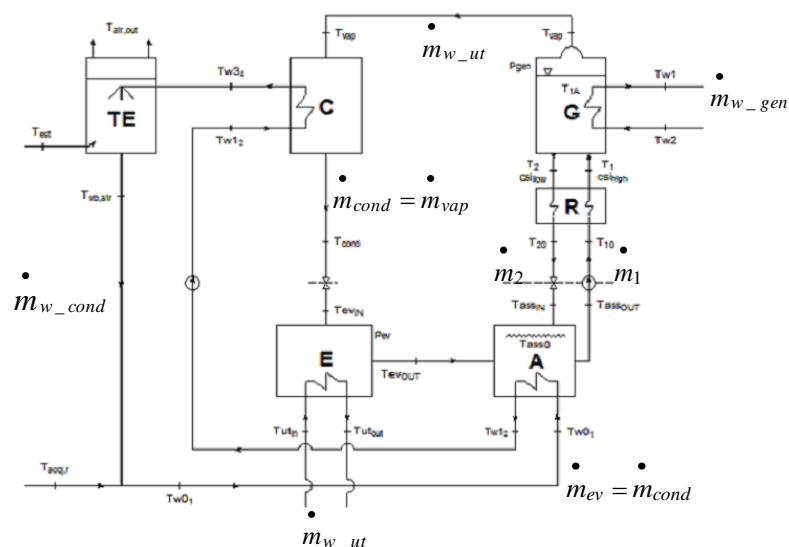


Figura 5. Esquema do ciclo de refrigeração por absorção, modelado através do *software* EES.

4.2. Painel Solar

A Equação (2) fornece a potência “ \dot{Q}_{solar} ” que um painel solar consegue converter, partindo dos dados de radiação solar total “ G_{total} ” (soma da radiação direta e difusa em uma dada região), e dos parâmetros do painel (área do coletor “ A_{col} ”, e eficiência instantânea do mesmo “ η ”):

$$\dot{Q}_{solar} = A_{col} \cdot \eta \cdot G_{total} \quad (2)$$

Para a Equação (2), a eficiência instantânea do coletor solar é dada por (Equação 3):

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot T^* - a_2 \cdot G_{total} \quad (3) \text{ (Fonte: COMISSÃO EUROPÉIA)}$$

- “ η_0 ”: eficiência do coletor quando as perdas com relação à temperatura são nulas;
- “ a_1 ” e “ a_2 ” $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$: coeficientes de perda térmica de primeira e segunda ordens;
- $T^* = \frac{T_m - T_{amb}}{G_{total}} \left[\frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$: diferença entre a temperatura média do fluido $\left(T_m = \frac{T_{solarIN} + T_{solarOUT}}{2} \right)$ e do ambiente “ T_{amb} ”, dividida pela radiação solar total “ G_{total} ”.

4.3. Arranjo das Fontes Quentes do Sistema

As fontes quentes utilizadas pelo sistema são o painel solar de placas planas (já descrito no item 4.2) e um aquecedor solar. Sendo assim, foi feita uma comparação entre duas formas de se dispor as fontes quentes de energia do sistema (como mostra a Figura 6): os “*layouts*” obtidos possuem uma analogia elétrica, de modo que as fontes podem ser dispostas em paralelo (no qual as válvulas de controle regulam a vazão de água que passa por cada trecho do arranjo, de modo a adequar a quantidade intermitente de potência fornecida pelo painel solar) ou em série (o painel solar realizará um pré-aquecimento da água, que depois passará pelo aquecedor a gás para ser completamente aquecida).

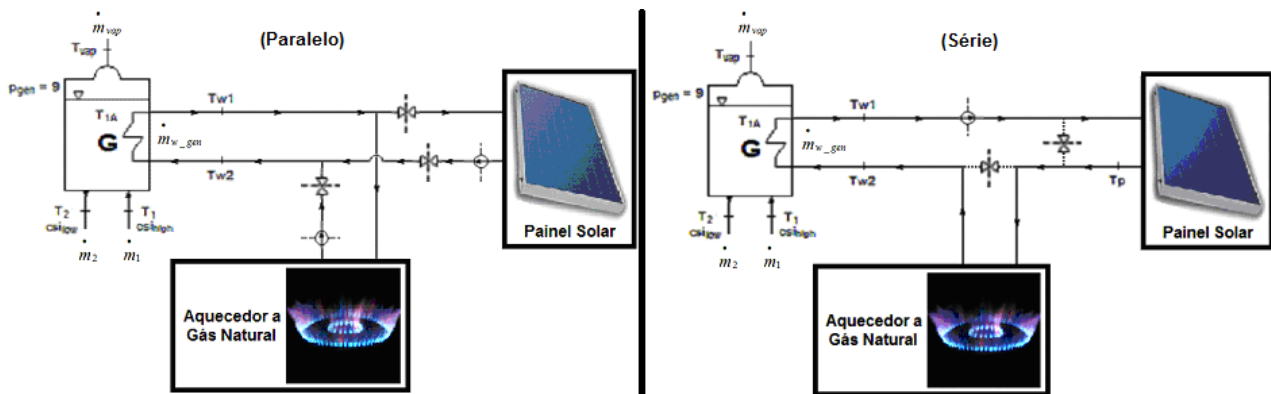


Figura 6. Arranjos em Paralelo (à esquerda) e em Série (à direita).

5. Resultados

Foram feitos os cálculos das potências e eficiências do sistema como um todo, de modo que pudesse ser analisado se haveria uma economia de energia (e de quanto seria esta) nos seguintes cenários:

- Presença ou ausência de termo-acumulação;
- Arranjo em paralelo e em série das fontes quentes do sistema;
- Utilização do ciclo economizador.

Tabela 1. Comparativo da participação energética solar em cada cidade estudada, nos casos de ausência e presença do acumulador de energia (posicionado apenas no evaporador do ciclo).

Ausência / Presença de Acumulador	Demanda no Gerador Q [kW]	Recife, PE (Brasil)*		São Paulo, SP (Brasil)		Turim, TO (Itália)	
		Q [kW]	Participação [%]	Q [kW]	Participação [%]	Q [kW]	Participação [%]
Média Anual na Ausência de Acumulador	153,9	57,5	37,4	41,8	27,2	28,2	18,3
Média Anual na Presença de Acumulador	153,5	57,2	37,2	42,5	27,7	29,4	19,2
Diferença favorável à presença do acumulador	-0,3%	-0,6%	-0,4%	1,7%	1,9%	4,3%	4,6%

* Não está sendo considerada uma possível acumulação de energia do painel solar (o resultado foi um excedente na oferta da energia solar, que não é aproveitada pela tubulação de água que aquece o gerador para a cidade de Recife, PE, Brasil).

A inclusão de um acumulador de “água gelada” no evaporador do ciclo pode resultar em um ganho de até 4,3% (na cidade de Turim, TO, Itália) na potência transferida pelo painel solar, em relação ao ciclo que não utiliza um acumulador no evaporador, e até 4,6% de diferença (também na cidade de Turim, TO, Itália) para a participação da energia solar como fonte do ciclo de refrigeração em consideração. O caso de um acumulador de energia no painel solar também poderia amenizar a perda do excedente no caso da cidade de Recife, PE (Brasil).

Tabela 2. Comparativo da participação energética solar em cada cidade estudada, nos casos de arranjo em paralelo e em série das fontes de calor do sistema.

Arranjo	Demanda no Gerador Q [kW]	Recife, PE (Brasil)		São Paulo, SP (Brasil)		Turim, TO (Itália)	
		Q [kW]	Participação [%]	Q [kW]	Participação [%]	Q [kW]	Participação [%]
Em paralelo	153,9	57,5	37,4	41,8	27,2	28,2	18,3
Em série	153,9	59,7	38,8	45,2	29,4	37,7	24,5
Diferença favorável ao arranjo em série	-	3,8%		8,1%		33,8%	

Foi possível um melhor aproveitamento da energia, principalmente devido ao fato que, com o cálculo iterativo no arranjo em série, a potência que a tubulação de água era capaz de transferir no painel solar era sempre maximizada: chegou-se a aumentos de até 33,8% (para a cidade de Turim, TO, Itália) utilizando o arranjo em série, e em todas as cidades, são ganhos maiores que no caso da utilização da termo-acumulação.

Portanto, pode-se mostrar para o arranjo com o melhor desempenho (“*layout*” em série sem termo-acumulação) os gráficos da potência fornecida pelo painel solar e pelo aquecedor a gás natural, de modo a corresponder com a potência necessária para alimentar o gerador do ciclo de refrigeração por absorção. Como a demanda de energia no CPD varia ao longo do dia, o cálculo de potência que o aquecedor a gás natural deve fornecer é dado pela diferença entre a demanda de potência no gerador e a potência fornecida pelo painel solar. Calculando esta diferença para o mês de novembro, responsável pela maior média de potência fornecida para as duas cidades brasileiras estudadas (para os demais meses do ano, o cálculo é análogo), foi obtido o gráfico que mostra a participação do coletor solar no fornecimento de calor à água que aquece o gerador do ciclo ao longo do dia, para as cidades de Recife, PE, Brasil (mostrado na Figura 7) e São Paulo, SP, Brasil (Figura 8).

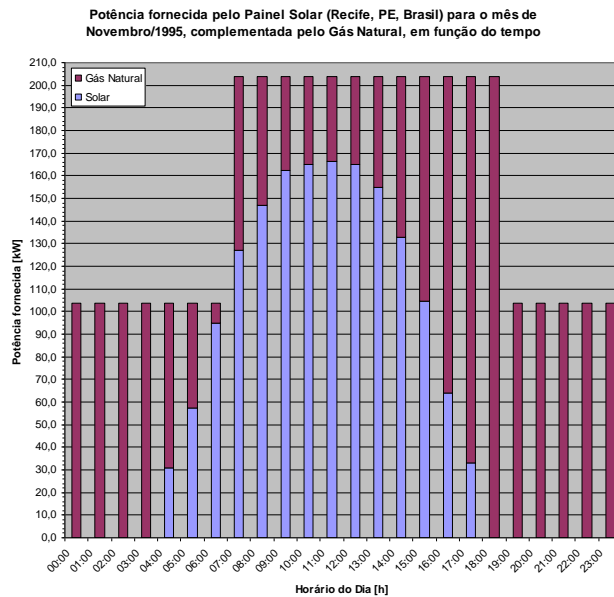


Figura 7. Demanda total de potência no gerador, com as respectivas potências fornecidas pelo painel solar e aquecedor a gás natural (arranjo em série) no mês de Novembro para a cidade de Recife, PE (Brasil).

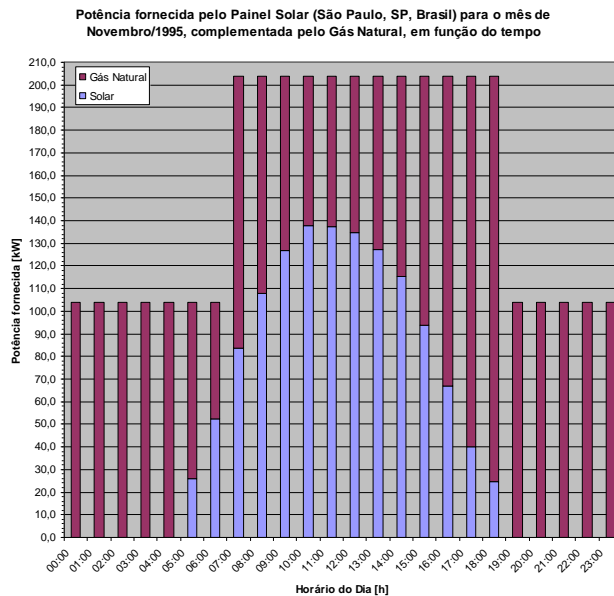


Figura 8. Demanda total de potência no gerador, com as respectivas potências fornecidas pelo painel solar e aquecedor a gás natural (arranjo em série) no mês de Novembro para a cidade de São Paulo, SP (Brasil).

Para a análise do ciclo economizador, foram calculadas as entalpias do ar externo em cada cidade. Percebe-se que nas cidades de Recife, PE e São Paulo, SP (Brasil), o ar externo sempre possuirá uma entalpia maior que o ar de insuflação, para qualquer média mensal. Sabe-se que, em alguns dias do ano, as condições do ar externo nestas duas cidades poderiam favorecer o uso do ar exterior como forma de retirar o calor do ambiente interno. Entretanto, o ganho obtido utilizando a técnica do ciclo economizador somente nesses poucos dias foi considerado irrisório em ambas as cidades brasileiras.

Já para a cidade de Turim, TO (Itália), é viável utilizar a técnica do ciclo economizador para retirar a carga térmica do interior do CPD em alguns meses do ano. Portanto, fazendo uma análise mais detalhada do ciclo economizador apenas para a cidade italiana, pode-se mostrar que é viável utilizar esta técnica no período de outubro a abril (sete meses ao ano), de modo que o ciclo de refrigeração não precisa ser utilizado neste período. Como o ciclo economizador não é viável no período entre maio e setembro, faz-se o uso do ciclo de refrigeração por absorção com arranjo das fontes de calor em série somente neste período: sendo assim, a participação média da energia solar durante o ano, é vista na Tabela 3.

Tabela 3. Participação da Energia Solar para a cidade de Turim, TO (Itália), no período de maio a setembro.

Tempo [mês]	Demanda no Gerador	Potência fornecida pelo painel solar	
	Q [kW]	Q [kW]	Participação [%]
Maio	153,9	53,6	34,8
Junho	153,9	65,8	42,7
Julho	153,9	67,8	44,0
Agosto	153,9	64,8	42,1
Setembro	153,9	45,5	29,5
Média no Período	153,9	59,5	38,7

6. Conclusões

O estudo realizado até aqui teve como principal meta mostrar a possibilidade de utilização racional dos recursos energéticos disponíveis à humanidade. Com este trabalho, foi possível demonstrar a viabilidade econômica do projeto de um ciclo de refrigeração por absorção de LiBr/H₂O utilizando como fonte a energia solar. Mostrou-se que o sistema, através do uso dos painéis solares, pode representar uma economia de até 38,8% na queima de gás natural (painel solar com arranjo em série, instalado na cidade de Recife, PE, Brasil, conforme o resultado da Tabela 7.5.1), o que pode ser considerada uma excelente marca para uma tecnologia pouco explorada no mundo, considerando que a utilização dos ciclos de refrigeração ainda é baseada majoritariamente no uso de energia elétrica (proveniente de fontes essencialmente não-renováveis).

Certamente, a aplicação dos painéis solares pode ser estendida a uma série de segmentos, desde o aquecimento de água para utilização no ciclo de refrigeração por absorção até a obtenção de energia elétrica através dos painéis fotovoltaicos. Isso mostra a versatilidade da energia solar, que possui um imenso potencial a ser explorado. Além disso, a técnica do ciclo economizador permite utilizar o ar externo para remover a carga térmica do ambiente, contribuindo para a economia das formas de energia não-renováveis: pode-se concluir que o sistema de ciclo economizador atribuído ao ciclo de refrigeração por absorção (utilizando o painel solar em um arranjo em série com o aquecedor a gás) permitiu uma economia de até 74,4% no consumo de gás natural para o sistema de ar condicionado na cidade de Turim, TO (Itália).

O ciclo economizador já é largamente utilizado nas cidades cujo inverno costuma ser bastante rigoroso (com temperaturas negativas). Entretanto, esta técnica pode também ser aproveitada em cidades com grandes variações de temperatura ao longo do dia. Um exemplo é a cidade de São Paulo, SP (Brasil), que pode não ter invernos tão rigorosos quanto os de Turim, TO (Itália), mas as temperaturas podem chegar aos 10°C durante algumas noites no inverno paulistano (que costuma ter baixa umidade relativa nesta estação), o que poderá favorecer a técnica do ciclo economizador no período da noite, enquanto no dia a radiação solar também fornece energia ao ciclo de refrigeração por absorção.

No que se refere exclusivamente à modelagem do ciclo de refrigeração por absorção descrita neste trabalho, o que se conclui é que os resultados obtidos foram os esperados: o ciclo foi modelado e simulado de modo a obter resultados de forma clara e objetiva, traduzindo os conceitos estudados nos textos científicos relacionados à solução de brometo de lítio em água (LiBr/H₂O), e aplicando as leis da Termodinâmica para cada ponto em questão do ciclo. Algo que poderá fazer parte de uma continuação deste trabalho seria a modelagem dos compartimentos de armazenamento de “água quente” e/ou “água gelada”: esta modelagem já depende de um *software* que seja capaz de simular condições transitórias em cada compartimento.

Outra análise a ser feita poderia ser a avaliação e modificação de outros parâmetros da modelagem do ciclo a partir do *software* EES: foi focada apenas a modificação da temperatura da água na entrada da tubulação que aquece o gerador. Muitos outros parâmetros, tais como a vazão da mistura que sai do absorvedor, a vazão de água na tubulação que passa pelo evaporador e resfria o ambiente, e a temperatura de entrada da água na torre de resfriamento poderiam também ser ajustados, de modo a melhorar a eficiência global do ciclo. Apesar deste trabalho ter como foco a modelagem e simulação de um ciclo que tinha parâmetros pré-determinados (os coeficientes dos trocadores de calor, por exemplo, já foram dados de projeto), o estudo da modificação destes parâmetros poderá ser mais bem abordada em um futuro projeto. De modo geral, o primeiro passo na modelagem e simulação de uma nova tecnologia está descrito neste trabalho, e muitas outras etapas poderão ser feitas de modo a detalhar as soluções obtidas aqui, sempre com um objetivo em questão: obter soluções ecologicamente sustentáveis e viáveis para o planeta Terra.

7. Agradecimentos

Em primeiro lugar, aos meus pais, por todo o apoio e estímulo desde o meu primeiro dia de vida, e aos meus irmãos, por poder contar com eles nos momentos felizes e tristes. Aos amigos que puderam participar da minha fase na graduação. À minha namorada Carolina, por ter acompanhado de perto o processo de conclusão do curso, sempre me apoiando e acreditando no meu potencial. Ao professor Vittorio Verda, pela orientação inicial deste projeto durante o período que passei na Itália, e ao professor Alberto Hernandez Neto, pela orientação final no Brasil: duas pessoas nas quais percebi o enorme interesse em transmitir o conhecimento que possuem, e que com muita paciência e competência contribuíram diretamente na elaboração deste trabalho.

8. Referências

- ABNT, “ABNT NBR 16401: Dados Climáticos de Projeto”. Brasil, 2008.
- ASHRAE, “2006 ASHRAE Handbook”, Abril 2002, New York (EUA).
- Bermejo, P.; Pino, F. J.; Rosa, F., “Solar absorption cooling plant in Seville”. ScienceDirect, Solar Energy 84, Junho 2010: 1503–1512.
- Comissão Europeia, “Annex IV on Eco-design implementing measures for dedicated water heaters”. Bruxelas (Bélgica), 2008.
- Duffie, J. A.; Beckman, W. A., “Solar Engineering of Thermal Processes”, Wiley-Interscience Publication, New York (EUA), 1991.
- Incropera, F. P.; DeWitt, D. P., “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”, 5ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 2002.
- Kreider, J. F.; Kreith, F., “Solar Heating and Cooling”, McGraw Hill, Washington (EUA), 1982.
- Mariani, A. L. C.; Bolliger, R. JR., “Sistemas de Tratamento de Ar”. São Paulo, 2010.
- McNeely LA, “Thermodynamic properties of aqueous solutions of lithium bromide”. ASHRAE Transactions 1979;85 (Part 1): 413–34.
- Pousa, A. C., “Análise Termo-Exergoeconômica e Financeira de um Sistema de Cogeração, Eletricidade e Água Gelada, Aplicado a um Centro Comercial”. 2009. 150p. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- Provincia di Torino, “UNI 10346: Caratteristiche Climatiche”. Turim (Itália), 2009.
- Provincia di Torino, “UNI 10349: Radiazione Solare”. Turim (Itália), 2009.
- Van Wylen, J. G.; Borgnakke, C.; Sonntag, R. E., “Fundamentos da Termodinâmica”, tradução da 5ª ed. americana, Edgard Blücher, São Paulo, 2003.
- <<http://www.aalborg-industries.com.br>>. Acesso em 08 Outubro 2010.
- <<http://www.comgas.com.br>>. Acesso em: 28 agosto 2010.
- <http://www.discoverybrasil.com/guia_tecnologia/marcos_tecnologia/motor_vapor/index.shtml>. Acesso em: 15 maio 2010.
- <<http://www.e-escola.pt>>. Acesso em: 20 agosto 2010.
- <<http://www.eurometeo.com>>. Acesso em 20 Maio 2010.
- <http://www.gasnet.com.br/novo_gasnatural/combust_completo.asp>. Acesso em 08 Outubro 2010.
- <<http://www.marla.pt>>. Acesso em: 26 agosto 2010.
- <<http://www.mspc.eng.br/tecdiv/tecDat110.shtml>>. Acesso em 08 Outubro 2010.
- <http://www.provincia.torino.it/ambiente/file-storage/download/energia/pdf/quarto_rapporto/clima_1.pdf>. Acesso em 24 Setembro 2010.
- <<http://www.refrigerator-troubleshooting.com>>. Acesso em: 21 junho 2010.

9. Direitos autorais

O autor é o único responsável pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

SOLAR AIR CONDITIONING: MODELING AND SIMULATION

Antonio Luiz Zambelli Loyola Gonzaga Mendonça

antoniolmendonca@yahoo.com.br

Abstract

Nowadays, humans live in a world driven by non-renewable sources of energy: those are generally inefficient and end up being the main cause of pollution on Earth. The use of renewable energy for productive activities is still very limited: the cost of technology is also very high and hardly accessible.

The research on a clean and renewable source of energy has been increasingly important to find cheaper solutions and less environmental impact. Thus, the focus of this work is the application of solar energy (primary source of clean and renewable energy, also essential to life on the planet) for air conditioning systems (which generally consumes a good portion of the electricity bill in homes, offices, shopping centers, warehouses and/or computer rooms, hospitals, hotels, etc.).

The analysis proposed here was done by modeling and simulation of an absorption refrigeration cycle using lithium bromide solution in water (LiBr/H₂O): the system was analyzed with the help of the software EES (Engineering Equation Solver). For this model, it was assumed as a heat source the sun radiation over a flat-plate solar panel, and evaluated the behavior of the whole system when the input variables in it are modified. The application for this cycle proposed here is a datacenter, and evaluated the possibility of locating it in the cities of Recife, PE (Brazil), São Paulo, SP (Brazil) and Turin, TO (Italy).

Keywords: refrigeration, absorption, solar energy.