

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA
DA USP**

ARTUR PAVANELLI VALSI

**Estudo para aplicação de energia solar como fonte de calor de um sistema de
climatização por ciclo de absorção de brometo de lítio na região de Recife/PE**

SÃO PAULO

2015

ARTUR PAVANELLI VALSI

Estudo para aplicação de energia solar como fonte de calor de um sistema de climatização por ciclo de absorção de brometo de lítio na região de Recife/PE

Trabalho de conclusão do curso de especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de concentração: Energia Solar.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio R. de Freitas Pacheco

SÃO PAULO

2015

Catálogo-na-publicação

Valsi, Artur Pavanelli

Estudo para aplicacao de energia solar como fonte de calor de um sistema de climatizacao por ciclo de absorcao de brometo de litio na regio de Recife/PE. / A. P. Valsi. - Sao Paulo, 2015.
72p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Energia Solar. 2.Universidade de São Paulo. 3.Escola Politécnica. 4.Programa de Eduação Continuada em Engenharia. 5.Cláudio Pacheco I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio sempre presente.

Aos amigos Marcus, Andrey e Edson, pela ajuda firme na elaboração deste trabalho.

Ao professor Pacheco, pela orientação clara e dedicada.

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de analisar a possibilidade de aplicação de energia solar em um sistema de climatização. Os sistemas de refrigeração por absorção com os pares brometo de lítio-água conseguem prover climatização utilizando como acionamento principal uma fonte de calor de baixa temperatura. Esta fonte de calor pode ser facilmente obtida através de coletores solares. O estudo fornece dados de uma simulação de aplicação na região de Recife – PE.

Este estudo tem também o objetivo de destacar a grande aplicabilidade da energia solar na indústria, onde praticamente 60% da energia térmica utilizada se concentra em processos de média e baixa temperatura e, portanto, podem ter a fonte de energia solar incorporada, reduzindo muitos seus gastos com energia e emissão de poluentes.

ABSTRACT

This paper aims to examine the possibility of solar energy application in an HVAC system. Absorption cooling systems using lithium bromide and water can provide air conditioning by using low temperature heat as the main drive source, which can be easily obtained through solar collectors. The study provides data for a simulated application in the region of Recife - PE.

This study also proposes to highlight the wide applicability of solar systems in the industry, where almost 60% of the thermal energy used is concentrated in processes at medium and low temperature ranges, and therefore can have incorporated solar energy, reducing much of its energy costs and pollutant emissions.

ÍNDICE

1.	OBJETO DE ESTUDO E JUSTIFICATIVA.....	9
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1.	TECNOLOGIA DE SISTEMAS SOLARES - COLETORES SOLARES	10
2.1.1.	COLETORES ESTACIONÁRIOS	10
2.1.1.1.	COLETORES PLANOS (<i>Flat Plate Collector – FPC</i>).....	11
2.1.1.2	COLETORES PARABÓLICOS COMPOSTOS (<i>Compound Parabolic Collector – CPC</i>)... 12	
2.1.1.3	COLETORES DE TUBOS EVACUADOS (<i>Evacuated Tube Collector – ETC</i>)	13
2.1.2.	COLETORES COM RASTREAMENTO SOLAR	15
2.1.2.1	REFLETOR LINEAR DE FRESNEL (<i>Linear Fresnel Reflector - LFR</i>).....	17
2.1.2.2	COLETOR DE CALHA PARABÓLICA (<i>Parabolic Trough Collector - PTC</i>).....	19
2.1.2.3	REFLETOR DE DISCO PARABÓLICO (<i>Parabolic Dish Reflector - PDR</i>).....	21
2.1.2.4	CAMPO DE HELIOSTATOS COM RECEPTOR CENTRAL	23
2.2.	FLUIDOS DE TRABALHO PARA SISTEMAS SOLARES	24
2.2.3.	AR	24
2.2.4.	ÁGUA	24
2.2.5.	FLUIDO TÉRMICO	25
2.2.6.	SAL FUNDIDO	25
2.3.	SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO	26
2.3.1	O CICLO DE ABSORÇÃO COM PAR BROMETO DE LÍTIO - ÁGUA	27
2.3.2	SISTEMA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA - AMÔNIA ($H_2O - NH_3$).....	39
3.	DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO	42
3.1.	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE GERAÇÃO SOLAR	42
3.2.	POTENCIAL SOLAR	43
3.3.	SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO POR ABSORÇÃO ACIONADO POR ÁGUA QUENTE	49
3.4.	SELEÇÃO E DESEMPENHO DOS COLETORES SOLARES	52
3.5.	ÁREA DE CAPTAÇÃO SOLAR REQUERIDA	59
4.	COMPARATIVO DE TECNOLOGIAS E CUSTOS.....	63
5.	CONCLUSÕES.....	69
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fábrica de POY-PET no Complexo Petroquímico da RNEST	9
Figura 2: Coletor Plano Típico.....	11
Figura 3: Esquemático do Coletor Parabólico Composto.....	13
Figura 4: Coletores Parabólicos Compostos	13
Figura 5: Esquemático de Montagem de Coletor Solar de Tubo Evacuado.....	14
Figura 6: Variantes de Coletores de Tubo Evacuado.....	15
Figura 7: Coletor de Tubo Evacuado com Refletor Parabólico Composto	15
Figura 8: Relação entre a taxa de concentração e a temperatura no receptor	17
Figura 9: Esquemático de funcionamento de um coletor Fresnel	18
Figura 10: Reflexão de raios solares nos espelhos primários e secundários em um coletor Fresnel	18
Figura 11: Coletor tipo Refletor Linear de Fresnel Compacto - CLFC.....	19
Figura 12: Coletor de Calha Parabólica	19
Figura 13: Coletor de Calha Parabólica instalado no Cairo, Egito, 1914	20
Figura 14: Refletores de Disco Parabólico	22
Figura 15: Sistema de Concentrador com Receptor Central.....	23
Figura 16: : Ponto de ebulição de solução aquosa de etileno glicol em diferentes pressões.....	24
Figura 17: Transformação de vapor de baixa pressão em alta pressão em um sistema de refrigeração	26
Figura 18: Processo de separação do refrigerante	27
Figura 19: : Processo de absorção do refrigerante	27
Figura 20: Pressão de equilíbrio de vapor d'água entre vasos de água e solução	28
Figura 21: Diagrama temperatura-pressão-concentração de soluções saturadas de BrLi-água	29
Figura 22: Esquemático do modelo integrado – Sistema de Absorção BrLi de Simples Efeito.....	29
Figura 23: Esquemático de funcionamento do Chiller de Simples Efeito	30
Figura 24: Esquemáticos de funcionamento do Chiller de Simples Efeito	32
Figura 25: Redução da capacidade de refrigeração pelo aumento da temperatura de condensação e redução da concentração de BrLi	34
Figura 26: Determinação do COP máximo de um sistema de refrigeração por Absorção	35
Figura 27: Fluxograma básico de um Sistema de Absorção de Brometo de Lítio-Água (BrLi) de Duplo Efeito	38
Figura 28: : Arranjo típico de uma Unidade de Absorção de Duplo Efeito	39
Figura 29: Fluxograma básico de um sistema de Absorção de Água-Amônia (H ₂ O-NH ₃) de um estágio	40
Figura 30: Curva de Irradiação Horária no Plano Inclinado hora a hora	48

Figura 31: Esquemático de Funcionamento do Sistema de Climatização Solar	51
Figura 32: Curva de dos coletores com base na irradiação média mensal - Dezembro	53
Figura 33: Desempenho dos coletores com base na irradiação média mensal - Junho	54
Figura 34 Variação de Temperatura ao longo do dia	55
Figura 35: Rendimento do coletor solar ao longo do dia, por faixa de temperatura	56
Figura 36: Rendimento do coletor solar ao longo do dia, por faixa de temperatura	57
Figura 37:Gráfico de Fluxo de Caixa Descontado.....	67
Figura 38: Gráfico de Fluxo de Caixa Acumulado	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipos de Coletores Solares	10
Tabela 2: Pares mais conhecidos utilizados em sistemas de Absorção	26
Tabela 3: Tabela comparativa dos sistemas usuais de Refrigeração por Absorção.....	41
Tabela 4: Dados Climatológicos de Recife.....	42
Tabela 5: Irradiação Solar no Plano Inclinado.....	43
Tabela 6: Irradiação Solar no Plano Inclinado.....	44
Tabela 7: Posicionamento da incidência da radiação solar em 10 de Dezembro	45
Tabela 8: Posicionamento da incidência da radiação solar em 11 de Junho.....	45
Tabela 9: Irradiação Horária.....	46
Tabela 10: Dados de posicionamento solar no dia médio de Dezembro e Junho.....	46
Tabela 11: Irradiação Horária no Plano Inclinado para Dezembro.....	47
Tabela 12: Irradiação Horária no Plano Inclinado para Junho	47
Tabela 13: Irradiação Horária no Plano Inclinado hora a hora ($\beta = 8^\circ$).....	48
Tabela 14:: Dados de Operação do Chiller de Absorção de Simples Efeito	49
Tabela 15: Dados de Operação do Chiller de Absorção de Simples Efeito	50
Tabela 16: Coletores Solares Inmetro 2015.....	52
Tabela 17: Rendimento dos coletores planos por irradiação média mensal, por faixa de temperatura	53
Tabela 18: Rendimento dos coletores planos por irradiação média mensal, por faixa de temperatura	54
Tabela 19: Rendimento horário do coletor solar, por faixa de temperatura, em Dezembro, $\beta=8^\circ$	55
Tabela 20: Energia útil total e horária em Dezembro, $\beta=8^\circ$	56
Tabela 21: Rendimento horário do coletor solar, por faixa de temperatura, em Junho, $\beta=8^\circ$	57
Tabela 22: Energia útil total e horária em Junho, $\beta=8^\circ$	58
Tabela 23: Irradiação solar diária média mensal.....	59
Tabela 24: Rendimento horário do coletor solar, por faixa de temperatura, em Dezembro, $\beta=26^\circ$	60
Tabela 25: Energia útil total e horária em Dezembro, $\beta=26^\circ$	60
Tabela 26: Rendimento horário do coletor solar, por faixa de temperatura, em Junho, $\beta=26^\circ$	61
Tabela 27: Energia útil total e horária em Junho, $\beta=26^\circ$	61
Tabela 28: Dados de Operação do Chiller de Compressão com Acionamento Elétrico	63
Tabela 29: Tarifas de Energia Elétrica	64
Tabela 30: Quadro Comparativo de Custos e Tecnologia entre Chillers de Absorção e Compressão	65
Tabela 31: Fluxo de Caixa Descontado e Acumulado	68

1. OBJETO DE ESTUDO E JUSTIFICATIVA

O local de referência para este estudo é onde está instalada a Planta Industrial de POY-PET (*Partially Oriented Yarn - Polyethylene Terephthalate* / Fio Parcialmente Orientado-Polietileno Tereftálico), que, junto à Refinaria Abreu e Lima, faz parte do complexo petroquímico de Suape no Estado de Pernambuco. O sítio encontra-se no Município de Ipojuca, próximo a Recife.

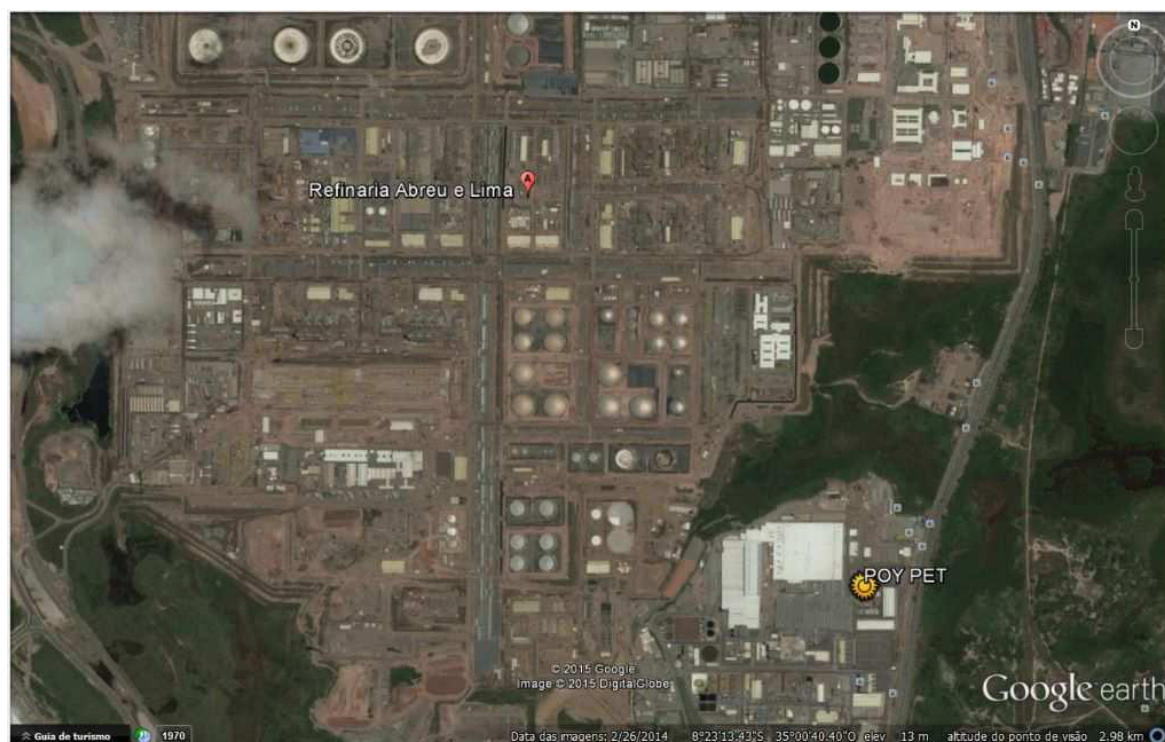


Figura 1: Fábrica de POY-PET no Complexo Petroquímico da RNEST (Google Earth)

Coordenadas do Local:

Latitude: S 8°23'25"

Longitude: W 35°0'44"

Altitude: 14m (nível do mar)

Este local foi escolhido como simulação da instalação de climatização solar por se tratar de uma planta industrial que demanda grande necessidade de climatização, por conta do local de instalação e pelo do processo de fabricação do filamento sintético. O processo de fabricação não é explorado neste trabalho, foi apenas definida a carga térmica de climatização necessária para a determinação da relação de Potencial Solar Vs. Carga de Climatização.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. TECNOLOGIA DE SISTEMAS SOLARES - COLETORES SOLARES

Coletores Solares são tipos de trocadores de calor que transformam a energia da radiação solar em calor e é o componente principal de qualquer sistema de aquecimento solar. Este dispositivo absorve a energia incidente da radiação solar e a converte em calor, transferindo-o para um fluido de trabalho (normalmente água, ar e óleo) que circula através do coletor. (KALOGIROU, 2009)

Há basicamente dois tipos de coletores solares – os não-concentradores e os concentradores. Os coletores não-concentradores possuem a mesma área de captação de energia e de absorção de calor. Os coletores concentradores possuem uma geometria onde a área de captação transfere o fluxo de energia incidente para uma área de absorção reduzida, concentrando o fluxo de energia. Os coletores concentradores são utilizados em aplicações que requerem maiores temperaturas.

KALOGIROU (2009), distingue os coletores solares por seu nível de movimento, podendo ser estacionários, com rastreamento em um único eixo e com rastreamento em dois eixos. Em cada grupo há a classificação pelo princípio de funcionamento e de faixas de temperatura, conforme a tabela abaixo:

Tabela 1: Tipos de Coletores Solares

(S.A. Kalogirou / *Progress in Energy and Combustion Science* 30 (2004) 231–295)

Grau de Movimento	Tipo de Coletor	Tipo de Absorvedor	Taxa de Concentração	Faixa de Temperatura (°C)
Estacionário	Coletor Plano (<i>FPC</i>)	Plano	1	30 - 80
	Coletor de Tubo Evacuado (<i>ETC</i>)	Plano	1	50 - 200
	Coletor Parabólico Composto (<i>CPC</i>)	Tubular	1 - 5	60 - 240
Rastreamento em 1 Eixo	Coletor Parabólico Composto (<i>CPC</i>)	Tubular	5 - 15	60 - 300
	Refletor Linear de Fresnel (<i>LFR</i>)	Tubular	10 - 40	60 - 250
	Coletor de Calha Cilíndrica (<i>CTC</i>)	Tubular	15 - 50	60 - 300
	Coletor de Calha Parabólica (<i>PTC</i>)	Tubular	10 - 85	60 - 400
Rastreamento em 2 Eixos	Refletor de Disco Parabólico (<i>PDR</i>)	Pontual	600 - 2000	100 - 1500
	Helioestado com Receptor Central (<i>HFC</i>)	Pontual	300 - 1500	150 - 2000

2.1.1. COLETORES ESTACIONÁRIOS

Os coletores estacionários ficam fixos em uma determinada posição e não possuem qualquer dispositivo para rastrear o sol.

Dentro deste grupo estão:

- Coletores Planos (*Flat Plate Collector – FPC*)
- Coletores Parabólicos Compostos (*Compound Parabolic Collector – CPC*)
- Coletores de Tubos Evacuados (*Evacuated Tube Collector – ETC*)

2.1.1.1. COLETORES PLANOS (*Flat Plate Collector – FPC*)

O coletor solar plano é o tipo mais comumente utilizado. Sua área de absorção equivale à área de captação. A construção típica utiliza um quadro metálico, normalmente em alumínio, com uma serpentina de material condutor (alumínio ou cobre) com uma placa absorvedora de calor. A caixa possui uma cobertura em vidro transparente para reduzir as perdas por convecção da serpentina e um isolamento térmico na parte inferior para evitar a trocas de calor do absorvedor com o meio.

As grandes vantagens dos coletores planos são sua simplicidade e baixo custo de produção; eles aproveitam tanto a radiação direta quanto a radiação difusa e operam em lugar fixo, dispensando o uso de rastreadores e posicionadores. Os coletores planos devem ser instalados orientados para o equador, faceando o Sul no hemisfério Norte e faceando o Norte no Hemisfério Sul. (KALOGIROU, 2009).

O ângulo ótimo para a instalação dos coletores plano é o da latitude, podendo variar entre 10 a 15° conforme a aplicação. A inclinação dos painéis pode ser feita de maneira a se ter um aproveitamento similar ao longo do ano ou se ajustando para obter maior aproveitamento nos meses de verão como é o caso quando utilizado em climatização.

O principal objetivo na utilização de coletores planos é que os mesmos tenham durabilidade e não percam o rendimento ao longo tempo, mesmo quando considerado os efeitos danosos da radiação ultravioleta, da corrosão por ambiente ácido ou alcalino, deposição de sujeira, umidade do ambiente, chuva, vento, granizo e a constante variação dimensional por conta de dilatação térmica (KALOGIROU, 2009).

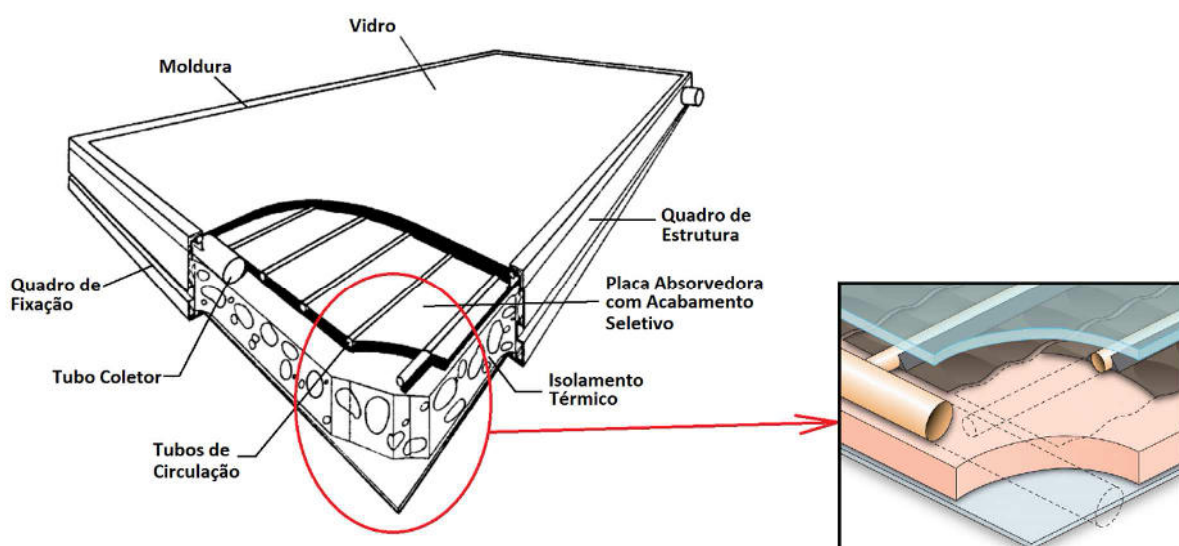


Figura 2: Coletor Plano Típico

(alterada de S.A. Kalogirou / *Progress in Energy and Combustion Science* 30 (2004))

Cobertura

O vidro tem sido o material utilizado como cobertura transparente na maioria dos casos, por conta de sua capacidade de absorver a irradiação solar enquanto retém o calor radiante do absorvedor. Os vidros mais adequados para esta utilização são os com baixo teor de ferro (o vidro convencional possui alto teor de ferro), pois permitem a transmissão de radiação solar de ondas curtas, enquanto retém a radiação de ondas longas da superfície aquecida pelo sol.

Plásticos e acrílicos também já foram experimentados, mas possuem limitação de temperatura, assim como degradam muito mais rapidamente quando expostos à radiação ultravioleta. Sua grande vantagem está no pouco peso, na grande flexibilidade e maior resistência à impactos.

Alguns tratamentos como a aplicação de camada antirreflexo e de textura de superfície, assim como a utilização de dupla camada de vidro separada por vácuo podem aumentar significativamente o desempenho do coletor (KALOGIROU, 2009).

Placa Absorvedora e Serpentina

A função da placa absorvedora é absorver o máximo da irradiação que atravessa o vidro, assim como reter o máximo de calor sem transmiti-lo para a camada inferior do coletor. Juntamente à placa absorvedora, os tubos devem transferir o calor retido para o fluido de trabalho de maneira eficiente. Os fabricantes atuais avançaram na construção de placas que compõem um conjunto único de tubos integrados às aletas, melhorando o coeficiente de troca de calor a um baixo custo.

Para maximizar a captação de energia, a superfície do absorvedor deve possuir um tratamento que proporcione alta absortância de radiação solar (ondas curtas) e baixa emissão de radiação de ondas longas. Esta propriedade se denomina *superfície seletiva*. Há muitas opções de materiais e cores aplicáveis às placas absorvedoras, porém o cromo-negro é o mais utilizado.

2.1.1.2 COLETORES PARABÓLICOS COMPOSTOS (*Compound Parabolic Collector – CPC*)

Os coletores parabólicos compostos são coletores concentradores que tem a propriedade de refletir para o absorvedor toda a irradiação incidente sobre sua área de abertura. O absorvedor longitudinal é instalado no ponto de sobreposição de dois segmentos de parábola. A curva parabólica característica reflete a irradiação recebida em uma ampla faixa de ângulos, dando grande flexibilidade de operação.

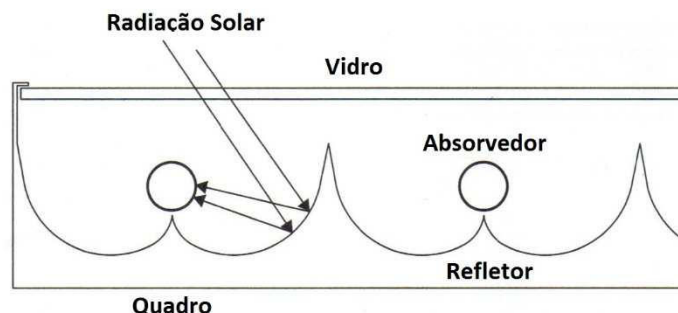


Figura 3: Esquemático do Coletor Parabólico Composto

(Fig. 3.6 - KALOGIROU, Soteris. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*)

Construtivamente é importante que exista uma distância entre o absorvedor e o refletor para que não ocorra dissipação de calor do absorvedor para o refletor. Esse espaçamento, no entanto, deve ser pequeno pois significada redução na área do refletor e conseguinte redução de desempenho.

Os arranjos dos coletores parabólicos compostos podem variar muito, com diferentes formas de refletores, tipos de absorvedores, com orientação longitudinal vertical ou horizontal e diferentes taxas de concentração. Os coletores parabólicos compostos podem ser fornecidos como peça única com um receptor e um absorvedor ou ainda montados agrupados formando um coletor plano.



Figura 4: Coletores Parabólicos Compostos

(<http://andyschroder.com/CPCEvacuatedTube/AdditionalImages/>)

2.1.1.3 COLETORES DE TUBOS EVACUADOS (*Evacuated Tube Collector – ETC*)

KALOGIROU (2009): “Os coletores planos convencionais foram desenvolvidos para uso em locais com clima quente e dias ensolarados. Estes benefícios, no entanto, são reduzidos drasticamente no frio, em dias nublados e com muito vento. Além disso, a umidade do ar e a condensação formada dentro do painel coletor o deterioram e reduzem seu desempenho e vida útil. Os coletores de tubo evacuado trabalham de modo diferente – os tubos de aquecimento anexados às aletas do

absorvedor são montados dentro de um cilindro de vidro de parede dupla selado a vácuo, com o bulbo de aquecimento instalado dentro de um coletor por onde circula o fluido de trabalho”.

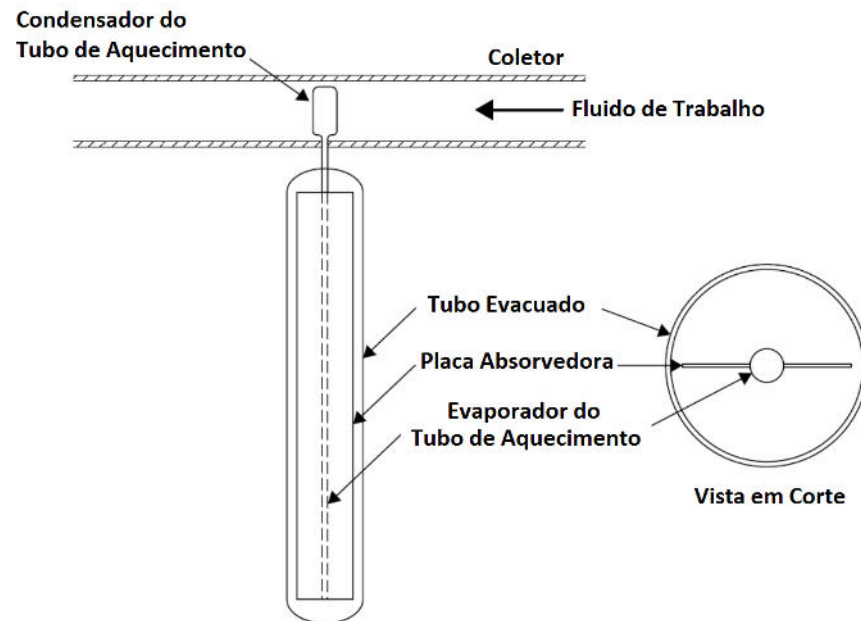


Figura 5: Esquemático de Montagem de Coletor Solar de Tubo Evacuado

(Fig. 3.7 - KALOGIROU, Soteris. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*).

Os coletores de tubo evacuado apresentam melhor desempenho em maiores temperaturas porque o envelope de vácuo minimiza as perdas por condução e convecção. Assim como os coletores planos, eles captam a radiação direta e difusa, no entanto estes apresentam melhor aproveitamento nos períodos com menos ângulo de incidência, prolongando o período de aproveitamento do sol.

O tubo evacuado possui um elemento selado de material condutor (normalmente cobre) anexado à aletas de material com tratamento de superfície seletiva. Estes elementos são preenchidos com um fluido que trabalha na fase líquido e vapor, e que circulam entre o cilindro de vidro a vácuo (evaporador) e o bulbo imerso dentro do fluido de trabalho do sistema (condensador). O calor absorvido na placa faz com que o fluido evapore, seguindo para o bulbo. O fluido de trabalho troca calor com o bulbo condensando o fluido interno, que retorna para a seção da placa, reiniciando o ciclo.

Embora o coletor de tubo evacuado seja basicamente um tubo de aquecimento inserido em um envelope de vidro a vácuo, diversas formas construtivas foram desenvolvidas, com o objetivo de melhorar o desempenho, reduzir os custos e aumentar a durabilidade.

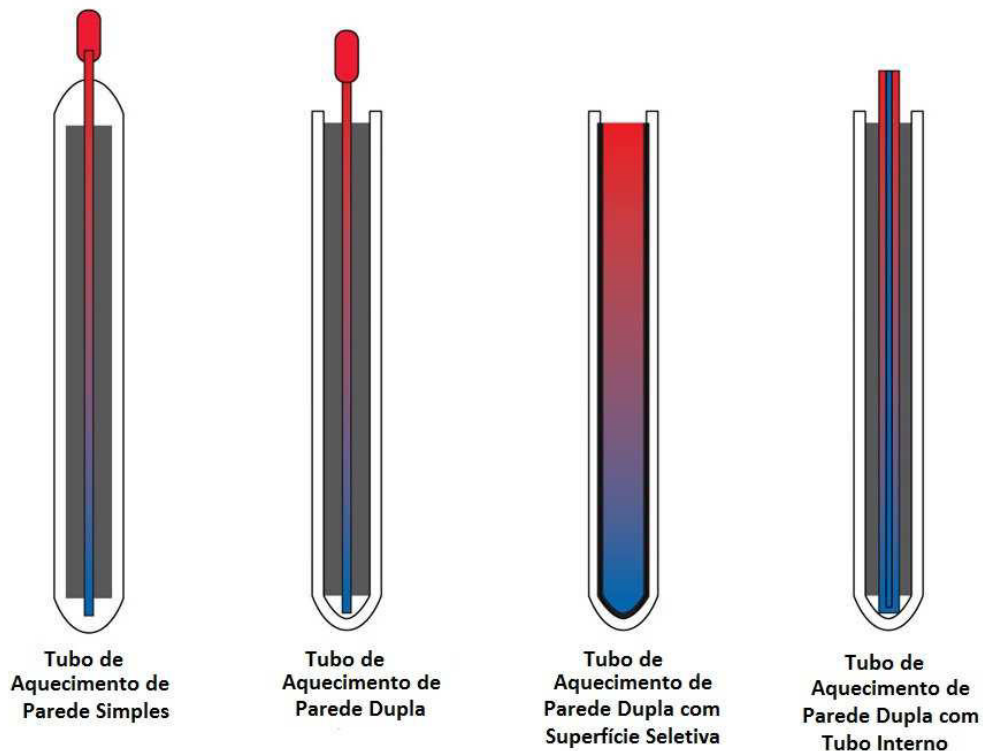


Figura 6: Variantes de Coletores de Tubo Evacuado

(<http://www.homepower.com/articles/solar-water-heating/equipment-products/solar-collectors-behind-glass>).

Os coletores de tubo evacuado também podem ter o desempenho melhorado quando associados à coletores concentradores, como no caso dos coletores parabólicos compostos.

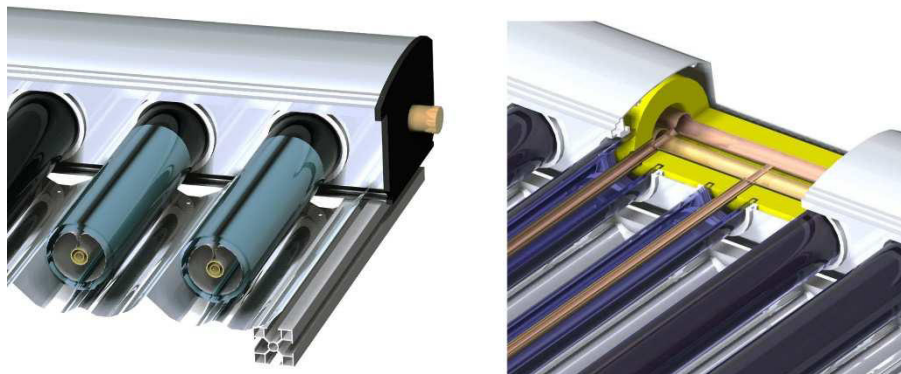


Figura 7: Coletor de Tubo Evacuado com Refletor Parabólico Composto

(*Installation Manual Solar collectors DTH-CPC - Edition 2011 - THERMICS s.r.l.*)

2.1.2. COLETORES COM RASTREAMENTO SOLAR

DUFFIE e BECKMAN (2013): “Para diversas aplicações é desejável que se entregue a energia em temperaturas acima daquelas obtidas nos coletores planos. A temperatura pode ser elevada através da redução das áreas por onde o coletor perde calor. Isto é feito pela interposição de um elemento

óptico entre a fonte de radiação e a superfície de absorção de energia. Quanto menor o absorvedor, menor será a perda de energia quando comparado a um coletor plano em uma mesma determinada temperatura no absorvedor”.

Algumas definições são necessárias quando nos referimos aos coletores concentradores. Coletor é o sistema completo, incluindo o receptor e concentrador. Receptor é o componente do sistema onde a radiação é absorvida e transformada em outra forma de energia; isto inclui o absorvedor, sua capa e isolamento. O concentrador ou sistema ótico é a parte do sistema que direciona a radiação para o receptor. A abertura do concentrador é a área de entrada da radiação solar.

Os coletores concentradores podem variar muito quanto à sua forma construtiva e a forma com que rastreiam o sol. A taxa de concentração (a proporção entre a área do absorvedor e a área de abertura) pode variar desde ligeiramente acima de 1 até uma ordem de 10^4 . Considerando esta grande abrangência, fica difícil estabelecer uma análise geral aplicável a todos eles. Há basicamente dois grupos, os coletores não-formadores de imagem (*nonimaging*) com baixa taxa de concentração, e os coletores lineares formadores de imagem (*imaging*), com taxas de concentração intermediárias. Há ainda um grupo de concentradores tridimensionais que operam nas maiores faixas de concentração. Os coletores formadores de imagem são aqueles que produzem uma imagem clara do sol sobre o absorvedor, enquanto que os não formadores de imagem distribuem a radiação solar ao longo dele.

Conforme a taxa de concentração aumenta, a temperatura também aumenta, assim como aumenta a perda de calor no absorvedor. A figura 8 mostra o limite inferior de operação dos coletores concentradores, onde as perdas se igualam à energia absorvida. Acima desta linha há ganhos e abaixo há mais perdas do que absorção. A faixa hachurada corresponde aos valores de eficiência entre 40 e 60 %, que é a faixa de rendimento mais provável.

Os coletores concentradores apresentam algumas desvantagens quando comparados aos coletores planos. Primeiramente eles absorvem praticamente apenas a radiação direta e muito pouca radiação difusa, necessitando de um sistema de rastreamento e posicionamento. A outra desvantagem significativa é a dependência do sistema ótico, que requer limpeza e manutenção mais frequentes. O sistema de rastreamento de um coletor concentrador pode posicioná-lo de maneira que este receba a radiação solar direta já nas primeiras horas de insolação, sendo que em determinada estação do ano ele será mais eficiente do que um coletor plano, que na mesma época vai absorver apenas a radiação difusa. Em região de céu limpo, pode-se afirmar que um coletor concentrador vai captar mais radiação por área de abertura do que um coletor plano. (KALOGIROU, 2009)

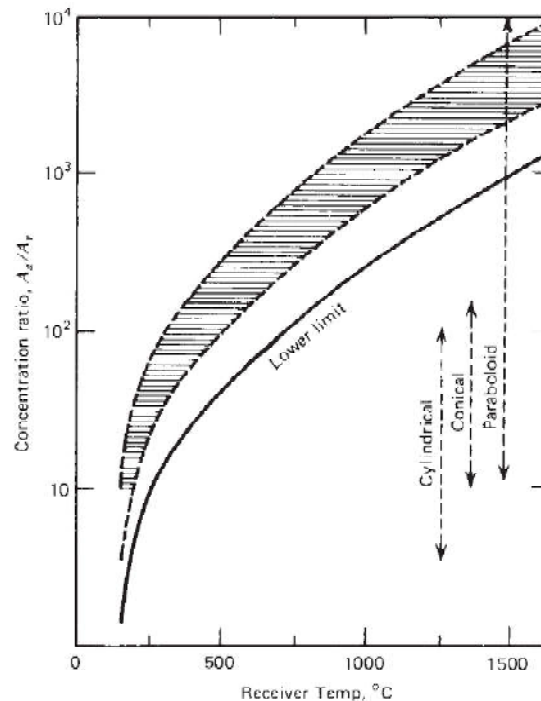


Figura 8: Relação entre a taxa de concentração e a temperatura no receptor

(Fig. 7.2.2 - DUFFIE, John A. and BECKMAN, William A.: *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th Edition)

Os coletores com baixa taxas de concentração operam de maneira semelhante aos coletores planos. À medida que a taxa de concentração aumenta, a temperatura também aumenta, trazendo a exigência de melhores sistemas óticos, de rastreamento e de posicionamento dos coletores. Os coletores com maiores taxas de concentração devem seguir o movimento do sol ao longo do dia. Há duas maneiras de se rastrear o movimento solar – rastreamento em 1 eixo (rastreamento zenital) e em 2 eixos (zenital e azimutal). Estes últimos tem a capacidade de seguir exatamente o movimento do sol.

Dentro deste grupo estão:

- Refletor Linear de Fresnel (*Linear Fresnel Reflector - LFR*)
- Coletor de Calha Parabólica (*Parabolic Trough Collector - PTC*)
- Disco Parabólico (PDR)
- Heliostatos com Receptor Central (HFC)

2.1.2.1 REFLETOR LINEAR DE FRESNEL (*Linear Fresnel Reflector - LFR*)

O coletor Fresnel é basicamente um conjunto de refletores planos que refletem a luz para um receptor longitudinal. Ele funciona como um coletor de calha parabólica dividido em seções, mas, diferentemente dos coletores parabólicos, estes segmentos são planos. Os refletores são

montados em suporte articulados no piso e projetam a radiação refletida para um receptor montado acima deles. A grande vantagem dos coletores Fresnel é o fato de utilizarem refletores planos em vez de curvos, que tem a fabricação bem mais simples, além do fato de serem montados no piso, reduzindo a estrutura do conjunto.

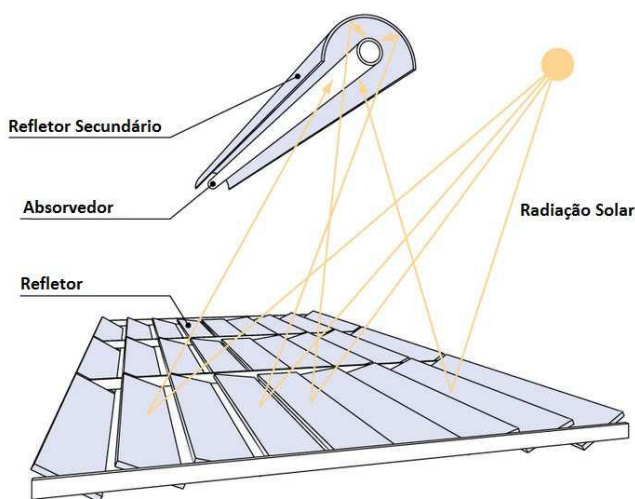


Figura 9: Esquemático de funcionamento de um coletor Fresnel

(http://www.renewables-made-in-germany.com/fileadmin/user_upload/2011/branchenreport/S.143.gif)

A utilização dos coletores Fresnel ganhou impulso após este coletor ser equipado com refletores secundários do tipo parabólicos compostos e com absorvedores de tubo evacuado KALOGIROU (2009),

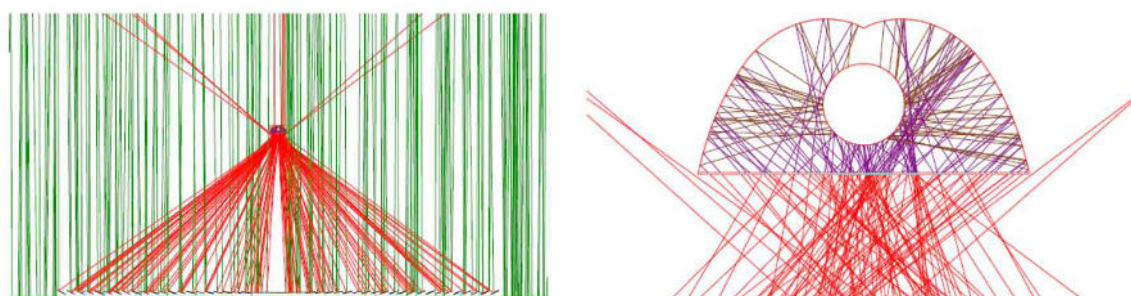


Figura 10: Reflexão de raios solares nos espelhos primários e secundários em um coletor Fresnel

(Medium Temperature Collectors - Solar Heat for Industrial Processes - International Energy Agency / Solar Paces)

Os coletores Fresnel também têm algumas desvantagens, entre elas o fato que os refletores primários fazem sombreamento sobre os refletores adjacentes. Para evitar este problema, aumenta-se o espaçamento entre eles e a altura do receptor, mas isto resulta em grande aumento de custo.

A solução foi dada através do Refletor Linear de Fresnel Compacto (CFLC), onde receptores foram instalados próximos uns aos outros (o Fresnel tradicional possui um único receptor) permitindo alternância entre refletores e receptores. Este arranjo reduz muito o tamanho dos sítios solares, o que pode não ser grande problema para grandes usinas instaladas em áreas remotas, por exemplo, mas em locais próximos de áreas urbanas onde o custo de aquisição de terras é alto, pode ser uma grande vantagem.

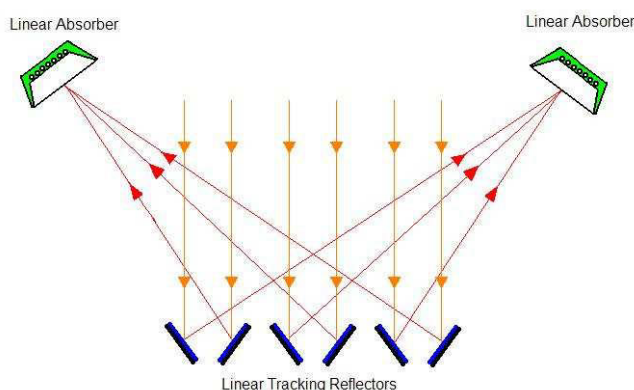


Figura 11: Coletor tipo Refletor Linear de Fresnel Compacto – CLFC

(https://en.wikipedia.org/wiki/Compact_linear_Fresnel_reflector#/media/File:CLFR_Alternating_Inclination.JPG, por Jrkenneyjr)

2.1.2.2 COLETOR DE CALHA PARABÓLICA (*Parabolic Trough Collector - PTC*)

Os coletores de calhas parabólicas se destacam por serem sistemas estruturalmente simples, com tecnologia de baixo custo e oferecem alto desempenho e eficiência para operar com calor em até 400°C. A base de sua construção é uma placa metálica polida, curva sob a forma de uma parábola e um receptor tubular por onde percorre o fluido de trabalho. O rastreamento solar só é necessário em um eixo, tornando a construção típica de coletores longos (KALOGIROU, 2009).

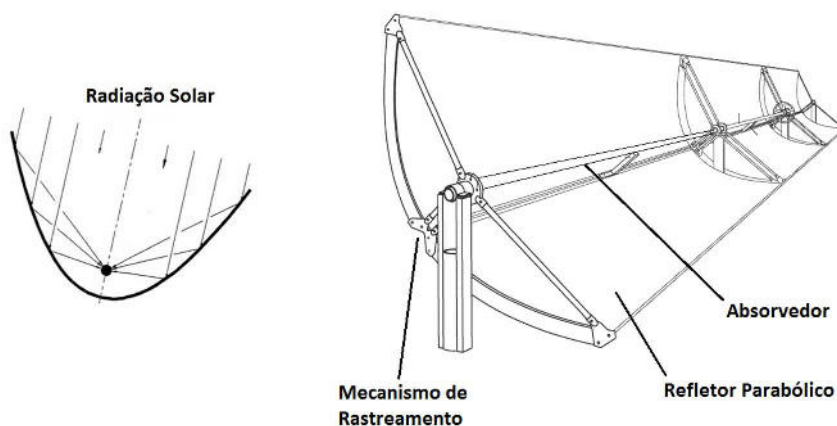


Figura 12: Coletor de Calha Parabólica

(alterada de <http://www.ipaustalia.com.au/applicant/sopogy-inc/patents/AU2010282524/>)

Os coletores de calha parabólica podem ser instalados com o eixo orientado no sentido leste-oeste, rastreando o sol no sentido norte-sul ou ao contrário, com o eixo orientado no sentido leste-oeste e o rastreamento no sentido norte-sul. A vantagem do primeiro arranjo é que necessário pouco ajuste de ângulo e o coletor tem a abertura total voltada para o sol ao meio dia, no entanto seu desempenho no início e no final do dia é muito reduzido. O segundo arranjo em contrapartida aproveita bem os raios solares do início e do fim do dia, porém a perda maior por refletância é no meio do dia.

No período de um ano, os coletores montados com o eixo norte-sul produzem mais energia do que os montados com o eixo leste-oeste. Este último produz mais energia no inverno e menos no verão, tornando a produção menos variável. A opção por um ou outro arranjo depende se a necessidade de energia é maior no verão ou no inverno.

A tecnologia de calhas parabólicas é hoje a mais avançada e madura dos sistemas solares por conta da experiência adquirida com este equipamento e pela indústria que se especializou em produzir e comercializar este sistema. (KALOGIROU, 2009).

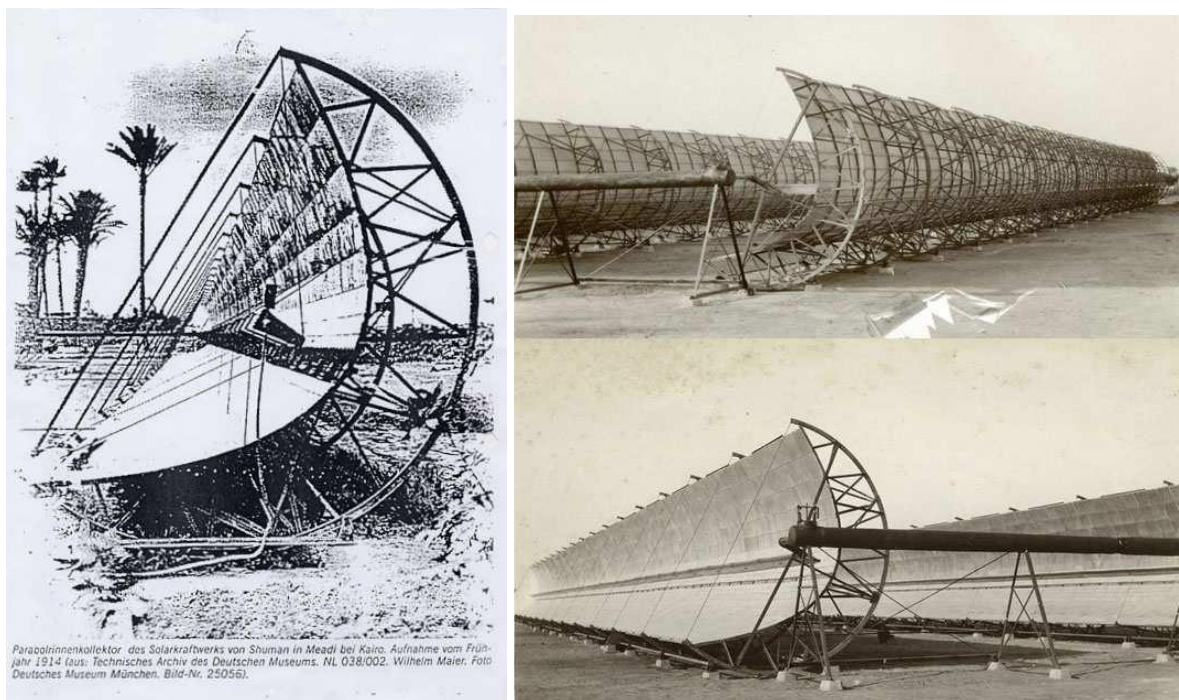


Figura 13: Coletor de Calha Parabólica instalado no Cairo, Egito, 1914

(<http://www.sustainablecitiescollective.com/david-thorpe/327416/how-ww1-killed-dream-solar-powered-world>)

A estrutura de um coletor de calha parabólica é relativamente simples, mas deve ser rija o suficiente para que não ocorram torções ou deformações no refletor, causando distorção na

projeção da luz e consequentemente diminuição do rendimento. A carga de vento é um ponto importante a considerar, devido à grande área de exposição e baixo peso.

O receptor de um coletor de calha parabólica é usualmente um tubo na linha focal do refletor e é dimensionado em função da dimensão da imagem solar refletida sobre ele (o que consequentemente determina a taxa de concentração) e as tolerâncias de fabricação da calha. O receptor é feito com tratamento de superfície seletiva e coberto com vidro para diminuir as perdas por convecção, o que ao mesmo tempo impõe uma pequena redução de desempenho da radiação ao atravessá-lo. Alguns melhoramentos também foram incorporados, como os receptores com camada de vácuo entre o vidro e o absorvedor e o tratamento antirreflexo para diminuir as perdas por refletância. O acúmulo de sujeira sobre a superfície refletiva é sempre um ponto de atenção nos coletores concentradores e também para isto foram desenvolvidos sistemas de lavagem automática que reduziram muito os custos de manutenção.

O sistema de rastreamento e posicionamento é também um ponto de atenção. O sistema deve rastrear o sol e posicionar os coletores com boa precisão, devem seguir com o rastreamento mesmo durante um acúmulo de nuvens e também reposicioná-los na posição de início após o final do dia. Eles devem ser confiáveis e estar disponíveis para a proteção dos coletores em momentos perigosos como em rajadas de vento, devem atuar em sobreaquecimento ou quando há falhas na circulação do fluido de trabalho (KALOGIROU, 2009).

2.1.2.3 REFLETOR DE DISCO PARABÓLICO (*Parabolic Dish Reflector - PDR*)

Os refletores de disco parabólico rastreiam o sol nos dois eixos, concentrando pontualmente a radiação solar em um receptor posicionado no ponto convergente. Dada a movimentação necessária em dois eixos, é necessário um sistema duplo similar àqueles utilizados nos de calha parabólica.

Os coletores de disco trabalham com uma taxa de concentração da ordem de 600 a 2000 e, portanto, podem atingir temperaturas acima de 1500°C. Este tipo de coletor trabalha com o rastreamento solar completo e é considerado o coletor mais eficiente de todos. Os discos podem trabalhar com motores térmicos do tipo *Stirling* ou ainda com trocadores de calor absorvendo energia através de tubulação para uso em uma central, embora o primeiro sistema seja o mais usual. Sua construção modularizada oferece flexibilidade na instalação, operando sozinho ou como parte de um sistema.



Figura 14: Refletores de Disco Parabólico

(alterado de <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter09/chapter09.html> e <http://simms10.wikis.birmingham.k12.mi.us/parabolic+solar+collector>)

2.1.2.4 CAMPO DE HELIOSTATOS COM RECEPTOR CENTRAL

O sistema de campo de heliostatos com receptor central se destina às aplicações de grande escala e unicamente à geração de energia elétrica sem utilização do calor absorvido para outra finalidade. Estas instalações são muito eficientes por conta do rastreamento em dois eixos dos heliostatos, mas também pela faixa de temperatura (até 2000°C) e taxas de concentração atingidas (300 a 1500).

A concepção deste sistema surgiu do fracionamento de refletores lineares de Fresnel, de modo que cada segmento de heliostato projetasse a radiação incidente em um ponto fixo, aumentando a concentração e temperatura. Esta mudança de arranjo exigiu que alguns pontos fossem considerados, como a aplicação de sistemas de rastreamento em dois eixos independentes; um estudo detalhado do posicionamento dos refletores de modo que um heliostato não interfira na radiação refletida por outro, assim como o estudo de acesso de manutenção a eles e o desenvolvimento de maquinário específico para fazer a manutenção e limpeza dos espelhos.

O estudo de vida útil exigiu que cuidados especiais fossem dados às estruturas e à cobertura dos espelhos para garantir sua durabilidade. Estes coletores concentradores trabalham com temperaturas entre 150 e 800°C, com um ciclo de liga e desliga a cada dia de operação, o que significa uma grande variação de temperatura ao menos uma vez por dia (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

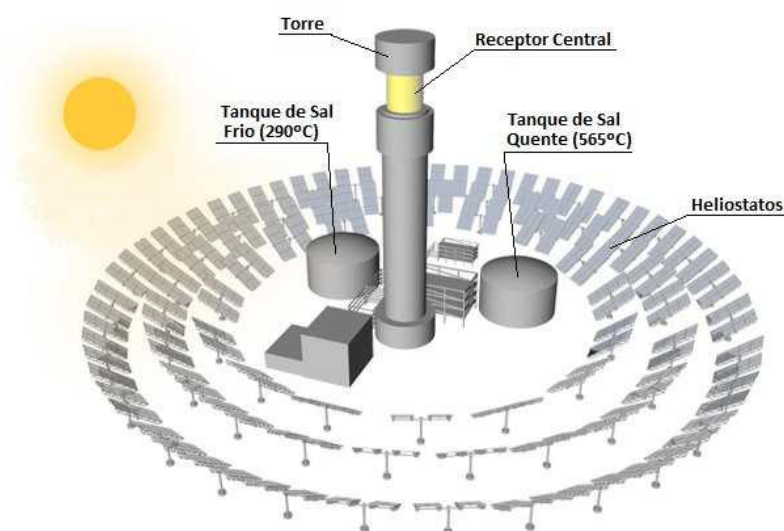


Figura 15: Sistema de Campo de Heliostatos com Receptor Central

(alterado de <http://www.sqm.com/en-us/productos/quimicosindustriales/salestermo-solares/energiasolarconcentrada%28csp%29.aspx>)

2.2. FLUIDOS DE TRABALHO PARA SISTEMAS SOLARES

Os fluidos de trabalho ou fluidos de transferência de calor são o veículo que vai possibilitar a transferência da energia entre sistemas. Há uma gama imensa de fluidos para cada aplicação. Nos ciclos frigorígenos estes fluidos podem ser ar, água, gases refrigerantes, amônia, metanol, soluções salinas etc. Nos sistemas solares os fluidos mais utilizados são o ar, a água, as soluções aquosas de glicóis, os fluidos (ou óleos) térmicos, e os sais fundidos.

2.2.3. AR

Não há necessidade de maiores explicações para este fluido. O ar é utilizado como fluido de trabalho nos sistemas solares desde aplicações simples e de baixa temperatura, como em aquecimento residencial, até em grandes usinas heliotérmicas de geração elétrica. O desenvolvimento de reservatórios com leitos de colmeia cerâmica permite que se armazene grandes quantidades de energia utilizando o ar como fluido em temperaturas até 680°C.

2.2.4. ÁGUA

Este é o fluido mais utilizado para aplicações menos exigentes, com temperaturas limite em torno de 100°C. A água tem custo irrisório mas necessita de alguns aditivos para evitar sua degradação e inibir a corrosão que causa ao meio. A adição de substâncias como os glicóis podem alterar suas propriedades, diminuindo o ponto de solidificação e aumentando o ponto de ebulição.

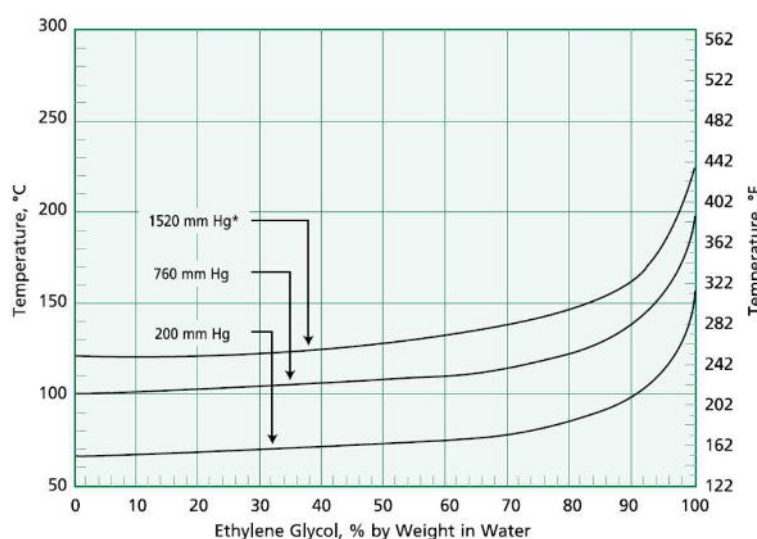


Figura 16: : Ponto de ebulição de solução aquosa de etileno glicol em diferentes pressões

(Ethylene Glycol Product Guide, MEGlobal. Figure 3: Boiling Points vs. Composition of Aqueous Ethylene Glycol Solutions at Various Pressures)

2.2.5.FLUIDO TÉRMICO

Os fluídos térmicos são utilizados nos sistemas solares e de energia que operam com temperaturas elevadas. Sua faixa de aplicação é de 15 a 400°C, podendo operar tanto na fase líquida como na fase vapor.

As principais vantagens são a alta estabilidade térmica, baixa corrosividade, baixa degradação e baixa viscosidade. Os fluidos térmicos possuem baixa viscosidade também em temperatura ambiente, o que minimiza os problemas de partida de planta.

As desvantagens são o preço elevado, a flamabilidade, a toxicidade e os relacionados ao manuseio e o descarte.

2.2.6.SAL FUNDIDO

Os sais de fusão ou sais fundidos são fluidos de transferência de calor para temperaturas extra altas, que podem operar em temperaturas até próximas a 600°C.

Os sais fundidos apresentam boas características de trabalho a altas temperaturas, como estabilidade térmica e viscosidade. Seu ponto de fusão, no entanto está entre 140°C e 250°C, o que traz muitos problemas de operação em partidas e paradas de sistemas quando a temperatura chega próxima ao ponto de cristalização.

Suas vantagens são o baixo custo, baixa toxicidade, e fácil descarte, não sendo prejudicial ao meio ambiente.

Suas desvantagens são a alta corrosividade e o principal - o alto ponto de fusão, que traz problemas operacionais e necessidade de aquecimento adicional distribuído ao longo das linhas e componentes do sistema.

2.3. SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO

A refrigeração por absorção é uma alternativa aos sistemas de compressão de gás. Os ciclos de absorção, assim como os demais ciclos frigorígenos, geram a fonte fria através da evaporação de um fluido refrigerante. A diferença nestes sistemas está em utilizarem uma fonte de calor e a absorção do fluido refrigerante em uma solução como gerador do processo de evaporação, enquanto o ciclo de compressão de gases utiliza a compressão mecânica e consequente condensação do fluido. A grande vantagem do sistema de absorção é a possibilidade de utilização do calor rejeitado em diversos processos termodinâmicos como fonte de alimentação, em contrapartida à necessidade de energia elétrica para o acionamento mecânico dos sistemas de compressão.

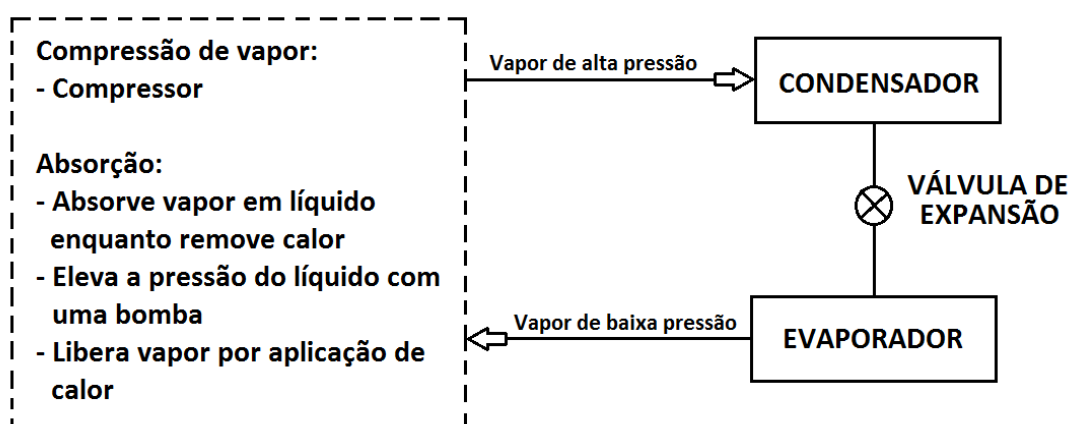


Figura 17: Transformação de vapor de baixa pressão em alta pressão em um sistema de refrigeração

(Stoecker e Jones. *Refrigeração e Ar Condicionado*, 1985)

O ciclo de absorção utiliza dois fluidos de trabalho, um fluido absorvedor e um fluido refrigerante. Há dezenas de duplas de absorvedores-refrigerantes, sendo os mais comumente utilizados os de Brometo de Lítio-Água ($\text{BrLi-H}_2\text{O}$), utilizados em temperaturas moderadas (basicamente Condicionamento de Ar) e os de Água-Amônia ($\text{H}_2\text{O-NH}_3$) para maior resfriamento (Refrigeração em geral) (Ochoa, 2011).

Tabela 2: Pares mais conhecidos utilizados em sistemas de Absorção

(adaptado de *Application Guide for Absorption Cooling/Refrigeration using recovered heat*. ASHRAE, 1995)

Corpo Absorvente	Fluido Refrigerante
Água	Amônia (NH_3)
Brometo de Lítio (BrLi) e Água em solução	Água
Cloreto de Lítio (CLi) e Metanol em solução	Metanol (CH_3OH)
Ácido Sulfúrico (H_2SO_4)	Água
Hidróxido de Potássio (KOH) ou Sódio (NaOH)	Água

O CICLO DE ABSORÇÃO

O ciclo de absorção trabalha basicamente com dois vasos separados e interligados, onde circula a solução de absorvente e refrigerante. Em uma seção do primeiro vaso ocorre a separação do refrigerante da solução, através da aplicação de calor oriundo de uma fonte quente (Gerador). A solução torna-se mais concentrada. Na outra seção deste vaso (Condensador), o refrigerante segregado da solução é condensado ao dissipar calor entrando em contato com uma fonte fria.

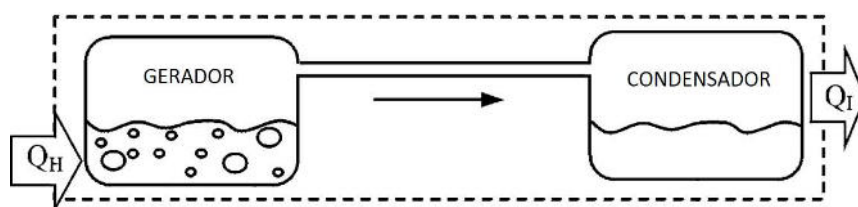


Figura 18: Processo de separação do refrigerante

(Srihirin, Aphornratana e Chungpaibulpatana, A review of absorption refrigeration technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2001)

O refrigerante circula para o segundo vaso, que se encontra a quase pleno vácuo (Evaporador), entrando em evaporação. A evaporação do refrigerante é um processo endotérmico, que será o gerador da fonte fria neste ciclo. O vapor de refrigerante migra para a outra seção do segundo vaso (Absorvedor), onde se mistura à solução concentrada que retorna do gerador. Este processo se denomina Absorção e é exotérmico, tendo seu calor dissipado para outra fonte de resfriamento.

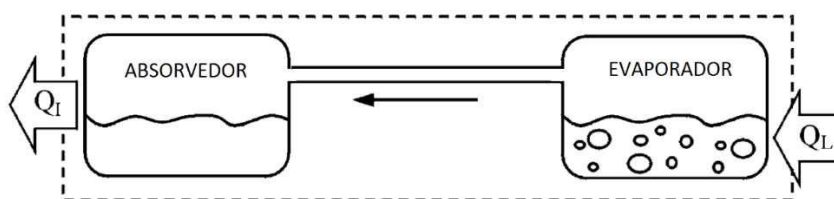


Figura 19: : Processo de absorção do refrigerante

(Srihirin, Aphornratana e Chungpaibulpatana, A review of absorption refrigeration technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2001)

2.3.1 O CICLO DE ABSORÇÃO COM PAR BROMETO DE LÍTIO - ÁGUA

Segundo Srihirin et al. (2001), o funcionamento dos sistemas de refrigeração por ciclos de absorção está diretamente ligado às propriedades físicas dos fluidos de trabalho. A composição da solução empregada deve ser quimicamente estável, atóxica e não explosiva. É desejável também:

- o ponto de ebulição da solução e do refrigerante puro sejam bem diferentes para uma mesma determinada pressão.
- o fluido refrigerante tenha alta entalpia de vaporização e alta concentração no absorvente de modo a manter uma pequena taxa de circulação específica entre o gerador e o absorvedor, por unidade de refrigeração.
- propriedades favoráveis para transferência de calor e massa, como condutividade térmica, viscosidade, coeficiente de difusão (propriedade de um soluto se mover em um solvente) etc.
- ambos componentes sejam não corrosivos, não agressivos ao meio ambiente e de baixo custo.

O Brometo de Lítio é um sal sólido cristalino que tem a propriedade de absorver o vapor d'água tornando-se uma solução líquida. A solução exerce uma pressão de vapor de água em função da sua temperatura e concentração.

Se dois vasos forem conectados como na figura abaixo, um contendo água pura e o outro contendo uma solução de BrLi-água, cada líquido exerceria uma pressão de vapor, até atingir um equilíbrio de pressão.

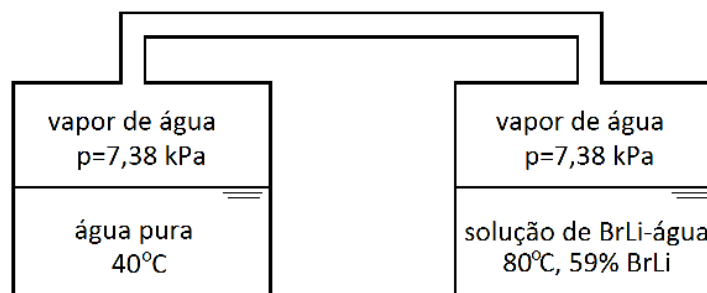


Figura 20: Pressão de equilíbrio de vapor d'água entre vasos de água e solução

(Stoecker e Jones. *Refrigeração e Ar Condicionado*, 1985)

Como mostrado na figura 21, a pressão de vapor para os dois lados do vaso seria 7,38kPa, mas outras combinações de concentração e temperatura também forneceriam a mesma pressão de vapor.

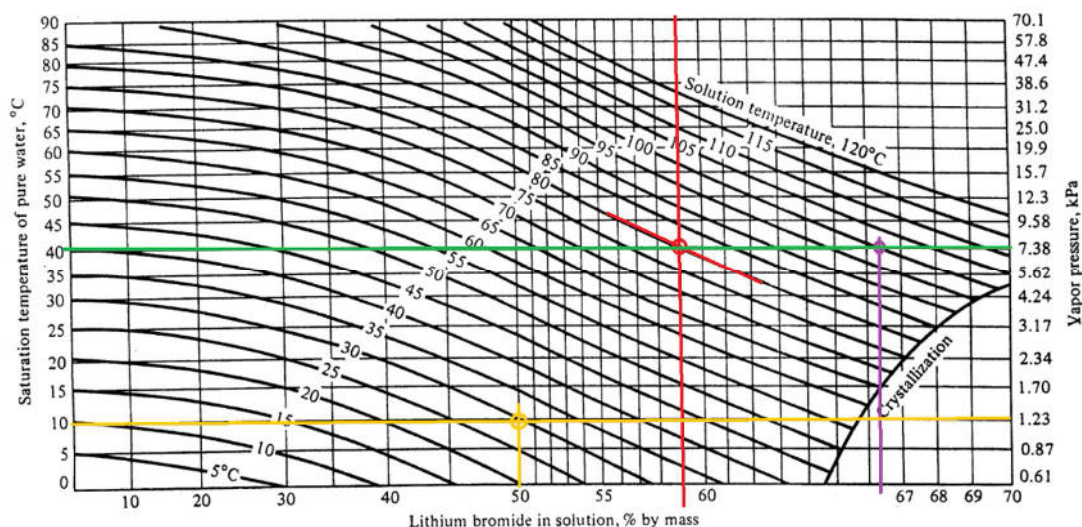


Figura 21: Diagrama temperatura-pressão-concentração de soluções saturadas de BrLi-água

(Stoecker e Jones. *Refrigeração e Ar Condicionado*, 1985)

Ao se estabelecer a temperatura de condensação em 40°C, a pressão no condensador e gerador será equilibrada em 7,38kPa. Se a fonte de calor for elevada para 100°C, aumentará a geração de vapor de refrigerante, levando com que a concentração da solução se estabeleça em 66,49% em massa. Ao fixarmos a temperatura de 10°C no Evaporador, a pressão no vaso será estabelecida em 1,23 kPa. A temperatura de 30°C estabelecida no Absorvedor fixará a concentração da solução em 50% em massa. A vazão de solução fraca que alimenta o Gerador será definida com base nessa condição.

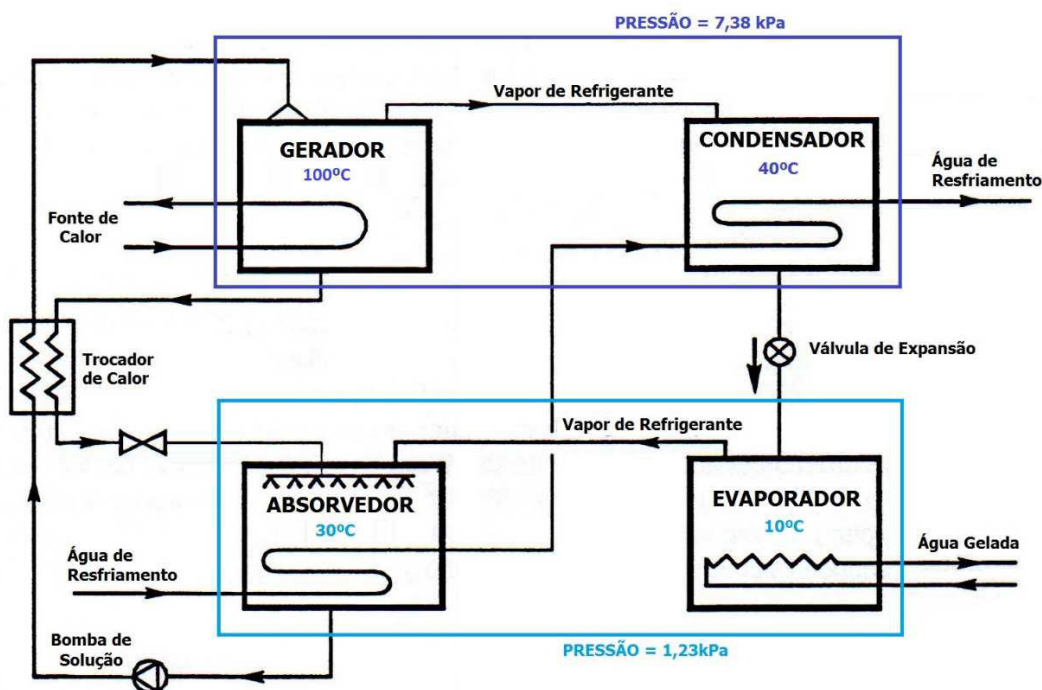


Figura 22: Esquemático do modelo integrado – Sistema de Absorção BrLi de Simples Efeito

(adaptado de ‘Application Guide for Absorption Cooling/Refrigeration using recovered heat’. ASHRAE, 1995)

CICLO DE SIMPLES EFEITO

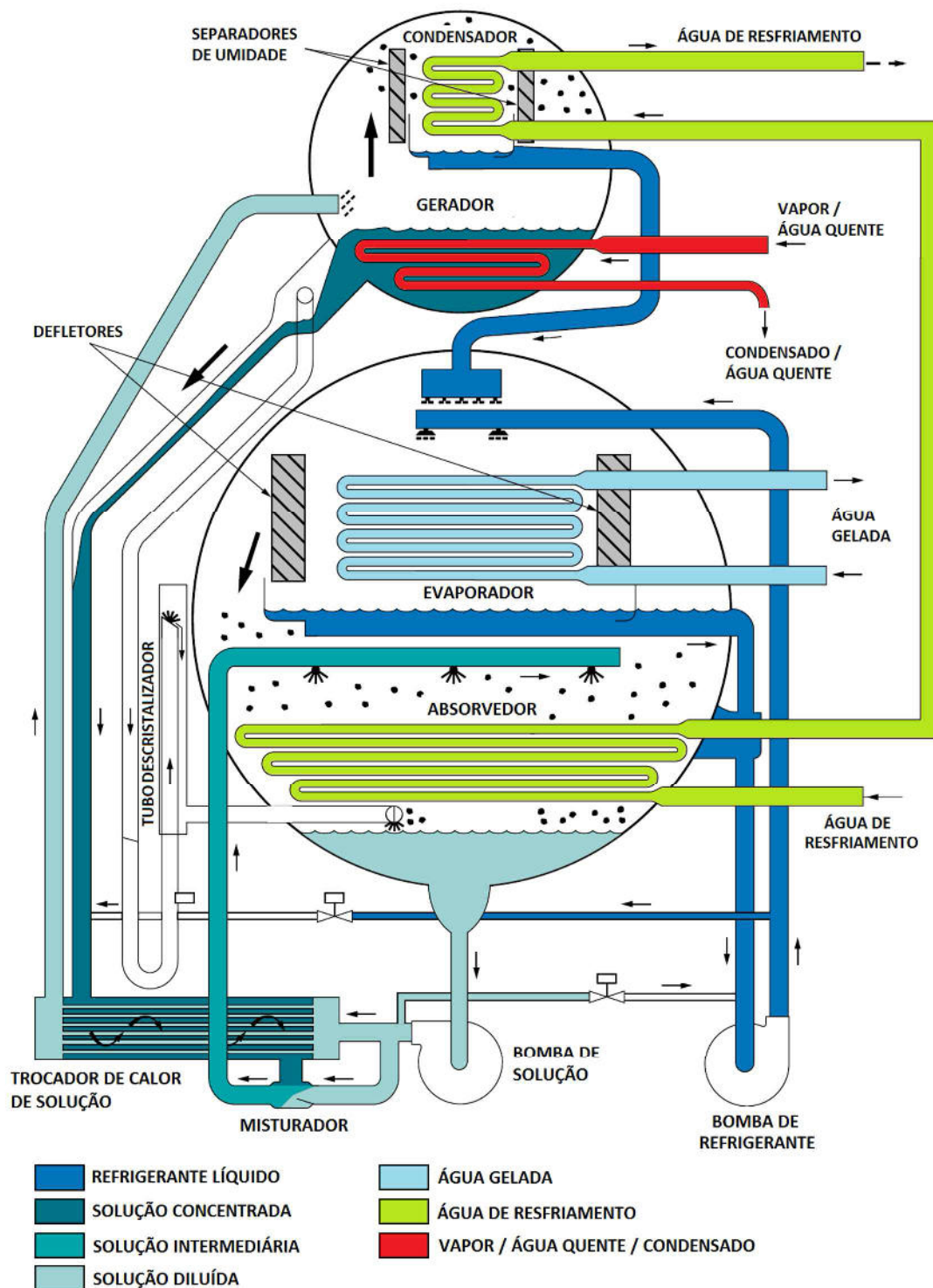
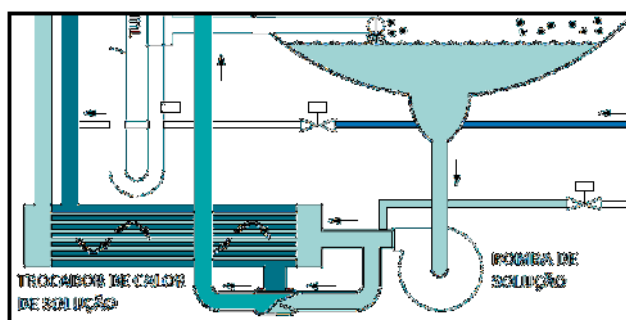


Figura 23: Esquemático de funcionamento do Chiller de Simples Efeito

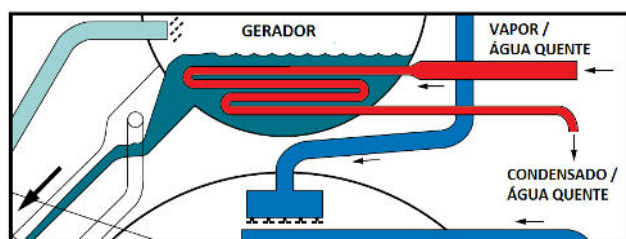
(Adaptado do catálogo YORK/Johnson Controls, Millenium YIA)

Bomba de solução



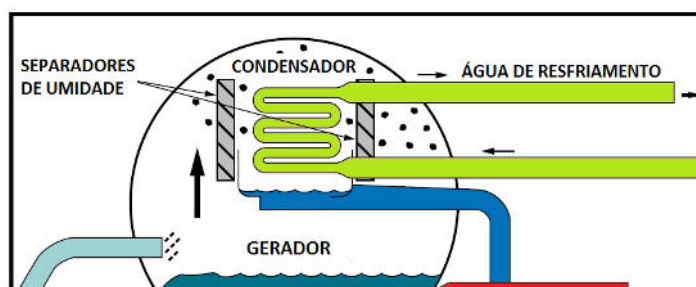
A solução diluída de brometo de lítio é coletada no fundo do casco do absorvedor. A partir deste ponto uma bomba hermética transfere a solução através de um trocador de calor para pré-aquecimento.

Gerador



Após deixar o trocador de calor a solução diluída chega ao vaso superior. A solução envolve uma serpentina de tubos por onde circula vapor ou água quente. Esta fonte quente transfere calor à solução diluída, que entra em ebulição fazendo com que o vapor do fluido refrigerante (água) para cima, na seção do condensador, deixando a solução mais concentrada. Esta solução concentrada desce para o trocador de calor, onde será resfriada em contra fluxo com a solução diluída que sobe bombeada para o gerador.

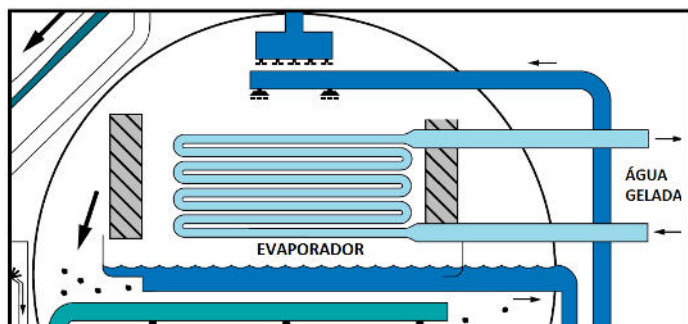
Condensador



O vapor de água migra para a seção do condensador passando através de separadores de umidade, até encontrar com o feixe tubular de água de resfriamento. O vapor condensa em

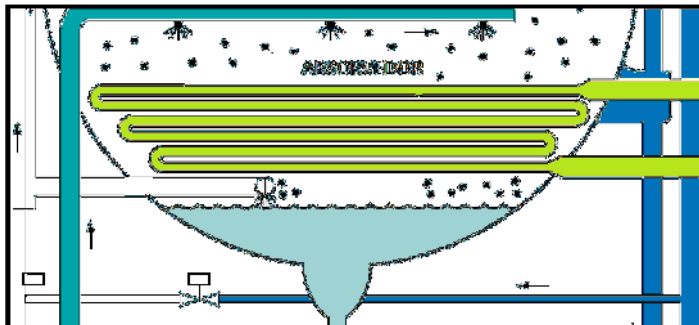
contato com o feixe e o calor é removido pela água de resfriamento. O condensado é coletado em uma bandeja sob o feixe.

Evaporador



O refrigerante condensado se transfere do ponto onde é coletado no vaso superior para o inferior, onde é aspergido sobre o feixe tubular do Evaporador. Por conta da baixíssima pressão no vaso inferior (próximo ao vácuo total), o refrigerante nebulizado se evapora criando o efeito de refrigeração. O vácuo é formado pela absorção do refrigerante na solução aspergida na seção do Absorvedor, logo abaixo.

Absorvedor



Com o vapor de refrigerante migrando do Evaporador, a solução concentrada de brometo de lítio é aspergida sobre o feixe tubular do Absorvedor. A solução concentrada absorve o vapor de água criando o vácuo no vaso. Esta reação de absorção é exotérmica, e a função do feixe tubular desta seção é justamente absorver o calor da reação através da água de resfriamento. A solução, agora mais diluída, flui para o fundo do vaso, onde é coletada pela bomba de circulação, reiniciando o ciclo.

Figura 24: Esquemáticos de funcionamento do Chiller de Simples Efeito

(Adaptado do catálogo YORK/Johnson Controls, Millenium YIA)

CONTROLE DE CAPACIDADE

(Stoecker e Jones, 1985): “O verdadeiro significado de controle de capacidade é ‘redução de capacidade’ já que a operação sem controle produz a máxima capacidade de refrigeração”. O controle de refrigeração é necessário principalmente quando ocorre uma redução na carga de refrigeração, resultando na queda de temperatura de retorno da água gelada à unidade de absorção. Sem o controle, a temperatura da água gelada diminuiria sua temperatura na saída do Evaporador, diminuindo também a pressão do vaso Absorvedor até o ponto de se congelar”.

O ponto central do controle da unidade de absorção é a temperatura de saída de água gelada, porém as variações na temperatura de água de resfriamento e da fonte de calor vão interferir no desempenho da unidade. O sistema pode ser controlado de várias maneiras, tendo sempre o objetivo de controlar a vazão de água refrigerante para o evaporador.

Métodos de controle:

- Reduzir a vazão de solução para o Gerador
- Reduzir a temperatura do Gerador
- Aumentar a temperatura de condensação

Reduzir a vazão de solução para o Gerador imediatamente seria um modo de reduzir a vazão de refrigerante para o Evaporador, mas isto só funcionaria se a taxa de adição de calor no Gerador fosse também reduzida. Ao se reduzir a vazão de solução e de a taxa de adição de calor, mas mantendo a temperatura e vazão da água de resfriamento constantes, ocasiona a diminuição da temperatura de condensação. De outra maneira, se reduzida a vazão de refrigerante e mantida a mesma taxa de adição de calor, a temperatura no gerador aumenta, causando o aumento da concentração da solução, levando a unidade mais próxima ao ponto de cristalização.

Reduzir a temperatura no Gerador é feita reduzindo a vazão de vapor ou água quente fornecida à unidade. Uma vez limitada a taxa de adição de calor ao gerador, a vazão de refrigerante para o Evaporador cai, e, se mantida a vazão e temperatura da água de resfriamento, ocorrerá uma queda na temperatura de condensação. As mudanças de temperatura nos processos afetam as pressões nos vasos e por sua vez a concentração da solução no Absorvedor e Gerador.

Aumentar a temperatura de condensação pode ser feito mediante controle da temperatura da água de resfriamento proveniente da Torre. O efeito sobre o ciclo de absorção é semelhante ao de redução da carga térmica no gerador – há redução na concentração de BrLi (a solução fica mais diluída). Como mostrado na figura abaixo, um aumento na temperatura de condensação causa um aumento na pressão de trabalho, movendo o ponto de operação 1 para o ponto 2. Na nova condição de trabalho, a solução se move em um patamar de temperatura constante diminuindo progressivamente sua concentração até atingir o ponto B de equilíbrio. Desta

maneira, para uma dada vazão da bomba de solução, a vazão de refrigerante circulando para o Condensador e Evaporador decresce. (Stoecker e Jones, 1985)

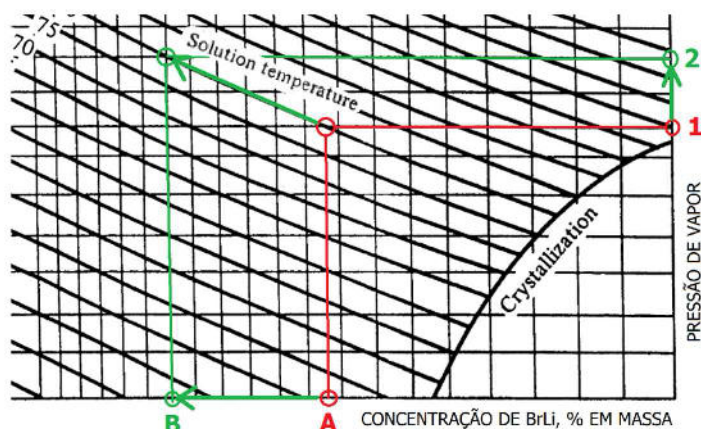


Figura 25: Redução da capacidade de refrigeração pelo aumento da temperatura de condensação e redução da concentração de BrLi

(Stoecker e Jones. *Refrigeração e Ar Condicionado*, 1985)

No ciclo de refrigeração por absorção é muito grande a interação entre temperaturas, pressões e concentração de solução. As unidades comerciais cruzam estas variáveis em um sistema de controle de modo a absorver as variações de carga térmica e ambiente, tornando a operação da unidade estável.

Coeficiente de Desempenho (COP) dos ciclos de Absorção

O desempenho dos sistemas de refrigeração (COP - *Coefficient of Performance*) é definido como o quociente entre o calor absorvido na fonte fria e a energia consumida pelo sistema (ASHRAE, 1993):

$$COP = \frac{\text{refrigeração útil}}{\text{energia consumida}}$$

Em um sistema de compressão de gás:

$$COP = \frac{\text{refrigeração útil}}{\text{trabalho útil}}$$

Em um sistema de absorção:

$$COP = \frac{\text{refrigeração útil}}{\text{adição de calor} + \text{consumo elétrico}}$$

Nos sistemas de absorção o consumo elétrico se restringe às bombas de circulação e é desprezível quando comparado aos valores totais do ciclo e, portanto, não são considerados nesta análise:

$$COP = \frac{\text{refrigeração útil}}{\text{adição de calor no Gerador}}$$

A comparação entre os COPs dos sistemas de compressão e absorção não é usual pois há muita diferença entre as grandezas (em torno de 6,0 nos sistemas de compressão e 1,0 nos sistemas de absorção de simples efeito), além do fato de que nos sistemas de absorção é utilizada como referência a fonte puramente térmica, enquanto nos sistemas de compressão é considerada a energia na forma de trabalho (normalmente elétrico), reconhecidamente mais valiosa e cara do que a energia térmica. (Stoecker e Jones, 1985)

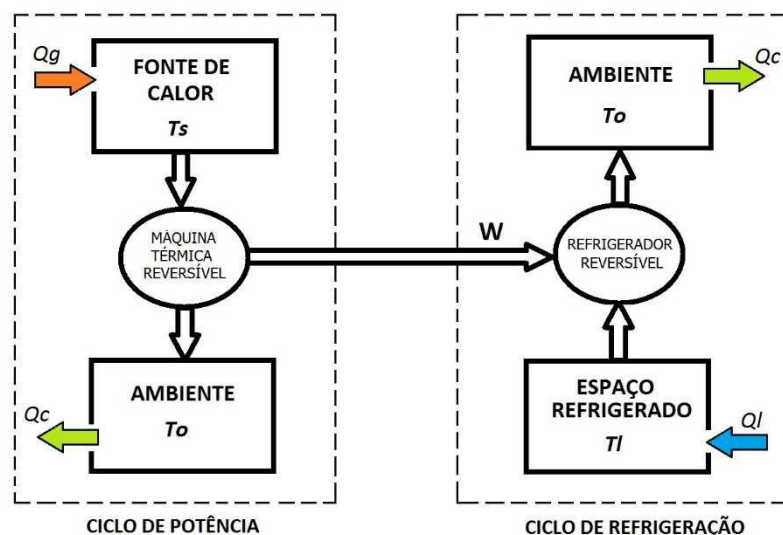


Figura 26: Determinação do COP máximo de um sistema de refrigeração por Absorção

(Stoecker e Jones. *Refrigeração e Ar Condicionado*, 1985)

ÇENGEL e BOLES (2005): “O COP máximo de um sistema de refrigeração por absorção é determinado considerando que todo o ciclo é totalmente reversível, ou seja, o ciclo não envolve irreversibilidades e toda a troca de calor é feita através da temperatura diferencial”.

Teremos, então, para o Ciclo de Potência:

$$\frac{Qg}{W} = \frac{T_s}{T_s - T_o}$$

Para o Ciclo de Refrigeração:

$$\frac{Q_l}{W} = \frac{T_l}{T_o - T_l}$$

A taxa de refrigeração é Q_l , e a taxa de calor adicionado ao gerador é Q_g . Unindo as duas expressões:

$$COP = \frac{Q_l}{Q_g} = \frac{W \cdot T_l}{T_o - T_l} = \frac{T_s - T_o}{W \cdot T_s} = \frac{T_l (T_s - T_o)}{T_s (T_o - T_l)}$$

Exemplo de definição de COP de um sistema de refrigeração ideal operado a calor:

Condição 1):

- Temperatura da Fonte (T_s): 100°C (373K)
- Temperatura de Refrigeração (T_l): 5°C (278K)
- Temperatura Ambiente (T_o): 30°C (303K)

$$COP = \frac{278 \cdot (373 - 303)}{373 \cdot (303 - 278)} = 2,09$$

Condição 2):

- Temperatura da Fonte (T_s): 100°C (373K)
- Temperatura de Refrigeração (T_l): 10°C (283K)
- Temperatura Ambiente (T_o): 30°C (303K)

$$COP = \frac{283 \cdot (373 - 303)}{373 \cdot (303 - 283)} = 2,66$$

Condição 3):

- Temperatura da Fonte (T_s): 120°C (393K)
- Temperatura de Refrigeração (T_l): 5°C (278K)
- Temperatura Ambiente (T_o): 30°C (303K)

$$COP = \frac{278 \cdot (393 - 303)}{393 \cdot (303 - 278)} = 2,55$$

Condição 4):

- Temperatura da Fonte (T_s): 100°C (373K)

- Temperatura de Refrigeração (T_l): 5°C (278K)
- Temperatura Ambiente (T_o): 35°C (308K)

$$COP = \frac{278 \cdot (373 - 308)}{373 \cdot (308 - 278)} = 1,74$$

Respostas de funcionamento da unidade de absorção quanto às variações de carga:

- Quando a Temperatura da Fonte (T_s) aumenta, o COP aumenta.
- Quando a Temperatura de Refrigeração (T_l) aumenta, o COP aumenta.
- Quando a Temperatura Ambiente (T_o) aumenta, o COP diminui.

CICLO DE DUPLO EFEITO

Os ciclos de Absorção por duplo efeito são utilizados quando há disponibilidade de fonte de aquecimento de maior temperatura. O sistema é arranjado de modo que o calor rejeitado no primeiro estágio seja utilizado como fonte de aquecimento no estágio seguinte. O sistema de duplo efeito é composto de dois geradores, o primeiro utiliza-se da fonte primária de calor na geração do vapor de refrigerante, que é transferido para o segundo estágio sendo a fonte de adição de calor deste, aumentando a geração efetiva. Uma vez que o aproveitamento da fonte energética é maior, o sistema de duplo efeito atinge COPs maiores.

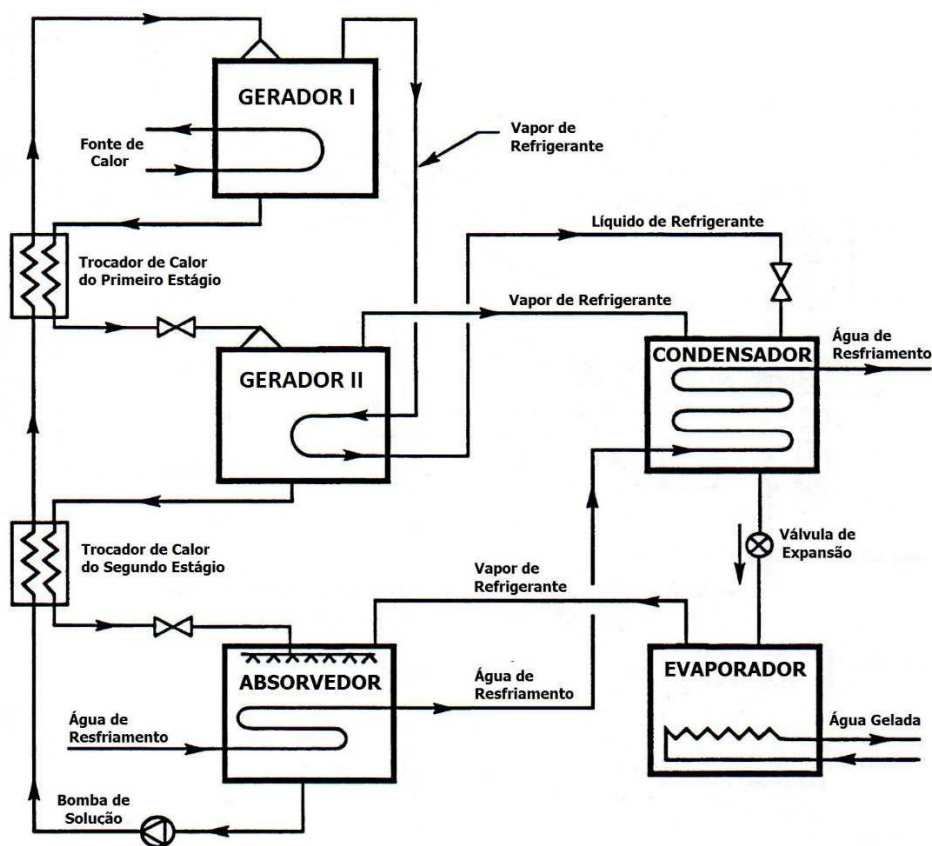


Figura 27: Fluxograma básico de um Sistema de Absorção de Brometo de Lítio-Água (BrLi) de Duplo Efeito

(Application Guide for Absorption Cooling/Refrigeration using recovered heat. ASHRAE, 1995)

A geração de vapor de refrigerante em unidades separadas estabelece três níveis de pressão de trabalho. Há diversos arranjos para uma unidade de duplo efeito, mas a mais comum é a de três vasos, onde o primeiro gerador, ou Gerador I fica em um vaso separado.

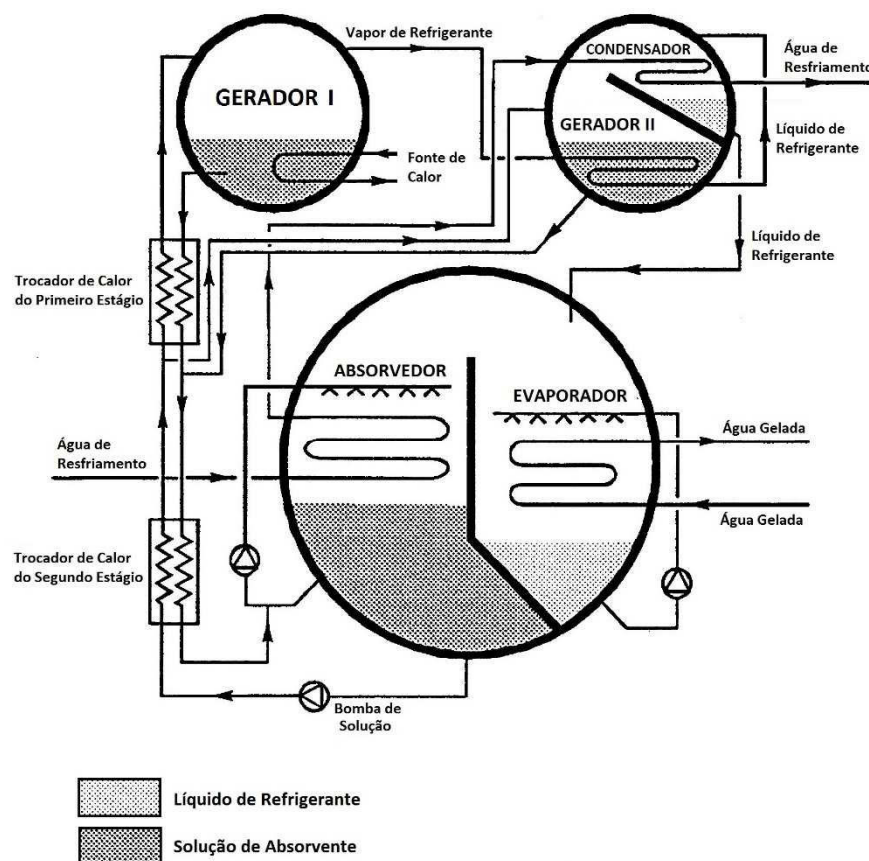


Figura 28: : Arranjo típico de uma Unidade de Absorção de Duplo Efeito

(Application Guide for Absorption Cooling/Refrigeration using recovered heat. ASHRAE, 1995)

2.3.2 SISTEMA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA - AMÔNIA (H₂O – NH₃)

O sistema de absorção por água-amônia foi predecessor dos sistemas de compressão de gás e de absorção BrLi. Este sistema utiliza água como meio absorvente e amônia como refrigerante, e possui basicamente os mesmos componentes que o sistema de BrLi: gerador, condensador, evaporador e absorvedor, além de um retificador. O retificador é necessário pois o vapor de refrigerante liberado no gerador (amônia) também possui vapor d'água que precisa ser removido. O retificador é um condensador que opera utilizando água de resfriamento, condensando o vapor de água e o retornando ao gerador (Stoecker e Jones, 1985).

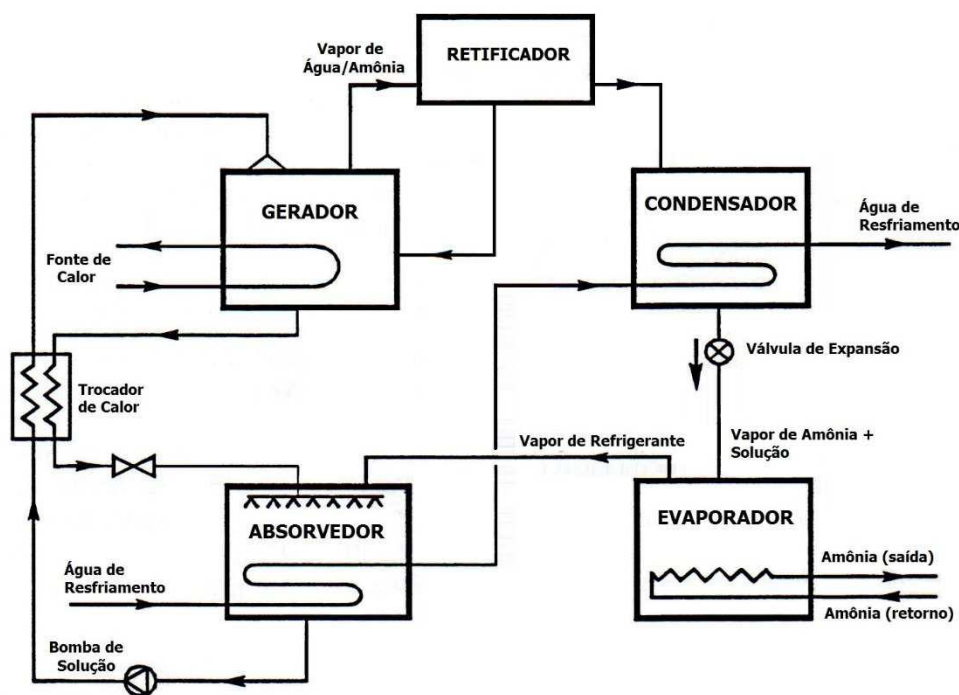


Figura 29: Fluxograma básico de um sistema de Absorção de Água-Amônia (H₂O-NH₃) de um estágio

(Application Guide for Absorption Cooling/Refrigeration using recovered heat. ASHRAE, 1995)

As vantagens do sistema de Água-Amônia sobre o de Brometo de Lítio-Água é que este utiliza a amônia como refrigerante, atingindo temperaturas abaixo de 0°C, enquanto que o segundo se limita à 3°C. Outra desvantagem do sistema de BrLi é a necessidade de operar em vácuo, o que torna muito difícil a detecção de vazamentos e o sujeita à necessidade de purgas frequentes. A solução de Brometo de Lítio-Água é também corrosiva, sendo necessária a utilização de inibidores para retardar a corrosão.

Os sistemas de absorção apresentam diversas desvantagens quando comparados aos sistemas de compressão de gás. Eles são maiores, mais complexos e mais caros, além de exigirem maior necessidade de resfriamento para o calor rejeitado. Sua grande vantagem, porém, a possibilidade de utilizar a recuperação de calor de diversos processos, assim como a energia solar como fonte de energia pode torná-los altamente atrativos para uma grande gama de aplicações. Este é o objetivo deste estudo.

Tabela 3: Tabela comparativa dos sistemas usuais de Refrigeração por Absorção.

(Srikhirin, Aphornratana e Chungpaibulpatana. A review of absorption refrigeration technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2001)

Sistema	Níveis de Pressão	Temperatura de Operação (°C)	Fluido de Trabalho	Capacidade de Refrigeração	COP	Notas
Simplex Efeito	2	80 - 110	BrLi / Água	50 - 2000	0.7 - 1.0	- O sistema mais simples e mais utilizado - Usa água como refrigerante, portanto não atinge temperaturas abaixo de 0°C. - O sistema opera em pressão negativa - Solução corrosiva - A operação em alguma faixas de alta concentração pode causar cristalização da solução
Simplex Efeito	2	120 - 150	Água / NH3	3 - 25	0.5	- Necessita de retificação para o circuito de refrigerante - A solução não é danosa ao meio ambiente - Opera com pressão positiva pois utiliza amônia como refrigerante. - Não há problemas de cristalização - pode ser utilizado como bomba de calor por conta da larga faixa de operação.
Duplo Efeito	3	120 - 150	BrLi / Água	50 - 2000	1.0 - 1.3	- Cído de alto rendimento, utilizando a energia disponível em dois estágios
Duplo Efeito	3	120 - 150	Água / NH3			Experimental

3. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

3.1. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE GERAÇÃO SOLAR

A grande vantagem do sistema de climatização solar por ciclo de absorção é o fato de que a curva de demanda de calor do sistema acompanha a curva de irradiação solar, com uma pequena defasagem. Ou seja, a mesma energia incidente que faz com que o ambiente necessite de climatização, está prontamente disponível para acionamento deste sistema.

Local da Instalação

Recife / PE

Latitude: S 8°23'25"

Longitude: W 35°0'44"

Altitude: 14m (nível do mar)

Dados Climatológicos

Tabela 4: Dados Climatológicos de Recife

(Instituto Nacional de Meteorologia)

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Temperatura máxima absoluta (°C)	34,7	34,3	35,1	33,5	33	31,9	33,1	32,2	32,7	33,1	32,4	34,5	35,1
Temperatura máxima média (°C)	30,2	30,2	30	29,7	28,9	27,9	27,3	27,5	28,1	29	30,1	30,2	29,1
Temperatura média (°C)	26,5	26,5	26,4	25,9	25,2	24,5	23,9	23,9	24,6	25,5	26,1	26,4	25,5
Temperatura mínima média (°C)	22,4	22,6	22,7	22,6	21,9	21,6	21,1	20,6	20,7	21,4	21,9	22,2	21,8
Temperatura mínima absoluta (°C)	16,8	17,8	17,9	17,1	16,9	17,1	16	15	15	16	16,7	16,4	15
Precipitação (mm)	108,2	148,2	256,9	337,6	318,5	377,9	388,1	204,8	122	63	35,7	56,8	2 417,6
Dias com precipitação (≥ 1 mm)	10	11	16	18	20	21	22	17	13	9	6	8	171
Umidade relativa (%)	73	77	80	84	85	85	85	85	78	76	74	75	79,8
Horas de sol	246,3	210,8	203,9	185,2	186,3	168,3	157,6	207,1	216,6	247,3	265,8	255,2	2 550,7

3.2. POTENCIAL SOLAR

Os dados para a informação da Irradiação Diária Média Mensal ($\bar{H}$) estão disponíveis no site do **CRESESB** - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito.

Nota referente à base de dados:

“O programa SunData é baseado no banco de dados Valores Medios de Irradiacion Solar Sobre Suelo Horizontal do Centro de Estudos de la Energia Solar (CENSOLAR, 1993) contendo valores de irradiação solar diária média mensal no plano horizontal para cerca de 350 pontos no Brasil e em países limítrofes”

Irradiação Diária Média Mensal no Plano Horizontal ($\bar{H}$):

Tabela 5: Irradiação Solar no Plano Horizontal

(Cresesb SunData)

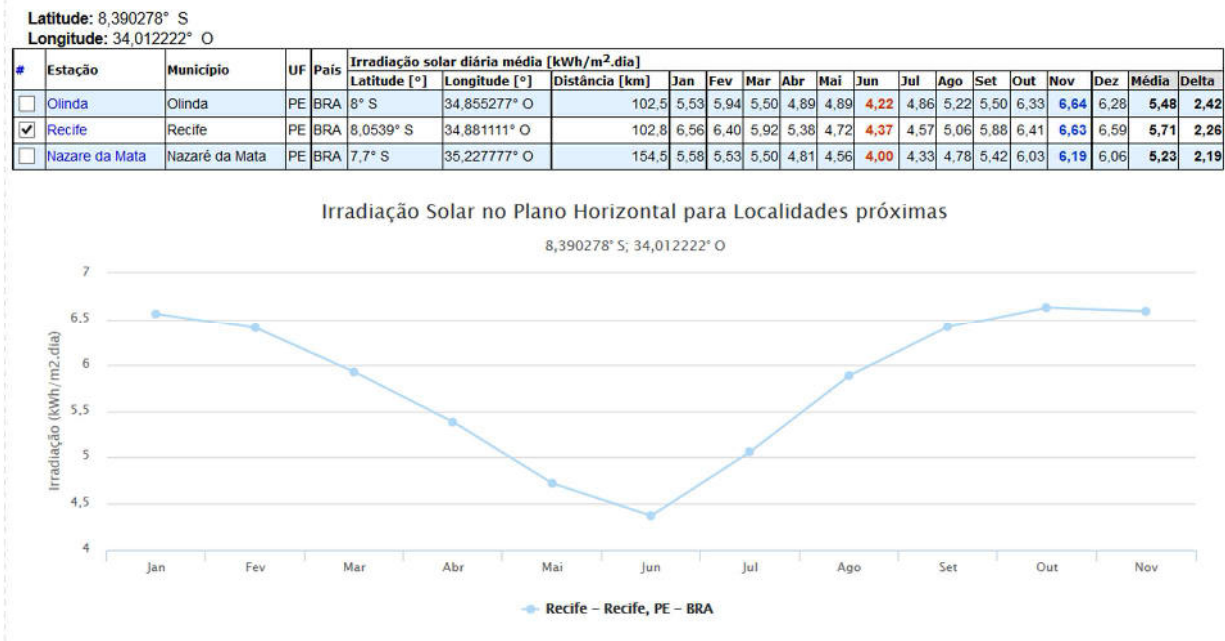
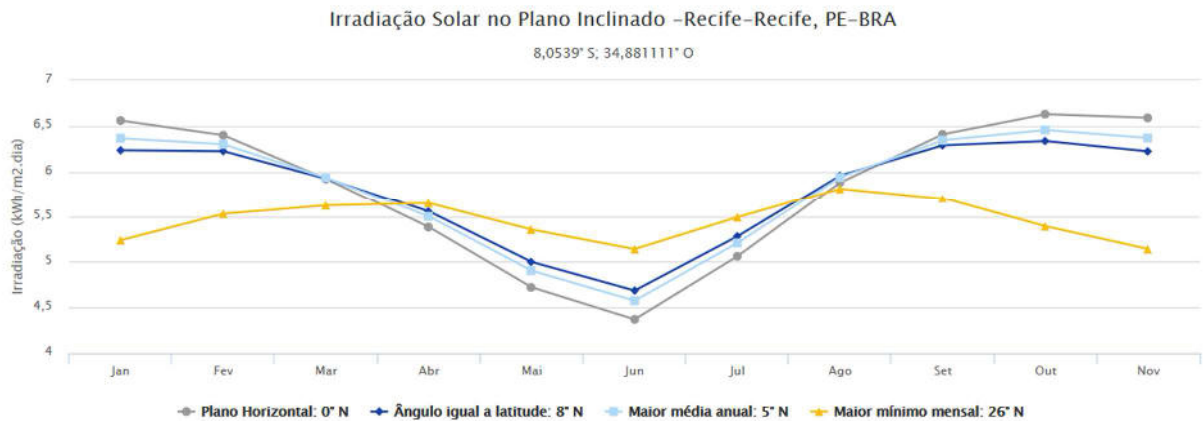


Tabela 6: Irradiação Solar no Plano Inclinado
(Cresesb SunData)

Estação: Recife
Município: Recife , PE - BRA
Latitude: 8,0539° S
Longitude: 34,881111° O
Distância do ponto de ref. (8,390278° S; 34,012222° O) :102,8 km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m².dia]												Média	Delta
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
✓	Plano Horizontal	0° N	6,56	6,40	5,92	5,38	4,72	4,37	4,57	5,06	5,88	6,41	6,63	6,59	5,71	2,26
✓	Ângulo igual a latitude	8° N	6,24	6,22	5,92	5,55	5,00	4,68	4,87	5,28	5,96	6,29	6,34	6,22	5,71	1,65
✓	Maior média anual	5° N	6,37	6,30	5,93	5,50	4,90	4,57	4,77	5,21	5,94	6,35	6,46	6,37	5,72	1,88
✓	Maior mínimo mensal	26° N	5,24	5,53	5,62	5,64	5,35	5,14	5,30	5,49	5,81	5,70	5,39	5,14	5,44	,67



A cidade de Recife encontra-se relativamente próxima à linha do Equador (8º S). Embora os registros climatológicos mostrem pouca variação de temperatura média ao longo do ano, utilizaremos os meses de Dezembro e Junho como referência para a comparação de desempenho do sistema entre picos de maior e menor temperatura e irradiação solar média.

Será utilizado o dia médio como base de cálculo do potencial de geração.

Nota: A irradiação horária será calculada com $\beta=8^\circ$, embora a prática de engenharia recomende uma inclinação mínima $\beta=10^\circ$ para efeito de drenagem e menor acúmulo de sujeira nos coletores.

Tabela 7: Posicionamento da incidência da radiação solar em 10 de Dezembro

(do Autor)

10 de Dezembro		
Dia		10
Mês		12
Cor	<i>Cor</i>	4,00
Dia do ano	<i>n</i>	344
Declinação Solar	δ (°)	-23,05
	<i>B</i>	260,11
	<i>E</i>	6,11
	<i>CorHora</i>	0,7679
		-0,0628
Ângulo Horário no Por do Sol	ω_s (°)	93,60
Duração da Insolação	$N = (2/15) \omega_s$	12,48
Hora Solar no Por do Sol	HS_s	18,24
Hora Legal no Por do Sol	HL_s	17,47
Hora Legal no Por do Sol	HL_s (h:m:s)	17:28:19
	$\cos \vartheta_{zs}$	0,0000
	ϑ_{zs}	90,00
		0,3958
Ângulo do Azimute Solar no Por do Sol	γ_{SS}	66,69

Tabela 8: Posicionamento da incidência da radiação solar em 11 de Junho

(do Autor)

11 de Junho		
Dia		11
Mês		6
Cor	<i>Cor</i>	1,00
Dia do ano	<i>n</i>	162
Declinação Solar	δ (°)	23,09
	<i>B</i>	80,11
	<i>E</i>	0,57
	<i>CorHora</i>	0,6755
		0,0629
Ângulo Horário no Por do Sol	ω_s (°)	86,40
Duração da Insolação	$N = (2/15) \omega_s$	11,52
Hora Solar no Por do Sol	HS_s	17,76
Hora Legal no Por do Sol	HL_s	17,08
Hora Legal no Por do Sol	HL_s (h:m:s)	17:05:03
	$\cos \vartheta_{zs}$	0,0000
	ϑ_{zs}	90,00
		-0,3964
Ângulo do Azimute Solar no Por do Sol	γ_{SS}	113,35

Estimativa da Irradiação Horária ($\bar{I}_T$) a partir da Radiação Diária ($\bar{H}_T$):

Radiação solar no Plano Inclinado:

Tabela 9: Irradiação Horária

(adaptada do Cresesb SunData)

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [MJ/m ² .dia]											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Plano Horizontal	0° N	23,62	23,04	21,31	19,37	16,99	15,73	16,45	18,22	21,17	23,08	23,87	23,72
Ângulo igual a latitude	8° N	22,46	22,39	21,31	19,98	18,00	16,85	17,53	19,01	21,46	22,64	22,82	22,39
Maior média anual	5° N	22,93	22,68	21,35	19,80	17,64	16,45	17,17	18,76	21,38	22,86	23,26	22,93
Maior mínimo mensal	26° N	18,86	19,91	20,23	20,30	19,26	18,50	19,08	19,76	20,92	20,52	19,40	18,50

A fração horária da irradiação média é dada por:

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (3.1)$$

Onde:

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (3.2)$$

$$b = 0.6609 + 0.4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (3.3)$$

Tabela 10: Dados de posicionamento solar no dia médio de Dezembro e Junho

(do Autor)

Dezembro

Irradiação solar diária média mensal [MJ/m2]	23,72
a= 0,409 + 0,5016 * sin (ωS -60)	0,6866
b= 0,6609 - 0,4767 * sin (ωS -60)	0,3971

Hora Legal	HL	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
		5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,00
Hora Solar	HS	5,77	6,77	7,77	8,77	9,77	10,77	11,77	12,77	13,77	14,77	15,77	16,77	17,77	18,77
Hora Solar	HS h:m:s	5:46	6:46	7:46	8:46	9:46	10:46	11:46	12:46	13:46	14:46	15:46	16:46	17:46	18:46
Ângulo Horário	ω (°)	-93,48	-78,48	-63,48	-48,48	-33,48	-18,48	-3,48	11,52	26,52	41,52	56,52	71,52	86,52	101,52
	cos θz	0,00	0,24	0,46	0,66	0,82	0,92	0,97	0,95	0,87	0,74	0,56	0,35	0,11	-0,12
Ângulo Zenital	θz	89,89	76,18	62,38	48,66	35,28	23,00	15,04	18,36	29,35	42,38	55,99	69,77	83,55	97,16
	cos θ	-0,05	0,29	0,50	0,70	0,85	0,95	0,99	0,98	0,90	0,77	0,60	0,39	0,16	-0,07
Ângulo de Incidência (face N)	θ	93,05	73,34	59,69	45,92	32,14	18,61	7,42	12,72	25,79	39,52	53,31	67,03	80,56	93,77
	cos γs	0,40	0,37	0,37	0,40	0,48	0,67	0,98	0,81	0,55	0,43	0,38	0,37	0,38	0,42
Ângulo do Azimute Solar	γS	-66,70	-68,21	-68,32	-66,59	-61,52	-48,29	-12,44	35,69	56,96	64,82	67,80	68,44	67,57	65,33

Junho

Irradiação solar diária média mensal [MJ/m2]	15,73
a= 0,409 + 0,5016 * sin (ωS -60)	0,6320
b= 0,6609 - 0,4767 * sin (ωS -60)	0,4490

Hora Legal	HL	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
		5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,00
Hora Solar	HS	5,68	6,68	7,68	8,68	9,68	10,68	11,68	12,68	13,68	14,68	15,68	16,68	17,68	18,68
Hora Solar	HS h:m:s	5:40	6:40	7:40	8:40	9:40	10:40	11:40	12:40	13:40	14:40	15:40	16:40	17:40	18:40
Ângulo Horário	ω (°)	-94,87	-79,87	-64,87	-49,87	-34,87	-19,87	-4,87	10,13	25,13	40,13	55,13	70,13	85,13	100,13
	cos θz	-0,13	0,10	0,33	0,53	0,69	0,80	0,85	0,84	0,77	0,64	0,46	0,25	0,02	-0,22
Ângulo Zenital	θz	97,73	84,09	70,77	58,04	46,41	36,99	31,83	33,00	39,94	50,31	62,42	75,40	88,85	102,55
	cos θ	-0,08	0,04	0,26	0,46	0,61	0,72	0,77	0,76	0,69	0,56	0,39	0,19	-0,04	-0,27
Ângulo de Incidência (face N)	θ	94,63	87,44	74,68	62,73	52,16	44,00	39,76	40,70	46,50	55,66	66,80	79,09	92,05	105,42
	cos γs	-0,38	-0,41	-0,47	-0,56	-0,69	-0,85	-0,99	-0,95	-0,79	-0,64	-0,52	-0,45	-0,40	-0,37
Ângulo do Azimute Solar	γS	-112,33	-114,44	-118,11	-124,00	-133,44	-148,70	-171,49	162,71	142,51	129,60	121,62	116,62	113,54	111,91

Irradiação Horária em função da fração r_t

$$r_t = \frac{I}{H} \quad (3.4)$$

Fração da radiação média diária mensal sobre uma superfície inclinada fixa (Liu e Jordan) ($\bar{R}$) ($\beta = 8^\circ$):

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} \quad (3.5)$$

Dezembro:

$$\bar{R} = \frac{22,39}{23,72} = 0,944$$

Junho:

$$\bar{R} = \frac{16,85}{15,73} = 1,071$$

Irradiação Horária no Plano Inclinado (I_T):

$$R = \frac{I_T}{I} \quad (3.6)$$

Dezembro

Tabela 11: Irradiação Horária no Plano Inclinado para Dezembro

Hora Legal	HL	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
Fração Horária da Radiação Total	r_T	0,0002	0,0239	0,0523	0,0820	0,1086	0,1279	0,1367	0,1334	0,1187	0,0950	0,0662	0,0367	0,0104	-0,0099
Irradiação Horária no Plano Horizontal [MJ/m ²]	I	0,0038	0,5671	1,2413	1,9447	2,5756	3,0336	3,2419	3,1647	2,8152	2,2530	1,5702	0,8706	0,2477	-0,2346
Irradiação Horária no Plano Horizontal [kWh/m ²]	I	0,0010	0,1575	0,3448	0,5402	0,7154	0,8427	0,9005	0,8791	0,7820	0,6258	0,4362	0,2418	0,0688	-0,0652
Fração da Radiação Média no Plano inclinado	$\bar{R}$	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944	0,944
Irradiação Horária no Plano Inclinado [MJ/m ²]	I_T	0,0036	0,5353	1,1716	1,8355	2,4310	2,8633	3,0599	2,9870	2,6571	2,1265	1,4820	0,8217	0,2337	-0,2214
Irradiação Horária no Plano Inclinado [kWh/m ²]	I_T	0,0010	0,1487	0,3254	0,5099	0,6753	0,7954	0,8500	0,8297	0,7381	0,5907	0,4117	0,2283	0,0649	-0,0615

Junho

Tabela 12: Irradiação Horária no Plano Inclinado para Junho

Hora Legal	HL	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
Fração Horária da Radiação Total	r_T	-0,0127	0,0116	0,0431	0,0777	0,1098	0,1341	0,1460	0,1434	0,1268	0,0992	0,0655	0,0315	0,0021	-0,0191
Irradiação Horária no Plano Horizontal [MJ/m ²]	I	-0,2000	0,1833	0,6787	1,2220	1,7279	2,1095	2,2973	2,2565	1,9947	1,5602	1,0309	0,4955	0,0336	-0,3011
Irradiação Horária no Plano Horizontal [kWh/m ²]	I	-0,0556	0,0509	0,1885	0,3394	0,4800	0,5860	0,6381	0,6268	0,5541	0,4334	0,2864	0,1376	0,0093	-0,0836
Fração da Radiação Média no Plano inclinado	$\bar{R}$	1,071	1,071	1,071	1,071	1,071	1,071	1,071	1,071	1,071	1,071	1,071	1,071	1,071	1,071
Irradiação Horária no Plano Inclinado [MJ/m ²]	I_T	-0,2142	0,1963	0,7268	1,3086	1,8505	2,2591	2,4603	2,4165	2,1362	1,6709	1,1041	0,5306	0,0360	-0,3224
Irradiação Horária no Plano Inclinado [kWh/m ²]	I_T	-0,0595	0,0545	0,2019	0,3635	0,5140	0,6275	0,6834	0,6713	0,5934	0,4641	0,3067	0,1474	0,0100	-0,0896

Irradiação Horária no Plano Inclinado hora a hora, ao longo do ano:

Tabela 13: Irradiação Horária no Plano Inclinado hora a hora ($\theta = 8^\circ$)

(do Autor)

Irradiação Horária no Plano Inclinado hora a hora [Wh/m2]														
	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
JANEIRO	0	102	273	458	632	767	841	841	768	632	459	273	102	0
FEVEREIRO	0	78	246	431	608	748	827	833	764	632	459	274	102	0
MARÇO	0	73	234	411	578	709	780	779	707	575	407	230	70	0
ABRIL	0	74	228	395	551	667	725	714	635	503	341	176	30	0
MAIO	0	64	204	355	494	598	647	632	556	434	286	137	9	0
JUNHO	0	55	202	364	514	628	683	671	593	464	307	147	10	0
JULHO	0	40	172	320	460	568	625	621	556	442	299	153	23	0
AGOSTO	0	57	202	361	511	625	685	678	606	483	329	171	31	0
SETEMBRO	0	104	272	451	613	732	787	767	677	533	358	182	29	0
OUTUBRO	1	154	335	521	686	800	845	813	709	552	367	183	24	0
NOVEMBRO	14	169	352	539	703	818	862	830	727	570	384	199	38	0
DEZEMBRO	1	149	325	510	675	795	850	830	738	591	412	228	65	0

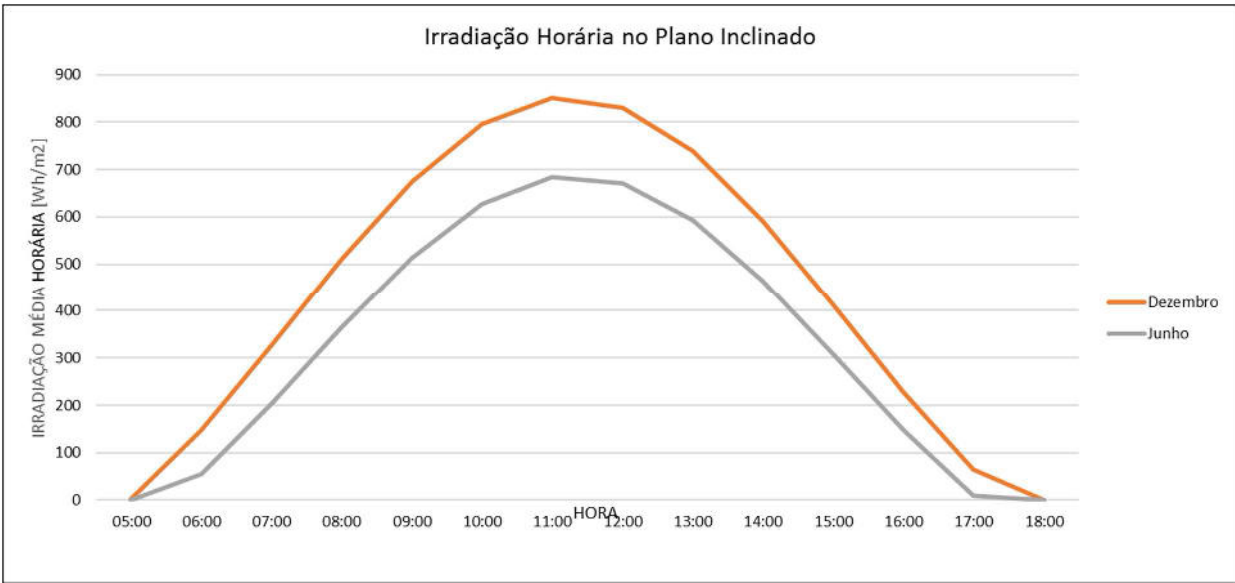


Figura 30: Curva de Irradiação Horária no Plano Inclinado hora a hora ($\theta = 8^\circ$)

(do Autor)

3.3. SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO POR ABSORÇÃO ACIONADO POR ÁGUA QUENTE

Como foi exposto anteriormente, os sistemas de refrigeração por absorção mais utilizados são os de Água-Amônia e os de Brometo de Lítio-Água. Para uso em climatização, onde não são necessárias temperaturas abaixo de 0°C, é utilizado o sistema de Brometo de Lítio-Água. Este sistema tem a limitação intrínseca de temperatura na faixa de 5°C por utilizar a água como fluido refrigerante.

Os Chillers de absorção de Brometo de Lítio-Água comercialmente difundidos são os de simples e de duplo efeito, embora já exista o de triplo efeito para aplicações mais exigentes. A faixa de temperatura da fonte quente em um sistema de simples efeito é de 80 a 110°C com um COP de 0,7 a próximo de 1,0, enquanto para o sistema de duplo efeito é de 120 a 150°C com COP entre 1,2 a 1,5. Neste estudo foi selecionado um Chiller de simples efeito, acionado por água quente, cujas características estão mostradas na Tabela 14.

Este estudo apresentou um comparativo de viabilidade técnico-econômica entre os sistemas de refrigeração por ciclos de compressão de gás e de absorção. Para tanto, foi selecionado um modelo de 500 TR, escolhido nesta capacidade por se tratar de um modelo de intermediário e de grande difusão no mercado. As características operacionais estão mostradas na Tabela 15.

O fluido de trabalho nesta aplicação é água pura, pois o sistema vai operar em temperaturas abaixo de 100°C, e em localidade onde a temperatura média anual raramente é menor do que 15°C, o que dispensa a utilização de aditivos como anticongelantes.

Dados de entrada para definição da carga térmica da fonte de calor

Chiller de Absorção de Simples Efeito, acionado por água quente, capacidade de 500 TRs.

Tabela 14:: Dados de Operação do Chiller de Absorção de Simples Efeito

(Catálogo LG, 2014)

Absorption chiller application

	Energy	Available	Model Selection			(Example) Application
			Efficiency	Model	Remark	
Chiller	Gas or Oil	LNG	COP 1.51	WCDH	World class high efficiency	Commercial area Multipurpose building Thermoelectric power plant
		LPG	COP 1.34	WCDN	Enhanced stability & reliability	
		Bio-Gas Exhaust gas Oil	COP 1.12	WCDS	Steady best selling model	
	Steam	Steam pressure 4-8kg/cm ²	COP 1.50 Consumption (3.5 kg/hRT)	WCSH	World Class High Efficiency Steam Pressure : 4 - 8kg/cm ²	Commercial area Multipurpose building Petroleum and Chemical Factory
			COP 1.21 Consumption (4.4 kg/hRT)	WCSS	Steady Best Selling Model Steam Pressure : 4 - 8kg/cm ²	
			COP 0.80	WCMH	World Class High Efficiency Outlet Temp. : 85 - 75°C	
	Hot Water	Inlet Temperature Standard 95°C (130 -85°C)	COP 0.72	WCMW	Steady Best Selling Model Outlet Temp. : 85 - 70°C	Solar system District energy system Cogeneration
			COP 0.74	WC2H	Low Temperature outlet Outlet Temp. : 70 - 55°C	
Heat pump	Waste heating Source	Gas Steam Hot water	COP 1.65-1.80	WCPX	World Class High Efficiency Hot water Temp. : 55 - 90°C	Combined Heat and Power Incinerator system

Tabela 15: Dados de Operação do Chiller de Absorção de Simples Efeito

(Catálogo LG, 2014)

Hot water fired absorption chiller

Model name (WCMW)			054	060		067		074		
Cooling capacity		RT	500	540	565	600	631	670	697	740
		kW	1,790	1,899	1,987	2,110	2,219	2,356	2,451	2,602
Chilled water data	Temperature	°C	12-7	13-8	12-7	13-8	12-7	13-8	12-7	13-8
	Water flow rate	m³/h	307.6	326.6	341.7	362.9	381.6	405.2	421.5	447.6
	Pressure drop	mAq	6.0	6.8	8.0	9.0	10.6	11.9	7.9	8.9
	Connection size	A(mm)	200	200	200	200	200	200	250	250
		B(inch)	8	8	8	8	8	8	10	10
Cooling water data	Temperature	°C		31 → 36.5						
	Water flow rate	m³/h	672.9	709.3	747.6	788.1	834.9	880	922.1	972
	Pressure drop	mAq	5.9	6.6	7.7	8.5	10	11.1	6.2	6.9
	Connection size	A(mm)	350	350	350	350	350	350	400	400
		B(inch)	14	14	14	14	14	14	16	16
Hot water circuit	Temperature	°C		95 → 80						
	Water flow rate	ton/h	144.2	151.2	160.2	168	178.9	187.6	197.6	207.2
	Pressure drop	mAq	2.5	2.8	3.4	3.7	4.5	4.9	1.3	1.4
	Connection size	A(mm)	200	200	200	200	200	200	200	200
		B(inch)	8	8	8	8	8	8	8	8
	Connection size of Control valve	A(mm)	150	150	150	150	150	150	200	200
		B(inch)	6	6	6	6	6	6	8	8

Capacidade de Refrigeração: 500 TR

Temperatura de Entrada da Água: 95°C

Temperatura de Saída da Água: 75°C

Delta T: 20°C

Vazão de Água Quente: 144,2 ton/h

Potência Térmica Requerida do Sistema:

$$P = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.7)$$

$$P = 144.000 \cdot 1 \cdot (95 - 75)$$

$$P = 2.884.000 \text{ kcal/h}$$

$$P = 3.352 \text{ kW}$$

P: Potência

m: Massa

c_p: Calor específico da água

ΔT: Diferencial de temperatura

Esquemático de Funcionamento do Sistema de Climatização Solar

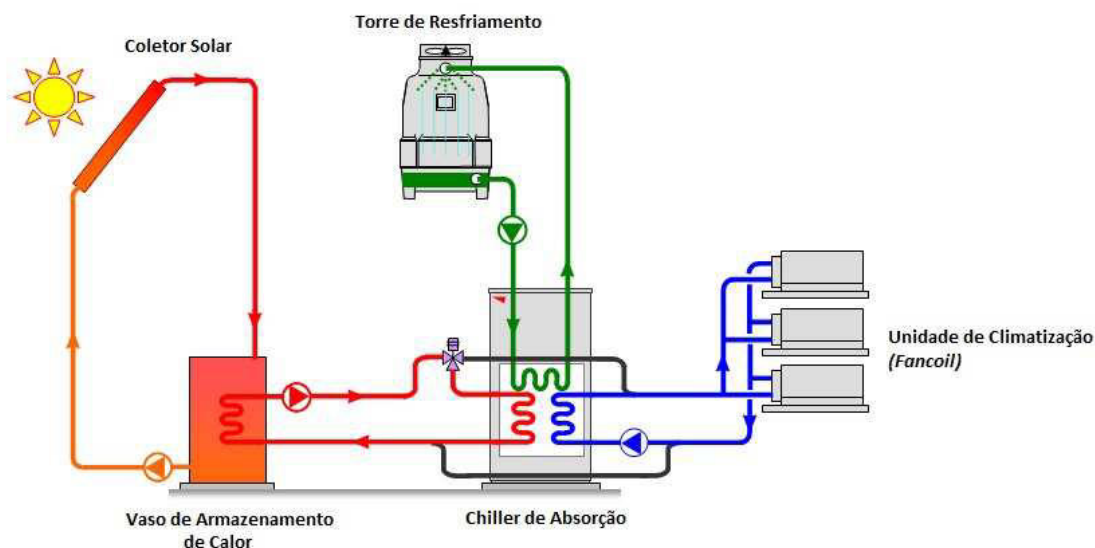


Figura 31: Esquemático de Funcionamento do Sistema de Climatização Solar

(<http://firstcontest.studentaward-middleeast.com/idea.php?id=376>)

Este trabalho aborda unicamente o sistema primário – o circuito que compreende os coletores solares e o armazenamento de calor. Os circuitos de água gelada e de água de resfriamento não são abordados.

Alimentação dos Chillers é feita por intermédio de um tanque de armazenamento com a função de tanque pulmão para homogeneização da temperatura entre os dois circuitos, além de reserva de energia para período de baixa insolação.

Por recomendação prática de engenharia, considerou-se um adicional de 3°C na saída dos coletores solares para a entrega do fluido de trabalho ao reservatório:

Energia Térmica Útil Horária Requerida do Sistema:

$$Q_U = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.8)$$

$$Q_U = 144.000 \cdot 1 \cdot (98 - 75)$$

$$Q_U = 3.316.600 \text{ kcal}$$

$$Q_U = 3.855 \text{ kWh}$$

Q_U : Energia Útil

m : Massa

c_p : Calor específico da água

ΔT : Diferencial de temperatura

3.4. SELEÇÃO E DESEMPENHO DOS COLETORES SOLARES

Para aplicações com temperatura de fluido na faixa 100°C é possível utilizar coletores não-concentradores. Estes coletores apresentam boas vantagens como o aproveitamento de radiação direta e difusa, bom rendimento a um custo relativamente baixo e baixa manutenção.

Inicialmente três tipos de coletores foram selecionados para determinar o melhor equipamento para esta aplicação:

1.) **Coletor Solar Plano vidro simples** antirefletivo, absorvedor em alumínio com superfície seletiva, conforme mostrado na Tabela 16:

Tabela 16: Coletores Solares Inmetro 2015

MODELO	PRESSÃO DE FUNCIONAMENTO		ÁREA EXTERNA DO COLETOR	PRODUÇÃO MÉDIA MENSAL DE ENERGIA		EFICIÊNCIA ENERGÉTICA MÉDIA	CLASSIFICAÇÃO	MATERIAL SUPERFÍCIE ABSORVEDORA	Fr(τ _α) _N	FrUL
				Por Coletor	Por m ² (Específica)					
	(kPa)	(mca)	(m ²)	(kWh/mês)	(kWh/mês.m ²)	(%)				
PRO - SOL TEC 1.9 V	400,0	40,8	1,91	171,4	89,7	64,0	A	ALUMÍNIO	0,73	3,41

FR(τ_α)_N: 0,730

FRUL: 3,41

2.) **Coletor Solar Plano vidro duplo** antirefletivo com enchimento de gás inerte, absorvedor em alumínio com superfície seletiva:

η = 0,8

A1a = 2,4 W/m²K

A2a = 0,015 W/m²K²

3.) **Coletor Solar de Tubo Evacuado**, heat-pipe em “U” em cobre com absorvedor em alumínio.

η = 0,779

A1a = 2,103 W/m²K

A2a = 0,0107 W/m²K²

O desempenho dos coletores é encontrado através das fórmulas:

Para o coletor 1.):

$$\eta = Fr(\tau\alpha)N - Fr.UL \frac{(T_{fi} - T_a)}{G_T} \quad (3.9)$$

Para os coletores 2.) e 3.):

$$\eta_i = F'(\tau\alpha) - a \frac{\Delta T_m}{G_T} - b \frac{\Delta T_m^2}{G_T} \quad (3.10)$$

Nota: Os símbolos η , a_1 e a_2 são normalmente substituídos por $F'(\tau\alpha)$, a e b .

DESEMPENHO DOS COLETORES

Dados de desempenho dos coletores com base na irradiação média mensal.

Nota: Neste caso foi considerada água pura como fluido de trabalho, embora em condição real seja recomendado o uso de aditivos como glicóis para aumentar o ponto de ebulição, uma vez que o sistema opera perto do limite.

Dezembro

Temperatura Ambiente Média: 26,4°C

Irradiação Horária Média Mensal no plano inclinado ($\bar{I}_T$): 498 Wh/m²

$$\bar{I}_T = \frac{\overline{H_T}}{N} \quad (3.11)$$

$\bar{I}_T$: Irradiação média horária

$\overline{H_T}$: Irradiação média mensal

N : Horas de Insolação

Tabela 17: Rendimento dos coletores planos por irradiação média mensal, por faixa de temperatura

Rendimento - Dezembro			
T (°C)	Plano Vidro Duplo	Tubo Evacuado	Plano Vidro Simples
30	0,78	0,76	0,74
35	0,76	0,74	0,71
40	0,73	0,72	0,67
45	0,70	0,69	0,64
50	0,67	0,67	0,60
55	0,64	0,64	0,57
60	0,60	0,61	0,53
65	0,57	0,58	0,50
70	0,53	0,55	0,47
75	0,49	0,52	0,43
80	0,46	0,49	0,40
85	0,41	0,46	0,36
90	0,37	0,42	0,33
95	0,33	0,39	0,29
98	0,30	0,37	0,26

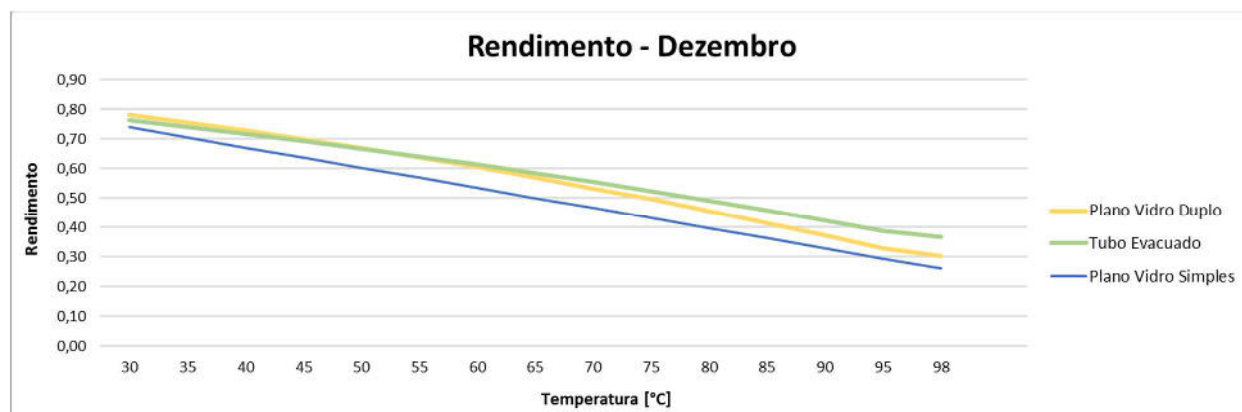


Figura 32: Curva de dos coletores com base na irradiação média mensal - Dezembro

Junho

Temperatura Ambiente Média: 24,5°C

Irradiação Horária Média Mensal no plano inclinado ($\bar{I}_T$): 406 Wh/m²

Tabela 18: Rendimento dos coletores planos por irradiação média mensal, por faixa de temperatura

Rendimento - Junho			
T (°C)	Plano Vidro Duplo	Tubo Evacuado	Plano Vidro Simples
30	0,77	0,75	0,73
35	0,73	0,72	0,68
40	0,70	0,69	0,64
45	0,66	0,66	0,60
50	0,63	0,63	0,56
55	0,59	0,60	0,52
60	0,54	0,56	0,47
65	0,50	0,53	0,43
70	0,45	0,49	0,39
75	0,41	0,45	0,35
80	0,36	0,41	0,31
85	0,31	0,37	0,26
90	0,25	0,33	0,22
95	0,20	0,28	0,18
98	0,17	0,26	0,14

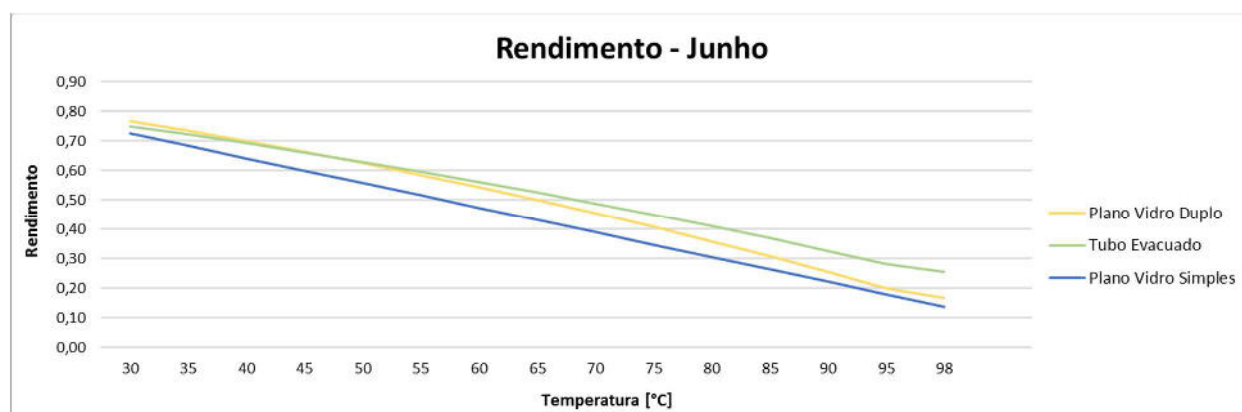


Figura 33: Desempenho dos coletores com base na irradiação média mensal – Junho

(do Autor)

RENDIMENTO DO COLETOR SOLAR

Com base na variação da temperatura ao longo dia, supôs-se a distribuição horária:

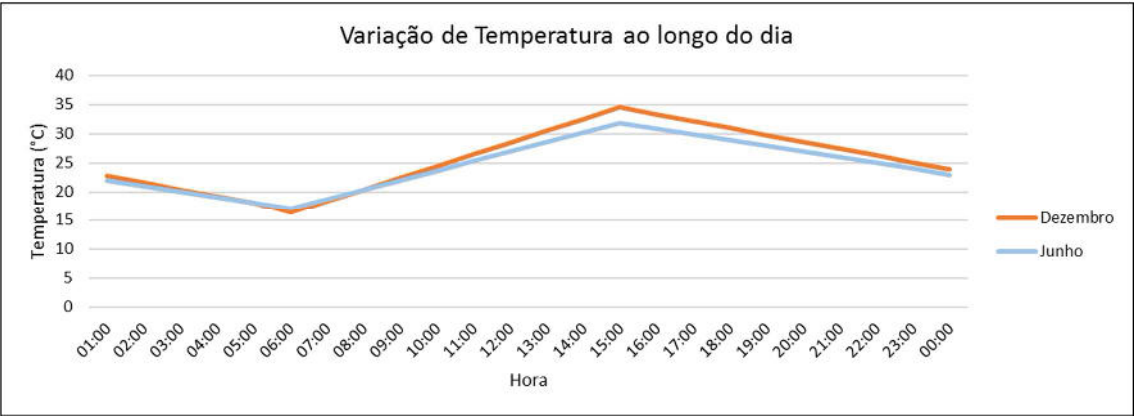


Figura 34 Variação de Temperatura ao longo do dia

(do Autor)

Com base na irradiação e temperatura ambiente horária, podemos determinar o rendimento horário do coletor em cada faixa de temperatura:

Rendimento horário do coletor plano, por faixa de temperatura ($\beta = 8^\circ$)

Dezembro

Tabela 19: Rendimento horário do coletor solar, por faixa de temperatura, em Dezembro, $\beta=8^\circ$

(do Autor)

DEZEMBRO														
Irradiação Horária [Wh/m2]	1,0	148,7	325,4	509,9	675,3	795,4	850,0	829,7	738,1	590,7	411,7	228,3	64,9	-61,5
Temperatura Ambiente [°C]	18,1	16,4	18,4	20,4	22,4	24,4	26,5	28,5	30,5	32,5	34,5	33,3	32,2	31,0
Temperatura da Placa [°C]	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
25	0,0	0,65	0,75	0,78	0,79	0,80	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,83	0,79	0,00
30	0,0	0,56	0,71	0,75	0,77	0,78	0,79	0,80	0,80	0,81	0,83	0,81	0,88	0,00
35	0,0	0,46	0,66	0,73	0,75	0,77	0,77	0,78	0,78	0,79	0,80	0,78	0,69	0,00
40	0,0	0,36	0,62	0,70	0,73	0,75	0,76	0,76	0,77	0,77	0,77	0,73	0,50	0,00
45	0,0	0,26	0,57	0,67	0,71	0,73	0,74	0,75	0,75	0,75	0,73	0,67	0,29	0,00
50	0,0	0,14	0,52	0,64	0,69	0,71	0,72	0,73	0,73	0,72	0,70	0,61	0,07	0,00
55	0,0	0,03	0,47	0,60	0,66	0,69	0,71	0,71	0,71	0,70	0,67	0,54	0,00	0,00
60	0,0	0,00	0,41	0,57	0,64	0,67	0,69	0,69	0,69	0,67	0,63	0,47	0,00	0,00
65	0,0	0,00	0,36	0,53	0,61	0,65	0,66	0,67	0,66	0,64	0,59	0,40	0,00	0,00
70	0,0	0,00	0,30	0,49	0,58	0,62	0,64	0,65	0,64	0,61	0,55	0,33	0,00	0,00
75	0,0	0,00	0,24	0,46	0,55	0,60	0,62	0,63	0,61	0,58	0,50	0,25	0,00	0,00
80	0,0	0,00	0,17	0,42	0,52	0,57	0,60	0,60	0,59	0,55	0,46	0,17	0,00	0,00
85	0,0	0,00	0,10	0,37	0,49	0,55	0,57	0,58	0,56	0,52	0,41	0,08	0,00	0,00
90	0,0	0,00	0,04	0,33	0,46	0,52	0,55	0,55	0,53	0,48	0,36	0,00	0,00	0,00
95	0,0	0,00	0,00	0,29	0,43	0,49	0,52	0,53	0,51	0,45	0,31	0,00	0,00	0,00
98	0,0	0,00	0,00	0,26	0,40	0,48	0,51	0,51	0,49	0,42	0,28	0,00	0,00	0,00

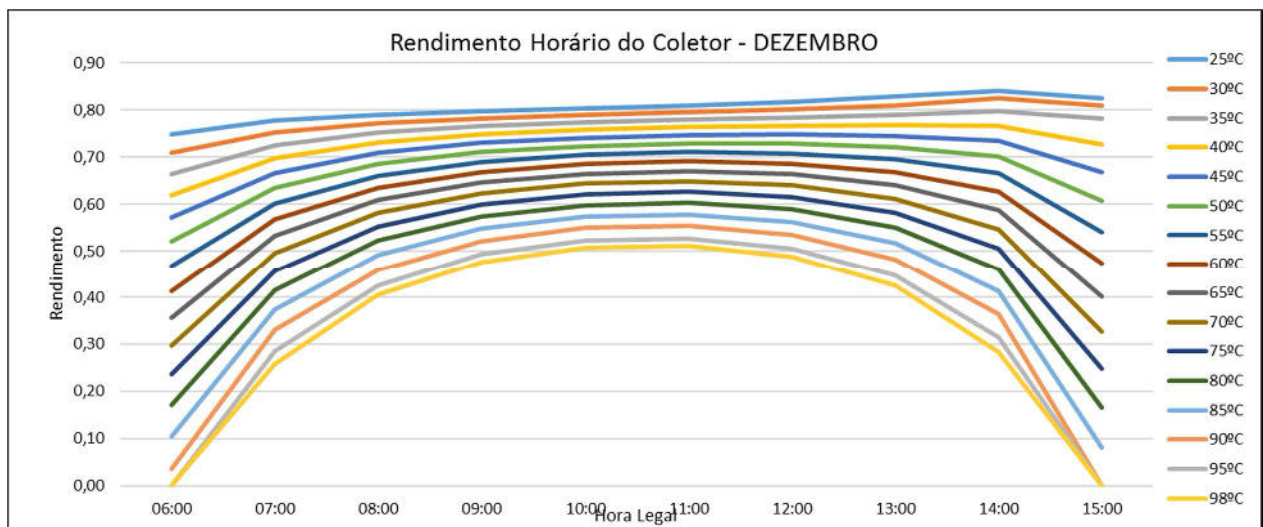


Figura 35: Rendimento do coletor solar ao longo do dia, por faixa de temperatura

(do Autor)

Irradiação média horária: 474,5 Wh/m²

Irradiação total diária: 6.169 Wh/m²

A energia útil horária Q_u é o produto da irradiação horária I_T pelo rendimento horário:

Tabela 20: Energia útil total e horária em Dezembro, $\theta=8^\circ$

(do Autor)

	Energia Útil Horária - Q_u [Wh/m ²]														Energia útil total diária [Wh/m ²]	Energia útil média horária [W/m ²]	Área de coleta requerida [m ²]
T [°C]	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00			
25	0,0	97,2	243,9	396,6	533,9	634,9	683,4	671,9	603,2	489,7	345,8	188,3	51,3	0,0	4940,1	548,9	
30	0,0	83,5	230,5	383,5	521,2	622,5	671,3	660,0	591,6	478,4	339,8	184,9	57,0	0,0	4824,4	536,0	
35	0,0	69,1	216,4	369,7	507,7	609,3	658,4	647,4	579,3	466,4	328,1	178,6	45,0	0,0	4675,4	519,5	
40	0,0	54,0	201,6	355,1	493,4	595,3	644,7	634,1	566,2	453,7	315,7	165,9	32,2	0,0	4511,9	501,3	
45	0,0	38,0	185,9	339,8	478,4	580,6	630,3	620,0	552,4	440,2	302,5	152,6	18,6	0,0	4339,4	482,2	
50	0,0	21,4	169,6	323,8	462,6	565,1	615,1	605,1	537,9	425,9	288,5	138,4	4,3	0,0	4157,9	462,0	
55	0,0	4,0	152,5	307,0	446,1	548,9	599,2	589,5	522,6	410,9	273,8	123,5	0,0	0,0	3978,1	442,0	
60	0,0	0,0	134,6	289,4	428,9	532,0	582,6	573,2	506,5	395,1	258,4	107,9	0,0	0,0	3808,6	423,2	
65	0,0	0,0	116,0	271,1	410,9	514,3	565,2	556,0	489,7	378,6	242,2	91,5	0,0	0,0	3635,5	403,9	
70	0,0	0,0	96,6	252,0	392,1	495,8	547,0	538,2	472,2	361,4	225,2	74,4	0,0	0,0	3455,0	383,9	
75	0,0	0,0	76,5	232,2	372,6	476,6	528,1	519,6	453,9	343,4	207,5	56,5	0,0	0,0	3266,9	363,0	10619
80	0,0	0,0	55,6	211,7	352,3	456,6	508,4	500,2	434,8	324,6	189,1	37,9	0,0	0,0	3071,4	341,3	11295
85	0,0	0,0	34,0	190,3	331,3	435,9	488,0	480,1	415,0	305,1	169,9	18,5	0,0	0,0	2868,3	318,7	12095
90	0,0	0,0	11,7	168,3	309,6	414,5	466,9	459,3	394,4	284,9	149,9	0,0	0,0	0,0	2659,4	295,5	13045
95	0,0	0,0	0,0	145,5	287,1	392,3	445,0	437,7	373,1	263,9	129,2	0,0	0,0	0,0	2473,7	274,9	14024
98	0,0	0,0	0,0	131,4	273,2	378,6	431,5	424,3	360,0	250,9	116,5	0,0	0,0	0,0	2366,4	262,9	14660
Média															2784,3	309,4	12460

Junho

Tabela 21: Rendimento horário do coletor solar, por faixa de temperatura, em Junho, $\theta=8^\circ$

(do Autor)

JUNHO														
Irradiação Horária [Wh/m2]	-59,5	54,5	201,9	363,5	514,0	627,5	683,4	671,3	593,4	464,1	306,7	147,4	10,0	-89,6
Temperatura Ambiente [°C]	18,1	17,1	18,7	20,4	22,0	23,7	25,3	26,9	28,6	30,2	31,9	30,9	29,9	28,9
Temperatura da Placa [°C]	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
25	0,0	0,44	0,72	0,77	0,79	0,79	0,80	0,81	0,81	0,83	0,82	0,81	0,80	0,00
30	0,0	0,19	0,66	0,73	0,76	0,77	0,78	0,79	0,79	0,80	0,80	0,79	0,78	0,00
35	0,0	0,00	0,59	0,69	0,73	0,75	0,76	0,77	0,77	0,77	0,78	0,73	0,00	0,00
40	0,0	0,00	0,51	0,65	0,71	0,73	0,74	0,75	0,75	0,75	0,73	0,64	0,00	0,00
45	0,0	0,00	0,44	0,61	0,68	0,71	0,72	0,73	0,73	0,72	0,69	0,55	0,00	0,00
50	0,0	0,00	0,36	0,57	0,65	0,68	0,70	0,71	0,70	0,69	0,64	0,45	0,00	0,00
55	0,0	0,00	0,27	0,52	0,61	0,66	0,68	0,68	0,68	0,65	0,59	0,35	0,00	0,00
60	0,0	0,00	0,18	0,47	0,58	0,63	0,65	0,66	0,65	0,62	0,54	0,24	0,00	0,00
65	0,0	0,00	0,09	0,42	0,55	0,60	0,63	0,63	0,62	0,58	0,49	0,13	0,00	0,00
70	0,0	0,00	0,00	0,37	0,51	0,57	0,60	0,60	0,59	0,54	0,43	0,01	0,00	0,00
75	0,0	0,00	0,00	0,32	0,47	0,54	0,57	0,58	0,56	0,50	0,37	0,00	0,00	0,00
80	0,0	0,00	0,00	0,26	0,43	0,51	0,54	0,55	0,53	0,46	0,31	0,00	0,00	0,00
85	0,0	0,00	0,00	0,20	0,39	0,48	0,51	0,52	0,49	0,42	0,25	0,00	0,00	0,00
90	0,0	0,00	0,00	0,14	0,35	0,44	0,48	0,49	0,46	0,38	0,18	0,00	0,00	0,00
95	0,0	0,00	0,00	0,08	0,30	0,41	0,45	0,45	0,42	0,33	0,11	0,00	0,00	0,00
98	0,0	0,00	0,00	0,04	0,28	0,38	0,43	0,43	0,40	0,30	0,07	0,00	0,00	0,00

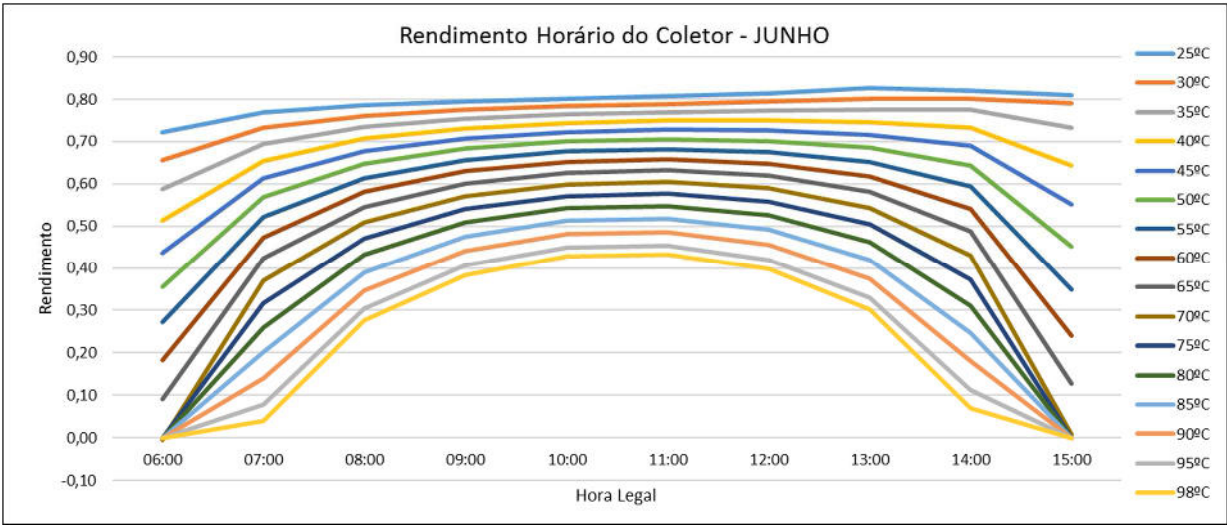


Figura 36: Rendimento do coletor solar ao longo do dia, por faixa de temperatura

(do Autor)

Irradiação média horária: 352,2 Wh/m2

Irradiação total diária: 4.578 Wh/m2

Tabela 22: Energia útil total e horária em Junho, $\theta=8^\circ$

(do Autor)

	Energia Útil Horária - Qu [Wh/m ²]														Energia útil total diária [Wh/m ²]	Energia útil média horária [W/m ²]	Área de coleta requerida [m ²]
T [°C]	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00			
25	0,0	23,7	145,9	279,4	403,9	498,8	547,4	541,6	483,1	383,4	251,5	119,4	8,0	0,0	3686,2	409,6	
30	0,0	10,2	132,6	266,3	391,1	486,2	535,1	529,5	471,3	371,8	245,3	116,4	7,8	0,0	3563,8	396,0	
35	0,0	0,0	118,5	252,5	377,5	472,9	522,0	516,7	458,7	359,5	237,8	107,9	0,0	0,0	3424,0	380,4	
40	0,0	0,0	103,7	237,9	363,2	458,8	508,2	503,1	445,3	346,4	224,9	94,9	0,0	0,0	3286,5	365,2	
45	0,0	0,0	88,2	222,6	348,2	444,0	493,6	488,8	431,2	332,6	211,3	81,1	0,0	0,0	3141,6	349,1	
50	0,0	0,0	71,8	206,6	332,3	428,4	478,3	473,7	416,4	318,0	197,0	66,6	0,0	0,0	2989,1	332,1	
55	0,0	0,0	54,8	189,7	315,8	412,1	462,2	457,9	400,8	302,6	181,9	51,4	0,0	0,0	2829,2	314,4	
60	0,0	0,0	37,0	172,2	298,4	395,0	445,4	441,3	384,5	286,5	166,1	35,4	0,0	0,0	2661,7	295,7	
65	0,0	0,0	18,4	153,9	280,4	377,2	427,8	423,9	367,4	269,7	149,5	18,7	0,0	0,0	2486,8	276,3	
70	0,0	0,0	0,0	134,8	261,5	358,6	409,5	405,9	349,6	252,1	132,1	1,2	0,0	0,0	2305,2	256,1	
75	0,0	0,0	0,0	115,0	242,0	339,3	390,4	387,0	331,0	233,8	114,0	0,0	0,0	0,0	2152,4	239,2	16118
80	0,0	0,0	0,0	94,4	221,6	319,2	370,6	367,4	311,6	214,7	95,2	0,0	0,0	0,0	1994,8	221,6	17391
85	0,0	0,0	0,0	73,1	200,6	298,4	350,0	347,1	291,5	194,8	75,6	0,0	0,0	0,0	1831,1	203,5	18946
90	0,0	0,0	0,0	51,0	178,8	276,8	328,7	326,0	270,7	174,2	55,3	0,0	0,0	0,0	1661,5	184,6	20880
95	0,0	0,0	0,0	28,2	156,2	254,5	306,6	304,2	249,1	152,9	34,2	0,0	0,0	0,0	1485,8	165,1	23349
98	0,0	0,0	0,0	14,1	142,3	240,7	293,0	290,7	235,8	139,7	21,2	0,0	0,0	0,0	1377,5	153,1	25184
Média															1750,5	194,5	19818

3.5. ÁREA DE CAPTAÇÃO SOLAR REQUERIDA

A área de coleta necessária será definida em função da energia útil média na faixa de temperatura a ser suprida ao sistema de climatização, 75 a 98°C.

Dezembro

Rendimento médio horário na faixa de operação:	0,40
Energia útil diária na faixa de operação:	2.784 Wh/m ²
Energia útil horária na faixa de operação:	309,4 Wh/m ²
Área de coleta solar requerida na faixa de operação:	12.460 m ²

Junho

Rendimento médio horário na faixa de operação:	0,39
Energia útil diária na faixa de operação:	1.750 Wh/m ²
Energia útil horária na faixa de operação:	194,5 Wh/m ²
Área de coleta solar requerida na faixa de operação:	19.818 m ²

Nota-se aqui que, embora a diferença de temperatura média na região varie cerca de 2°C entre os meses de referência (24,5°C em Junho e 26,4°C em Dezembro), o que significa uma pequena diferença na variação da carga térmica de calor sensível no sistema de climatização, porém a área coleta solar requerida é 60% maior para o mês de Junho.

A solução imediata para este desequilíbrio no sistema seria mudar a inclinação dos coletores (β), de modo a se obter a distribuição mais nivelada ao longo do ano, ou ainda, o valor de maior mínimo de irradiação média. Segundo nossa fonte de dados do local, o SunData do Cresesb, este valor é obtido com a inclinação dos coletores em 26°:

Tabela 23: Irradiação solar diária média mensal [MJ/m².dia] (adaptada do Cresesb SunData)

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [MJ/m ² .dia]											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Plano Horizontal	0° N	23,62	23,04	21,31	19,37	16,99	15,73	16,45	18,22	21,17	23,08	23,87	23,72
Ângulo igual a latitude	8° N	22,46	22,39	21,31	19,98	18,00	16,85	17,53	19,01	21,46	22,64	22,82	22,39
Maior média anual	5° N	22,93	22,68	21,35	19,80	17,64	16,45	17,17	18,76	21,38	22,86	23,26	22,93
Maior mínimo mensal	26° N	18,86	19,91	20,23	20,30	19,26	18,50	19,08	19,76	20,92	20,52	19,40	18,50

Com os coletores posicionados nesta inclinação, os valores de irradiação média em Junho e Dezembro são próximos, o que permite a seleção de um sistema de coletar solar que trabalhe equilibradamente em todos os meses do ano.

Dezembro

Tabela 24: Rendimento horário do coletor solar, por faixa de temperatura, em Dezembro, $\theta=26^\circ$ (do Autor)

DEZEMBRO															
Irradiação Horária [Wh/m ²]	0,8	122,9	268,9	421,3	558,0	657,3	702,4	685,7	609,9	488,1	340,2	188,6	53,7	-50,8	
Temperatura Ambiente [°C]	18,1	16,4	18,4	20,4	22,4	24,4	26,5	28,5	30,5	32,5	34,5	33,3	32,2	31,0	
Temperatura da Placa [°C]	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	
25	0,0	0,62	0,74	0,77	0,79	0,80	0,80	0,81	0,82	0,83	0,83	0,83	0,81	0,00	
30	0,0	0,51	0,69	0,74	0,77	0,78	0,79	0,79	0,80	0,81	0,82	0,82	0,80	0,00	
35	0,0	0,39	0,64	0,71	0,74	0,76	0,77	0,78	0,78	0,79	0,80	0,78	0,67	0,00	
40	0,0	0,27	0,58	0,67	0,72	0,74	0,75	0,76	0,76	0,76	0,76	0,71	0,43	0,00	
45	0,0	0,14	0,52	0,64	0,69	0,72	0,73	0,74	0,74	0,73	0,72	0,64	0,18	0,00	
50	0,0	0,01	0,46	0,60	0,66	0,69	0,71	0,71	0,71	0,70	0,68	0,57	0,00	0,00	
55	0,0	0,00	0,40	0,56	0,63	0,67	0,69	0,69	0,69	0,67	0,64	0,49	0,00	0,00	
60	0,0	0,00	0,33	0,52	0,60	0,64	0,66	0,67	0,66	0,64	0,59	0,40	0,00	0,00	
65	0,0	0,00	0,26	0,48	0,57	0,61	0,64	0,64	0,63	0,61	0,54	0,32	0,00	0,00	
70	0,0	0,00	0,19	0,43	0,53	0,59	0,61	0,62	0,61	0,57	0,49	0,23	0,00	0,00	
75	0,0	0,00	0,12	0,38	0,50	0,56	0,58	0,59	0,58	0,54	0,44	0,13	0,00	0,00	
80	0,0	0,00	0,04	0,33	0,46	0,53	0,56	0,56	0,54	0,50	0,39	0,03	0,00	0,00	
85	0,0	0,00	0,00	0,28	0,43	0,50	0,53	0,53	0,51	0,46	0,33	0,00	0,00	0,00	
90	0,0	0,00	0,00	0,23	0,39	0,46	0,50	0,50	0,48	0,42	0,27	0,00	0,00	0,00	
95	0,0	0,00	0,00	0,18	0,35	0,43	0,47	0,47	0,44	0,37	0,21	0,00	0,00	0,00	
98	0,0	0,00	0,00	0,14	0,32	0,41	0,45	0,45	0,42	0,35	0,17	0,00	0,00	0,00	

Irradiação média horária: 392,1 Wh/m²

Irradiação total diária: 5.098 Wh/m²

Tabela 25: Energia útil total e horária em Dezembro, $\theta=26^\circ$ (do Autor)

T [°C]	Energia Útil Horária - Qu [Wh/m ²]														Energia útil total diária [Wh/m ²]	Energia útil média horária [W/m ²]	Área de coleta requerida [m ²]
	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00			
25	0,0	76,5	198,7	325,8	440,1	524,5	565,4	556,6	500,6	405,2	282,4	155,6	43,5	0,0	4074,8	452,8	
30	0,0	62,9	185,3	312,7	427,4	512,0	553,2	544,8	489,1	396,4	279,0	153,7	42,9	0,0	3959,3	439,9	
35	0,0	48,5	171,2	298,9	413,9	498,8	540,3	532,2	476,8	384,4	270,5	146,8	36,0	0,0	3818,1	424,2	
40	0,0	33,3	156,3	284,3	399,6	484,8	526,6	518,8	463,7	371,6	258,5	134,2	23,2	0,0	3655,1	406,1	
45	0,0	17,4	140,7	269,0	384,6	470,1	512,2	504,7	449,9	358,1	245,3	120,8	9,6	0,0	3482,6	387,0	
50	0,0	0,7	124,4	252,9	368,8	454,7	497,1	489,9	435,4	343,9	231,4	106,7	0,0	0,0	3305,8	367,3	
55	0,0	0,0	107,3	236,1	352,3	438,5	481,2	474,3	420,0	328,9	216,7	91,8	0,0	0,0	3147,0	349,7	
60	0,0	0,0	89,4	218,6	335,1	421,5	464,5	457,9	404,0	313,1	201,2	76,2	0,0	0,0	2981,5	331,3	
65	0,0	0,0	70,8	200,3	317,1	403,8	447,1	440,8	387,2	296,6	185,0	59,8	0,0	0,0	2808,4	312,0	
70	0,0	0,0	51,4	181,2	298,3	385,3	428,9	422,9	369,6	279,3	168,1	42,7	0,0	0,0	2627,9	292,0	
75	0,0	0,0	31,3	161,4	278,8	366,1	410,0	404,3	351,3	261,3	150,4	24,8	0,0	0,0	2439,8	271,1	14219
80	0,0	0,0	10,4	140,8	258,5	346,2	390,4	385,0	332,3	242,6	131,9	6,2	0,0	0,0	2244,3	249,4	15458
85	0,0	0,0	0,0	119,5	237,5	325,4	370,0	364,9	312,5	223,1	112,7	0,0	0,0	0,0	2065,6	229,5	16795
90	0,0	0,0	0,0	97,5	215,8	304,0	348,8	344,0	291,9	202,8	92,8	0,0	0,0	0,0	1897,5	210,8	18283
95	0,0	0,0	0,0	74,6	193,3	281,8	326,9	322,4	270,6	181,8	72,1	0,0	0,0	0,0	1723,5	191,5	20129
98	0,0	0,0	0,0	60,6	179,4	268,1	313,4	309,1	257,5	168,9	59,3	0,0	0,0	0,0	1616,2	179,6	21465
Média															1997,8	222,0	17365

Junho

Tabela 26: Rendimento horário do coletor solar, por faixa de temperatura, em Junho, $\beta=26^\circ$ (do Autor)

JUNHO														
Irradiação Horária [Wh/m ²]	-65,4	59,9	221,7	399,2	564,6	689,2	750,6	737,2	651,7	509,8	336,8	161,9	11,0	-98,4
Temperatura Ambiente [°C]	18,1	17,1	18,7	20,4	22,0	23,7	25,3	26,9	28,6	30,2	31,9	30,9	29,9	28,9
Temperatura da Placa [°C]	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
25	0,0	0,47	0,73	0,77	0,79	0,80	0,80	0,81	0,81	0,82	0,82	0,81	0,79	0,00
30	0,0	0,24	0,67	0,74	0,76	0,78	0,78	0,79	0,79	0,80	0,80	0,79	0,78	0,00
35	0,0	0,00	0,61	0,70	0,74	0,76	0,77	0,77	0,78	0,78	0,78	0,74	0,00	0,00
40	0,0	0,00	0,54	0,67	0,71	0,74	0,75	0,75	0,75	0,75	0,74	0,66	0,00	0,00
45	0,0	0,00	0,47	0,63	0,69	0,72	0,73	0,73	0,73	0,72	0,70	0,57	0,00	0,00
50	0,0	0,00	0,40	0,59	0,66	0,69	0,71	0,71	0,71	0,70	0,66	0,48	0,00	0,00
55	0,0	0,00	0,32	0,55	0,63	0,67	0,69	0,69	0,69	0,67	0,61	0,39	0,00	0,00
60	0,0	0,00	0,24	0,50	0,60	0,64	0,66	0,67	0,66	0,63	0,56	0,29	0,00	0,00
65	0,0	0,00	0,15	0,46	0,57	0,62	0,64	0,65	0,64	0,60	0,52	0,19	0,00	0,00
70	0,0	0,00	0,07	0,41	0,53	0,59	0,62	0,62	0,61	0,57	0,46	0,08	0,00	0,00
75	0,0	0,00	0,00	0,36	0,50	0,56	0,59	0,60	0,58	0,53	0,41	0,00	0,00	0,00
80	0,0	0,00	0,00	0,31	0,46	0,53	0,57	0,57	0,55	0,49	0,35	0,00	0,00	0,00
85	0,0	0,00	0,00	0,25	0,43	0,50	0,54	0,54	0,52	0,45	0,30	0,00	0,00	0,00
90	0,0	0,00	0,00	0,20	0,39	0,47	0,51	0,51	0,49	0,41	0,24	0,00	0,00	0,00
95	0,0	0,00	0,00	0,14	0,35	0,44	0,48	0,48	0,45	0,37	0,17	0,00	0,00	0,00
98	0,0	0,00	0,00	0,11	0,32	0,42	0,46	0,47	0,43	0,35	0,13	0,00	0,00	0,00

Irradiação média horária: 424,5 Wh/m²

Irradiação total diária: 5.028 Wh/m²

Tabela 27: Energia útil total e horária em Junho, $\beta=26^\circ$ (do Autor)

T [°C]	Energia Útil Horária - Qu [Wh/m ²]														Energia útil total diária [Wh/m ²]	Energia útil média horária [W/m ²]	Área de coleta requerida [m ²]
	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00			
25	0,0	28,0	161,8	308,0	444,4	548,1	601,2	594,4	529,8	419,9	276,2	131,1	8,7	0,0	4051,5	450,2	
30	0,0	14,4	148,5	294,9	431,5	535,5	588,8	582,3	517,9	408,3	269,5	127,9	8,6	0,0	3928,3	436,5	
35	0,0	0,1	134,4	281,1	418,0	522,2	575,8	569,5	505,3	396,0	261,9	119,4	0,0	0,0	3783,7	420,4	
40	0,0	0,0	119,6	266,5	403,6	508,1	561,9	555,9	492,0	382,9	249,0	106,5	0,0	0,0	3646,1	405,1	
45	0,0	0,0	104,0	251,2	388,6	493,3	547,4	541,6	477,9	369,1	235,4	92,7	0,0	0,0	3501,2	389,0	
50	0,0	0,0	87,7	235,1	372,8	477,7	532,0	526,5	463,1	354,5	221,1	78,2	0,0	0,0	3348,7	372,1	
55	0,0	0,0	70,7	218,3	356,2	461,4	515,9	510,6	447,5	339,1	206,0	63,0	0,0	0,0	3188,8	354,3	
60	0,0	0,0	52,8	200,8	338,9	444,3	499,1	494,1	431,1	323,0	190,2	47,0	0,0	0,0	3021,3	335,7	
65	0,0	0,0	34,3	182,4	320,8	426,5	481,5	476,7	414,1	306,2	173,6	30,3	0,0	0,0	2846,4	316,3	
70	0,0	0,0	15,0	163,4	302,0	407,9	463,2	458,6	396,2	288,6	156,2	12,8	0,0	0,0	2663,9	296,0	
75	0,0	0,0	0,0	143,6	282,4	388,6	444,1	439,8	377,6	270,3	138,2	0,0	0,0	0,0	2484,5	276,1	
80	0,0	0,0	0,0	123,0	262,1	368,5	424,3	420,2	358,3	251,2	119,3	0,0	0,0	0,0	2326,9	258,5	
85	0,0	0,0	0,0	101,7	241,0	347,7	403,7	399,9	338,2	231,3	99,7	0,0	0,0	0,0	2163,2	240,4	
90	0,0	0,0	0,0	79,6	219,2	326,1	382,4	378,8	317,4	210,7	79,4	0,0	0,0	0,0	1993,6	221,5	
95	0,0	0,0	0,0	56,8	196,6	303,8	360,3	357,0	295,8	189,4	58,3	0,0	0,0	0,0	1817,9	202,0	
98	0,0	0,0	0,0	42,7	182,7	290,1	346,7	343,5	282,5	176,2	45,3	0,0	0,0	0,0	1709,7	190,0	
Média															2082,6	231,4	16657

Dezembro

Rendimento médio horário na faixa de operação:	0,40
Energia útil diária na faixa de operação:	1.998 Wh/m ²
Energia útil horária na faixa de operação:	222 Wh/m ²
Área de coleta solar requerida na faixa de operação:	17.365 m ²

Junho

Rendimento médio horário na faixa de operação:	0,42
Energia útil diária na faixa de operação:	2082 Wh/m ²
Energia útil horária na faixa de operação:	231,4 Wh/m ²
Área de coleta solar requerida na faixa de operação:	16.657 m ²

Será selecionada a área de coleta maior, que é a referente ao mês de Dezembro.

Para efeito de dimensionamento do sistema, serão selecionados os coletores padrão de 2,13m².

Portanto:

Área de coleta solar requerida: 17.365 m²

Área útil do coletor solar: 2,13 m²

Quantidade de Coletores:

$$N = \frac{A_R}{A_C} \quad (3.12)$$

$$N = \frac{17.365}{2,13} = 8.153$$

Total : 8.153 unidades

4. COMPARATIVO DE TECNOLOGIAS E CUSTOS

O levantamento de custos foi feito com base em preços de mercado dos equipamentos e da tarifa elétrica vigente no estado de Pernambuco.

O dimensionamento do sistema de coleta solar foi feito utilizando os dados de ensaio de coletores planos de vidro duplo importados, porém no levantamento de custos foi utilizado o preço do coletor nacional, uma vez que seu desempenho é semelhante e está disponível no mercado nacional.

Os Chillers selecionados são os da linha de entrada para esta aplicação, não se tratando de modelos de alto desempenho, porém de menor custo.

Tabela 28: Dados de Operação do Chiller de Compressão com Acionamento Elétrico

(Catálogo LG, 2014)

| RCWF Series (Single Stage) |

	ITEM	MEASURE	RCWF025P	RCWF030P	RCWF035P	RCWF040P	RCWF050P	RCWF055P	RCWF060P
General Unit Data	Unit Capacity	usRT	250	300	350	400	500	550	600
	Input Power	kW	178.25	208.2	240.8	265.2	347	365.75	399
	kW/RT		0.713	0.694	0.688	0.663	0.694	0.665	0.665
	COP		4.93	5.07	5.11	5.30	5.07	5.29	5.29
	Refrigerant Charge, R-134a	kg	450	450	450	450	550	550	550
	Shipping Weight	kg	5,200	6,100	6,900	7,700	8,500	9,200	9,700
	Operating Weight	kg	6,200	7,100	8,000	8,300	9,900	10,700	11,700
Compressors	Compressor Type		Single Stage Centrifugal Compressor						
	Compressor No.	EA	1	1	1	1	1	1	1
	Power	Ph / V / Hz	3 Phase / 3,300V / 60Hz						
	Oil Pump Power	Ph / V / Hz	3 Phase / 220V, 380V, 440V / 60Hz						
Condenser	Maximum Water Side Pressure	MPa	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Maximum Refrigerant Side Pressure	MPa	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Water Connections	KS Flange(mm)	150	200	200	200	200	200	200
	Water Flow Rate	m ³ /hr	182	217	253	288	362	396	432
	Fouling Factor	m ² °C/kW	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086
	Pressure Drop	mH ₂ O	7.5	8.5	8.5	8.4	10.7	10.6	10.5
	Pass No.	EA	2	2	2	2	2	2	2
Evaporator	Maximum Water Side Pressure	MPa	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	Maximum Refrigerant Side Pressure	MPa	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
	Water Connections	KS Flange(mm)	150	200	200	200	200	200	200
	Water Flow Rate	m ³ /hr	151	181	212	242	302	333	363
	Fouling Factor	m ² °C/kW	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086
	Pressure Drop	mH ₂ O	5.5	5.6	5.7	5.7	6.9	7.0	7.0
	Pass No.	EA	2	2	2	2	2	2	2
Dimensions	Length	mm	4,150	4,150	4,150	4,150	4,150	4,150	4,150
	Width	mm	1,620	1,620	1,620	1,620	1,880	1,880	1,880
	Height	mm	2,030	2,030	2,030	2,030	2,220	2,220	2,220

Fonte dos preços

Coletores solares:	Pro-Sol TEC
Torres de Resfriamento:	Alpina
Chiller de Absorção:	LG WCMW 500 TR
Chiller Elétrico:	LG Johnson Controls (York)
Tarifa Elétrica:	CELPE / Ref. Novembro 2015

Demais preços obtidos através de consultas a empresas que forneceram dados de índices e histórico.

Tabela 29: Tarifas de Energia Elétrica

(CELPE)

TARIFA DE ENERGIA ELÉTRICA: RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA Nº 1885 DE 22 DE ABRIL DE 2015

INÍCIO DE VIGÊNCIA DAS TARIFAS DA RESOLUÇÃO : 29/04/2015 *
 ICMS - LEI ESTADUAL Nº 11.919 de 29/12/2000, LEI 12.472/2003 de 21/11/2003 e DECRETO Nº 30.404/2007, de 07/05/07
 PIS e COFINS - LEI Nº 10.637 de 30/12/2002 e LEI 10.833/2003 de 29/12/2003 e Res. Hom. Anel 112/2005 de 09 de maio de 2005



Em função da BANDEIRA TARIFÁRIA nos valores abaixo deverá ser acrescido R\$ 0,045 para cada kWh, sem impostos, conforme Resolução ANEEL nº 1945/2015 de 28/08/2015

Conforme despacho ANEEL nº 3612/2015 de 03/11/2015, este mês a BANDEIRA TARIFÁRIA é VERMELHA

TARIFA CONVENCIONAL - ALTA TENSÃO (13,8 kV)	TARIFA SEM (ICMS e PIS/COFINS) ¹			VALOR FINAL COM (ICMS e PIS/COFINS) ¹			ICMS %
	CONSUMO (R\$/kWh)	DEMANDA (R\$/kW)	ULTRAPASSAGEM DE DEMANDA (R\$/kW)	CONSUMO (R\$/kWh)	DEMANDA (R\$/kW)	ULTRAPASSAGEM DE DEMANDA (R\$/kW)	
	SEM (ICMS e PIS/COFINS) ²	SEM (ICMS e PIS/COFINS) ²	SEM (ICMS e PIS/COFINS) ²	(COM ICMS e PIS/COFINS) ³	(COM ICMS e PIS/COFINS) ³	(COM ICMS e PIS/COFINS) ³	
A4 - RESIDENCIAL	0,24136	38,57000	77,14000	0,34773	55,56836	111,13672	TABELA ICMS
A4 - INDUSTRIAL	0,24136	38,57000	77,14000	0,34773	55,56836	111,13672	25%
A4 - DEMAIS CLASSES	0,24136	38,57000	77,14000	0,34773	55,56836	111,13672	25%
A4 - RURAL - (REDUÇÃO DE 10% NO CONSUMO E NA DEMANDA)	0,21722	34,71300	77,14000	0,31295	50,01153	111,13672	25%
A4 - RURAL IRRIGANTE- Consumo da Madrugada(21:30h às 6h)-Res. Norm. ANEEL 207/06-(90%desc)	0,02414	38,57000	77,14000	0,03478	55,56836	111,13672	25%
A4 - COOP. ELETRIFICAÇÃO RURAL - (REDUÇÃO DE 50% NO CONSUMO E NA DEMANDA)	0,12068	19,28500	77,14000	0,12783	20,42686	81,70745	ISENTO
A4 - PODERES PÚBLICOS ***	0,24136	38,57000	77,14000	0,34773	55,56836	111,13672	25%
A4 - ABASTECIMENTO D'ÁGUA (REDUÇÃO DE 15% NO CONSUMO E DEMANDA)	0,20516	32,78450	77,14000	0,29558	47,23311	111,13672	25%
A4 - TRACÇÃO ELÉTRICA	0,24136	38,57000	77,14000	0,34773	55,56836	111,13672	25%

* Valor Final com ICMS e PIS/COFINS - corresponde ao valor da tarifa acrescido da cobrança da despesa com o PIS/COFINS incorrida pela CELPE após o desconto dos créditos conforme Lei 10.637/2002 e Lei 10.833/2003 e repasse autorizado pela Res.Hom. Anel

** Abastecimento d'água, esgoto e saneamento tem redução de 15% nas tarifas de consumo e demanda (DECRETO Nº 7891/2013).

Os descontos não se aplicam as Tarifas de Ultrapassagem de Demanda, de acordo com a portaria DNAEE 478/93

*** Os Clientes de Poder Público Estadual da Administração Direta e suas Fundações são isentos do ICMS (verificar tabela de tarifas específicas) conforme Art. 9º, Inciso XLVIII, Alínea "c", do Decreto nº 14.876/91, alterado pelo art. 1º, do Decreto nº 19.1

**** ICMS isento para produtor Rural conf Portaria SF 263/1999 e alterações

Tabela 30: Quadro Comparativo de Custos e Tecnologia entre Chillers de Absorção e Compressão

	CHILLER DE ABSORÇÃO	CHILLER DE COMPRESSÃO
DADOS TÉCNICOS		
Delta T	12 - 7°C	12 - 7°C
COP (*)	0,72	5,07
Dimensões (C x L x A)	5616 x 2195 x 3680	4150 x 1880 x 2220
Água Gelada (t/h)	307	302
Água de Resfriamento (t/h)	673	362
Água Quente (t/h) (95°C)	144	na
Acionamento Principal	Água Quente	Elétrico
Consumo (kWt)	3352	
Consumo (kWe)		347
Acionamento Auxiliares (kWe)	6	
BB Água Quente (kWe)	27	
BB Água Resfriamento (kWe)	126	68
Ventiladores da Torre de Resfr. (kWe)	30	17
Potência (kWe)	189	432
Horas de Operação Anual (8h/dia x 21 d/mês x 12 meses)	2016	2016
Consumo Elétrico Anual (kWh)	381.276	870.912
	CHILLER DE ABSORÇÃO	CHILLER DE COMPRESSÃO
CUSTOS		
Implantação		
Chiller	1.200.000	1.000.000
Instalação	60.000	60.000
Sistema Solar	10.272.780	na
Acumulador Térmico	150.000	na
Bombas e linhas de circulação resfriamento	75.000	40.000
Bombas e linhas de circulação quente	20.000	na
Sistema de Controle	15.000	na
Torre Resfriamento	170.000	120.000
Sistema Elétrico	50.000	87.000
Infraestrutura	50.000	50.000
Total Capex	R\$ 12.062.780	R\$ 1.357.000
Operação		
Manutenção Anual (6%)	96.900	69.600
Tarifa A4 Industrial (Celpe) - Demanda (R\$/kW)	55,568	55,568
Tarifa A4 Industrial (Celpe) - Consumo (R\$/kWh)	0,348	0,348
Consumo Elétrico Anual	258.796	591.142
Total Opex	R\$ 355.696	R\$ 660.742

Chiller de Absorção e Sistema Solar Térmico

Investimento Inicial: R\$ 12.062.780

Custo de Operação Anual: R\$ 355.696

Chiller de Compressão Elétrico

Investimento Inicial: R\$ 1.357.000

Custo de Operação Anual: R\$ 660.742

Migração para Energia Solar

Investimento Inicial: R\$ 10.705.780

Economia anual de operação: R\$ 305.046

Análise de Investimento

Parâmetros Financeiros

Invest. Inicial Adicional	-R\$ 10.705.780	llo
Fluxo de Caixa	R\$ 305.046	FLC
Taxa de desconto	12%	r
Período (anos)	10	n

Resultado Financeiro

Payback simples	35,1 anos
Payback Descontado	60,5 anos
VPL	-R\$ 8.982.202
TIR	-18,1%

Fluxo de Caixa Descontado

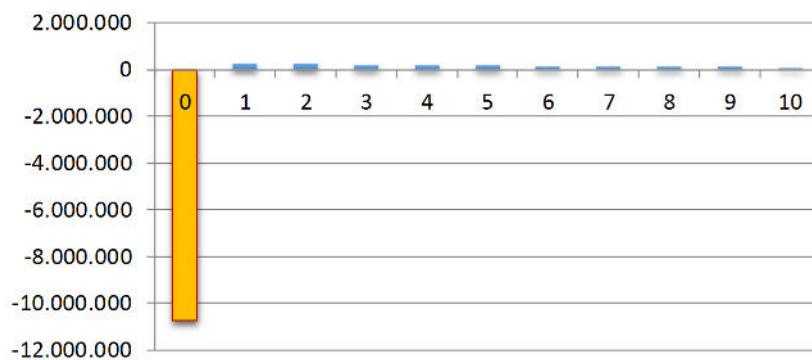


Figura 37: Gráfico de Fluxo de Caixa Descontado

Fluxo de Caixa Acumulado

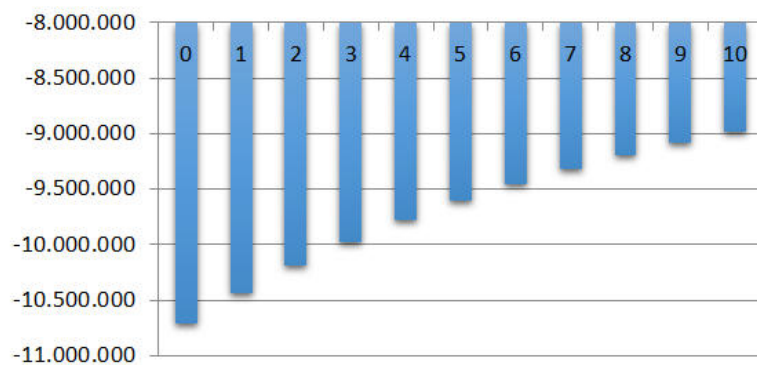


Figura 38: Gráfico de Fluxo de Caixa Acumulado

Tabela 31: Fluxo de Caixa Descontado e Acumulado

Ano	Fluxo de Caixa	Fluxo Caixa Desc	Fluxo Caixa Acum
0	-10.705.780	-10.705.780	-10.705.780
1	305.046	272.363	-10.433.417
2	305.046	243.181	-10.190.237
3	305.046	217.126	-9.973.111
4	305.046	193.862	-9.779.249
5	305.046	173.091	-9.606.157
6	305.046	154.546	-9.451.612
7	305.046	137.987	-9.313.624
8	305.046	123.203	-9.190.421
9	305.046	110.003	-9.080.419
10	305.046	98.217	-8.982.202
11	305.046	87.693	-8.894.509
12	305.046	78.298	-8.816.211
13	305.046	69.909	-8.746.302
14	305.046	62.418	-8.683.884
15	305.046	55.731	-8.628.153
16	305.046	49.760	-8.578.393
17	305.046	44.428	-8.533.965
18	305.046	39.668	-8.494.297
19	305.046	35.418	-8.458.879
20	305.046	31.623	-8.427.256
21	305.046	28.235	-8.399.021
22	305.046	25.210	-8.373.811
23	305.046	22.509	-8.351.303
24	305.046	20.097	-8.331.206
25	305.046	17.944	-8.313.262
26	305.046	16.021	-8.297.240
27	305.046	14.305	-8.282.936
28	305.046	12.772	-8.270.164
29	305.046	11.404	-8.258.760
30	305.046	10.182	-8.248.578
31	305.046	9.091	-8.239.487
32	305.046	8.117	-8.231.371
33	305.046	7.247	-8.224.123
34	305.046	6.471	-8.217.653
35	305.046	5.777	-8.211.875

5. CONCLUSÕES

Viabilidade técnica

O objetivo inicial deste estudo foi executar uma análise de viabilidade técnica do uso de coletores solares de baixo custo.

O primeiro ponto a ser considerado é o fato de que a instalação do sistema solar na cobertura do prédio da fábrica vai lhe trazer sombreamento, que vai reduzir sensivelmente a carga de climatização necessária. O cálculo das contribuições deve levar em conta a nova configuração de arquitetura do prédio.

Ao analisar as curvas de rendimentos dos coletores planos e de tubo evacuado (coletores não concentradores) é possível perceber que nas faixas de temperaturas requeridas para a utilização em sistema de climatização solar (acima de 75°C) os coletores não- concentradores têm um rendimento muito baixo (menor que 40%). Outro ponto crítico para a utilização destes coletores na aplicação demonstrada neste estudo são problemas de sobreaquecimento e de estagnação. A elevada quantidade de placas coletoras torna o sistema hidráulico da instalação muito propenso ao desequilíbrio, ao criar zonas de maior e menor circulação de fluido. A distribuição desigual de calor na superfície faz com que ocorram zonas mais frias, onde a troca de calor não é feita de forma eficiente, e o pior delas, as zonas de estagnação, onde a baixa vazão eleva a temperatura, ocorrendo sobreaquecimento. Este último é especialmente crítico por conta da proximidade da temperatura de trabalho com o ponto de evaporação do fluido – água pura, neste caso.

Do lado da refrigeração, o sistema selecionado para esta aplicação é o de menor custo dentre os sistemas de absorção, o Chiller de simples efeito acionado por água quente possui um COP bastante baixo, entre 0,7 e 0,8.

Uma alternativa a ser selecionada para aumentar a eficiência global seria a utilização de Chiller de duplo efeito, com COP entre 1,2 e 1,5. Para atender a temperatura de acionamento destas máquinas seriam necessários coletores solares concentradores, que possuem rendimento maior que 70% em praticamente todas as faixas de temperatura. A grande vantagem no uso destes coletores é o fato de possuírem reduzida área de absorção, o que reduz muito as perdas por radiação em elevadas temperaturas. Os coletores de concentração linear como os de Fresnel e os de Calha Parabólica também eliminam os problemas de estagnação e sobreaquecimento, pois funcionam como serpentina, onde a circulação e trocas de calor são mais homogêneas. Outra desvantagem é o fato de aproveitarem apenas a radiação direta.

É de conhecimento também que este par Chiller de duplo efeito - coletor concentrador, embora eleve muito a eficiência do sistema, eleva muito o custo de implantação. Uma análise mais rigorosa de viabilidade deve ser executada quanto à escolha da tecnologia aplicada.

Cabe enfatizar também que os sistemas de refrigeração por absorção não dispensam totalmente a energia elétrica, uma vez que ela é necessária para acionamento das bombas de circulação e instrumentação.

Outro ponto a ressaltar é o elevado consumo de água de resfriamento nos Chillers de absorção. Na comparação dos sistemas equivalentes, em 500TRs, o sistema de absorção indicou uma vazão 85% maior do que o sistema de compressão. A comparação entre as tecnologias não deve se limitar às máquinas de refrigeração e seus acionamentos; o balanço de energia deve englobar o sistema completo. Neste caso também as bombas de circulação de água no circuito primário (coletores solares e acumulador térmico) são parte do sistema e possuem consumo de energia expressivo.

Sistema de aquecimento complementar

Os sistemas de aquecimento solar são intrinsecamente ligados às condições climáticas. As operações industriais necessitam normalmente de regimes constantes de funcionamento, o que faz com que os sistemas solares necessitem de fonte de energia complementar para seu funcionamento. Pequenas variações transitórias, como a causada pela presença de nuvens, por exemplo, podem ser minimizadas a partir do uso de acumulador térmico, que complementa a energia fornecida aos consumidores por um determinado período. No entanto, em caso de dias não ensolarados por determinado período, os consumidores devem ser supridos pela fonte complementar na totalidade. Para tanto, é necessária uma caldeira ou aquecedor.

Visto que o sistema solar necessita de uma fonte de calor complementar, uma alternativa a ser estudada é esta fonte operar em regime integral, como complemento ao sistema solar. Os coletores não-concentradores possuem baixo rendimento em temperaturas acima de 65 ou 70°C, portanto, pode ser estudada a aplicação solar até esta faixa de temperatura, com complementação na faixa superior por um sistema de aquecimento a gás, por exemplo. Esta aplicação pode ser muito útil em sistemas que não recuperam condensado de vapor, por exemplo, e a água de alimentação esteja sempre em temperatura ambiente.

Custo de Implantação e Análise de Investimento

Foi demonstrado neste estudo que o sistema de absorção utilizando energia solar se torna um sistema complexo e custoso. A diferença na implantação do sistema solar é nove vezes maior do que o sistema elétrico, e nem mesmo possuindo um custo de manutenção igual à metade do sistema elétrico ele consegue anular a diferença. O tempo de retorno de investimento em um cálculo de *payback* simples é de 35 anos, ou seja, ainda bem maior que o tempo de vida útil do sistema.

É esperado que os sistemas solares fiquem mais atrativos ao passar dos anos. Temos testemunhado um aumento considerável no preço da energia elétrica e a expectativa é que seu preço não se reduza muito em um prazo curto. O aumento da escala da utilização dos sistemas solares levará à redução dos preços dos sistemas, assim como a procura por sistemas mais limpos e de emissões reduzidas aumente sua importância e lhe tragam incentivos fiscais e financeiros.

O preço baixo do petróleo na atualidade continua sendo um entrave para a aplicação de energias de fontes renováveis, porém não se acredita que esta situação se prolongará por muito tempo.

Final

Dentre os vários pontos analisados neste trabalho, a constatação mais evidente, na opinião do autor, é a real de necessidade de aplicação de engenharia quando da utilização de sistemas solares. A gigantesca gama de resultados do cruzamento dos dados oriundos das aplicações, faixas de temperatura, localidades, condições climáticas etc., exigem um estudo minucioso para que seja aproveitada ao máximo a energia solar, que é abundante, mas pequena quando comparada à energia concentrada contida nos combustíveis fósseis.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DUFFIE, John A. and BECKMAN, William A.: Solar Engineering of Thermal Processes, 4th Edition. Wiley, 2013, 910 p., ISBN 978-0470-87366-3.
- [2] KALOGIROU, Soteris. Solar Energy Engineering: Processes and Systems, 1st Edition, Academic Press / Elsevier, 2009, 760 p., ISBN 978-0-12-374501-9.
- [3] Medium Temperature Collectors - Solar Heat for Industrial Processes - 2005, Solar Heating and Cooling Executive Committee of the International Energy Agency (IEA)
- [4] RAPP, Donald: Solar Energy, Prentice-Hall, 1981, 516 p., ISBN 0-13-822213-4.
- [5] ÇENGEL, Yunis e BOLES, Michael. Termodinâmica – 6^a. Edição, Mc Graw Hill, 2006.
- [6] KOHLENBACH, Paul e JAKOB, Uli. Solar Cooling: The Earthscan Expert Guide to Solar Cooling Systems. Routledge Publisher, 2014, 224 p.
- [7] REDDY, T. Agami. The Design and Sizing of Active Solar Thermal Systems, Claredon Press, 1987, 391 p., ISBN 0-19-859016-4.
- [8] LOVEGROVE, Keith and STEIN, Wes: Concentrating solar power technology: principles, developments and applications. Cambridge, UK, Philadelphia, PA. 674 p., 2012
- [9] STOECKER, W.F. e JONES, J.W.: Refrigeração e Ar Condicionado. McGraw Hill do Brasil, 1985.
- [10] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc. (ASHRAE): Application Guide for Absorption Cooling/Refrigeration using recovered heat. ASHRAE, 1995. ISBN 1-883413-26-5.
- [11] SRIKHIRIN, APHORN RATANA E CHUNGPAIBULPATANA, A review of absorption refrigeration technologies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2001.
- [12] VILLA, Alvaro Antonio Ochoa: Introdução à análise de sistemas de refrigeração por absorção. Ed. Universitária da UFPE, 2011. ISBN 978-85-7315-902-8
- [13] MILLER, Mark Rex. Refrigeração e Ar Condicionado, 1^a. Edição, LTC, 2008. ISBN 978-85-216-1624-5
- [14] SRESNEWSKY, Svetlana Francisca Galvão Bueno: Estudo de ciclos de refrigeração por absorção quanto a sua aplicação e fonte energética. Dissertação de Mestrado, 113 p., São Paulo, 1983.
- [15] MENEZES, Silvana Martins de: A energia solar e suas aplicações na área de refrigeração e aquecimento. Trabalho de conclusão de curso, 113 p., São Paulo, EPUSP, 1984.
- [16] KREIDER, Jan F; KREITH, Frank: Solar Heating and Cooling. 479 p., Hemisphere, 1982.
- [17] PARABOLIC TROUGH CSP TECHNOLOGY - State of the Art and Market Overview. Projeto Energia Heliotérmica, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Junho 2014.
- [18] Base de Dados de radiação solar incidente (irradiação solar) SUNDATA Cresesb. Disponível em < <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>> Acesso em setembro/ 2015
- [19] Registro climatológico de Recife. Disponível em < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Recife>>. Acesso em setembro/ 2015