

2172363

81

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO MECÂNICO

AQUECIMENTO DE ÁGUA ATRAVÉS DE ENERGIA SOLAR
PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

AUTOR: MILTON BECK
ORIENTADOR:
PROF. JELIL ASLAN

1984

A G R A D E C I M E N T O S

Agradeço ao Prof. JELIL ASLAN pela colaboração dada sem a qual o presente trabalho não poderia -
ter sido realizado.

SUMÁRIO

O presente trabalho visa dar uma visão geral das várias formas sob a qual a energia solar pode ser aproveitada e dos dispositivos de captação utilizados.

Consta também do trabalho um estudo sobre as perspectivas do aproveitamento desta forma de energia pelas indústrias brasileiras além da descrição de algumas instalações solares industriais já em uso no Brasil e no exterior.

Por fim é feito um pré-cálculo de uma instalação destinada a aquecer água por via solar para uma indústria têxtil. É feito ainda um estudo relativo à viabilidade financeira de tal empreendimento.

Í N D I C E

	Pág.
1. Introdução.....	1
2. Histórico.....	5
3. Formas de Captação e Conversão da Energia Solar...	10
3.1- Coletor solar de placa plana.....	10
3.1.1- Aquecimento de água a baixas temperatu <u>ra</u> ras.....	11
3.1.2- Aquecimento de piscinas.....	13
3.2- Coletor solar de placa plana a ar.....	14
3.2.1- Secagem de alimentos.....	15
3.2.2- Aquecimento de ambientes.....	16
3.3- Coletores concentradores.....	17
3.3.1- Aquecimento de água a altas temperatu <u>ra</u> ras.....	19
3.3.2- Fusão de metais.....	20
3.3.3- Geração de eletricidade.....	21
3.4- Casas de vidro.....	24
3.4.1- Estufas.....	24
3.4.2- Destilação de água.....	24
3.5- Células fotovoltaicas.....	25
3.5.1- Iluminação.....	26
3.5.2- Aplicações aero-espaciais.....	26
3.6- Instalações solares marítimas.....	27
3.7- Cataventos.....	28
3.7.1- Geração de energia elétrica.....	28
3.7.2- Na agricultura.....	29

3.8- Biomassa.....	29
4. As Perspectivas do Uso da Energia Solar na Indústria.....	30
5. Exemplos de Algumas Instalações Solares Utilizadas com Finalidades Industriais.....	37
5.1- Sistema de aquecimento de água através de energia solar para lavagem industrial.....	37
5.2- Sistema de geração de vapor para utilização em produção industrial de batatas fritas...	40
5.3- Sistema de aquecimento de água para utilização em processos de revelação em um laboratório cinefotográfico.....	42
5.4- Sistema de aquecimento de água através de energia solar para utilização nas dependências de um hospital.....	46
6. Estudo da Possibilidade de Implantação de um Sistema de Aproveitamento da Energia Solar na Indústria TDB-Têxtil David Bobrow S.A.....	48
6.1- Descrição da unidade industrial.....	48
6.1.1- Descrição do setor têxtil.....	49
6.1.2- Descrição do setor Korotan.....	52
6.2- Descrição dos sistemas de aquecimento de - óleo térmico e de geração de vapor.....	55
6.2.1- Descrição do sistema de aquecimento de óleo térmico.....	55
6.2.2- Descrição do sistema de geração de - vapor.....	56

	Pág.
6.3- Considerações sobre o tipo de instalação solar mais viável para ser implantado na indústria.....	58
6.4- Pré-cálculo da instalação solar destinada ao pré-aquecimento de água para a caldeira.....	59
6.4.1- Cálculo da área de captação necessária.....	60
6.4.2- Cálculo da economia de combustível anual devido à implantação do sistema de captação de energia solar.....	63
6.4.3- Esquema da instalação de coletores solares.....	64
6.4.4- Análise quanto aos custos da instalação de captação de energia solar e determinação do tempo de retorno do capital investido.....	68
7. Conclusão.....	71
Bibliografia.....	73
Anexo 1	75

1. INTRODUÇÃO

A quase totalidade da energia disponível na Terra é proveniente do Sol e pode se apresentar sob diversas formas. O vento, a energia dos rios e das marés, os depósitos de combustíveis fósseis, assim como a energia armazenada nas plantas através da fotossíntese, são formas de energia que, apesar de distintas, têm no Sol sua origem em comum.

No passado, o homem dependia exclusivamente de sua própria energia e isto definia seu padrão de vida. Ele então ampliou suas fontes energéticas através da domesticação de cavalos e outros animais, da queima de madeira e posteriormente através da descoberta de combustíveis fósseis tais como carvão e petróleo. A invenção do moinho de vento e da roda d'água expandiram ainda mais seus horizontes energéticos. A medida que se desenvolvia seu conhecimento técnico juntamente com um entendimento das leis físicas do Universo, cresceu também sua demanda de energia a qual ele incorporou ao seu meio ambiente.

Há mais de 300 anos que cientistas e engenheiros reconheceram, quantitativamente, o potencial do Sol como fonte direta de obtenção de energia, mas foi apenas recentemente que se intensificaram as pesquisas a esse respeito.

Com o advento dos combustíveis fósseis coinci

diu o alto desenvolvimento científico e tecnológico alcançado neste século. Isto levou a uma convergência dos esforços de pesquisa e desenvolvimento de fontes de energia ao petróleo, relegando as outras formas a uma posição marginal.

O começo do uso em larga escala do petróleo - data de 12 de agosto de 1859, quando foi achado acidentalmente numa perfuração da Pensilvânia (EUA). A enérgia fósil que já era conhecida há mais de 2000 anos, tornou-se - de súbito a energia favorita do século dezenove e isto pode ser creditado a uma série de fatores. O baixo custo de extração do petróleo, associado ao seu uso intenso no suprimento de energia dos motores desenvolvidos durante a Revolução Industrial foram as principais fontes do aumento - incessante no consumo deste combustível. Isto acabou por ocasionar profundas alterações na estrutura mundial de consumo energético.

Uma complexa estrutura industrial foi criada e vem se desenvolvendo desde então baseada no uso do petroleo e de seus múltiplos derivados como fonte de energia.

A deflagração da crise petrolífera de 1973, - com o boicote do fornecimento por parte dos países árabes produtores e com o vertiginoso aumento dos preços do petroleo, pôs em dramática evidência quão perigosamente o mundo industrializado ocidental depende , para sua sobrevivência desta matéria prima. Como consequência lógica, reavivaram-

se os temores pelo esaurimento mais ou menos próximo das jazidas de petróleo. A uma taxa de extração anual de $2,774 \times 10^9$ ton (1973), as reservas mundiais conhecidas ainda no subsolo e que, sob as condições econômicas e operacionais de 1973 são recuperáveis no futuro, estariam esauridas em 27 anos [1]. Apesar de novas descobertas estarem sendo feitas continuamente, esses valores ilustram e justificam o renovado interesse pela pesquisa de fontes de energia alternativas ou substitutivas. O presente estudo insere-se nesse contexto, procurando definir a possível contribuição da energia solar na solução de uma futura escassez de fontes convencionais de energia. O seu desenvolvimento ativo em diversos países do mundo, muitos dos quais dotados de uma taxa de insolação inferior à brasileira, justificam plenamente essa expectativa inicial.

Algumas das técnicas de aproveitamento da energia solar encontram-se presentemente bem dominadas enquanto outras encontram-se ainda em fase de desenvolvimento experimental. O panorama tecnológico, todavia, não coincide com o econômico mesmo as técnicas bem desenvolvidas poucas vezes conseguem produzir sistemas economicamente aceitáveis. Para que esse estágio possa ser alcançado, é necessário fornecer de antemão condições para o desenvolvimento de uma tecnologia solar no Brasil. Sem bases para esse desenvolvimento, não haverá no futuro possibilidade de optar-se pela energia solar como fonte significativa, pois esta não poderá vir a ser -

competitiva com outras fontes energéticas. Torna-se necessário acompanhar os desenvolvimentos que estão sendo realizados nesta área no exterior através do apoio a universidades e centros de pesquisa. É fundamental também o engajamento da indústria, necessariamente com apoio governamental, tendo em vista que o desenvolvimento de uma nova tecnologia até sua penetração no mercado progride lentamente.

2. HISTÓRICO

A energia solar já é conhecida desde os primórdios da civilização. Historiadores relatam que sacerdotes - teriam utilizado metais polidos para refletir e concentrar os raios do Sol, no intuito de acender as chamas de altares na antiga Mesopotâmia.

A Arquimedes (287-212 AC), grande cientista do reino de Heirom II de Siracusa, se atribui o feito de ter - repellido a invasão da esquadra de Marcellus em 21 AC, incendiando seus barcos através de raios solares. Este acontecimento é tido por muitos como uma lenda e persiste a dúvida se Arquimedes possuía ou não suficientes conhecimentos de óptica para inventar um método simples e capaz de concentrar os raios do Sol em um ponto onde navios pudessem ser queimados a distância.

Após Arquimedes, poucos foram os progressos alcançados nas aplicações de energia solar até a Renascença. O número de inventores fascinados pela sua potencialidade foi grande, mas até recentemente as invenções eram mais sensacionalistas do que práticas.

No ano de 1615, o francês Solomon de Caux desenvolveu uma máquina capaz de bombear água através da expansão de ar aquecido pelo Sol. Aproximadamente 250 anos depois, outro francês de nome August Mouchot realizou uma das primeiras tentativas de converter a energia solar em mecânica

ca. Várias máquinas foram desenvolvidas com esse intuito mas o governo da França as considerou muito caras para serem construídas numa escala capaz de atender a demanda existente.

Nos Estados Unidos, John Ericsson também dedicou sua atenção ao desenvolvimento de engenhos movidos pela energia solar no período compreendido entre 1871 e 1884. Em 1883, Ericsson construiu um coletor solar que utilizava um cilindro parabólico para focalizar os raios do Sol em um tubo absorvedor. Seu engenho, mostrado na figura 1, gerava 0,7 kw para uma área de $9,3 \text{ m}^2$ de superfície refletora.

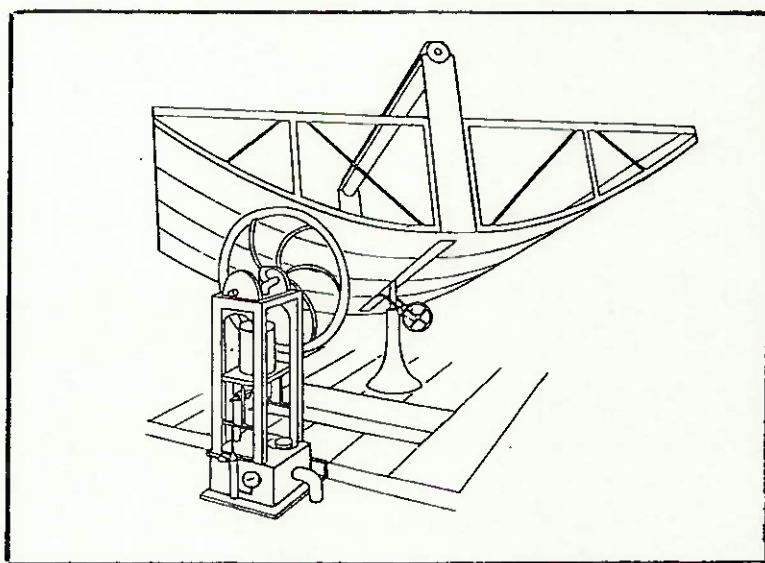


Fig.1 - Motor Solar de Ericsson, construído em Nova Iorque em 1883. [1].

Ericsson era capaz de analisar criticamente a praticabilidade de engenhos solares. Tendo gasto 90 000 dólares de seu próprio dinheiro no curso de suas experiências concluiu que tais engenhos custavam dez vezes mais que os convencionais e que seu uso só seria economicamente justificável em áreas remotas do planeta com intensas taxas de insolação.[2].

Progressos tecnológicos foram sendo feitos - mas foi em 1908 que o americano Frank Schuman e o professor inglês C.V.Boys organizaram a Companhia de Energia Solar do Leste (Eastern Sun Power Company Ltd.) e juntos se dedicaram a um dos mais importantes empreendimentos históricos de captação de energia solar. Em 1913 construíram em Meadi, Egito, concentradores parabólicos para obtenção de energia capaz de irrigar aquela região com as águas provenientes do Rio Nilo. As filas de coletores com 62,5 m de comprimento e totalizando 1.200 m² de área projetada foram utilizadas na operação de um motor de 75 kw. Com o início da 1ª Guerra Mundial e com uma nova era de utilização dos combustíveis fósseis, a instalação foi abandonada já que não era economicamente viável se comparada com instalações que utilizavam outras formas de energia.

Vários tipos de engenhos e instalações solares foram sendo desenvolvidos desde então, mas o final da 2ª Guerra Mundial tornou esta forma de energia proeminente. O surgimento de novas nações, em sua maioria pobres e dis-

privilegiadas de mananciais energéticos convencionais, reacendeu o interesse pela pesquisa de novas aplicações da energia proveniente do Sol.

Em 1955 foi realizado um Simpósio Mundial de Energia Solar Aplicada em Tucson, Arizona. Aproximadamente 900 pessoas, representando a indústria, o governo e os centros de pesquisa de 36 países, estiveram presentes exibindo dezenas de estudos e inventos. A mostra abrangeu desde caldeiras solares até as recém inventadas células fotovoltaicas e refletiu o interesse mundial nesta ciência.

Atualmente várias são as aplicações que usam o Sol como fonte de energia e dentre elas o aquecimento de água domiciliar é, indubitavelmente, o mais difundido. Equipamentos com esse fim começaram a ser desenvolvidos em 1920 e hoje já são utilizados em larga quantidade em diversos países do mundo.

O início do uso de coletores solares no aquecimento de água com finalidades industriais é, no entanto, bastante recente. A quase totalidade das indústrias americanas que adotaram tal sistema o fizeram a partir de 1976. No Brasil, a implantação do primeiro sistema deste tipo data de 1980 através da iniciativa pioneira do Laboratório - Cinefotográfico CURT.

Estes sistemas, apesar de ainda pouco difundidos nas indústrias brasileiras, vêm se tornando competitivos economicamente com sistemas que utilizam combustíveis

fósseis. Os constantes aumentos dos preços do petróleo e as perspectivas cada vez maiores de reduções nos custos de instações através de novas técnicas de manufatura tendem a viabilizar o uso do Sol, não necessariamente como fonte única de suprimento de energia, mas como uma forma de se conseguir sensíveis reduções no consumo de eletricidade e de derivados do petróleo.

3. FORMAS DE CAPTAÇÃO E CONVERSÃO DA ENERGIA SOLAR

Neste capítulo, algumas das diversas formas de captação e conversão da energia solar serão apresentadas, de forma bastante concisa, com o intuito de ilustrar seu - vasto campo de aplicações.

3.1) Coletor Solar de Placa Plana

Os coletores de placa plana são coletores fixos disponíveis comercialmente para o aquecimento de água, embora seja possível utilizá-los com outras finalidades. Apesar de possuírem a vantagem de poderem coletar tanto a componente difusa, resultante da dispersão da radiação solar - por choques e reflexões na atmosfera, como a componente direta da radiação incidente, dificilmente conseguem aquecer o fluido de trabalho a temperaturas superiores a 90 °C. A figura 2 ilustra os componentes básicos de um coletor deste tipo.

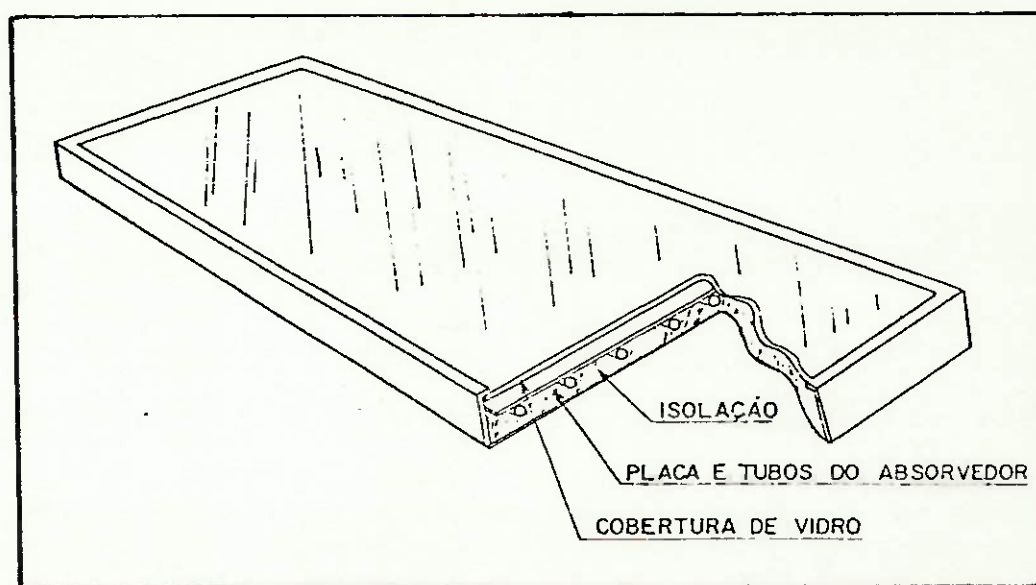


Fig.2 - Coletor Solar de Placa Plana Simples. [3]

A caixa é termicamente isolada na parte inferior (o isolante é geralmente lã de vidro) e contém, sobre este isolamento, a tubulação encamisada por uma chapa metálica (os metais mais utilizados são o cobre e o alumínio). A parte superior do coletor é fechada por um ou dois vidros planos transparentes, dependendo do nível de temperatura desejado.

O funcionamento baseia-se na absorção da radiação solar pela chapa metálica, a qual é aquecida gerando um fluxo de calor que é transferido ao fluido de trabalho.

Visando um aumento no rendimento de tais dispositivos é comum tratar-se a superfície da chapa para que a mesma se torne seletiva, ou seja, possua uma alta absorvância para radiações com baixo comprimento de onda (caso da radiação solar) e uma baixa emitância para radiações -

com grande comprimento de onda, que é a forma sob a qual a superfície aquecida tende a liberar energia (radiação - infravermelha). Dentre as várias superfícies seletivas existentes, o negro de cromo tem sido o mais utilizado.

O vidro é utilizado como cobertura para a parte superior do coletor solar pois, além de minimizar as perdas por convecção, é também responsável pelo "efeito estufa". Este efeito ocorre em locais fechados e sujeitos à radiação solar que possuem cobertura de material transparente à luz visível e opaco à radiação infravermelha. Não só o vidro, mas também alguns tipos de plásticos possuem esta característica. A radiação solar penetra no interior do coletor e aquece a chapa absorvente que, uma vez aquecida, passa a emitir radiação infravermelha. Esta radiação é reemitida de volta ao interior do coletor após refletir no vidro, opaco a radiações neste comprimento de onda. Consegue-se assim, conseqüentemente, um aumento desejável na temperatura de saída do fluido de trabalho.

Dentre as aplicações deste tipo de dispositivos podem ser citadas:

3.1.1)- Aquecimento de água a baixas temperaturas

Bastante utilizado no aquecimento de água com finalidades domésticas, o coletor de placas planas pode ser utilizado em diversos arranjos, dos quais o mais

simples e comum é representado na figura 3 abaixo.

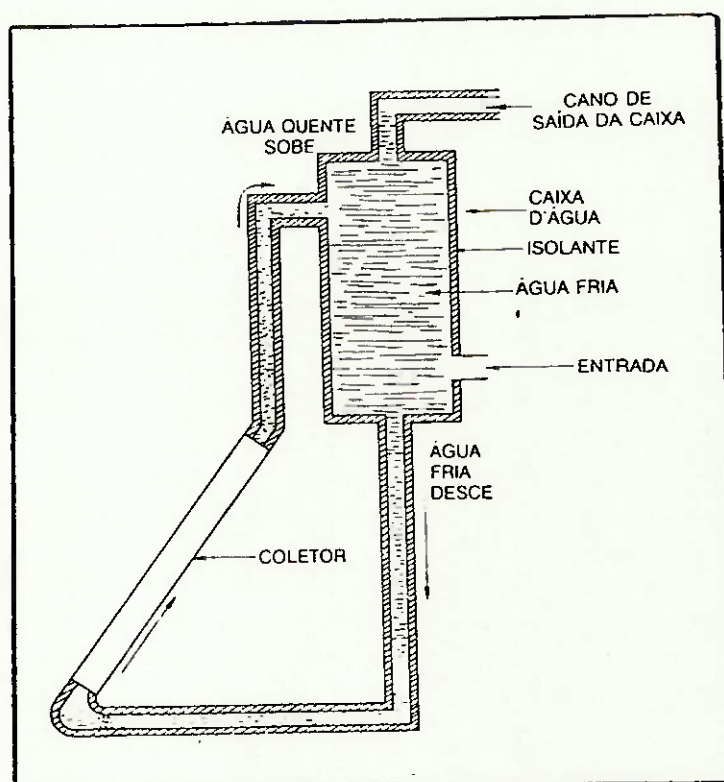


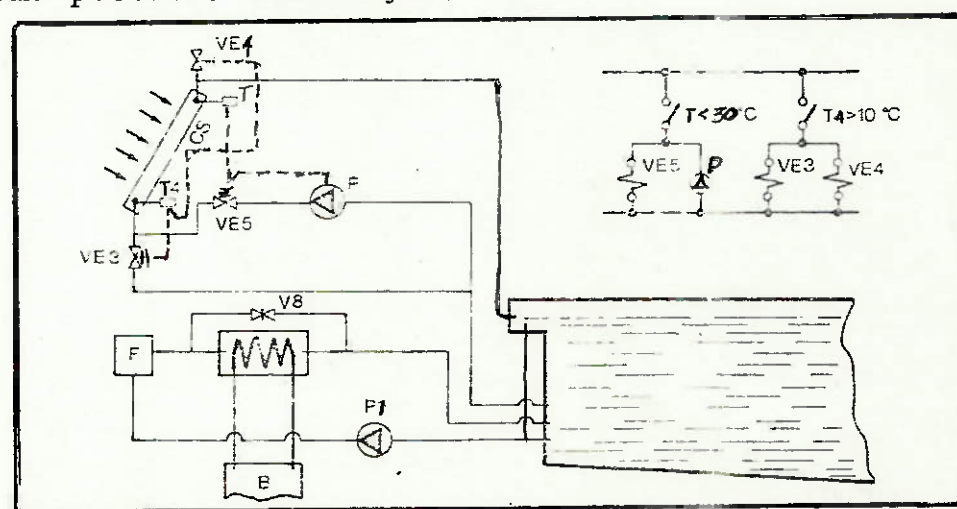
Fig.3 - Desenho esquemático de um termo-sifão. [4]-

Dispondo-se o reservatório em posição elevada em relação ao coletor, a instalação não requer bomba de circulação nem dispositivos de regulagem. A circulação da água é feita por termo-sifão, ou seja, graças a menor densidade da água quente em relação à fria. Dessa maneira a circulação de água dos coletores ao reservatório é interrompida automaticamente quando, por uma razão qualquer, a tem

peratura da água na saída dos coletores for igual ou inferior a do reservatório.

3.1.2)- Aquecimento de piscinas

A energia solar se adequa bastante bem ao aquecimento de piscinas pois a temperatura desejada da água, em torno dos 30°C , é facilmente obtida através do uso de coletores de placa plana. A figura 4 exemplifica o esquema de uma possível instalação.



CS - coletor solar

T - T4 - termostatos

V3-V4-V5-V8 - válvulas de acionamento elétrico.

P-P1 - bombas de circulação

F - filtro de água

B - caldeira

Fig.4 - Instalação solar para aquecimento da água de uma piscina com circulação direta dentro do coletor solar. [5]

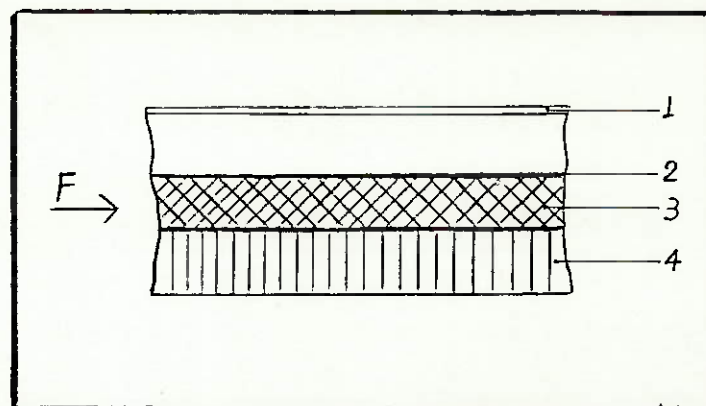
A instalação possui além de uma bomba de circulação, dois termostatos e três válvulas de acionamento elétrico. Quando a temperatura da água no coletor é superior a 30°C , o termostato T fecha seu contato, abrindo a válvula V5 e iniciando conseqüentemente o processo de circulação e aquecimento da água da piscina. Quando a temperatura for inferior a este valor a circulação é ininterrompida.

Caso a temperatura da água caia abaixo de 10°C o termostato T4 fecha, abrindo a válvula V3 (descarga de água) e V4 (entrada do ar).

A instalação prevê ainda a possibilidade de aquecimento auxiliar através de uma caldeira alimentada por combustível tradicional.

3.2) Coletor Solar de Placa Plana a Ar

O princípio físico de tais coletores é o mesmo daqueles à circulação de água, citados no item anterior. A figura 5 mostra um deles em corte.



- | | |
|---------------------|---------------------------|
| 1. placa de vidro | 4. isolante |
| 2. chapa absorvente | F. fluxo de ar a aquecer. |
| 3. tubo de ar | |

Fig.5 - Coletor solar de placa plana a ar.

Bastante leves e simples, possuem uma tubulação adaptada para a condução de um fluido de baixíssima densidade como é o caso do ar. É costume dotar-se a chapa absorvente de aletas ou nervuras para aumentar a superfície de contato com o fluido de trabalho e melhorar a troca de calor. Capazes de elevar a temperatura do ar em 100°C são usados basicamente em duas aplicações distintas:

3.2.1)- Secagem de alimentos

Os secadores solares são utilizados na secagem de chá, café, frutas, etc., e na conservação de alimentos perecíveis como o peixe e a carne. Um dos sistemas utilizados, dotado de coletor a ar, está representado na figura 6.

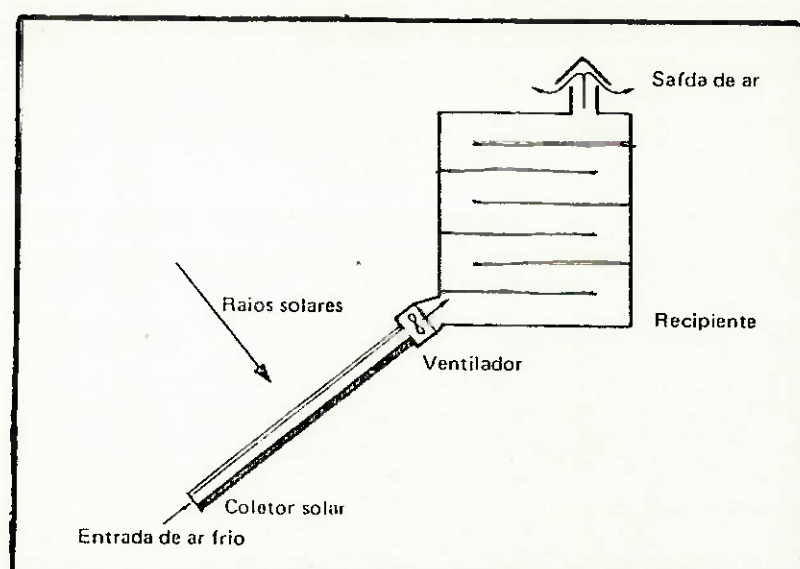
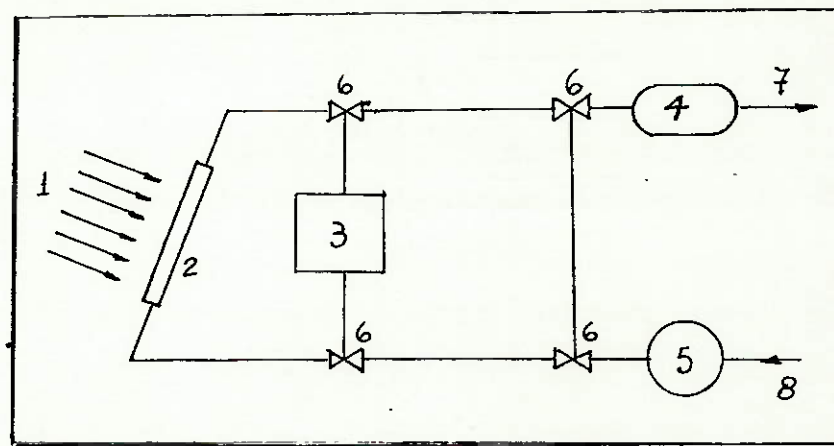


Fig.6 - Esquema de um secador solar [1].

A parte inferior do coletor é aberta e recebe ar fresco pelo efeito de termo-sifão. O ar é aquecido no coletor pela radiação solar e atravessa o recipiente. A temperatura do ar no mesmo é controlada pela variação do fluxo de ar com a ajuda de um ventilador, sendo assim possível escolher aquela que mais se adapta a um determinado produto.

3.2.2)- Aquecimento de ambientes

Um esquema bastante simples desse tipo de instalação é apresentado na figura 7.



- | | |
|------------------------|-----------------------------|
| 1. raios solares | 5. ventilador |
| 2. coletor solar | 6. válvula de três posições |
| 3. acumulador de calor | 7. saída de ar quente |
| 4. aquecedor auxiliar | 8. entrada de ar. |

Fig.7 - Esquema de uma instalação de aquecimento a ar quente. [5].

O ar aquecido pode ser enviado aos ambientes ou ao acumulador de calor conforme a posição das válvulas. À noite, o aquecimento é proporcionado pelo acumulador ou pelo sistema de aquecimento auxiliar.

3.3) Coletores Concentradores

O coletor concentrador é um dispositivo que permite a obtenção de altas temperaturas mediante a concentração dos raios solares sobre uma zona restrita, denomina

da foco, onde estão posicionados os absorvedores. A superfície de reflexão pode assumir diversas configurações dependendo do grau de concentração desejado e da necessidade de focos pontuais ou lineares. As figuras 8 e 9 ilustram respectivamente um coletor de foco linear e um de foco pontual.

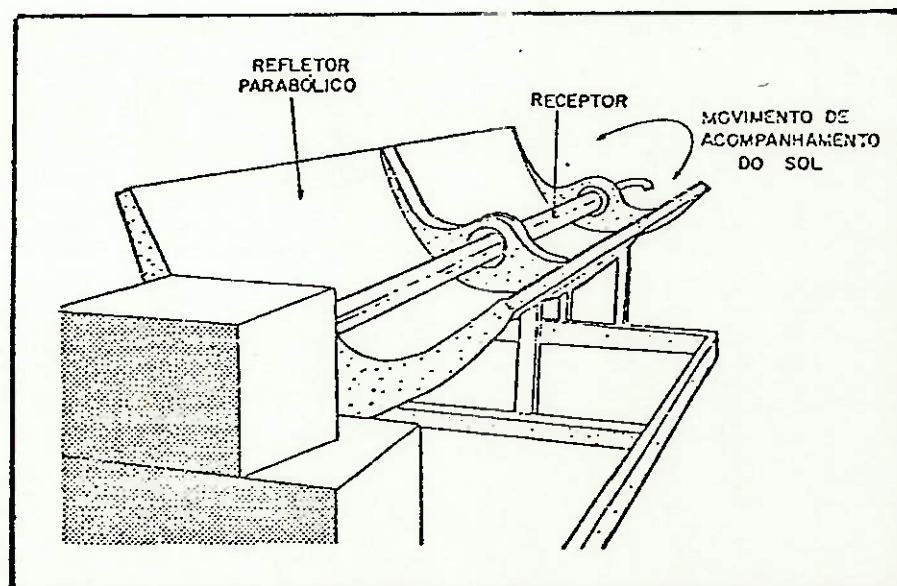


Fig.8 - Coletor do tipo cilíndrico parabólico [3].

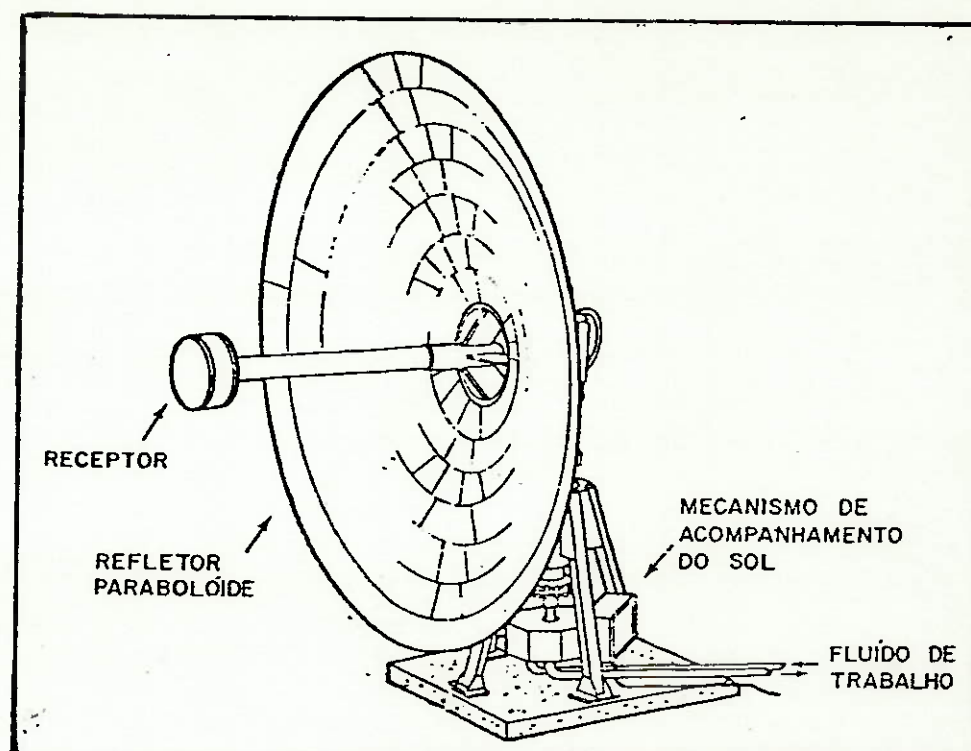


Fig.9 - Concentrador parabolóide típico [3].

É importante ressaltar que os painéis concentradores utilizam somente a radiação solar direta e devem estar constantemente orientados para o Sol, o que implica na construção de dispositivos de orientação automática.

A gama de aplicações deste tipo de coletor é bastante ampla e algumas das mais importantes são explicadas a seguir.

3.3.1)- Aquecimento de água a altas temperaturas

Apesar do concentrador de foco pontual(fig.9) conseguir atingir temperaturas superiores às alcançadas - pelo de foco linear (fig.8), seu uso não é muito comum dado

seu alto preço. O segundo, pelo contrário, tem seu uso difundido no aquecimento de água, que chega a atingir temperaturas superiores a 300°C na forma de vapor super-aquecido.

3.3.2)- Fusão de metais

Os dispositivos com essa finalidade são chamados fornos solares e são utilizados no estudo do comportamento de certos materiais quando submetidos a altas temperaturas e em alguns processos de manufatura tais como a fusão de tungstênio e a produção de refratários. Apesar de poderem ser construídos artesanalmente, somente as grandes e complexas instalações têm capacidade de operar satisfatoriamente a temperaturas superiores a 3000°C . Dentre as instalações deste tipo já em operação, o forno solar francês localizado nos Pirineus orientais exemplifica um dos sistemas existentes para obtenção de temperaturas dessa ordem de grandeza.

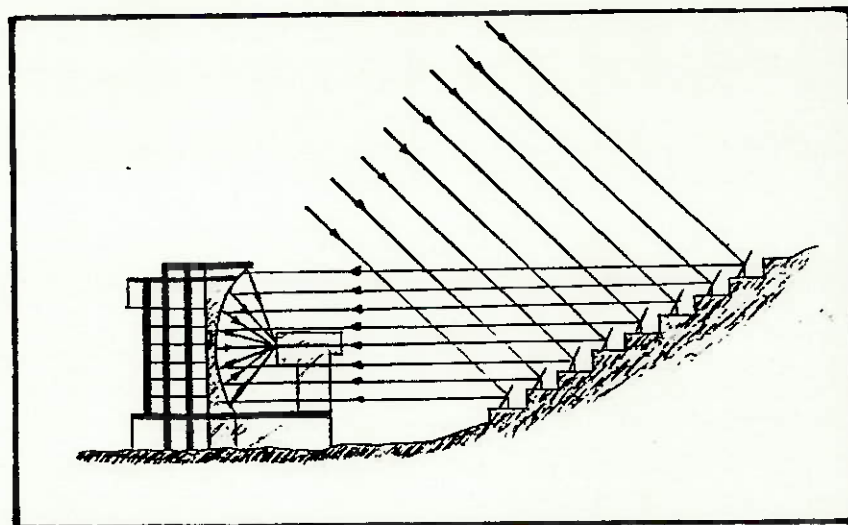


Fig.10 - Esquema de forno solar francês localizado nos Pirineus orientais [6].

Os raios solares são refletidos por um conjunto de espelhos orientáveis em direção ao refletor parabólico. A energia solar incidente neste refletor cuja área é de aproximadamente 2100 m^2 é então concentrada numa área - 7500 vezes menor localizada no centro do plano focal da parábola. É importante lembrar que instalações desse tipo - possuem atualmente interesse basicamente científico, já - que não podem competir economicamente com outras fontes - de energia.

3.3.3)- Geração de eletricidade

A concepção de instalação mais conhecida para geração de eletricidade é a do sistema de receptor central e foco pontual, frequentemente chamada de sistema de torre

central. Um campo de espelhos individualmente orientados, os heliostatos, reflete a energia radiante sobre um receptor instalado no alto de uma torre. No receptor, o fluxo solar altamente concentrado aquece um fluido de trabalho, que é então usado para acionar uma máquina térmica acoplada a um gerador elétrico.

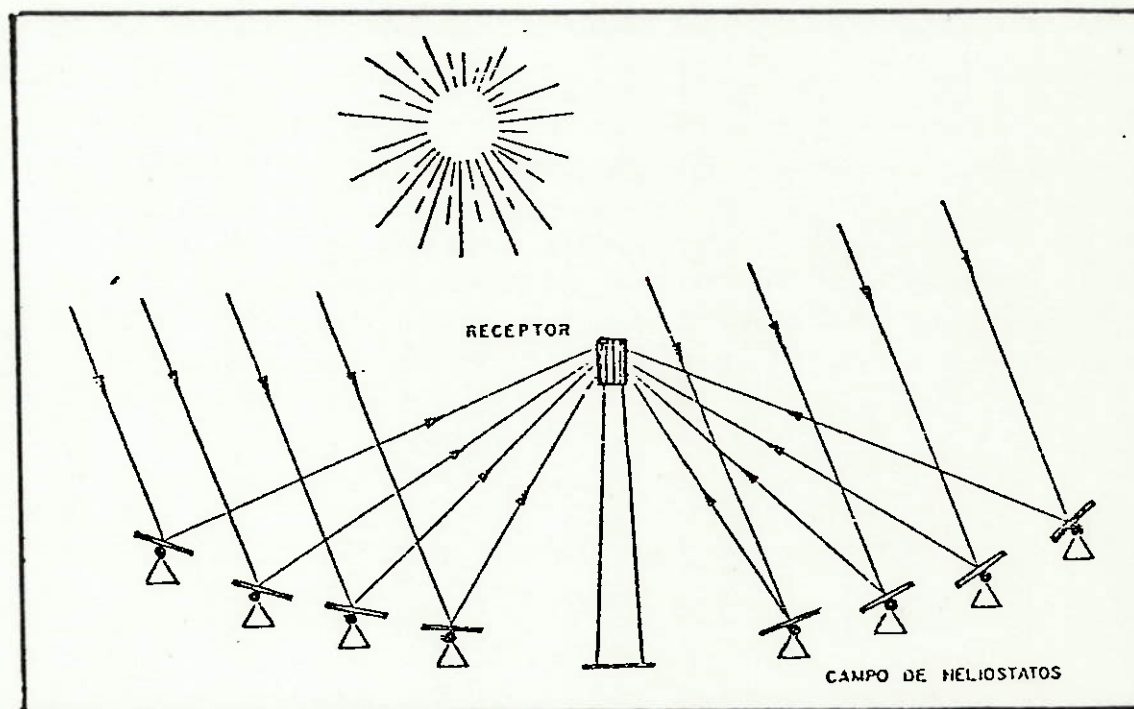


Fig.11 - Sistema de receptor central e foco pontual para geração de eletricidade [3].

Dois ciclos termomecânicos básicos têm sido considerados para a conversão de energia térmica em mecânica: o ciclo Rankine e o ciclo Brayton.

As primeiras usinas piloto de vários Megawatts elétricos que devem entrar em operação nos Estados Unidos, Europa e Japão utilizam ciclos Rankine a vapor -

d'água. A razão desta escolha é o fato de que este sistema de conversão é bem conhecido e a grande maioria dos equipamentos é disponível comercialmente.

Um ciclo Rankine simples para aplicações solares está representado na figura 12.

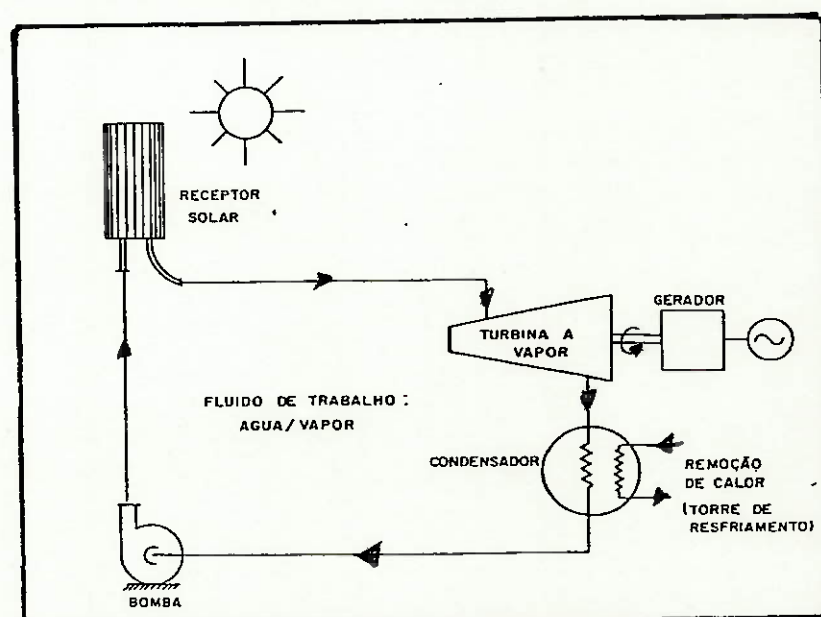


Fig.12 - Diagrama esquemático de um ciclo Rankine simples para aplicações solares [3].

O ciclo funciona da seguinte maneira: um líquido (geralmente água) é bombeado sob pressão ao receptor solar onde a absorção de calor acarreta a mudança de fase para vapor; esse vapor é expandido numa turbina produzindo energia mecânica; o vapor de baixa pressão que sai do expansor é condensado e o ciclo recomeça.

3.4) "Casas de Vidro"

A aplicabilidade das "casas de vidro" está diretamente ligada ao "efeito estufa". Graças a este efeito a temperatura interna permanece superior à externa, o que é interessante em diversas finalidades.

3.4.1)- Estufas

Permitem o cultivo de plantas fora das estações normalmente apropriadas, além de aumentar significativamente a produtividade. Seu uso é importante também em países quentes onde há escassez de água pois permitem economizar até 90% da mesma.

3.4.2)- Destilação da água

A obtenção de água potável a partir de água salobra ou salgada pode ser conseguida através do uso de destiladores solares. Dentre os vários tipos existentes, o mais simples encontra-se esquematizado na figura 13.

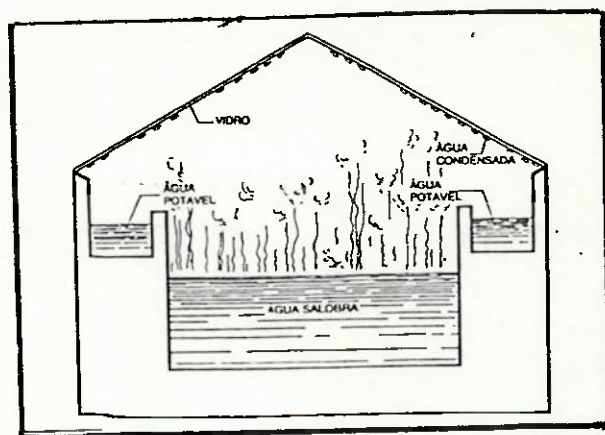


Fig.13 - Destilador solar de água [4].

O calor do sol faz evaporar a água do tanque que se condensa na superfície interna do vidro. A água é então recolhida em canaletas periféricas de onde encaminha-se a um reservatório. Um sistema bastante similar a esse - pode também ser útil na obtenção do sal de cozinha através da evaporação da água do mar.

3.5) Células Fotovoltaicas

A conversão fotovoltaica de energia solar em eletricidade é obtida em dispositivos chamados células fotovoltaicas ou solares.

Estas células trabalham segundo o princípio - de que os fótons incidentes, colidindo com os átomos de - certos materiais provocam um deslocamento dos eletrons. Um efeito de conversão fotovoltaica pode ser obtido em todos

os semi-condutores. O silício é atualmente o material mais utilizado na confecção de tais células embora a utilização de outros materiais esteja sendo estudada com o intento de reduzir os custos de fabricação.

Até o presente, a utilização de sistemas fotovoltaicos solares está limitada a potências da ordem de alguns kw. As aplicações mais comuns são:

3.5.1)- Iluminação

Dados os altos custos das células fotovoltaicas, o seu uso na geração de energia elétrica é atualmente viável somente em áreas remotas onde o acesso seja muito - difícil para a instalação de redes de eletricidade convencional. Dispositivos sinalizadores para navegação aérea em regiões montanhosas, sinalizadores para antenas de rádio e iluminação de bóias marítimas são algumas aplicações comuns das células fotovoltaicas.

3.5.2)- Aplicações aero-espaciais

As células fotovoltaicas estão sendo usadas - na geração de eletricidade para satélites e veículos espaciais. Este tipo de equipamento para captação de energia -

solar está sendo usado também no setor aeronáutico. A empresa norte-americana Lockheed está construindo um avião que pode voar a 20 mil metros de altura durante um ano sem aterrisar. O avião solar terá controle remoto e utilizará um sistema de recarga fotovoltaica semelhante ao usado pela NASA em equipamentos espaciais. Durante o dia o aparelho acumulará a energia necessária para voar a noite. Entre suas muitas aplicações poderá servir para fins militares, agrícolas e até substituir satélites em tarefas de transmissão de comunicações [7].

3.6) Instalações Solares Marítimas

Nos mares tropicais a camada superficial da água atinge temperaturas superiores a 20°C devido a radiação solar enquanto que as camadas profundas, por efeito das correntes frias, atingem temperaturas da ordem de 5°C . Essa diferença de temperatura sugere a utilização de máquinas térmicas acopladas a geradores para a obtenção de eletricidade. Devido à pequena diferença de temperaturas os rendimentos alcançados são da ordem de 4%. O baixo rendimento e as dificuldades de construção e manutenção inviabilizam atualmente tais instalações [5].

3.7) Cataventos

Como consequência das radiações solares, regiões vizinhas na superfície da Terra adquirem temperaturas diferentes ocasionando uma diferença de pressão atmosférica entre elas. No reestabelecimento do equilíbrio barométrico, o vento surge como elemento estabilizador.

A energia eólica já é conhecida há milhares de anos e são várias suas aplicações.

3.7.1)- Geração de energia elétrica

Os cataventos são dispositivos que transformam a energia dos ventos em mecânica, que por sua vez pode ser diretamente convertida em eletricidade por meio de um gerador elétrico. A incerteza quanto a disponibilidade de ventos implica na necessidade de armazenadores de energia para garantir a produção contínua de eletricidade e isto ocasiona um significativo investimento adicional.

Apesar de existirem no Brasil regiões com características favoráveis de ventos e relevo, o número de geradores eólicos de energia elétrica ainda é bastante restrito.

3.7.2)- Na agricultura

Em zonas rurais não alcançadas pela rede elétrica os cataventos são utilizados para bombear água de irrigação e na moagem de grãos.

3.8) Biomassa

A biomassa é considerada um método indireto - de aproveitamento da energia solar. Quando água e anidrido carbônico se unem pela fotossíntese para formação de carboidratos, uma parte da energia solar incidente se transforma em energia de ligação. O aproveitamento da energia armazenada nas plantas pode ser feito de diversos modos. No Brasil, a expansão das culturas de cana de açúcar e de mandioca está relacionada ao potencial de produção do álcool etílico - por fermentação, processo este de tecnologia relativamente bem desenvolvida. Dessa maneira conseguem-se combustíveis renováveis diminuindo-se consequentemente o consumo de derivados de petróleo.

4) AS PERSPECTIVAS DO USO DA ENERGIA SOLAR NA INDÚSTRIA

A possibilidade de se aplicar a energia solar como fonte de calor tem sido objeto de vários estudos e demonstrações, mas o início de seu aproveitamento em instalações industriais é, no entanto, bastante recente.

Os fabricantes de equipamentos para captação de energia solar tendem a concentrar seus esforços na comercialização de produtos para aplicações residenciais, relegando à indústria uma parcela mínima de atenção. Isto é devido principalmente ao fato de que em vários países do mundo as grandes indústrias têm sido geralmente taxadas a um preço mais baixo por unidade de energia consumida do que os consumidores domésticos, cuja demanda além de menor é mais instável.

Apesar disso os benefícios que a implantação de sistemas de captação de energia solar pode trazer ao orçamento de várias empresas é evidente. Países industrializados consomem uma considerável parcela de sua demanda global de energia no setor industrial e de uma forma geral - mais da metade deste consumo é na forma de energia térmica. Por exemplo, cerca de 40% da demanda energética dos EUA é consumida pela indústria, dos quais de 50 a 70% são utilizados na forma de calor de processos. Por calor de processos, entende-se a energia térmica necessária ao preparo e tratamento dos produtos de processos industriais.

O calor de processos é gerado, na maioria dos casos, através da queima direta de combustíveis fósseis. É evidente, portanto, que a utilização de sistemas solares - para a produção de energia térmica para a indústria apresenta o atrativo de substituir combustíveis não renováveis.

Com base nestas evidências, o Departamento de Energia dos EUA (DOE) patrocinou, no final da década de 70, vários estudos objetivando determinar o potencial econômico para o aproveitamento da energia solar pelas indústrias americanas. Estimou-se que aproximadamente 1% da energia - por elas gasta poderia ser substituída pela energia solar em 1985 e a medida que a tecnologia para a obtenção de temperaturas cada vez mais altas fosse sendo desenvolvidas este número poderia atingir a casa dos 10% no ano 2000 e possivelmente 20% no ano 2025 [8]. Este departamento tem dado também grande ênfase a projetos industriais de grande escala para incentivar o desenvolvimento e produção dos componentes e demonstrar a viabilidade técnica da aplicação de energia solar a processos industriais.

Não somente os EUA, mas vários outros países do mundo se mostram confiantes no aproveitamento da energia solar em suas indústrias tais como os países do Reino Unido, possuidores de um potencial energético solar bastante limitado se comparado ao de várias regiões brasileiras e americanas. Seus principais parques industriais encontram-se localizados entre as latitudes 52 e 56 N, onde a insola

ção média anual atinge valores da ordem de 900 kWh/m^2 em uma superfície horizontal. Este valor equivale a 55% dos valores alcançados nos EUA e a 45% dos alcançados em certas regiões do Brasil. Em virtude dos baixos índices de insolação da região e da grande frequência de dias nublados, esses países foram obrigados a desenvolver uma tecnologia própria de captação e armazenamento de energia solar para tornar o seu uso viável em suas indústrias.

O fato de países muito menos favorecidos climaticamente do que o Brasil terem conseguido desenvolver e implantar grandes sistemas solares em seus complexos industriais indica o imenso potencial brasileiro nesse campo de aplicações.

Em princípio, a energia solar pode ser aplicada diretamente a qualquer forma requerida pela indústria. Na prática, porém, o nível de temperatura é um dos fatores determinantes na avaliação das aplicações mais promissoras. O rendimento de um coletor solar diminui com o aumento de sua temperatura de operação, devido as crescentes perdas térmicas. Para se conseguir eficientemente temperaturas mais elevadas torna-se necessário utilizar sistemas de maior complexidade gerando implicações quanto à viabilidade econômica da instalação.

Com base no exposto, as indústrias com elevado consumo de calor a baixas temperaturas (menos de 100°C) são as mais promissoras economicamente. Adicionalmente, pro

cessos que se situam na faixa situada entre 100 e 250°C merecem atenção especial pois é nesta faixa que se situa a maior parcela do consumo industrial. Temperaturas superiores a 250°C são problemáticas pois os equipamentos necessários são substancialmente mais caros e sofisticados. Além disso, as indústrias que usam essas altas temperaturas, - tais como refinarias de petróleo, vidro, cimento e siderurgia são tão intensivas em energia que seriam necessárias - áreas enormes de terreno para suprir significativamente - suas demandas.

O conhecimento dos diversos níveis de temperatura em que o calor de processo é consumido é de grande importância para a escolha do sistema solar mais adequado para sua geração, contudo inexistem dados brasileiros a esse respeito. Até mesmo a parcela dos gastos energéticos das indústrias brasileiras na forma de calor de processos não se encontra claramente determinada e os resultados da tabela 1 são apenas estimativas aproximadas desses valores.

Indústria	Consumo de energia para calor de processos ($\times 10^{12}$ J).
fundição	450.000
mineração	100.000
química	125.000
não ferrosos	20.000
têxtil	30.000
alimentos e bebidas	270.000
papel e celulose	55.000
cerâmica	80.000

Tabela 1 - Estimativa do consumo de energia na forma de calor de processos de alguns ramos da indústria brasileira no ano de 1981.

A falta de dados precisos a respeito dos gastos energéticos das indústrias brasileiras aliada a um ceticismo do empresariado ante uma tecnologia não muito difundida no país, contribuem para um atraso na implementação de instalações solares. Aparentemente o setor industrial é promissor pois a indústria está acostumada a comparar custos na base da vida útil do equipamento. Sistemas solares, por definição, são intensivos em capital inicial, porém têm o potencial de baixo custo de operação. As incertezas inerentes ao mercado comercial forçam a maioria das indústrias a investirem em projetos com curto período de retorno sobre o capital investido. Naturalmente isso tem e-

NOTA: A estimativa foi feita baseada em dados retirados da publicação "Balanço Energético Nacional" de 1982 [9]. O consumo de energia para calor de processos foi considerado como sendo a soma das toneladas equivalentes de petróleo (TEP) referentes aos gastos com os diversos tipos de combustíveis utilizados pelas indústrias. Considerou-se para efeito de cálculo um valor médio para TEP igual a: $1 \text{ TEP} = 1,06 \times 10^7 \text{ kcal}$; $44,5 \times 10^9 \text{ J}$. Os gastos com energia elétrica não foram considerados pois em 1981 esta forma de energia não era praticamente utilizada para gerar calor na indústria.

feito negativo sobre investimentos em equipamentos dispendiosos, mesmo sendo estes eficientes.

Contribuem para desestimular as indústrias o fato de que devido à intermitência da radiação solar, há em geral a necessidade de se instalar um sistema convencional em paralelo para garantir uma boa confiabilidade na geração de vapor. Além disso as indústrias devem possuir telhados que suportem as cargas dos componentes solares ou áreas livres disponíveis, o que é bastante raro nas que estão situadas em áreas urbanas.

Por outro lado a manutenção rotineira de instalações solares é, em geral, bastante simples e existe um potencial de redução de custos de fabricação através de produção seriada. Deve-se ressaltar ainda o fato da energia solar ser renovável e não poluente, possibilitando a substituição de combustível fósseis.

Dada a necessidade de investir-se uma grande quantidade de capital na instalação dos sistemas solares, erros na previsão do funcionamento podem ter um grande efeito na viabilidade econômica dos mesmos. Elaboradas técnicas analíticas e de desenho, assim como simulações por computadores da performance dos vários componentes e do sistema - como um todo são justificadas na elaboração de instalações de grande porte. O estudo de sistemas já instalados é também muito importante pois permite a elaboração de projetos melhores, sem repetir erros que porventura já tenham ocor-

rido anteriormente.

Evidentemente, o futuro das aplicações de energia solar na indústria vai depender de maneira decisiva de uma política de estímulos do governo. O fato do petróleo não ser renovável e de que os recursos hídricos são limitados devem ser sempre lembrados e justificam um engajamento na busca de soluções, aplicáveis ao Brasil, que contornem a futura escassez de fontes convencionais de energia.

5) EXEMPLOS DE ALGUMAS INSTALAÇÕES SOLARES
UTILIZADAS COM FINALIDADES INDUSTRIAIS.

5.1) Sistema de Aquecimento de Água através de
Energia Solar para Lavagem Industrial.

Entrou em funcionamento em novembro de 1977 - uma instalação solar destinada à lavagem de latas para a fábrica de sopas em conserva. Campbell Soup Co., na Califórnia.

O sistema, construído e instalado pela Acurex Corporation, tem o objetivo de aquecer a água para lavagem até 90°C. O sistema encontra-se esquematizado na figura 14. A água é pré-aquecida a 60°C por 420 m² de coletores planos de uma só cobertura. O aquecimento final até 90°C é obtido através de 270 m² de coletores cilindro-parabólicos. O sistema foi projetado para produzir 45.500 l de água a 90°C e para garantir a confiabilidade dessa produção foi construído um sistema convencional em paralelo. A temperatura da água é portanto controlada por meio de um trocador de calor tendo vapor como fluido de transferência. Um tanque de armazenamento de água quente de 76.000 l de capacidade garante o suprimento contínuo de água ao longo de dois turnos diários de 8 horas de operação da indústria.

O sistema solar foi projetado para suprir 75% da demanda de água quente de uma das 20 linhas de lavagem da fábrica. Os coletores foram montados no telhado de forma a não necessitar de áreas de terreno adicional.

O custo do sistema foi de US\$ 780.000 (US\$ de 1977) tendo sido totalmente financiado pelo Departamento de Energia dos EUA.

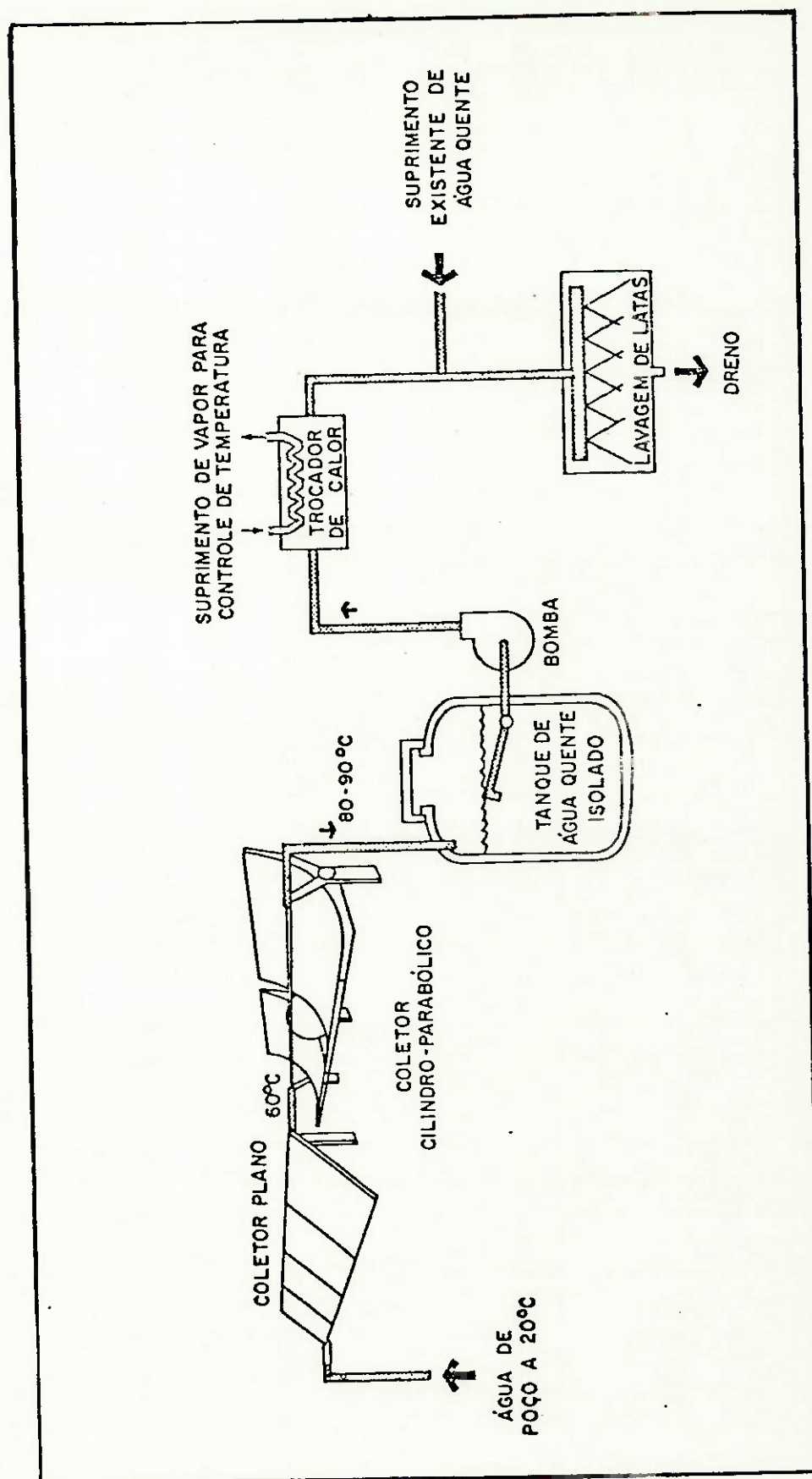


Fig.14 - Diagrama esquemático do sistema de aquecimento de água através de energia solar para lavagem industrial [3].

5.2) Sistema de Geração de Vapor para Utilização em Produção Industrial de Batatas Fritas.

Foi construído em 1980 na fábrica de Ore-Ida Foods, Inc, em Ontário, Oregon, EUA, um sistema destinado a captar energia solar e utilizá-la na geração de vapor, usado posteriormente na fabricação de batatas fritas. Um esquema simplificado da instalação encontra-se - representado na figura 15.

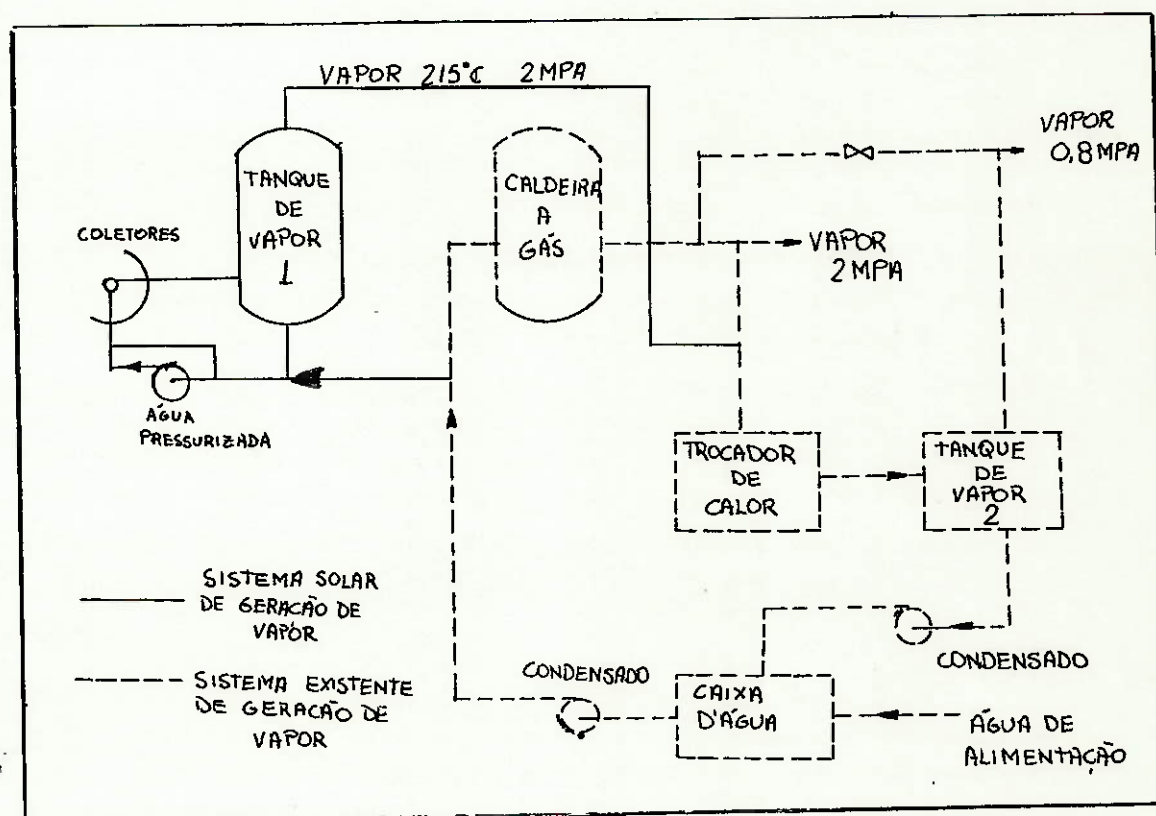


Fig.15 - Esquema simplificado do sistema de geração de vapor para produção industrial de batatas fritas [10].

Neste sistema, a energia solar é captada por um conjunto de coletores cilindro-parabólicos e aquece um fluido de transferência. Foi construída uma área de 930m^2 desses coletores em um terreno de aproximadamente 2000m^2 adjacente a indústria.

Este sistema solar destina-se a trabalhar em paralelo com um sistema convencional já antes existente.

A água proveniente de uma caixa d'água é bombeada sob pressão para os coletores solares, onde é aquecida pelo fluido de transferência, e para a caldeira a gás. Devido a uma abrupta queda de pressão causada por válvulas estranguladoras e pela entrada no tanque de vapor 1, a água aquecida via solar transforma-se em vapor a 214°C e 2 MPA. Este vapor, juntamente com o produzido pela caldeira, seguem por tubulações até os trocadores de calor das máquinas destinadas a fritar batatas.

Após passar por estes trocadores de calor, o vapor sofre um abaixamento de pressão até 0,8 MPA no tanque de vapor 2 e segue para ser usado em um processo que visa tirar a casca das batatas.

O equipamento de controle foi construído de modo que a medida que cresce o volume de vapor gerado através de energia solar, automaticamente decresce a quantidade de vapor gerada pela caldeira e vice-versa.

5.3) Sistema de Aquecimento de Água para Utilização em Processos de Revelação em um Laboratório - Cinefotográfico.

A energia térmica necessária para o aquecimento da água utilizada no processo de revelação de filmes e de papel do Laboratório Cinefotográfico CURT, em São Paulo, provinha inicialmente unicamente de uma caldeira a querosene. Com a intenção de diminuir o consumo de derivados de petróleo foi implantado em 1980 um sistema de aquecimento solar, pioneiro na época na indústria nacional. Foram construídas 60 coletores de placa plana de 2 m^2 cada um, no telhado do edifício. Este equipamento trouxe sensível redução no consumo de querosene.

Segundo esse mesmo direcionamento foram instaladas em 1982 duas bombas de calor, também pioneiras em uso industrial no Brasil, com projeto desenvolvido e executado pela ENAL. As bombas de calor são utilizadas no reaproveitamento da energia rejeitada pelo condensador do sistema de ar condicionado central do edifício. Um balanço energético simplificado do sistema pode ser descrito conforme esquema da figura 16.

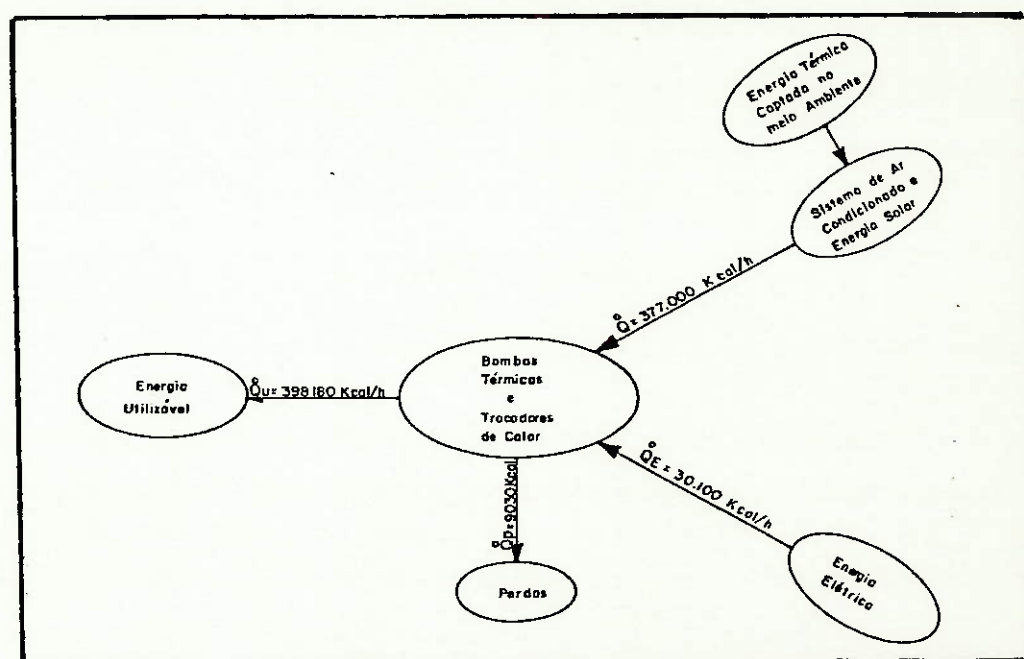
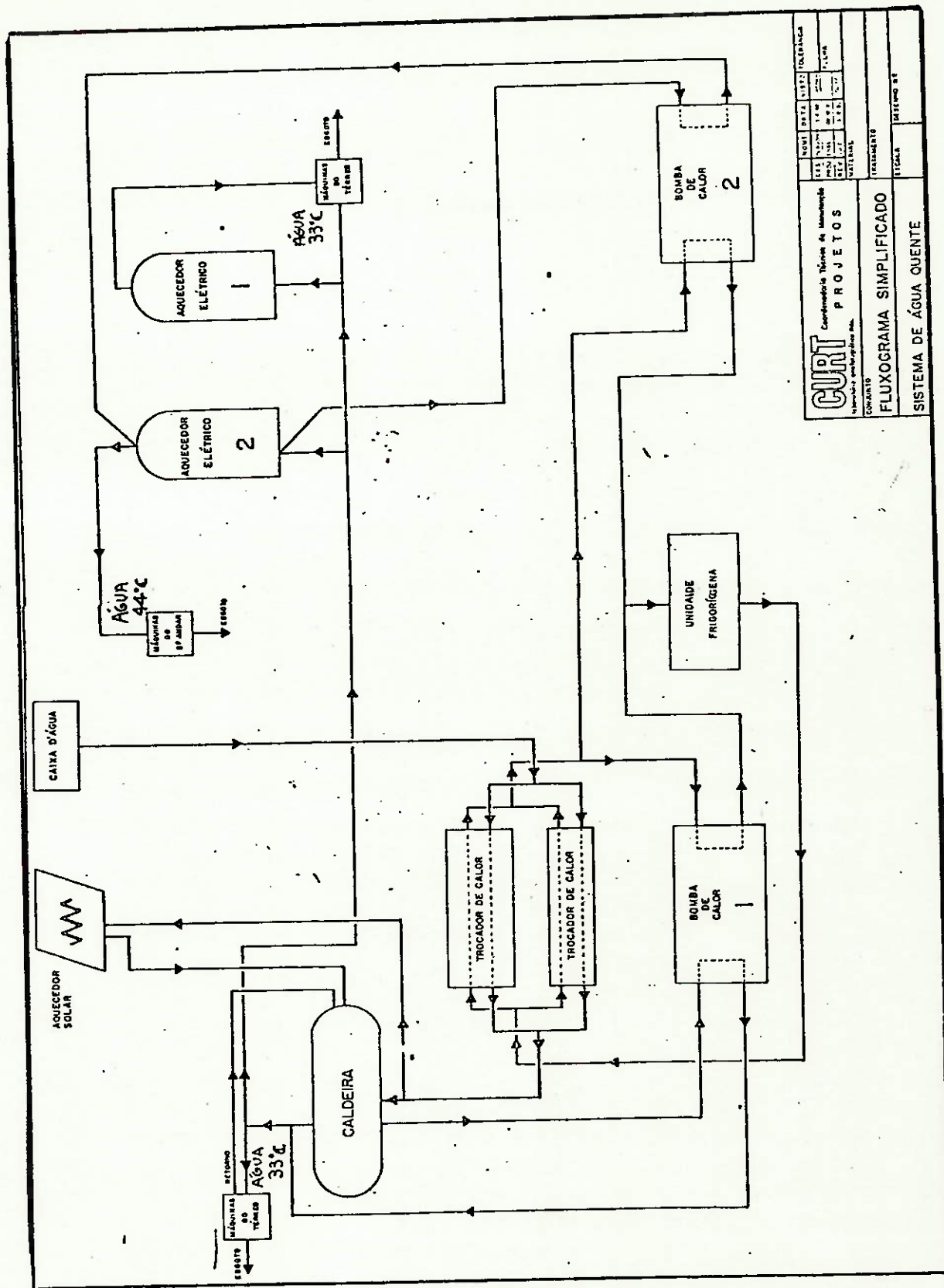


Fig.16 - Balanço energético simplificado do sistema [11].

O sistema para aquecimento de água da CURT possui basicamente quatro fontes de energia: a energia térmica captada pelo ar condicionado central, a energia solar, a energia proveniente da queima de querosene na caldeira e a eletricidade que aciona as bombas de calor e os aquecedores elétricos. A figura 17 representa simplificada o sistema utilizado.



Existem na instalação dois ciclos distintos de água que trabalham interligados, sendo um deles fechado e o outro aberto.

No ciclo fechado, a água é aquecida com energia proveniente do ar condicionado central (unidade frigorífica) e sofre então dois processos de resfriamento: nos trocadores de calor e em uma das duas bombas de calor. Retorna então à unidade frigorífica e o ciclo recomeça.

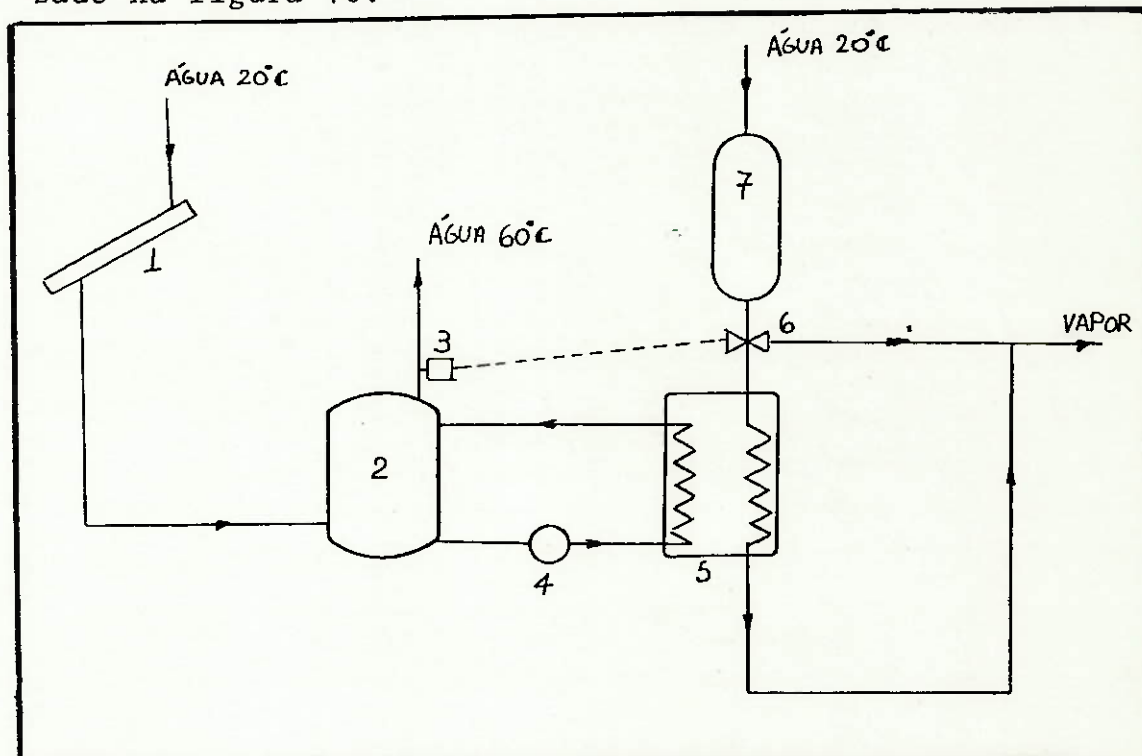
No ciclo aberto, a água proveniente da caixa d'água é aquecida nos trocadores de calor e nos coletores solares antes de ser armazenada na caldeira que trabalha também como reservatório. A água sofre então um novo aquecimento na bomba de calor 1. Uma parcela dessa água é então utilizada nas máquinas do térreo a uma temperatura aproximada de 33°C . A outra parcela sofre ainda um aquecimento adicional na bomba de calor 2 sendo então aproveitada pelas máquinas do 2º andar que necessitam de água a 44°C .

Os aquecedores elétricos aquecem a água quando a mesma não se encontra na temperatura ideal para o processo de revelação.

Nos dias frios em que a insolação é muito baixa e os aparelhos de ar condicionado se encontram desligados, a caldeira é ativada queimando querosene, para suprir esta queda no fornecimento habitual de energia.

5.4) Sistema de Aquecimento de Água através de Energia Solar para Utilização nas Dependências de um Hospital.

A instalação a ser descrita a seguir foi construída em 1981 no Hospital Universitário da USP em São Paulo e tem capacidade para aquecer, em média 24000 l de água a 60°C por dia. O sistema utilizado encontra-se esquematizado na figura 18.



- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. coletores solares de placa plana | 5. trocador de calor |
| 2. reservatório de água quente | 6. válvula pneumática |
| 3. termostato | 7. caldeira flamotubular (óleo BPF). |
| 4. bomba de circulação | |

Fig.18- Diagrama esquemático do sistema de aquecimento de água para utilização nas dependências de um hospital.

Nesta instalação foram construídos sobre o telhado do edifício 360 coletores de placa plana de 2 m^2 cada um, perfazendo um total de 720 m^2 de área de captação. A água que circula pelos coletores é proveniente da caixa d'água do hospital que se encontra a uma altura superior a do telhado. Dessa forma dispensa-se o uso de uma bomba para alimentação dos coletores.

A água depois de aquecida por via solar é armazenada em um reservatório de água quente, situado em um nível inferior ao dos coletores, de onde é bombeada para ser utilizada nas dependências do hospital (chuveiros, torneiras, etc).

Paralelamente a instalação solar existe uma instalação convencional que gera vapor para ser utilizado nas máquinas de esterilização de equipamentos cirúrgicos, secagem de roupas, etc. Caso a água na saída do reservatório de água quente não esteja na temperatura desejada, um termostato aí localizado aciona uma válvula pneumática para liberar a passagem de vapor d'água da caldeira pelo trocador de calor. Dessa forma consegue-se uma uniformidade na temperatura de saída de água quente mesmo nos dias de baixa insolação, ainda que as custas de uma certa quantidade de óleo combustível.

6) ESTUDO DA POSSIBILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA
DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR NA INDÚSTRIA
TDB - TÊXTIL DAVID BOBROW S.A.

6.1) Descrição da Unidade Industrial

Dentre os vários tipos de indústria que se utilizam de água quente em seus processos de fabricação a indústria têxtil foi escolhida para ser estudada por sua expressividade no contexto produtivo brasileiro e seus significativos gastos com energia.

Atualmente o parque têxtil brasileiro é o maior da América do Sul e ocupa o quarto lugar do mundo com aproximadamente 150 mil teares, 4,5 milhões de fusos e 300 mil máquinas de costura industriais. Estimou-se em 1981 a existência de 12 mil estabelecimentos que incluem fiação, tecelagem, malharia e confecções, acabamento e tinturaria onde se empregam diretamente cerca de 800 mil pessoas.

Em São Paulo encontra-se cerca de 60% da atividade têxtil nacional. A TDB-têxtil David Bobrow S.A., localizada na Av. Thomas Edison 929, no município de São Paulo, é uma das grandes empresas paulistas do setor produzindo tecidos de nylon, lycra, malhas circulares, etc.

A unidade industrial caracteriza-se por ser - constituída por dois setores independentes: O setor têxtil propriamente dito e o setor de "Korotan" que produz couro -

sintético.

6.1.1)- Descrição do setor têxtil

Neste setor a produção é principalmente de tecidos de lycra e de nylon. A figura 19 representa o fluxograma do processo de fabricação.

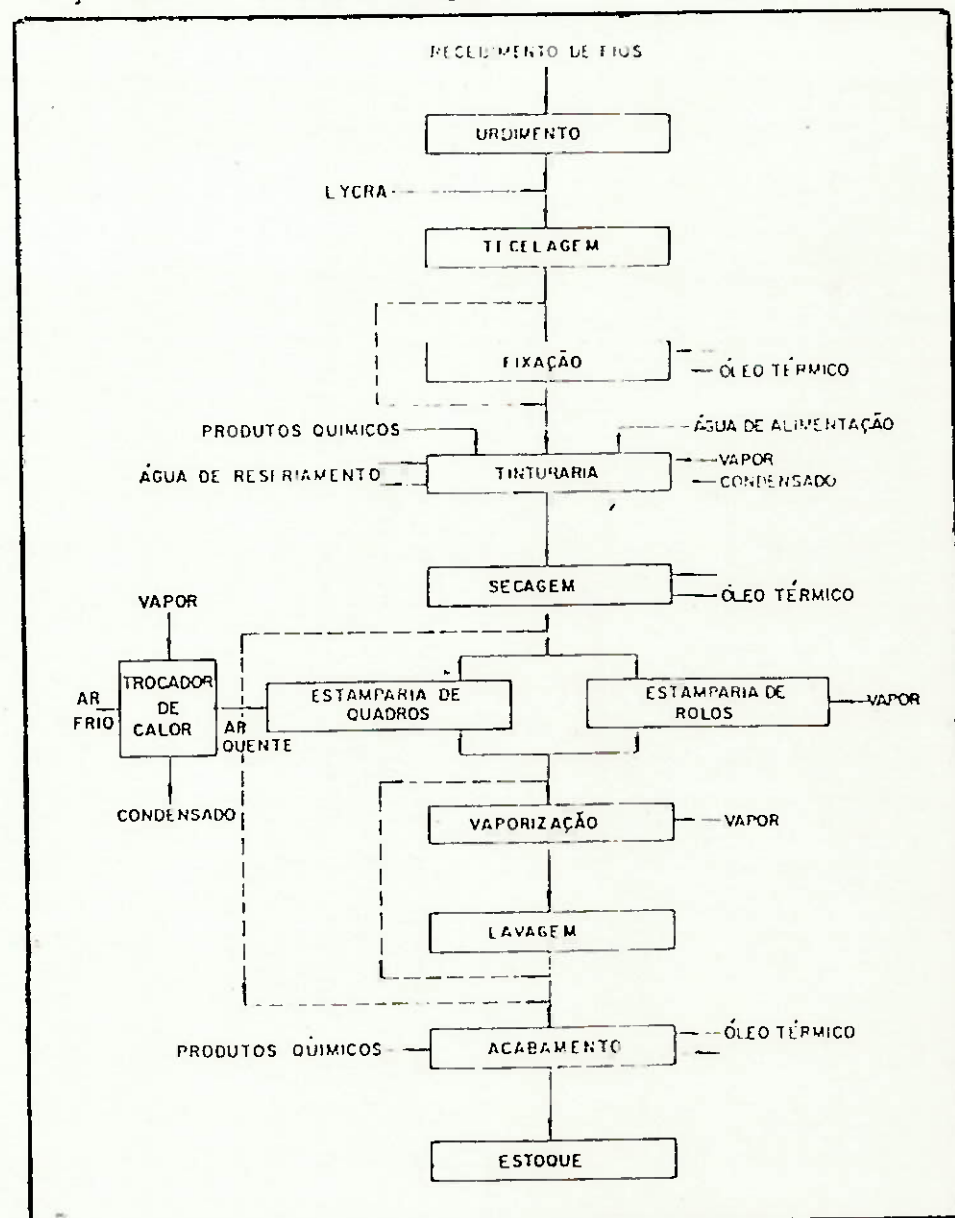


Fig.19 - Fluxograma de processo do setor têxtil [12].

Urdimento

É a primeira operação do setor têxtil e consiste em arranjar convenientemente os fios num carretel de modo a que eles possam ser trançados posteriormente para a confecção do tecido. Os fios de lycra, em virtude de já serem comprados urdidos, não passam por esta operação.

A eletricidade é a única forma de energia consumida nesta operação.

Tecelagem

Através do entrelaçamento dos fios, produzem-se as malhas nesta operação onde somente eletricidade é consumida.

Fixação

Consiste na fixação dimensional do tecido através de aquecimento. Esse processo é feito em ramas aquecidas por óleo térmico.

Tingimento

Na tinturaria colorem-se os tecidos. É um dos setores onde é grande o consumo de vapor.

Secagem

Nesta operação os tecidos são primeiramente espremidos entrando em seguida nas ramas para completar o processo de secagem.

Os tecidos que já estão com sua cor final seguem para a secção de acabamento de onde estão prontos para o consumo.

Estampagem

Existem dois setores de estampagem na unidade: o de quadros e o de rolos. No setor de quadros o processo é manual, feito sobre mesas nas quais o tecido é colado e estampado por meio de quadros movidos a intervalos regulares e uma cor de cada vez. No setor de rolos o processo é automático.

A secagem dos tecidos é feita através de ar aquecido em trocadores de calor a vapor.

Vaporização

É um tratamento térmico adicional necessário à fixação no tecido de certos tipos de corantes usados na estamparia. Os equipamentos destinados a esse fim utilizam-se de injeção direta de vapor.

Lavagem

Após a vaporização, o tecido é lavado a frio e é encaminhado ao acabamento.

Acabamento

Consiste em um banho com amaciantes, impermeabilizantes, etc seguido de um processo de secagem. O tecido sofre então inspeção do controle de qualidade e segue - para ser estocado.

6.1.2)- Descrição do setor Korotan

Este setor produz uma espécie de couro sintético que recebe o nome de Korotan. A figura 20 representa o fluxograma do processo de fabricação.

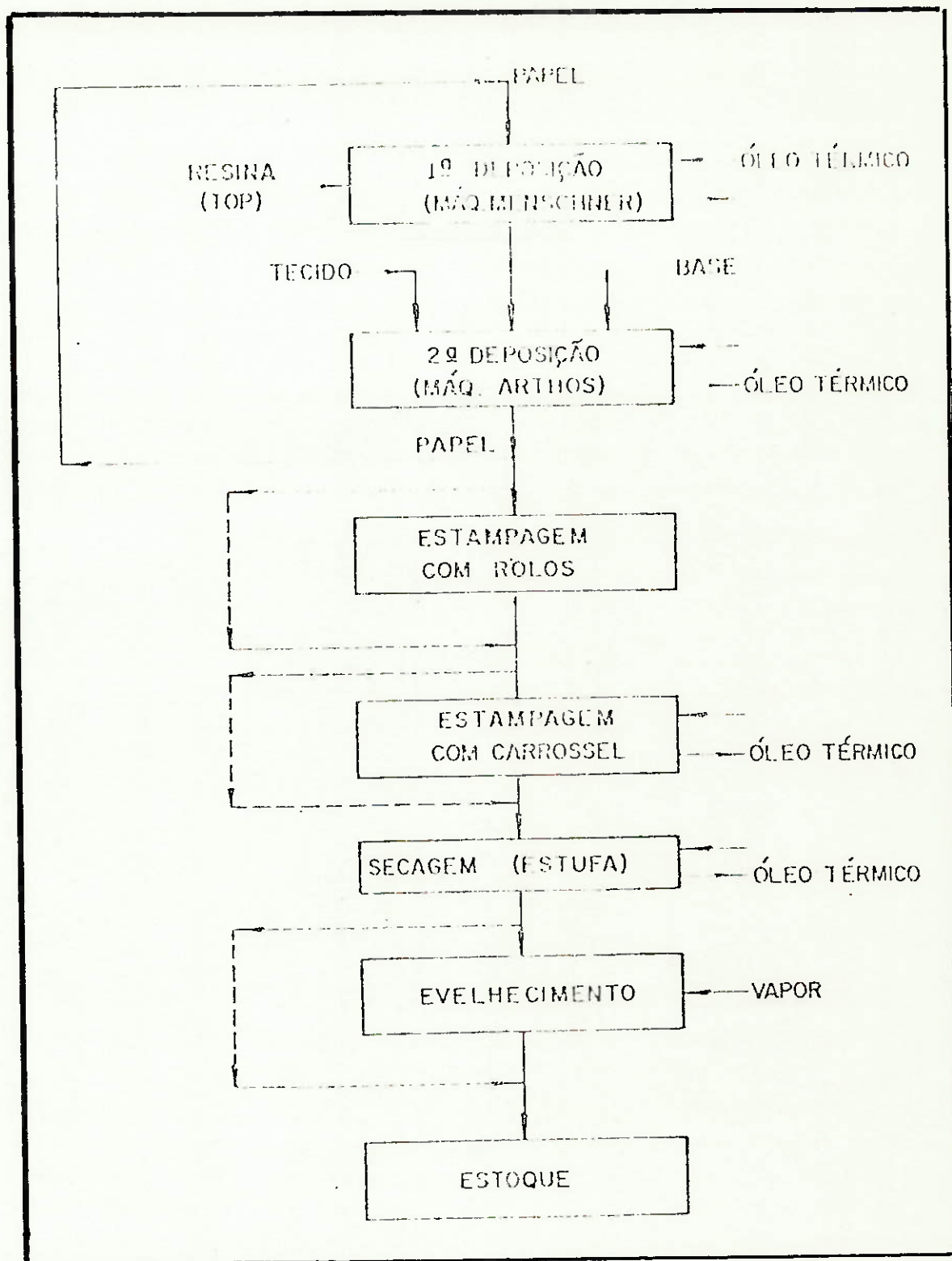


Fig.20 - Fluxograma de processo do setor Koroton [12].

O Korotan é produzido através de duas deposições sucessivas de resinas sobre uma base de tecido.

Primeira deposição

A primeira deposição é feita sobre um papel - especial que serve apenas de suporte ao laminado formado em sua superfície, sendo posteriormente retirado. Esse - processo é feito em uma máquina provida de aquecimento - por meio de óleo térmico para secar a resina.

Segunda deposição

Nesta etapa ocorre a deposição de uma base - (adesiva) que unirá ao tecido a lâmina plástica formada - sobre o papel na primeira deposição.

À saída da máquina, também provida de aquecimento por meio de óleo térmico, o papel é separado do resto do produto e ambos são embobinados. O papel é reutilizado (no máximo cinco vezes) e o produto conduzido à estampagem.

Estampagem

Esta operação pode ser feita com carrossel ou com rolos.

Secagem

O produto sofre então um processo de secagem - em uma estufa aquecida por óleo térmico.

Envelhecimento

O envelhecimento é feito num equipamento com injeção direta de vapor, que amassa o produto, conferindo-lhe um aspecto envelhecido. No final desta operação o produto é examinado pelo controle de qualidade e estocado.

6.2) Descrição dos Sistemas de Aquecimento de Óleo Térmico e de Geração de Vapor

6.2.1)- Descrição do sistema de aquecimento de óleo térmico

Duas caldeiras, gerando em média 4800 MJ/h através da queima de óleo BPF-E, aquecem óleo térmico até a temperatura de 290°C. Este óleo é então distribuído para várias máquinas e retorna então a uma temperatura de 260°C para ser reaquecido. A figura 21 representa esquematicamente o sistema de óleo térmico.

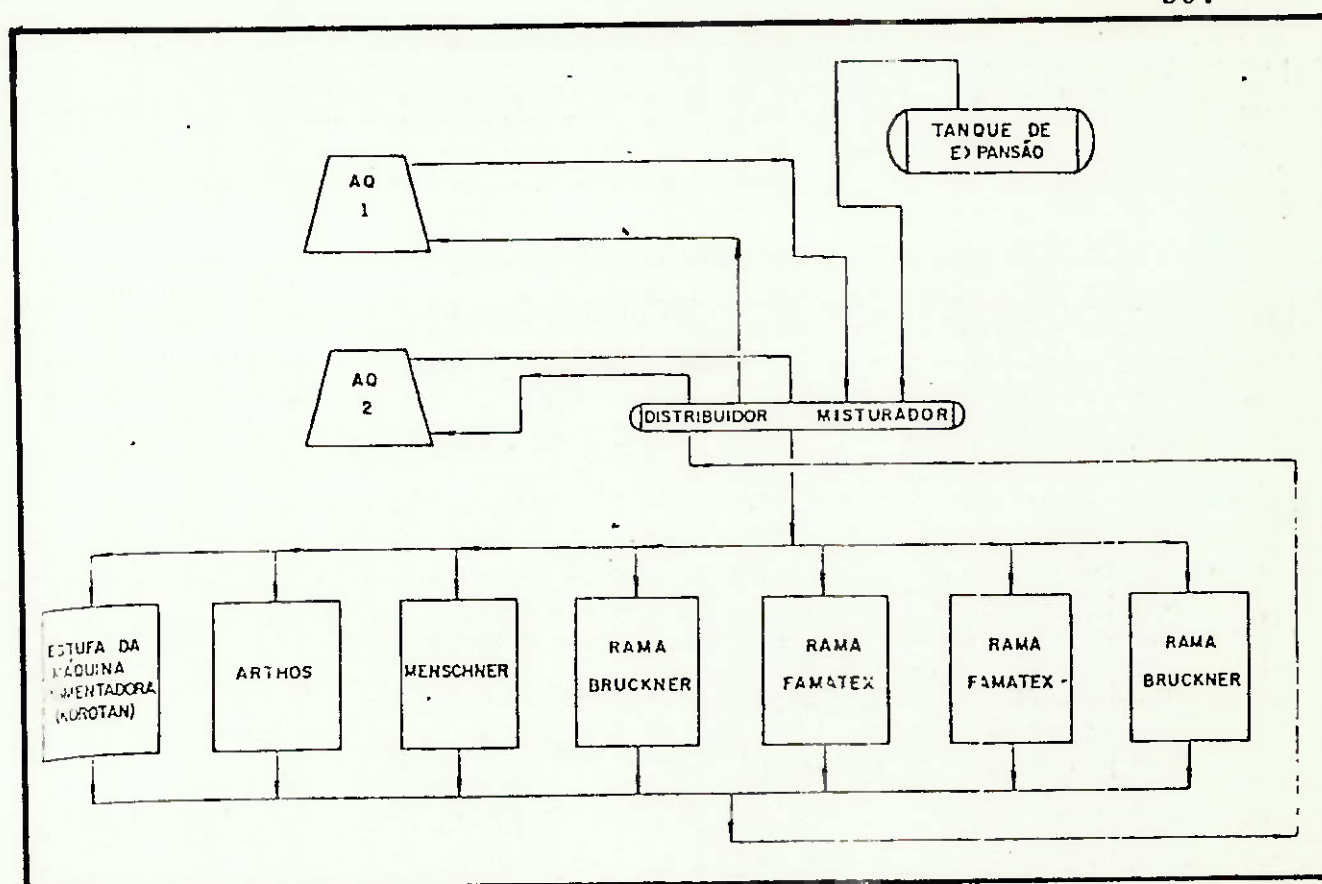


Fig.21 - Esquema do sistema de óleo térmico [12].

6.2.2)- Descrição do sistema de geração de vapor

A instalação possui três caldeiras que queimam óleo BPF-E e geram em média 3,2 ton/h de vapor a 172°C e 833 KPa. A figura 22 representa esquematicamente o sistema da instalação.

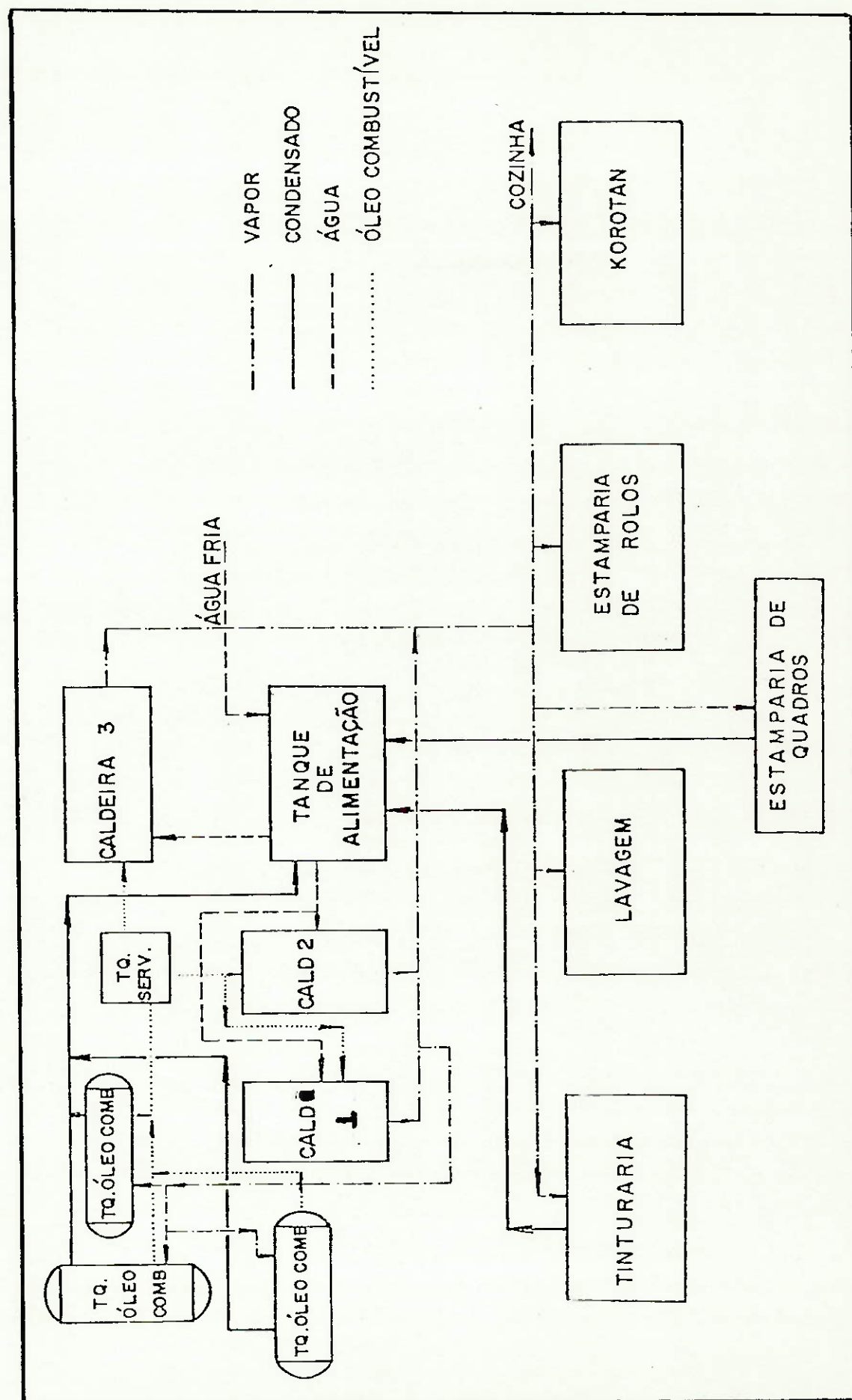


Fig.22 - Fluxograma do sistema de geração e distribuição de vapor e retorno do condensado [12].

As caldeiras 2 e 3 são de reserva e não trabalham normalmente.

O vapor gerado é utilizado no pré-aquecimento do óleo queimado nas caldeiras, na tinturaria, lavagem e demais secções da indústria. O condensado retorna então ao tanque de alimentação a uma temperatura de 96°C para realimentar a caldeira.

Para suprir a demanda de água da caldeira é necessário a captação de água fria da rede pública com uma vazão média de $0,67 \text{ m}^3/\text{h}$ e a uma temperatura de 20°C .

Foi constatado um consumo médio de 263 kg/h de combustível pela caldeira 1, que possui um rendimento aproximadamente igual a 75%.

6.3) Considerações sobre o tipo de instalação solar mais viável para ser implantado na indústria

Como visto anteriormente, os gastos com combustíveis são devidos ao aquecimento de óleo térmico e à geração de vapor.

Na instalação de aquecimento de óleo térmico, este após ser distribuído pelas máquinas a uma temperatura de 290°C , retorna às caldeiras a uma temperatura de 260°C para ser reaquecido. Em virtude do óleo se encontrar a uma temperatura muito alta no início do processo de reaqueci-

mento torna-se impraticável, tanto tecnologicamente como economicamente, a implantação de um sistema de coletores solares com esta finalidade.

Na instalação de geração de vapor poderia ser construído um sistema solar que se utilizasse de coletores concentradores para aquecimento da água até aproximadamente 170°C e consequente transformação em vapor. Uma instalação desse tipo no entanto, exigiria um investimento maciço de capital inicial que dificilmente seria concretizado pela direção da empresa. Além disso as dificuldades ainda existentes no Brasil inerentes a construção de coletores concentradores acabariam por tornar inviável um projeto deste porte.

A utilização de coletores de placas planas no pré-aquecimento da água da caldeira apresenta-se como única alternativa viável do aproveitamento de energia solar nesta indústria. Em virtude do condensado que alimenta a caldeira retomar ao tanque de alimentação a uma temperatura de 96°C , os coletores solares só poderiam ser usados no aquecimento da água de reposição que é proveniente da rede pública a uma temperatura de 20°C .

6.4) Pré-Cálculo da Instalação Solar Destinada ao Pré-Aquecimento de Água para a Caldeira.

A instalação consome $0,67 \text{ m}^3/\text{hora}$ de água vin-

da diretamente da rede pública. Este valor somado a vazão correspondente ao retorno do condensado que é de $2,53 \text{ m}^3/\text{h}$ supre a demanda de água da caldeira.

Analisaremos agora os efeitos de usarmos uma - instalação de coletores solares de placa plana em paralelo a instalação já existente, no pré-aquecimento da água de - reposição.

6.4.1)- Cálculo da área de captação necessária

Os coletores de placa plana dificilmente conseguem aquecer a água a temperaturas superiores a 70°C . Além disso o rendimento dos mesmos cai a medida que cresce a temperatura do fluido a ser aquecido. Em virtude disso adotaremos, para efeito de cálculo, o valor de 65°C para a temperatura da água na saída dos coletores.

A quantidade de calor necessária para elevar a temperatura da água até este valor é:

$$\dot{Q} = \mu \dot{V}(h_2 - h_1)$$

onde: h_1 = entalpia da água a 20°C na entrada do coletor = 20 kcal/kg

h_2 = entalpia da água a 65°C na saída do coletor = 65 kcal/kg

μ = densidade da água = 1000 kg/m^3

$\dot{V}$ = vazão de água = $0,67 \text{ m}^3/\text{hora} = 16,08 \text{ m}^3/\text{dia}$
(a instalação é usada 24 horas por dia).

$\dot{Q}$ = quantidade de calor necessária para aquecer de 20°C a 65°C a água de reposição consumida pela caldeira durante um dia.

Temos portanto:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= 1000 \cdot 16,08 \cdot (65-20) = 723600 \text{ kcal/dia} = \\ &= 3,02 \times 10^9 \text{ J/dia}.\end{aligned}$$

A área de captação necessária será portanto:

$$S = \frac{\dot{Q}}{I \cdot \eta_{\text{coletor}}}$$

onde:

I = intensidade média anual da radiação solar em
São Paulo = $3944 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{dia} = 16,5 \times 10^6 \text{ J/m}^2 \cdot \text{dia}$
(anexo I)

η_{coletor} = rendimento do coletor

A determinação da eficiência de um coletor solar depende de um número muito grande de variáveis tais como:

- a) material do coletor
- b) tipo de superfície absorvedora da radiação solar
- c) intensidade da radiação solar
- d) área do coletor
- e) número de coberturas transparentes
- f) qualidade do isolamento térmico

- g) temperatura de entrada e saída da água
- h) velocidade do vento.

Em virtude da complexidade de cálculo decorrente do número muito grande de parâmetros a serem considerados, costuma-se nas aplicações práticas fixar determinados parâmetros como intensidade de radiação, material de que é feito o coletor, tipo de superfície de absorção e número de vidros da cobertura transparente e em função destes elementos prepara-se um gráfico eficiência versus diferença de temperatura (Δt). O gráfico da figura 23 será utilizado na estimativa da eficiência dos coletores e segundo a referência [13] os resultados obtidos são bastante satisfatórios.

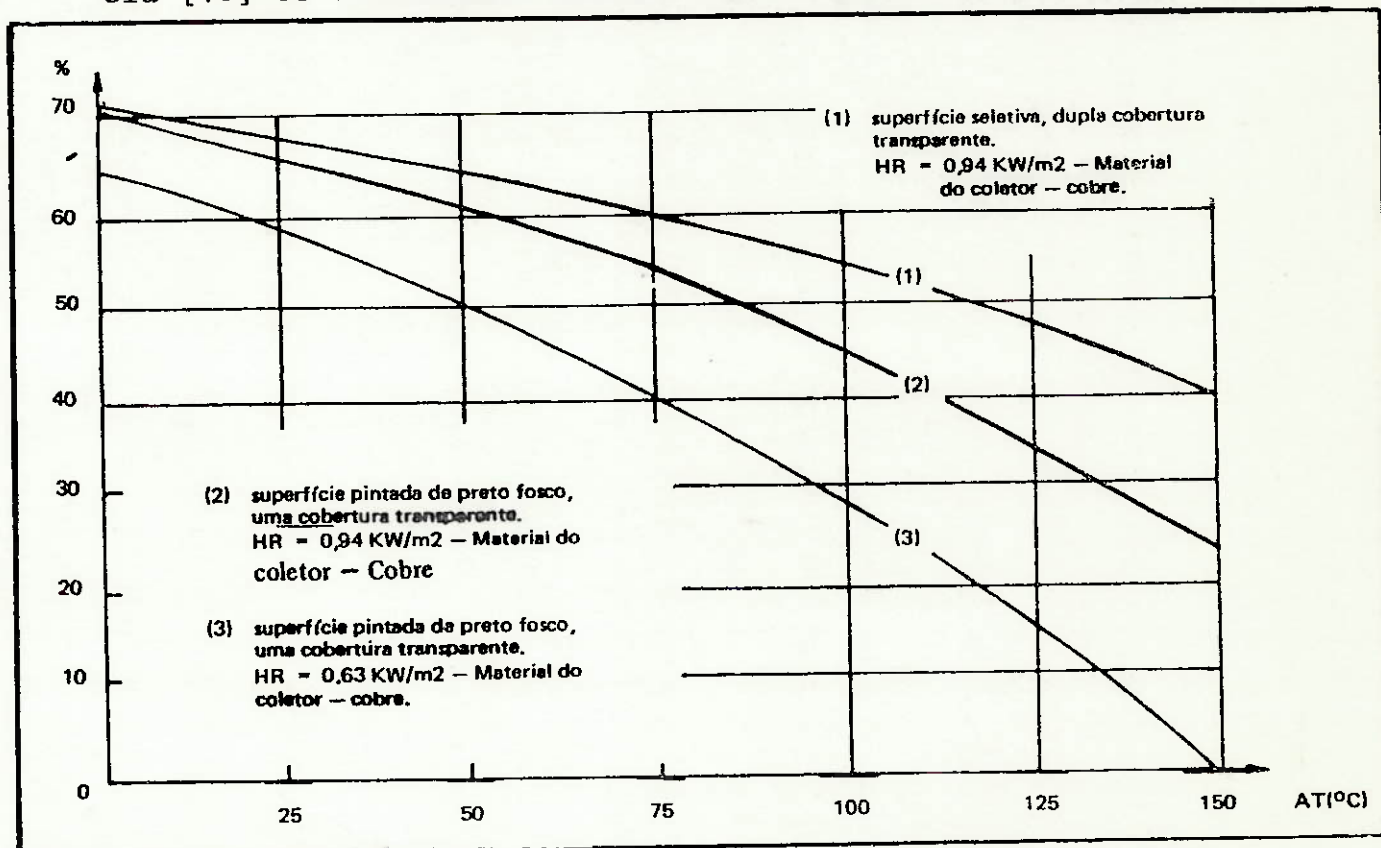


Fig.23 - Eficiência do coletor solar de placa plana [13].

Para São Paulo, onde a insolação média anual é igual a $16,5 \times 10^6 \text{ J/m}^2\text{dia}$, pode se considerar que praticamente toda a radiação ocorre, em média, num período de 10 horas durante o dia. Teremos portanto uma radiação aproximadamente igual a $0,46 \text{ kw/m}^2$. Assumindo que a superfície de absorção do coletor seja de cobre pintado de preto fosco e que seja usada uma cobertura transparente, podemos interpolar do gráfico 1, para um ΔT de 45°C , o valor aproximado do rendimento do coletor. Obtemos então:

$$\eta_{\text{coletor}} = 45\%$$

A área de captação S necessária será portanto:

$$S = \frac{3,02 \times 10^9}{16,5 \cdot 10^6 \cdot 0,45} = 407 \text{ m}^2$$

6.4.2)- Cálculo da economia de combustível anual devido à implantação do sistema de captação de energia solar.

O óleo combustível utilizado pela caldeira é o óleo BPF-E cujo poder calorífico inferior é igual a $39,14 \times 10^6 \text{ J/kg}$ (9364 kcal/kg). A economia de combustível diária (E_c) vale:

$$E_c = \frac{\dot{Q}}{P_{ci_{\text{óleo}}} \cdot \eta_{\text{caldeira}}}$$

onde: P_{ci} = poder calorífico inferior do óleo BPF-E =
 $= 39,14 \times 10^6 \text{ J/kg}$

$\eta_{\text{caldeira}} = 75\%$

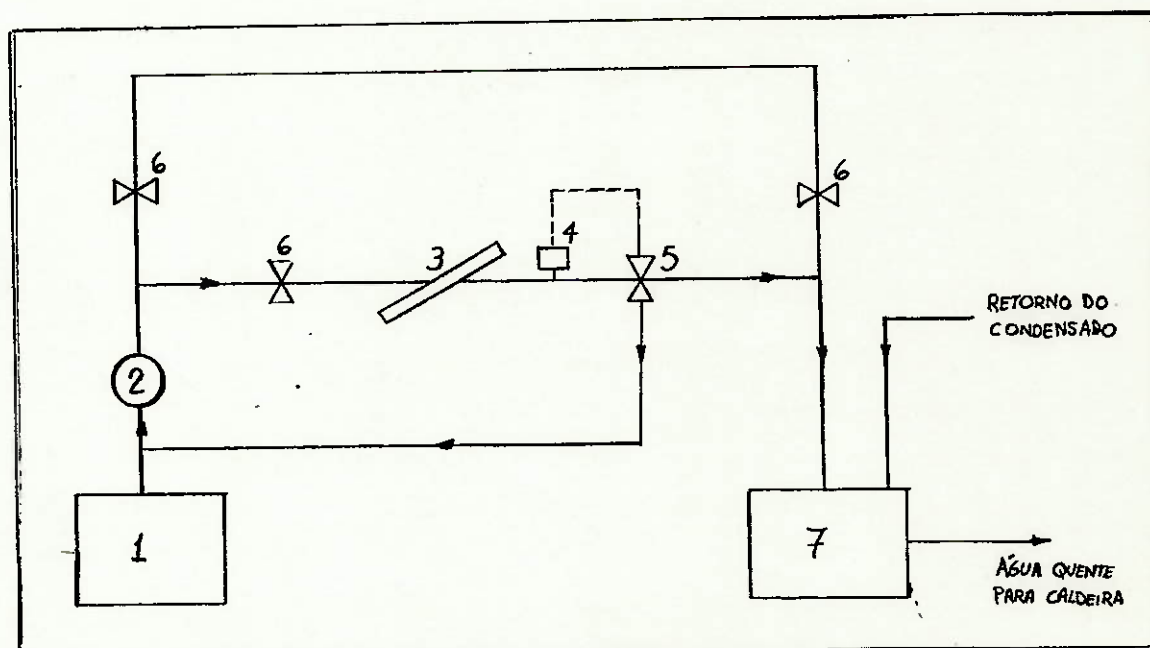
obtemos portanto:

$$E_c = \frac{3,02 \cdot 10^9}{39,14 \cdot 10^6 \cdot 0,75} = 103 \text{ kg de combustível/dia}$$

O sistema de geração de vapor trabalha em média 300 dias por ano, o que acarretaria uma economia de combustível anual igual a 30 900 kg de combustível.

6.4.3)- Esquema da instalação de coletores solares

A figura 24 ilustra simplificada a instalação de aquecimento solar a ser construída.



- | | |
|--|--|
| 1. caixa d'água | 5. válvula pneumática(3 posi-
ções) |
| 2. bomba de circulação | 6. válvulas comuns |
| 3. coletores solares de
placas planas | 7. tanque de armazenamento |
| 4. termostato | |

Fig. 24 - Esquema da instalação solar para pré-aquecimento da água de alimentação da caldeira.

A água proveniente da caixa d'água a 20°C circula pelos coletores aquecendo-se até 65°C e é armazenada no tanque de alimentação. Quando a temperatura da água na saída dos coletores for inferior a desejada um termostato acionará uma válvula pneumática que fará com que a água recircule pelos coletores. A instalação prevê ainda uma tubulação em paralelo a que alimenta os coletores para ligar - diretamente a caixa d'água ao tanque de alimentação quando isso se fizer necessário.

Para maximizar a captação de energia solar é fundamental posicionar-se os coletores corretamente. Eles serão montados sobre o telhado da fábrica com as faces voltadas para o Norte e com um ângulo de inclinação em relação ao plano horizontal igual à latitude da cidade mais um ângulo de correção que é dado pelo gráfico da figura 25.

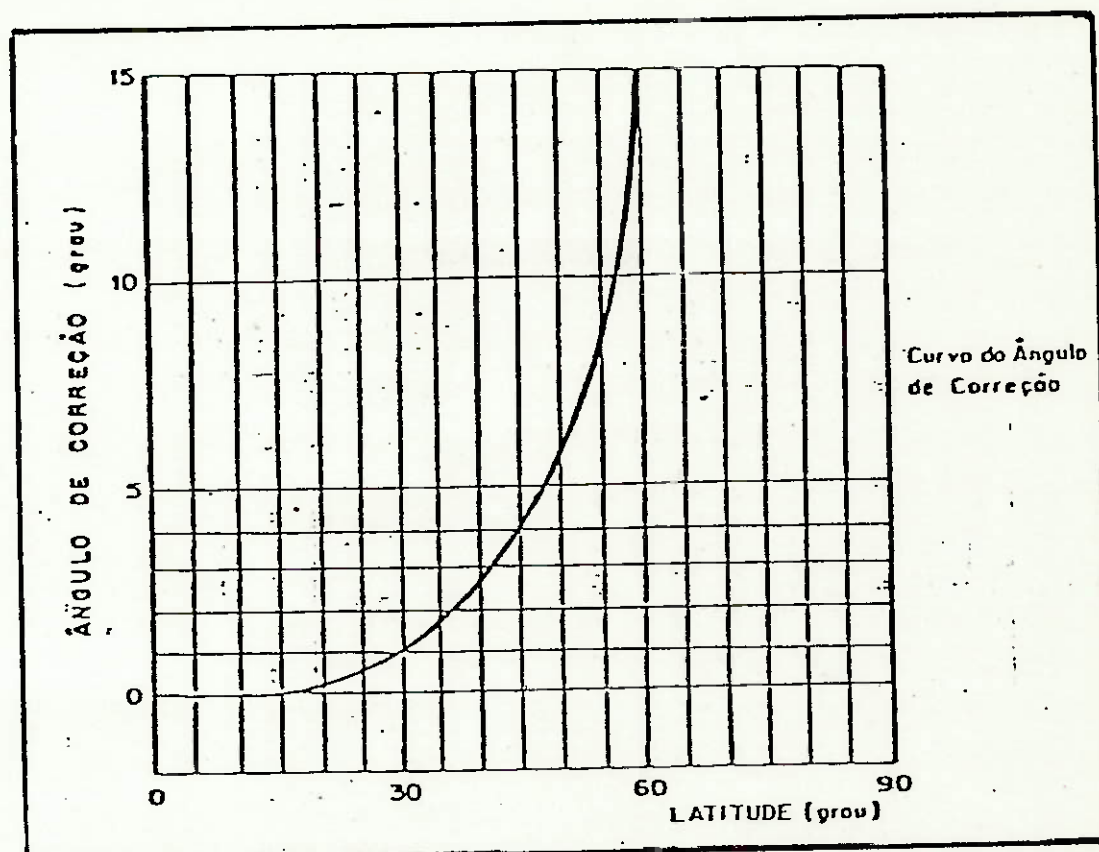


Fig.25 - Curva do ângulo de correção em função da latitude do local onde são instalados os coletores de placa plana. [14].

A cidade de São Paulo está localizada na latitude 24° Sul (anexo 1). Neste caso a inclinação ótima será em torno de $24^{\circ} + 1^{\circ} = 25^{\circ}$.

Como no inverno o ângulo formado entre os raios solares e o plano horizontal é menor, deve-se compensar este fato inclinando-se mais os coletores.

Como a temperatura de entrada nos coletores é fator fundamental no rendimento dos mesmos deve-se arran-

jar os coletores de modo a obter-se o rendimento máximo possível. A figura 26 ilustra um arranjo racional para os coletores.

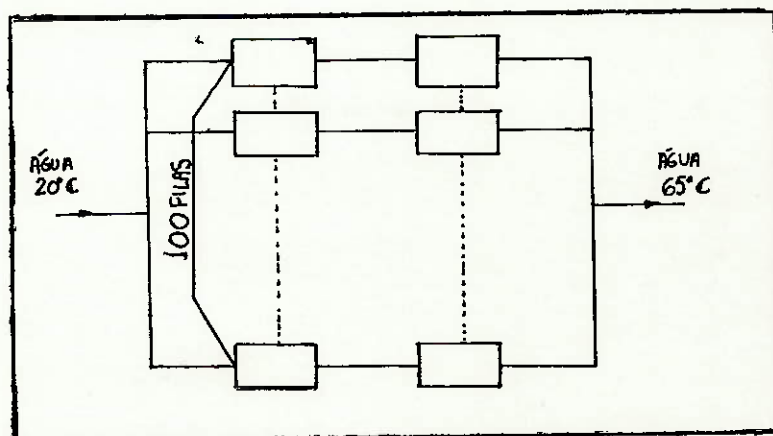


Fig.26 - Arranjo dos coletores.

As placas coletoras a serem utilizadas terão área de captação igual a 2 m^2 com as seguintes características:

- dimensões da placa: 1000 x 2000 x 90 mm
- tubos coletores em cobre
- placa coletora de alumínio anodizado preto fosco
- uma cobertura de vidro com 3mm de espessura (baixo teor de ferro)
- caixa estrutural de alumínio anodizado fosco
- isolamento com lã de vidro.

6.4.4)- Análise quanto aos custos da instalação de captação de energia solar e determinação do tempo de retorno do capital investido.

Serão necessárias 200 placas coletoras de 2 m² (dimensão mais comumente fabricada pelas indústrias nacionais) cujo custo unitário é em outubro de 1984 aproximadamente igual a 500 mil cruzeiros (27,8 ORTNs). Na compra de um lote dessas proporções pode-se conseguir, segundo uma avaliação superficial dos fornecedores, uma redução de até 20% neste valor. O conjunto de placas coletoras sairia então por volta de 80 milhões de cruzeiros (4445 ORTNs).

Pode-se estimar em aproximadamente 15% do valor das placas coletoras, os custos referentes à compra - das tubulações de cobre, isolamentos, válvulas, termostato e a mão de obra necessária à execução da instalação.

O sistema de captação de energia solar teria um custo inicial aproximadamente igual a 90 milhões de cruzeiros (5000 ORTNs). Seria ainda necessário gastar-se aproximadamente 2% do valor da instalação anualmente com manutenção (limpeza, reposição de peças quebradas, etc) e com pagamento da eletricidade consumida pela bomba de circulação. Isto equivaleria a 1 milhão e 800 mil cruzeiros (100 ORTNs).

A economia de combustível anual conseguida - com a instalação solar é de 30,900 l . Com o preço atual - do óleo BPF em 400 cruzeiros (0,022 ORTNs) essa economia -

equivaleria a praticamente 12 milhões e 400 mil cruzeiros (690 ORTNs).ao ano.

Considerando-se a taxa de juros do mercado - igual a 6% (valor pago pelas cadernetas de poupança)e com o auxílio de fundamentos da matemática financeira podemos calcular o tempo de retorno do capital investido.

Sendo CI = custo da instalação em ORTNs = 5000

M = gastos anuais com manutenção e eletricidade em ORTNs = 100

Ec = economia com combustível anualmente em ORTNs = 690

i = taxa de juros do mercado = 6% ao ano

n = número de anos necessários para o retorno do capital.

Vale a seguinte fórmula:

$$CI (1+i)^n + M \left| \frac{(1+i)^n - 1}{i} \right| = E_c \left| \frac{(1+i)^n - 1}{i} \right|$$

teremos então:

$$5000 (1,06)^n + 100 \left| \frac{(1,06)^n - 1}{0,06} \right| = 690 \left| \frac{(1,06)^n - 1}{0,06} \right|$$

Simplificando esta equação obteremos:

$$(1,06)^n = 2,03$$

portanto:

$$n = \frac{\log 2,03}{\log 1,06} = 12,15$$

Isto significa que após um período de 12 anos a instalação já terá sido paga em função da economia de combustível conseguida. É importante lembrar que este é um valor aproximado pois podem ocorrer variações na taxa de juros do mercado além de aumentos superiores aos devido à inflação no preço do combustível. Serve contudo para refletir a ordem de grandeza do período de retorno do capital investido.

7) CONCLUSÃO

A utilização da energia solar em aplicações industriais mostra-se tecnologicamente viável sob várias formas. Dada a simplicidade inerente ao aquecimento de água até baixas temperaturas (da ordem de 70°C) através de coletores de placa plana, este tem sido o meio mais difundido no Brasil do aproveitamento desta alternativa energética.

Verificou-se contudo, no decorrer do trabalho, que na construção de instalações com essa finalidade é necessário o investimento de grandes quantidades de capital. Face a atual situação político-econômica brasileira, os empresários do setor industrial veem com cautela quaisquer investimentos deste tipo, ainda mais tratando-se de uma tecnologia relativamente recente em nosso país.

É recomendável que antes de se cogitar a implantação de coletores solares, sejam feitos investimentos em simples medidas de conservação de energia e de melhoria na eficiência dos equipamentos. Algumas indústrias desperdiçam grande quantidade de energia por não isolarem termicamente de forma adequada suas tubulações de água quente e vapor, por exemplo. Outras negligenciam o calor dos gases quentes que saem de suas chaminés sem se dar conta das significantes economias de combustível que poderiam ser conseguidas caso aproveitassem esse calor para aquecer

água, óleo etc.

Apesar de que para várias indústrias a instalação de sistemas de captação solar possa deixar de ser viável economicamente dado o grande período necessário ao retorno do capital, isto não pode ser visto como regra geral.

Indústrias situadas em áreas distantes dos centros urbanos onde os custos de transporte de combustível - passam a ser significativos, ou aquelas situadas em áreas de intensa radiação solar, podem conseguir um rápido retorno do capital investido em instalação deste tipo.

É evidente ainda que sistemas mais modernos e eficientes serão implantados em indústrias brasileiras no futuro, mas este será em processo gradual que ocorrerá a medida que tecnologias avançadas a esse respeito forem sendo efetivamente assimiladas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] - PALZ, Wolfgang. Energia solar e fontes alternativas.
1ª ed. São Paulo, Hemus, 1981.
- [2] - MEINEL, Aden B.; MEINEL Marjorie P. Applied solar energy - an introduction. 2ª ed. USA, Addison Weley Publishing Company, 1977.
- [3] - CENTRO DE TECNOLOGIA PROMON. As perspectivas do uso da energia solar no estado de São Paulo. São Paulo, 1981.
- [4] - BRASIL. Ministério da Indústria e do Comércio. Secretaria de Tecnologia Industrial. Manual de energia solar. Brasília, 1978.
- [5] - COMETTA, Emilio. Energia solar - utilização e empregos práticos. São Paulo, Hemus, 1982.
- [6] - WILLIAMS, J. Richard. Solar energy, technology and applications. 2ª ed. USA, Ann Arbor Science Publishers Inc. 1975.
- [7] - EUA constroem avião solar. O Estado de São Paulo São Paulo, 26 de outubro de 1984.
- [8] - LEWIS, Christopher W.. The prospects for solar energy use in industry within the United Kingdom. Solar Energy, Great Britan, Vol.24, pg.47-53, 1980.

- [9]- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional. Brasília, 1982.
- [10]- EVER Wonder just how solar energy could be applied to a complex industrial process?. Solar Energy Digest, pg.3, june 1981.
- [11]- SILVA,Robson Ribeiro da. Bombas térmicas - caso CURT São Paulo, 1982.
- [12]- RELATÓRIO sobre gastos energéticos da indústria têxtil TDB . IPT, São Paulo, 1982.
- [13]- BEZERRA, Arnaldo M. . Energia solar - aquecedores de água. Paraná, LITEL, 1980.
- [14]- MANUAL de projetos de coletores solares.
CODETEC - Companhia de desenvolvimento tecnológico.

ANEXO 1

RADIAÇÃO SOLAR E TEMPERATURAS MÉDIAS NAS PRINCIPAIS CIDADES BRASILEIRAS

CIDADE (latitude)	IRRADIAÇÃO (Kcal/m ² /dia) e temperaturas (°C)	JAN.	FEV.	MAR.	ABR.	MAI.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OUT.	NOV.	DEZ.	Médias anuais
P. ALEGRE (30° s)	Irradiação	5382	4822	4105	3267	2386	1999	2191	2774	3267	4272	5101	5603	3755
	Temp. med.	25.4	25.1	24.0	20.5	17.8	15.4	14.9	15.9	17.4	19.5	21.7	23.9	20.1
CURITIBA (26° s)	Irradiação	4993	4883	4272	3525	2996	2637	2913	3412	3583	4022	4672	4965	3902
	Temp. med.	21.3	26.3	20.6	17.8	15.5	14.1	13.6	15.0	16.0	17.3	18.6	20.1	17.6
SÃO PAULO (24° s)	Irradiação	4937	4852	4327	3726	3135	2809	3051	3606	3755	3939	4614	4577	3944
	Temp. med.	22.9	23.0	22.5	20.4	18.1	17.1	16.5	18.0	19.2	19.5	20.6	21.8	20.0
RIO DE JANEIRO (23° s)	Irradiação	4965	4729	4272	3582	2885	2637	2857	3384	3525	3717	4270	4424	3775
	Temp. med.	26.4	26.6	26.0	24.3	22.8	21.9	21.3	21.8	22.1	22.7	23.6	25.0	23.7
B. HORIZONTE (20° s)	Irradiação	5104	5098	4771	4385	3911	3640	3856	4549	4557	4549	4672	4549	4467
	Temp. med.	23.4	23.6	23.2	21.9	20.0	18.9	18.5	20.0	21.7	22.3	22.3	22.4	21.5
BRASÍLIA (16° s)	Irradiação	4965	4944	4744	4414	4216	4098	4355	4970	4844	4383	4328	4522	4556
	Temp. med.	22.2	22.2	22.6	21.8	20.2	19.3	18.8	20.9	22.6	22.3	22.0	21.8	21.4
SALVADOR (13° s)	Irradiação	5270	5098	4633	4041	3212	3153	3301	3911	4471	4854	4815	5049	4311
	Temp. med.	26.5	26.6	26.6	26.0	25.0	24.1	23.3	23.3	24.0	24.6	25.5	26.0	25.1
RECIFE (8° s)	Irradiação	5354	5129	4633	4270	3573	3325	3523	4133	4901	5437	5646	5437	4608
	Temp. med.	27.0	27.2	26.9	26.3	25.5	24.7	24.1	24.2	25.1	26.1	26.5	26.8	25.9
FORTALEZA (3° s)	Irradiação	4799	4545	4022	3898	3939	3984	4438	5076	5474	5631	5445	5049	4693
	Temp. med.	27.4	27.1	26.7	26.5	26.5	26.1	25.9	26.1	26.6	27.1	27.3	27.5	26.7
MANAUS (3° s)	Irradiação	3606	3716	3495	3382	3384	3726	4188	4688	4758	4410	3984	3717	3918
	Temp. med.	26.7	26.6	26.7	26.7	27.1	27.2	27.3	28.1	28.5	28.5	28.0	27.4	27.4
CAMPINAS (22° s)	Irradiação	5187	5006	4743	4299	3578	3210	3523	4133	4414	4743	5187	5049	4417
	Temp. med.	24.1	24.2	23.7	21.8	19.3	18.2	18.1	19.0	21.5	22.1	22.6	23.4	21.6
SANTOS (24° s)	Irradiação	4410	4146	3883	3287	2663	2436	2580	2885	3095	3190	3840	4161	3374
	Temp. med.	25.5	25.7	25.1	23.2	21.2	19.8	18.9	19.5	20.0	21.1	22.3	24.0	22.2
PINDAMONHANGABA (22° s)	Irradiação	4882	4791	4383	3783	3079	2866	3135	3717	4070	4133	4557	4633	3998
	Temp. med.	25.2	25.3	24.5	22.2	19.3	17.8	17.5	19.2	21.1	22.4	22.2	24.3	21.8
RIB. PRETO (21° s)	Irradiação	5157	5006	4771	4328	3606	3153	3523	4161	4614	4771	5216	4938	4439
	Temp. med.	24.2	24.4	24.0	22.2	20.0	19.2	19.1	21.4	23.6	23.6	23.6	23.8	22.4
BOTUCATU (23° s)	Irradiação	5076	4699	4771	4041	3578	3124	3606	4300	4442	4716	4156	4937	4286
	Temp. med.	22.3	23.0	22.2	20.0	17.8	17.3	16.4	18.0	18.6	19.5	20.3	21.6	19.8