

- ENERGIA EÓLICA, SOLAR E NUCLEAR

# **AUMENTO DO EFEITO ESTUFA ATRAVÉS DO USO DE FILMES EM SUPERFÍCIES DE VIDRO**

**Silvio Romero de Melo**  
**Manoel Leonel de Oliveira Neto**  
**George Santos Marinho**

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica – CT – UFRN  
Campus Universitário – Natal RN – 59072-970  
E-mail: silvio@dem.ufrn.br

## **RESUMO**

Foram realizados experimentos para verificação da variação da temperatura do interior de uma câmara hermeticamente fechada, dotada de cobertura de vidro e submetida à radiação proveniente de uma fonte térmica utilizada para simular o fluxo de energia solar. Três tipos de filme (película) de filtração da radiação solar, com diferentes índices de opacidade, foram analisados. Em cada caso, compararam-se as temperaturas atingidas na câmara com aquela obtida na situação da cobertura sem filme. Empregando materiais de baixo custo e instrumentação comum a qualquer laboratório de ensino e pesquisa, foi possível estabelecer uma metodologia simples para verificação da influência do uso de filmes em superfícies de vidro na temperatura do interior de uma câmara. A análise permitiu demonstrar o aumento do efeito estufa devido ao uso de filme, resultado que pode ser estendido ao aumento do rendimento térmico de coletores solares planos.

**Palavras-chave:** Radiação térmica, efeito estufa, filme, película.

## 1. INTRODUÇÃO

Entre os parâmetros que influenciam o rendimento térmico de coletores solares, destacam-se: a geometria, o tipo de material e acabamento da superfície de absorção, o ângulo de inclinação em relação à fonte, o espaçamento da cavidade, o fator de correção devido à deposição de poeira, o tipo e o número de lâminas de vidro (Garg, 1978).

A cobertura de um coletor solar deve, ao mesmo tempo, permitir a passagem da maior quantidade possível de radiação térmica incidente e minimizar a perda de calor refletido e emitido pela superfície de absorção, caracterizando o denominado efeito estufa. Devido às suas características intrínsecas, tais como: alta transmissividade, resistência às intempéries, baixo custo e fácil reposição, o vidro transparente é o melhor material atualmente disponível para uso como cobertura de coletores solares (Mesquita & Trindade, 1996).

Várias técnicas para aumentar a eficiência de coletores solares do tipo placa plana têm sido investigadas. Saboya & Saboya (1996) demonstraram que a adição de aletas à superfície de absorção permite minimizar as perdas de calor por convecção e radiação, já que as aletas retêm parte da energia que seria liberada por convecção para o ar no interior da cavidade.

Tanaka (1980) descreve os efeitos da deposição de filmes metálicos na face interna do envelope de vidro que envolve a superfície de absorção de coletores concentradores, mostrando que, para o intervalo de comprimento de onda da radiação solar, o aumento da espessura do filme provoca uma diminuição na transmissividade ao mesmo tempo em que aumenta a refletividade na região infra-vermelho.

O uso de material isolante transparente (MIT) acoplado à superfície refletora possibilita o aumento da eficiência de captação de radiação térmica e, conseqüentemente, o aumento da temperatura no interior do coletor. Além disso, o uso de MIT implica em menor complexidade e custo inferior em comparação às técnicas de uso de superfícies seletivas e/ou tubos evacuados. Entretanto, a viabilidade do uso de MIT depende do equacionamento entre o ganho obtido com a redução das perdas térmicas pelo coletor e a perda devido à atenuação da radiação pela cobertura (Leite *et al.*, 1996).

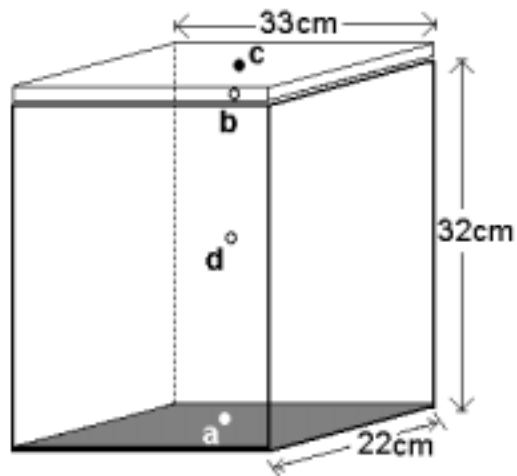
O presente trabalho trata da análise da influência do uso de películas em superfícies de vidro no aumento da temperatura do ar no interior de uma câmara hermeticamente fechada submetida à radiação proveniente de uma fonte térmica.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

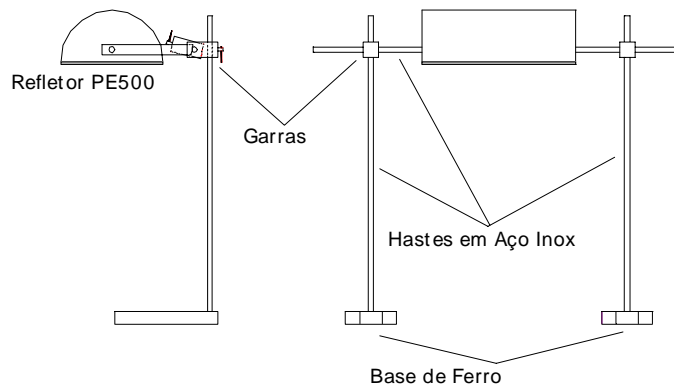
Os experimentos foram realizados em uma câmara com cobertura de vidro transparente de 3mm de espessura, por ser esse o tipo mais empregado (Mesquita e Trindade, 1996), e paredes laterais e inferior de madeira, pintadas respectivamente nas cores branco fosco a preto fosco. Na figura 1 representam-se as dimensões e pontos de fixação dos termopares.

A análise da eficiência de um coletor solar em condições naturais está associada à problemas de repetibilidade das medidas. Desse modo, deve-se dispor de um dispositivo que permita estimar os parâmetros térmicos de interesse sem os inconvenientes das medições em ambiente externo (Tiba *et al.*, 1989).

Para garantir a repetibilidade dos dados nos experimentos, utilizou-se uma fonte de radiação térmica para aquecimento da câmara, constituída por uma lâmpada mista (vapor de mercúrio e fluorescente, 500W) e um refletor de alumínio, montado sobre barras e garras universais de laboratório. Uma lâmina de vidro foi fixada à frente do refletor da lâmpada para servir de anteparo à radiação. Dessa forma, os experimentos ficaram restritos à faixa visível da radiação térmica. Na figura 2 vê-se o esquema do sistema utilizado.



**Figura 1.** Câmara com cobertura de vidro e pontos de fixação de termopares (a, b, c, d).



**Figura 2.** Fonte de radiação térmica montada em suporte universal.

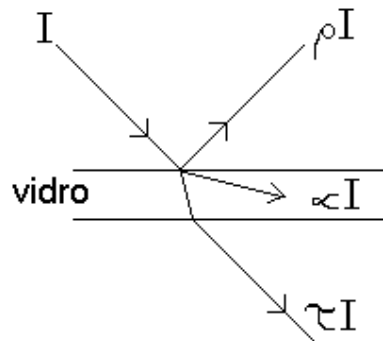
Sendo o objetivo da pesquisa a análise do efeito da modificação da superfície transparente de coletores solares na temperatura no interior da câmara, uma superfície horizontal de vidro foi exposta à radiação solar às 12:00h, com ângulo de incidência dos raios de 90°; dessa forma, foi possível determinar a temperatura atingida pelo vidro e, a partir desse valor, foi determinada a distância a ser utilizada nos experimentos em laboratório entre a fonte luminosa e a câmara. Assim, nos experimentos realizados, a cobertura da câmara atingiu uma temperatura próxima daquela obtida quando exposta ao sol.

Após a montagem do aparato em ambiente com controle de temperatura, a primeira parte dos experimentos permitiu a análise do aquecimento da câmara no caso da cobertura de vidro sem película de filtragem de radiação térmica. Para medição de temperatura foram utilizados quatro termopares acoplados a dois termômetros digitais. Os termopares foram fixados em pontos simetricamente alinhados, localizados nas partes centrais externa e interna da cobertura, no centro e na base da câmara (ver fig.1). As medidas foram tomadas em intervalos de 5, 15, 30 e 60min, durante 11 horas (duas horas além do tempo necessário para que o sistema atingisse o regime permanente).

Na segunda parte dos experimentos, películas foram fixadas na superfície inferior do vidro e repetidos os procedimentos da primeira parte para cada uma delas. i.e., submetendo-se a câmara à mesma potência de radiação luminosa anterior. Foram utilizadas três películas com índices de transparência diferentes, sendo uma delas fumê e as duas outras refletivas.

### 3. RESULTADOS E ANÁLISE

Os resultados dos experimentos podem ser explicados com base na figura 3.



**Figura 3.** Distribuição da energia térmica radiante sobre a superfície de vidro.

A equação genérica da distribuição de radiação térmica que incide sobre uma superfície é dada por:

$$I = \rho(I) + \tau(I) + \alpha(I) \quad (1)$$

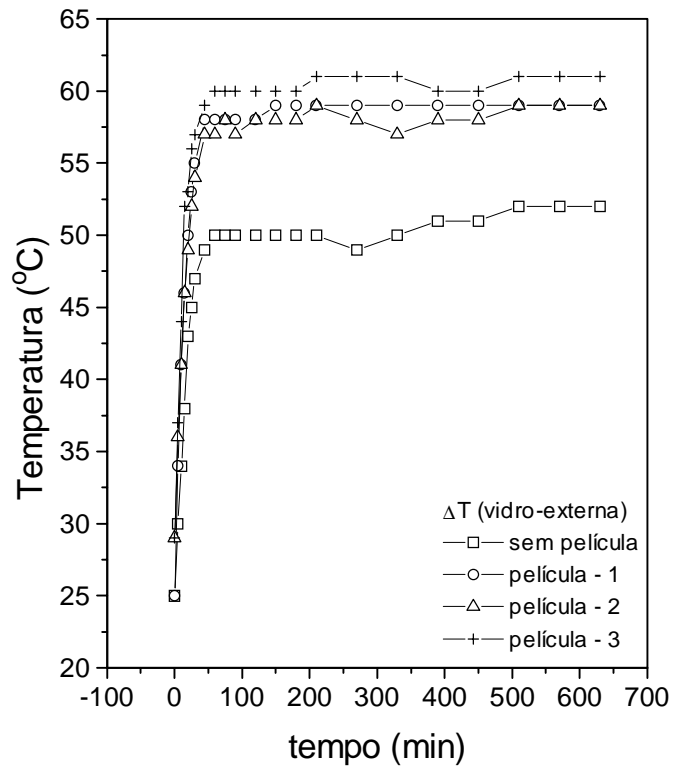
onde:  $I$  = energia total incidente  
 $\rho$  = refletividade  
 $\tau$  = transmissividade  
 $\alpha$  = absorptividade

Em relação ao vidro, considerando-se a radiação térmica com comprimento de onda na faixa visível, as absorptividades ( $\alpha_p$ ) e refletividades ( $\rho_p$ ) das películas utilizadas nos experimentos eram maiores, enquanto a transmissividade ( $\tau_v$ ) do vidro era maior que as das películas. Com base nesses dados, a comparação entre a distribuição da energia incidente na cobertura da câmara nas situações com e sem película permite os seguintes resultados:

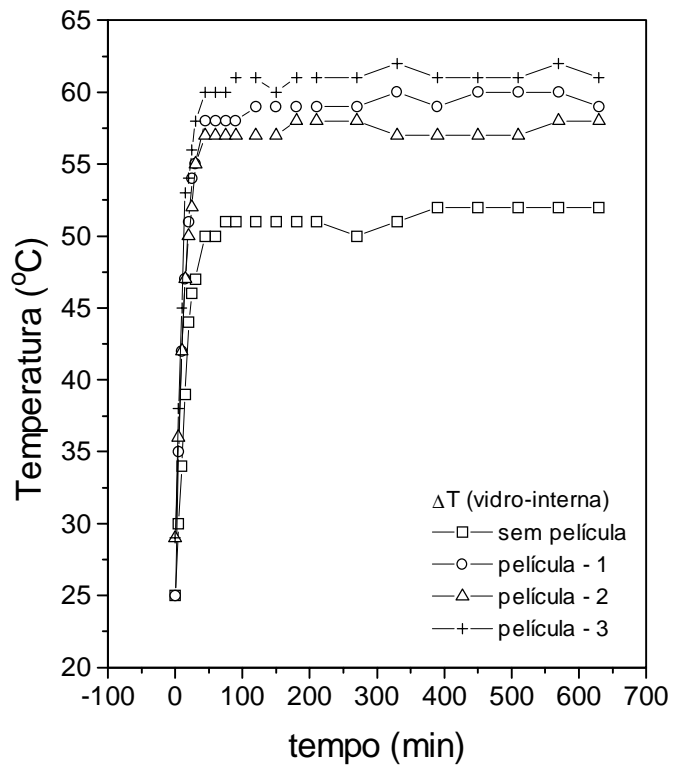
$$\begin{aligned} \rho_p I &> \rho_v I \\ \alpha_p I &> \alpha_v I \\ \tau_p I &< \tau_v I \end{aligned} \quad (2)$$

onde: subscrito “p” refere-se à cobertura com película  
subscrito “v” ao vidro sem película.

Nas figuras 4 e 5 representam-se respectivamente as variações de temperatura nas faces superior e inferior do vidro, nas quatro situações do experimento, ou seja: sem película, com película nº1 (refletiva), com película nº2 (“fumê”) e com película nº3 (refletiva).



**Figura 4.** Variação da temperatura na parte superior do vidro.



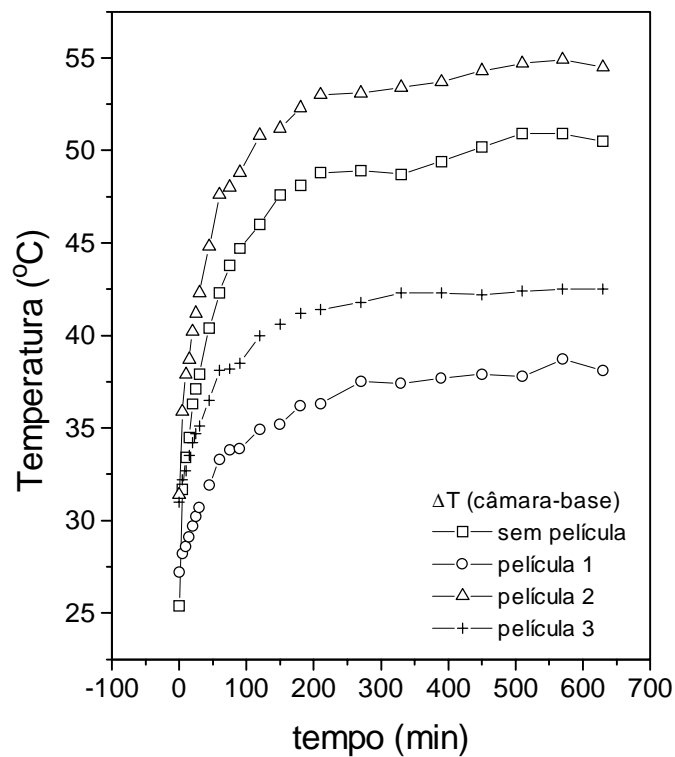
**Figura 5.** Variação da temperatura na parte inferior do vidro.

Distingui-se o aumento de temperatura na parte superior do vidro (fig.4) devido à adição da película, como era esperado, já que a película aumenta a absorvidade ( $\alpha$ ) da radiação incidente. A máxima diferença de temperatura foi obtida com a película nº3 (espelhada), cujo valor ficou 10°C acima da temperatura do vidro sem película.

A temperatura na parte inferior do vidro (fig.5) seguiu o mesmo padrão obtido no caso da temperatura na parte superior (fig.4), com diferença de temperatura máxima de 9°C entre o vidro sem película e com película nº3 (espelhada).

Apesar da refletividade da cobertura ser maior nos casos com película (que, assim, devolvem ao meio através de reflexão uma fração maior da energia incidente), as absorvidades das películas eram maiores. Desse modo, mesmo com o aumento da quantidade de energia refletida, a energia absorvida pela película fez com que a temperatura na parte inferior do vidro atingisse um valor superior ao caso do vidro sem película.

A figura 6 representa a variação da temperatura na base da câmara.



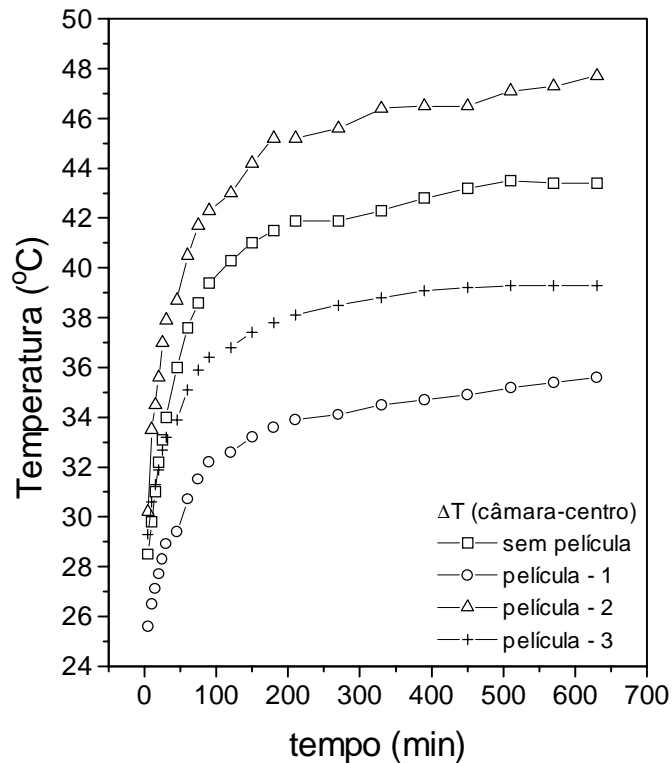
**Figura 6.** Variação da temperatura na base da câmara.

Observou-se que no caso da cobertura com películas espelhadas (nº1 e nº3), a base da câmara atingiu temperaturas respectivamente 12,4 e 8°C menores do que no caso da superfície sem película. Isso ocorreu devido à maior refletividade das películas espelhadas, que provocaram uma redução da quantidade de energia que atravessava a cobertura (em comparação com os casos da superfície com a película nº2 e sem película), resultando na diminuição na energia radiante que atingia a base da câmara.

Apesar de aparentemente idênticas, as películas refletoras possuíam absorvidades distintas, o que explica o maior valor da temperatura obtida com a película nº3, 4,4°C superior ao obtido com a película nº1.

No caso da película n°2 (fumê), mediu-se uma temperatura na base da câmara 4°C acima da obtida no caso sem película. Apesar de causar uma redução na transmissividade ( $\tau$ ), a película fumê foi responsável por um aumento na temperatura do vidro devido à sua maior absorptividade ( $\alpha$ ). Desse modo, a soma das energias transmitida através da cobertura, refletida de volta para a base e emitida por radiação pela cobertura aquecida superam o menor ganho de energia devido à menor transmissividade da película fumê, resultando numa quantidade maior de energia chegando na base da câmara e, portanto, uma temperatura mais elevada.

Apesar das temperaturas nas faces do vidro com película atingirem valores muito próximos (ver figs. 4 e 5), a menor refletividade da película n°2 (fumê) resultou em temperaturas na base 12 e 16,4°C maiores que as obtidas com as películas n°3 e n° 1, respectivamente. Na figura 7 vê-se a variação da temperatura do ar no centro da câmara.



**Figura 7.** Variação da temperatura do ar no centro da câmara.

Como o ar é transparente à radiação, apenas a condução próximo às paredes e a convecção contribuem para a elevação de sua temperatura no interior da câmara. O calor absorvido pelo ar pode ser expresso matematicamente por:

$$Q_{ar} = Q_P + Q_C \quad (3)$$

onde:  $Q_P$  é o calor transferido por convecção pelas paredes e pela base e  $Q_C$  é o calor transferido por convecção a partir da cobertura.

Em comparação à situação sem película, as diferenças de temperatura do ar na câmara foram, respectivamente, - 7.8°C com a película n°1, + 4.3°C com a película n°2 e - 4.1°C com a película n°3. Como a temperatura da cobertura foi maior no caso da película n° 2, a parcela de calor transferida para o ar por convecção para o ar foi maior.



#### **4. CONCLUSÕES**

Construído o aparato e realizados os experimentos, a análise dos dados permitiu que se chegasse às seguintes conclusões:

- a) a utilização de filmes de filtração da radiação solar permitiu modificar as características de absorvidade ( $\alpha$ ), transmissividade ( $\tau$ ) e refletividade ( $\rho$ ) da cobertura da câmara;
- b) a modificação das características da cobertura alterou significativamente a transferência de calor para o ar no interior da câmara;
- c) no caso do filme fumê (película nº 2), a redução da transmissividade da energia para o interior da câmara foi compensada pelo aumento da absorvidade ( $\alpha$ ) da cobertura, cuja fração de energia radiante transferida à base da câmara aumentou sua temperatura; esta, por sua vez, transferiu calor por convecção para o ar, aumentando sua temperatura;
- d) através de uma metodologia simples e da utilização de recursos mínimos de instrumentação para análise de parâmetros térmicos (termopares), foi possível evidenciar o aumento do efeito estufa devido à adição de películas à cobertura de uma câmara que simulava um coletor solar;
- e) faz-se necessária a realização de experimentos com o dispositivo submetido à radiação solar (ou a proveniente de um simulador da radiação solar) para que seja possível determinar o aumento do rendimento de coletores com cobertura dotadas de filmes.

#### **5. BIBLIOGRAFIA**

- Garg, H. P., 1978, System data on flat plate collectors and it's optimization, anais do I Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro – RJ, pp.65-86.
- Leite, A. P. F., Soares, J. J. & Rodrigues, L. S., 1996, Simulação do desempenho ótico de um coletor solar plano isolado com material transparente, IV Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, Recife – PE, pp. 747-751.
- Mesquita, L. C. S. & Trindade, R. C., 1996, Manual de aquecimento solar, CRESESB, 1.ed., pp. 7-8.
- Saboya, S. M. & Saboya, F. E. M., 1996, Eficiência de coletores solares com absorvedores aletados, VI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, Florianópolis – SC, pp. 1621-1626.
- Tanaka, T., 1980, Review Paper: Solar Thermal Electric Power Systems in Japan. Solar Energy, vol.25, pp.97-104, Pergamon Press Ltd., Great Britain.
- Tiba, C., Fraidenraich, N. & Barbosa, E. M. S., 1989, Desempenho térmico de um coletor solar mediante testes noturnos, X Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro – RJ, pp.577-580.

#### **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Misteiner Rodrigues Meira, Coordenador do Laboratório de Física do CEFET-RN  
Ao CNPq e à CAPES.

## SISTEMA ALTERNATIVO DE AQUECIMENTO SOLAR

**Luiz Guilherme Meira de Souza;**

**João Maria Bezerra**

UFRN – CT – Depto. de Engenharia Mecânica

Campus universitário – Natal – RN.

CEP: 59072-970 – Fone: (84) 215-3740.

### RESUMO

O trabalho desenvolvido busca uma alternativa para redução do uso da energia elétrica obtida da forma convencional como uma maneira de amenizar diretamente a matriz energética estadual, bem como contribuir para a diminuição do consumo nacional de energia elétrica, através da utilização de uma fonte de energia renovável, limpa e abundante, no aquecimento de água para fins de banho e uso em cozinha por energia solar.

O sistema que tem sido normalmente empregado para o aquecimento de água residencial e indicado pela literatura especializada trabalha no regime de termo-sifão; o trabalho presentemente desenvolvido usa o regime de fluxo contínuo com uma única passagem pelos coletores solares e busca mostrar que pode ser usado com eficiência em função dos objetivos a serem atingidos, podendo se constituir num sistema que opera com um consumo mínimo de energia elétrica, diminuindo o custo operacional para o usuário.

Palavras Chaves: Energia Solar, Energia Elétrica, Fontes Alternativas de Energia

### 1. INTRODUÇÃO

De todas as fontes alternativas de energia estudadas, quais sejam, a eólica, a solar, a de biomassa, a geotérmica, a maremotriz e a hidráulica, a que mais tem merecido destaque é a energia solar, por ser uma fonte renovável, limpa e não poluente, disponível em qualquer localidade da Terra. De uma forma geral, todas essas fontes de energia podem ser resumidas apenas em solar e geotérmica, visto que todas as demais fontes são formas indiretas da energia solar. De todas as possibilidades de uso da energia solar, a que tem se evidenciado como uma das mais viáveis é o aquecimento de água para fins residenciais e industriais, sendo sua aplicação a mais difundida e utilizada em todo o mundo, principalmente na França, Estados Unidos, Israel, Índia, Canadá, dentre outros. No Brasil, por ser um país tropical, esta fonte de energia encontra-se de forma bastante abundante em todo o território nacional, principalmente na região nordeste, onde se estima que apresenta um alto nível de insolação ficando na ordem de 500 a 700 W/m<sup>2</sup>, conforme BEZERRA(1986).

Segundo LAMBERTS, R. et all (1996), 42% do consumo de energia elétrica no Brasil é direcionado para o setor de edificações, dos quais 84,1% indica a construção por empresas e famílias e 15,9% pela administração pública, envolvendo 13,8% do Produto Interno Bruto do país. Ainda de acordo com LAMBERTS, R. et all (1996) , o setor residencial responde por 25% do consumo nacional de energia e coloca o chuveiro elétrico como segundo maior consumidor de energia em uma residência com 25% do consumo total perdendo apenas para o refrigerador com 30% deste consumo. Dados da CEMIG – Companhia Energética de Minas

Gerais, constantes em FIGUEIREDO (1990), indicam que o uso de chuveiro elétrico no Brasil atinge o horário de pico das 18:00 h às 19:00 h, quando em pelo menos 50% das unidades habitacionais que dispõe de chuveiro elétrico existe pelo menos uma pessoa tomando banho, o que provoca uma demanda de aproximadamente 8,5% da demanda nacional de energia que está sendo utilizada neste horário. Portanto, se, pelo menos, mantiver-se a qualidade e disponibilidade dos serviços reduzindo o consumo de energia, se estará aumentando a eficiência da matriz energética. Estes dados indicam ser a utilização cada vez mais crescente de unidades habitacionais com sistema de aquecimento de água por energia solar como sendo um caminho claro e viável para o alívio do sistema energético nacional, que ora encontra-se numa situação bastante difícil devido a falta de investimentos do Governo Federal para instalação de novos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica pela via convencional, agravado pela questão dos recursos hídricos existentes que, por sua vez, em algumas regiões também encontram-se já com sua capacidade para acomodação de usinas hidrelétricas praticamente esgotadas.

Os dispositivos utilizados para a captação da energia solar são chamados de coletores solares, que podem ser classificados de baixa, média e alta concentração dependendo do nível de temperatura requerido. Os coletores mais utilizados para esse fim são os coletores de placa plana que são constituídos de uma caixa isolada termicamente nas partes lateral e inferior. Sobre o isolamento inferior é colocada uma placa absorvedora que pode ser pintada de preto fosco ou com uma tinta seletiva. Nessa placa, pode-se colocar tubos absorvedores ou não, caso o seu uso seja para o aquecimento de água ou de ar, respectivamente. A parte superior do coletor é fechada com uma ou duas placas de vidro plano transparente, dependendo da temperatura que se deseja atingir. O seu funcionamento se baseia na absorção da radiação solar pela placa absorvedora, que transforma esta radiação em calor e o transfere para o fluido de trabalho.

## **2.1. O SISTEMA PROPOSTO**

No âmbito do Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar da UFRN sempre priorizou-se a importância dada ao desenvolvimento de coletores solares que, além de atenderem ao fim para o qual haviam sido projetados, tivessem um baixo custo em relação aos coletores dito convencionais disponíveis no mercado, apresentando uma relação custo x benefício satisfatória. Com este intuito, foram construídos e estudados seis modelos de coletores solares alternativos que variaram bastante quanto a pontos fundamentais, tais como o material a ser utilizado para a confecção dos tubos absorvedores bem como sua disposição (em série ou em paralelo), o número de unidades absorvedoras e a geometria a ser empregada.

O sistema proposto neste trabalho será utilizado como base para se analisar dois pontos fundamentais para o uso destes sistemas solares: sua operacionalidade e o desempenho de dois coletores similares com tubos absorvedores de diferentes diâmetros.

Para se ter uma posição definida quanto à viabilidade econômica do sistema, foi efetuada uma simulação no que diz respeito ao consumo de água quente e à utilização da energia elétrica necessária para dar suporte ao sistema, para uma residência padrão, definida como uma média dos padrões de unidades habitacionais existentes nesta região.

No presente estudo, procurar-se-á chegar a um sistema solar de aquecimento de água para fins residenciais, que apresente satisfatória relação custo x benefício, que mantenha um bom nível de operacionalização, atendendo ao objetivo para o qual se propôs, se bem adequando à realidade e que se apresente como uma alternativa prática e acessível para uso imediato no mercado consumidor.

## **2.2. CONSTITUIÇÃO DO SISTEMA**

O sistema em estudo foi montado com a finalidade de se simular uma situação de consumo a mais próxima possível de uma residência. Este sistema constituiu-se, basicamente, de duas caixas de fibrocimento (uma de 250 litros e uma de 500 litros), dois coletores solares planos, complementado por um aporte elétrico constituído por uma resistência elétrica de 2000W de potência, uma bóia de controle de nível de 10 A, um contactor e um termostato.

Os coletores solares utilizados para a montagem do sistema apresentavam uma área de exposição a radiação solar correspondente a  $1,5\text{m}^2$  ( $1,0\text{m} \times 1,5\text{m}$ ), tubos absorvedores de cobre com diâmetro de  $3/4"$  (Coletor I) e  $1/2"$  (Coletor II), em número de 17, dispostos em série e cobertura com uma placa de vidro plano transparente de 3mm de espessura. A relação quantidade de unidades absorvedoras x disposição das unidades está diretamente relacionada com a curvatura mínima conseguida em laboratório nos tubos de cobre),

## **2.3. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA**

Pode-se dimensionar um sistema solar para aquecimento de água de forma direta ou indireta. A seguir, faz-se um breve resumo sobre cada um destes métodos de dimensionamento: No método direto o dimensionamento é feito em função do número de pessoas a usar o sistema ( $0,7\text{m}^2/\text{pessoa}$ ) e no indireto a área de captação é determinada de acordo com o volume do reservatório de água quente (vazão pequena – 2 l/min; vazão confortável – 5 l/min e vazão farta – 10 l/min).

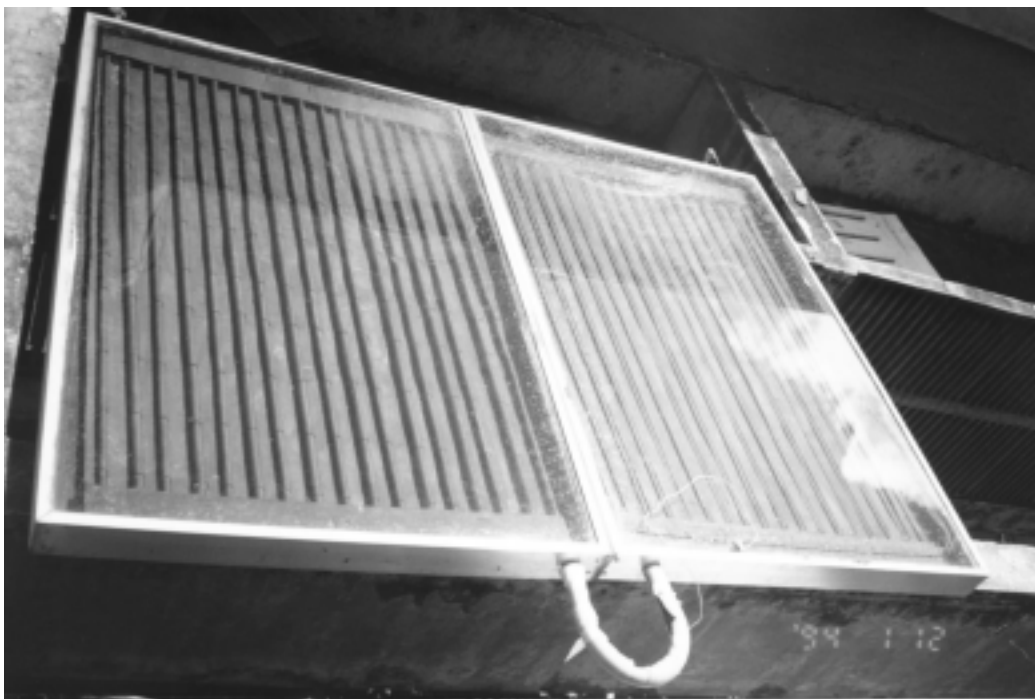
## **2.4. DEFINIÇÃO DA RESIDÊNCIA PADRÃO E HÁBITOS DE CONSUMO**

Com a finalidade de se definir um modelo padrão de residência que representasse uma média das unidades habitacionais da região nordeste, foram definidas como hipóteses simplificadoras, uma residência que constasse do casal com dois filhos totalizando 4 (quatro) pessoas, 3 (três) banhos por dia por pessoa, um tempo médio de banho igual a 6 (seis) minutos e uma vazão do chuveiro de 5 (cinco) litros por minuto (vazão confortável).

O reservatório de água fria foi alimentado através da rede pública, sendo responsável pela manutenção da vazão requerida em níveis constantes e pela alimentação dos coletores solares I e II. A água, ao sair aquecida dos coletores solares, que foram ligados em série, seguia para o reservatório de água quente do sistema, onde se mantinha armazenada até o consumo. As figuras 1 e 2 mostram os principais componentes do sistema proposto.

## **2.5. CUSTO DE FABRICAÇÃO DOS COLETORES SOLARES**

Para cada coletor fabricado utilizou-se 25 metros de tubos de cobre de R\$ 4,00 por metro para os de  $3/4"$  e R\$ 2,50 para os de  $1/2"$ . Para cobertura de cada coletor utilizou-se  $1,5\text{m}^2$  de placa de vidro de 3mm de espessura ao preço de R\$ 10,00 por metro quadrado. A estrutura foi confeccionada em perfil de alumínio (R\$20,00 para cada seis metros) com chapas, absorvedora e de fundo, de alumínio com 5mm de espessura (R\$10,00 por metro quadrado). O isolamento térmico utilizado foi a lã de vidro (R\$10,00 a manta de  $0,60\text{m} \times 1,20\text{m}$ ), o elemento de vedação borracha de silicone (R\$5,00 a bisnaga) e a pintura dos elementos absorvedores feita com preto fosco (R\$5,00 o litro).



**Figura 1 - Coletores do sistema de aquecimento proposto**



**Figura 2 - Reservatório de água quente do sistema de aquecimento**

### **3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

O desenvolvimento experimental deste trabalho consistiu, primeiramente, em se fazer um ensaio dos dois coletores a serem usados no sistema a ser estudado, procurando fazer-se

uma análise comparativa dos mesmos quanto à relação custo x benefício; numa segunda etapa, foi realizada uma simulação prática do real consumo diário de uma residência padrão, estudando-se o desempenho operacional do sistema instalado, usando-se para isto, as hipóteses simplificadoras citadas no item anterior. Com estes dados, foi estabelecido o consumo diário desta residência que serviria de base de cálculo para determinar-se o consumo médio mensal desta unidade habitacional.

Os coletores solares foram ensaiados individualmente com as vazões de 30 l/h, 40 l/h e 50 l/h, em um período de três dias, em regime de fluxo contínuo. O sistema de aquecimento instalado foi ensaiado com uma vazão de 60 l/h, tendo os coletores sido montados em série e os ensaios realizados em um período de cinco dias, em regime de fluxo contínuo, com uma única passagem e considerando-se um volume de 360 litros de água quente por dia. Tanto para os ensaios dos coletores individualmente quanto para o sistema instalado, os dados foram tomados de meia em meia hora, de 8:00 às 15:00 horas.

Para simular o funcionamento do sistema na residência padrão definida, foram realizadas três descargas de água quente do sistema, representando o consumo diário para banho dos seus usuários. Procurou-se realizar estas descargas de água quente para consumo nos horários de 7:00 h, 12:00 h e 18:00 h, por serem os horários médios que, geralmente, são usados para banho.

Durante o período no qual foi realizado este experimento também foi analisada a funcionalidade dos coletores solares planos empregados, estudando-se os seus rendimentos térmicos para as vazões especificadas. Uma atenção especial será dada ao reservatório térmico utilizado com o intuito de procurar-se ter uma análise mais cuidadosa deste reservatório quanto ao seu material (fibrocimento) e ao seu isolamento.

Para os ensaios realizados com os coletores foram levantados dados das temperaturas de entrada e de saída de água em cada coletor para cada vazão trabalhada e nível da radiação solar. Por sua vez, para os ensaios realizados com o sistema de aquecimento instalado, foram levantados dados das temperaturas nos seguintes pontos: entrada dos coletores, temperatura de saída de água do primeiro coletor (igual a temperatura de entrada do segundo coletor), na entrada do reservatório térmico, no interior do reservatório térmico. Além disso, foram medidos o nível da radiação solar e consumo diário de eletricidade para a vazão determinada. A temperatura da água no interior do reservatório térmico foi tomada na região intermediária do reservatório, procurando-se obter a temperatura média interna do reservatório de água quente.

O consumo de eletricidade foi tomado através do medidor de eletricidade integrante do aporte elétrico do sistema e a radiação solar foi medida por intermédio de um piranômetro, construído no Laboratório de Máquinas Térmicas e Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, acoplado a um multímetro digital.

#### **4.1. ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS COLETORES SOLARES**

Na primeira etapa, centralizam-se as considerações apenas nos coletores solares estudados e chamados, respectivamente, de coletor I com os tubos absorvedores de 3/4" e, coletor II, com os tubos absorvedores de 1/2".

Para que se possa ter uma melhor visão sobre o desempenho destes coletores, mostra-se na Tabela 1, os dados obtidos para as vazões de 30, 40 e 50 litros por hora para ambos.

**Tabela 1. Dados de temperatura e rendimento dos coletores estudados**

<b>Q (l/h)</b>	30 l/h	40 l/h	50 l/h
<b><math>\Delta T - C1</math></b>	23,8	19,6	17,5
<b><math>\Delta T - C2</math></b>	21,8	18,4	15,1
<b><math>\eta - C1</math></b>	70,04	71,99	75,08
<b><math>\eta - C2</math></b>	66,95	69,44	69,46

$\Delta T - C1$ : Variação da Temperatura no Coletor Solar I (°C)

$\Delta T - C2$ : Variação da Temperatura no Coletor Solar II (°C)

$\eta - C1$ : Rendimento Térmico do Coletor Solar I (%)

$\eta - C2$ : Rendimento Térmico do Coletor Solar II (%)

Comparando ao dados obtidos de um coletor em relação ao outro, percebeu-se que os valores obtidos no coletor I sempre foram mais elevados do que os valores obtidos no coletor II, tanto no que diz respeito às diferenças das temperaturas de entrada e de saída do fluido, quanto em relação ao rendimento dos mesmos. Em relação às diferenças de temperaturas estes acréscimos foram de 9,17%, 6,52% e 15,89%, respectivamente, para as mesmas vazões de 30, 40 e 50 litros por hora. Para os rendimentos térmicos, estes acréscimos foram de 4,61%, 3,67% e 8,09% para as mesmas vazões.

Os acréscimos obtidos pelo coletor I em relação ao coletor II, conforme visto, situaram-se em patamares bastante modestos, salientando-se que ambos os coletores foram construídos com as mesmas características, alterando-se apenas o diâmetro dos tubos absorvedores e que foram colocados sob as mesmas condições de trabalho.

A escolha de qual dos dois coletor seria o mais indicado para utilização em um sistema de aquecimento de água para banho recairia naquele que melhor apresentasse a relação custo x benefício, já que ambos satisfazem às exigências técnicas. Diante deste fato, é importante lembrar-se os custos de fabricação de cada um dos coletores, cujo resumo se encontra na tabela 2.

**Tabela 2. Custos de fabricação dos coletores solares**

<b>Coletor</b>	<b>Custo/m<sup>2</sup> (R\$)</b>	<b>Custo Total (R\$)</b>
Coletor I	132,00	198,00
Coletor II	103,70	155,50

De acordo com a tabela acima, nota-se um aumento de R\$ 42,50 no custo do coletor I em relação ao coletor II, o que equivale a um acréscimo de 27,33%.

Diante do exposto, conclui-se que o coletor II seria o que apresentou uma maior viabilidade em função da relação custo x benefício, visto que os ganhos obtidos com o coletor I foram bastante modestos, não compensando o acréscimo de 27,33% nos custos de fabricação.

## **4.2. ANÁLISE DO SISTEMA DE AQUECIMENTO**

Para se analisar o sistema de aquecimento proposto, é de fundamental importância que se compare os dados obtidos com aqueles referentes a um sistema convencional de aquecimento de água para banho, que opere em iguais condições.

Para isso, convém lembrar as características de operação do sistema convencional: -  
Objetivo: aquecimento de água para banho, Temperatura mínima da água quente: 40°C;  
Usuários: 4 pessoas; - Banhos por dia: 3 banhos; Vazão do chuveiro: 5 l/min (confortável);  
Tempo de banho: 6 minutos; Volume de água quente a ser aquecida: 180 litros; Volume  
Total de consumo por dia: 360 litros

#### 4.2.1. ANÁLISE DE CUSTO DA ENERGIA DO SISTEMA CONVENCIONAL

Para um chuveiro elétrico aquecer o volume de água quente requisitado trabalharia 72 minutos diariamente, proporcionando as mesmas condições de conforto para os usuários, isto é, um volume de água quente correspondente a 3 banhos por dia com duração de 6 minutos para cada um dos quatro usuários. (obs.: 3 banhos x 6 minutos x 4 usuários = 72 minutos/dia)

Portanto, para o aquecimento de um volume equivalente a 360 litros de água quente por dia, necessitaria-se de uma quantidade de calor a ser determinada pela expressão abaixo:

$$Q_u = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

onde:  $Q_u$  = quantidade de calor fornecida (kW);  $m$  = vazão mássica (kg/s);  $c_p$  = calor específico a pressão constante ( $4,18 \times 10^3$  kJ/Kg.°C);  $\Delta T$  = variação entre a temperatura final e inicial do fluido (10°C)

Sendo assim, ter-se-ia que uma quantidade de calor correspondente a 4,17 kWh. Portanto, para aquecer o volume especificado necessitaria-se de 83,4 kWh de energia elétrica por mês que, em termos financeiros, equivaleria ao valor de R\$ 13,34 levando-se em consideração o preço do kWh estimado em R\$ 0,16, conforme dado da concessionária de energia local.

Perceba-se que este é um raciocínio generalizado, visto que o consumo originado pela fonte de aquecimento convencional, tanto pode ser um chuveiro elétrico quanto um aquecedor elétrico de passagem, por exemplo.

#### 4.2.2. SISTEMA SOLAR DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

A eficiência do sistema solar projetado pode ser avaliada pela quase não utilização do aquecimento elétrico para suprir a incapacidade de aquecimento na temperatura desejada por parte do sistema solar.

A quantidade de calor perdida pelo reservatório térmico das 15:00 horas de um dia de ensaio para às 07:00 horas do dia seguinte, atingiu um valor médio de 8,7°C .

Observou-se que estas quedas de temperatura, praticamente, não ocasionaram o acionamento da resistência elétrica do sistema, regulada para ser acionada a 40°C, temperatura mínima desejada da água no reservatório térmico. Apenas no último dia de ensaio foi que o reservatório atingiu uma temperatura inicial de 39,7°C. Esse comportamento implicou o consumo de energia mostrado na tabela 3.



**Tabela 3. Consumo elétrico do sistema de aquecimento**

<b>Período</b>	<b>Consumo Diário (kWh)</b>	<b>Consumo Semanal (kWh)</b>	<b>Consumo Mensal (kWh)</b>
28.12 – 29.12	1,2	4,5	18,0
29.12 – 30.12	1,1		
30.12 – 31.12	0,5		
31.12 – 01.01	1,7		
<b>MÉDIA SEMANAL</b>	1,1		
<b>MÉDIA MENSAL</b>	4,4		

Pelos valores apresentados, percebe-se que a resistência elétrica do sistema foi muito pouco acionada, lembrando-se que nestes consumos está incluída a energia consumida pelo termostato do sistema que, por ser elétrico, também tem sua parcela de consumo de eletricidade.

Diante do exposto, podemos concluir que o sistema apresentou um desempenho bastante satisfatório no período de ensaios realizados tanto em relação a sua eficiência para aquecimento da água requerida para o consumo quanto à energia elétrica utilizada pelo seu aporte elétrico.

Portanto, pode-se concluir que pode ser indicado o sistema em estudo para uso de aquecimento de água para fins de banho em residências de pequeno porte. É importante salientar que com o uso do sistema de aquecimento proposto, obter-se-ia uma economia mensal do consumo de energia elétrica de 78,4% em relação ao sistema convencional, visto que enquanto o consumo média mensal de um chuveiro elétrico ficaria em torno de 83,4 kWh, o do sistema proposto foi de 18,0 kWh.

## **5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

Em função da análise dos dados coletados e apresentados neste trabalho, além da observação mantida quanto à operacionalidade, manutenção e desempenho tanto dos coletores solares quanto do sistema de aquecimento empregados, chegou-se às seguintes conclusões:

- a) Os resultados atingidos pelos coletores solares estudados (coletor I – tubos absorvedores de 3/4" e coletor II – tubos absorvedores de 1/2") mostraram a viabilidade operacional de qualquer um dos dois em sistemas de aquecimento de água por energia solar para residências;
- b) Os coletores apresentaram baixo custo de fabricação por metro quadrado (R\$ 132,00 para o coletor I e R\$ 155,50 para o coletor II), quando comparados aos coletores planos convencionais com os tubos ligados em paralelo, sendo de seis a oito por metro de largura e trabalhando em regime de termosifão (R\$ 200,00), conforme LOURENÇO (1998), o que indica a viabilidade econômica dos seus usos;
- c) Com relação à durabilidade dos coletores empregados, pode-se afirmar que os mesmos não sofreram alterações perceptíveis quanto à deformação e desgaste durante o período de ensaios;
- d) O reservatório térmico mostrou-se eficiente com relação a sua funcionabilidade nos dias de ensaio. A caixa de fibrocimento não apresentou vazamento nem desgaste, resistindo bem à temperatura e à pressão. O pó de madeira cumpriu satisfatoriamente a sua função de isolante térmico, garantindo a possível temperatura interna da água no reservatório, com um mínimo de perdas de calor.

- e) O sistema de aquecimento mostrou-se bem mais econômico do que o convencional, visto que projetou um consumo médio mensal de 18,0 kWh (equivalentes a R\$ 2,88) contra 83,4 kWh (equivalentes a R\$ 13,34) obtendo uma economia de 78,4%, o que indica ser bastante promissor a substituição do sistema convencional pelo sistema alternativo proposto.
- f) Os coletores do sistema proposto poderiam ter como elementos absorvedores tubos de PVC, devendo ser estudada a viabilidade de utilização de tal tipo de material de uma forma mais aprofundada, em função de seu baixo custo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEZERRA, A.M. **Energia Solar: Aquecedores de Água**, Editora Universitária – UFPB, 221 p. João Pessoa, 1986.
- DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A. **Solar Engineering of Thermal Processes**, II edição, New York, John & Sons, 757 p., 1991.
- FIGUEREDO, J.C.A. **Performance de sistemas de aquecimento solar de água em condomínios**. V Congresso Brasileiro de Energia. Anais – Vol. 1/3. Rio de Janeiro, 1990.
- JAGUARIBE, E.F. **Parâmetros e Modelos Ligados à Captação da Energia Solar**, Boletim da Associação Brasileira de Energia Solar, Ano V, n. 13, João Pessoa/PB, 1983.
- JÚNIOR, F.S. **Otimização e Desempenho Térmico de um Coletor Solar Alternativo com Tubos Absorvedores de Cobre**, Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 1995.
- LAMBERTS, R. et all. **Eficiência Energética em Edificações: estado da arte**. MME/ELETROBRÁS.1996.
- LOURENÇO, J.M. **Estudo de um Coletor Solar Alternativo, usando Tubos Absorvedores de Alumínio**, Dissertação de Mestrado/Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-UFRN, Natal/RN, 144 p., 1997.
- MEIRA, G.L. **A importância da Energia Solar como Fonte Alternativa e o Desenvolvimento de um Instrumento para medir Radiação Solar Global**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 70 p., Natal, 1987.
- PALZ, W. **Energia Solar e Fontes Alternativas**, Tradução Noberto de Paula Lima. Hemus Editora Ltda., p. 116, São paulo, 1995.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dubinin, M.M. & Astakhov, V.A., 1971, "Molecular-Sieve Zeolithes-II". Washington: American Chemical Society.
- Khelifa, N. ,1984, "Das Adsorptionspaar Silicagel-Wasserdampf". Anwendung als Solares Klimatisierungssystem, Dissertation Ludwig-Maximilians Universität, Munich.
- Vodianitskaia, P.J. e Klüppel, R.P., 1984, "Geladeira Solar de Adsorção", Anais do III Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro.
- Cacciola, G., Restuccia, G. and Mercadante, 1995, "Composites of activated carbon for refrigeration adsorption machines", Carbon, Vol. 33 (9), pp. 1205-1210.
- Guilleminot, J.J., 1998, "From pellets to composite adsorbent bed: evolution of adsorbent technologies", FOA6, Elsevier, pp 1071-1076.
- Guilleminot, J.J. , Meunier, F. and Pakleza, J. , 1987, "Heat and Mass transfer in a non-isothermal fixed bed solid adsorbent reactor: a uniform pressure/non-uniform temperature case", Int. J. of Heat Mass Transfer, V 30, N 8, pp 1595-1606.
- Gurgel J. M. e Klüppel, R. P., 1992, "Simulação Numérica de um Sistema de Refrigeração por Adsorção", anais do IV ENCIT , Rio de Janeiro.
- Klüppel, R. P. and Gurgel, J.M., 1987, "Solar adsorption cooling using silicagel/water", Advances in solar energy technology, Proceedings of ISES, volume 3, Hamburg, R.F.A.
- Guilleminot J.J. and Gurgel, J.M. , 1990, "Heat transfer intensification in adsorbent beds of adsorption thermal devices", International solar energy conference american society of mechanical engineers (ASME), Miami (Florida).
- Hsieh, C.K., 1981. "Thermal Analysis of CPC Collectors"; S. Energy, V 27, N 1.
- Carvalho, J.M. , Silva, J. E. Jr e Gurgel, J.M., 1998, " Simulação De Um Sistema De Refrigeração De Leite Usando Adsorção E Regenerado Por Energia Solar." V Congresso De Engenharia Mecânica Norte Nordeste , Fortaleza –CE.
- Tchernev, D. I., 1979, "Proceedings of the XIVth Intersociety Energy Conversion Engineering Conferences".
- Guilleminot, J.J. Meunier F. et Mischler B., 1979, "Étude des cycles intermittents à adsorption solide pour la refrigeration solaire"; Ver. Phys. Appl. 15.
- Boubakri A., Grenier Ph. And Pons M., 1985, "Utilisation du couple C.A.-méthanol pour la production de glace par énergie solaire. Proceedings of the J.I.T.H. Conference, C.N.R.S. Editor, Rabat.
- Passos, E.F., Escobedo, J.F. and Meunier, F., 1986, "Étude des couples charbon actif-methanol et leur application a la refrigeration solaire", Thèse de Doctorat – École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suíça.
- Pons, M. and Grenier, Ph., 1986, "Experiemntal data on a solar-powered ice maker using activated carbon and methanol adsorption pair", Journal of Solar Energy Engineering, V 109, pp 303-310.
- Winston, R.,1986, "Principles of solar concentrators of a novel design, Solar Energy, V 16, pp 89-95.
- Silva, J.A., 1986, "Desenvolvimento e análise térmica de um coletor solar de baixo custo"; Dissertação de Mestrado, CPGEM, UFMG.

## 6 – AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo CNPq (Proc. N° 350163/91-0).

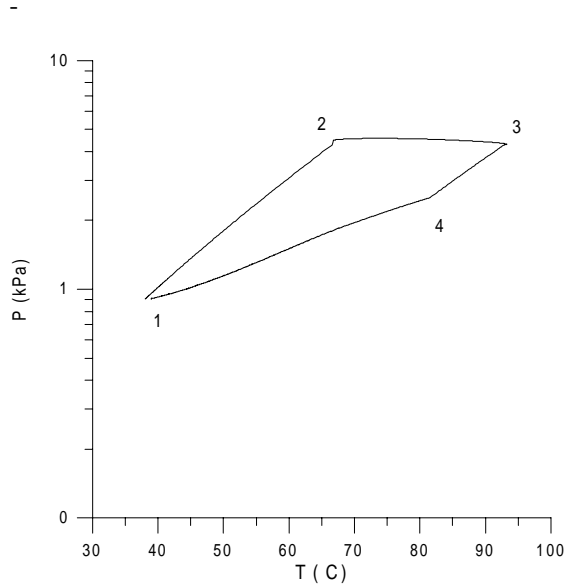


Figura 3. Ciclo adsorptivo obtido com uso de coletor / reator plano

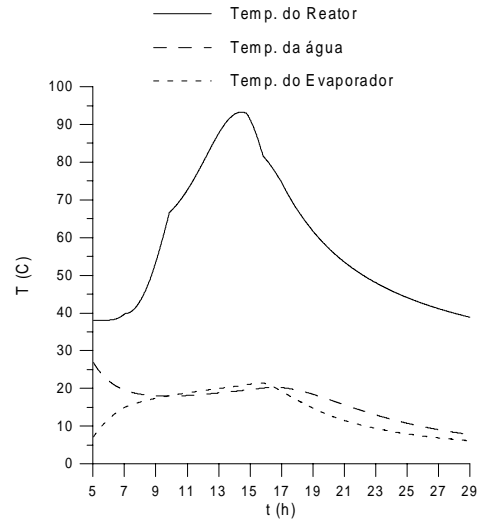


Figura 4. Histogramas de temperaturas do refrigerador com uso de coletor/reator plano

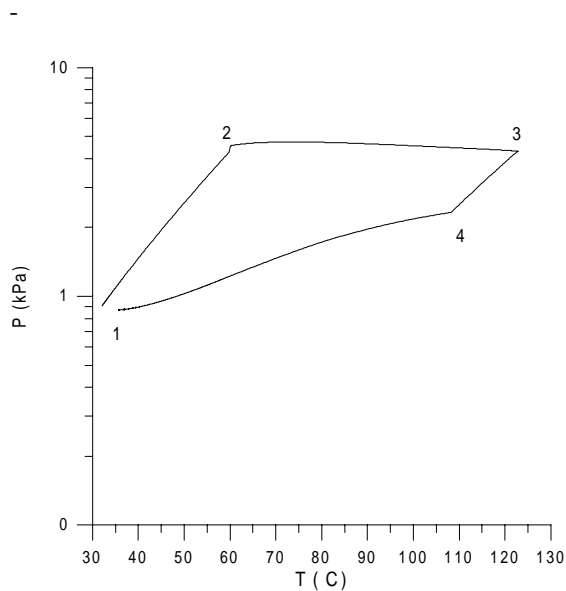


Figura 5. Ciclo adsorptivo obtido com uso de coletor / reator plano

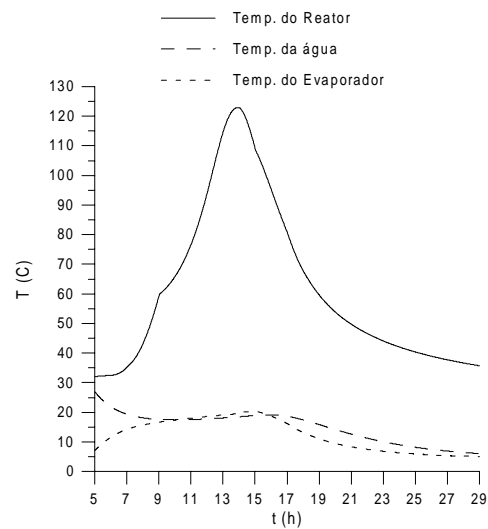


Figura 6. Histogramas de temperaturas do refrigerador com uso de coletor/reator CPC

#### 4. SIMULAÇÃO

O refrigerador é simulado através dos modelos apresentados. É usado um esquema numérico totalmente implícito para a solução das equações. Inicialmente é realizada uma simulação de um refrigerador com reator usando coletor plano. Em seguida, para as mesmas condições de funcionamento é simulado o mesmo refrigerador com a única diferença que é a utilização de um CPC. São consideradas condições solarimétricas e ambientais relativas ao dia 30/04/1985 (João Pessoa), que correspondem a energia incidente em um área da captação de  $1\text{ m}^2$  de 23,8 MJ, temperatura ambiente variando entre 21 e 28 °C, massa de água do evaporador de 25 kg com temperatura inicial (5 horas da manhã) de 6 °C, massa de água para ser resfriada no reservatório de 15 kg com temperatura inicial (5 horas da manhã) de 27 °C. Para o coletor plano ( $1\text{ m}^2$ ), 24 tubos posicionados paralelamente, (4 cm de diâmetro externo com tubo interno concêntrico com 1 cm de diâmetro, permitindo a compactação de 20 kg de sílica gel) somam um comprimento total de 23 m com área total superficial externa de  $2.9\text{ m}^2$  que corresponde a área de transferência de calor entre os tubos e o adsorvente. No CPC, as simulações levaram a otimização de um reator formado por um tubo de 2 m de comprimento com diâmetro externo de 20 cm e interno de 16 cm e com uma área de absorção de energia de  $1.25\text{ m}^2$  e de  $2.26\text{ m}^2$  para resfriamento por convecção. A quantidade de sílica gel foi otimizada em 17 kg. A área de captação na abertura do CPC é igualmente de  $1\text{ m}^2$  porém considerou-se uma eficiência de captação de radiação no absorvedor (CE) de 70 % (decorrente das múltiplas reflexões e imperfeições construtivas das superfícies refletoras). Os resultados obtidos estão mostrados nas figuras 3,4,5 e 6 onde são mostrados os ciclos adsorptivos e histogramas referentes as temperaturas do reator, evaporador e da água a ser resfriada. Os ciclos são formados por 4 processos: (1-2) aquecimento do reator, (2-3) dessorção com condensação do sorbato, (3-4) resfriamento do reator até atingir a pressão do evaporador e (4-1) adsorção com obtenção do frio. Observa-se que no sistema com coletor plano atinge-se uma temperatura menor que no sistema com CPC. Também pode ser notado que o CPC permite uma temperatura de final de processo de adsorção menor que a conseguida com o coletor plano. São fatos que eram esperados com a utilização do CPC que permitiu um melhor COPs solar que é definido como a razão entre a energia solar disponível e o frio obtido no evaporador. Para o uso de sílica gel /água, temperaturas acima de 120 °C não inúteis pois para estas condições a sílica gel já se encontra praticamente anidra. O fato de se conseguir um maior resfriamento é fundamental para se obter uma maior quantidade de massa cíclica (evaporada) com a sílica gel conseguindo atingir uma maior concentração de sorbato. Com o coletor plano obteve-se um COPs de 0.13 com uma massa cíclica de adsorbato de 1.25 kg. Com o CPC, o COPs foi 0.19 e obteve-se uma massa cíclica de 1.95 kg. Estes resultados são obtidos para configurações otimizadas.

#### 5. CONCLUSÃO

Com as simulações realizadas, o uso de um coletor CPC para regenerar um reator adsorptivo mostrou-se viável do ponto de vista técnico e apresentando melhores resultados do COPs quando comparados com os resultados obtidos com reator com coletor solar plano. Isto é entendido como consequência do CPC ter permitido uma maior temperatura do adsorvente e também pela maior facilidade de se resfriar durante o período noturno em relação a um coletor plano. A utilização do absorvedor de vidro também auxiliou na obtenção de temperaturas elevadas com a radiação atingindo diretamente o leito adsorvente. A construção de um protótipo usando CPC se faz necessário para se validar o modelo e melhor avaliar as implicações tecnológicas do seu uso. Também um estudo teórico e experimental da convecção no absorvedor do CPC é relevante para uma conclusão final.

construtivas do absorvedor. O uso do tubo em vidro é inovador e vantajoso pois permite que o fluxo solar incida diretamente sobre o leito poroso, considerando uma transmissividade próxima de 1 para a parede de vidro do tubo. Desta forma os processos de aquecimento não ocorrem através da parede do tubo que apresenta uma grande resistência térmica entre ele e o leito granular. Isto permite se atingir temperaturas mais elevadas com menor inércia térmica. Durante os processo em que envolve o resfriamento do reator, isto não pode ser mais considerado visto que a emissão radiativa do leito ocorre no infravermelho (com  $\tau$  próximo de 0, tornando o vidro opaco a radiação) e a transferência de calor vai ocorrer através de três resistências em série: contato térmico entre leito e parede do tubo, condução através da parede e finalmente convecção para o ambiente. Como o absorvedor aqui idealizado é composto por tubos concêntricos, a convecção ocorre também através do interior do reator, aumentando a superfície de troca convectiva.

O balanço de energia para a parede externa do tubo de vidro (desprezando-se reflexões de radiação sobre a sua superfície) é então:

$$M_t C_{p_t} \frac{\partial T_t}{\partial t} = I_s CE (1 - \tau) \pi D L + h_c \pi D_i L (T_g - T_t) + h_e \pi D L (T_a - T_t) \quad (4)$$

No leito adsorvivo, compreendido entre os dois tubos concêntricos, um balanço de energia permite calcular para cada tempo sua temperatura:

$$M_g C_{p_g} \frac{\partial T_g}{\partial t} = I_s CE \tau + h_c \pi D_i L (T_{te} - T_g) + h_c \pi d_e L (T_{ti} - T_g) + \frac{\partial C}{\partial t} M_g h_s \quad (5)$$

O balanço de energia para a parede externa do menor tubo do absorvedor é:

$$M_{ti} C_{p_{ti}} \frac{\partial T_{ti}}{\partial t} = h_c \pi d_e L (T_g - T_{ti}) + h_{e2} \pi d_i L (T_a - T_{ti}) \quad (6)$$

Onde:  $I_s$  é a radiação solar incidente na abertura do CPC,  $CE$  é o coeficiente de eficiência do CPC,  $\tau$  é a transmissividade do vidro,  $h_e$  é o coeficiente de convecção sobre o duto,  $h_{e2}$  é o coeficiente de convecção no interior do duto do absorvedor,  $h_c$  é o coeficiente de contato térmico tubo/leito,  $T_{te}$  é a temperatura do tubo externo,  $T_{ti}$  é a temperatura do tubo interno do absorvedor,  $M_{te}$  é a massa do tubo externo,  $M_{ti}$  é a massa do tubo interno,  $C_{p_{te}}$  e  $C_{p_{ti}}$  são os calores específicos do tubo externo e do interno,  $D_e$  e  $D_i$  são os diâmetros externo e interno do maior tubo do absorvedor,  $d_e$  e  $d_i$  são os diâmetros externo e interno do menor tubo do absorvedor,  $T_g$  é a temperatura do adsorvente,  $T_a$  é a temperatura ambiente.  $M_g$  é a massa do adsorvente (kg),  $C_{p_g}$  = Calor específico do adsorvente com adsorbato.

O termo  $(dC/dt)$  é obtido diferenciando-se a equação 2 parcialmente em relação a  $T_g$  e  $\ln P$  e usando-se equação 3 chega-se a:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = nDC T_g^n \left( \ln \frac{P_s(T)}{P} \right)^{n-1} \left[ \frac{\partial (\ln P)}{\partial t} - \frac{h_s}{RT^2} \frac{\partial T_g}{\partial t} \right] \quad (7)$$

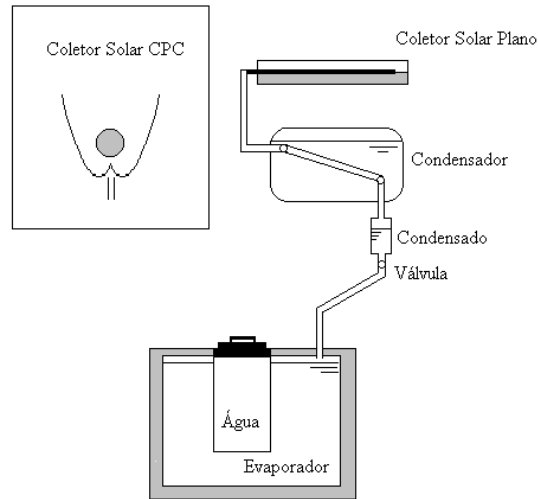


Figura 2. Esquema do resfriador de água adsorvente. São mostradas as duas possibilidades de coletores que formam os reatores estudados.

A relação de Clapeyron dá a entalpia de mudança de fase:

$$h_s = -R T^2 \left( \frac{\partial \ln P}{\partial T_g} \right) \quad (3)$$

Onde:  $C$  = concentração de sorbato (kg/kg),  $\rho(T)$  = massa específica do sorbato ( $\text{kg/m}^3$ ),  $R = 461,6$  (J/kg K),  $h_s$  é o calor de sorção (J/kg),  $P_s$  = pressão de saturação do sorbato que é função da temperatura do leito sorvente (Pa),  $P$  = pressão no adsorvente (Pa),  $T_g$  = temperatura do adsorvente (K),  $n$ ,  $K$  e  $W_0$  são constantes dependentes do par sorvente/sorbato. Para o par sílica gel/água, essas constantes foram determinadas por (Khelifa, 1984) e são:  $W_0 = 4,07 \times 10^{-4} \text{ m}^3(\text{H}_2\text{O})/\text{kg}$  de sílica-gel,  $n = 1$  e  $k = 4,912 \times 10^{-6} \text{ kg}(\text{H}_2\text{O})/\text{J}$

O desequilíbrio térmico responsável pelo início do processo de dessorção corresponde, a partir do instante  $t = 0$ , ao fornecimento de uma potência solar incidente  $I_s$  (em  $\text{W/m}^2$ ), na parede externa dos tubos paralelos cujo comprimento total ( $L$ ) seja suficiente para preencher a área de um metro quadrado de coletor. Um coletor funcionando num sistema de refrigeração por sorção está ligado a um condensador e a um evaporador. Quando a pressão do leito atinge a pressão de condensação do sorbato ( $P_{\text{cond}}$ ), inicia-se a condensação do vapor d'água proveniente do processo de dessorção no reator. Após a finalização da condensação, o reator se resfria com a conseqüente queda de pressão, quando esta atinge a pressão do evaporador e continuando a se resfriar, provoca o processo de adsorção com a evaporação de água obtendo-se o efeito frigorífico. Desta forma define-se o COPs como sendo a razão entre o frio obtido no evaporador e a energia solar global incidente na abertura do concentrador.

O condensador é considerado multi-tubular, resfriado a água estacionária. O evaporador é esquematizado como um reservatório contendo água que é o fluido refrigerante (adsorvato) e em contato com este, um outro reservatório onde se coloca a água a ser resfriada.

Para a modelização matemática do refrigerador de água com o uso do CPC, o procedimento é semelhante ao citado acima. O absorvedor do CPC recebe o mesmo fluxo de energia solar ( $I_s$ ) incidente na sua abertura ( $1 \text{ m}^2$ ) com a consideração de um coeficiente de eficiência CE onde são levados em conta a refletividade das paredes refletoras e imperfeições

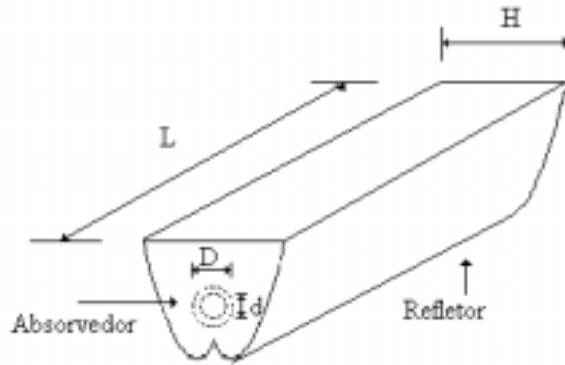


Figura 1. Esquema do CPC

Neste CPC o absorvedor de radiação consiste de dois cilindros concêntricos de dimensões  $D$  e  $d$  onde entre eles está o leito adsorativo granular consistindo assim no reator adsorativo. A abertura do CPC com  $L = 2$  m e  $H = 0.5$  m, corresponde a uma área de  $1 \text{ m}^2$ . As superfícies refletoras são unidas por placas com as mesmas propriedades óticas e têm o objetivo também de refletir radiação para o absorvedor.

Desta forma, considerando as superfícies com excelente refletividade e perfeitamente parabólicas, define-se a razão de concentração RC como sendo função da área de abertura e da área do absorvedor, podendo ser calculada por:

$$RC = \frac{H}{\pi D} \quad (1)$$

### 3. MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático e as respectivas hipóteses simplificadoras utilizadas para simular uma geladeira esquematizada na figura 2 (com o uso de um coletor plano) encontra-se detalhado nos trabalhos de (Gurgel e Klüppel, 1992) e (Carvalho et al., 1998). Nesse modelo a radiação solar incidente no coletor solar plano ( $I_s$ ), é distribuída em tubos paralelos que compõem o reator no interior do coletor. A parede do tubo é considerada a uma temperatura uniforme, ou seja, o fluxo radiativo incidente na parte superior, é rapidamente difundido por toda a parede do tubo. O aquecimento do leito adsorativo se faz entre as paredes internas dos tubos através de uma resistência térmica de contato.

No interior do leito adsorativo, são desprezados gradientes de temperatura devido a pequena espessura da camada porosa do leito granular. Em função da temperatura e da pressão, os adsorventes têm a capacidade de reter uma quantidade de sorbato variável entre zero e  $W_0$  que é a quantidade máxima possível. Uma relação entre a concentração do sorbato retido no adsorvente, a temperatura do leito sólido e a pressão em que se encontra o sorbato gasoso foi proposta por (Dubinin-Astakhov, 1971) na forma abaixo:

$$C = W_0 \rho(T) \exp \left\{ -K \left[ R T_g \ln \frac{P_s}{P} \right]^n \right\} \quad (2)$$



misturadas ao leito e de compactação bimodal. Mais recentemente, nesta mesma direção, também foram desenvolvidos por (Cacciola e Restuccia, 1995) e (Guillemintot, 1998), novos adsorventes (compósitos de carvão ativado e de zeolita-PTFE), com o propósito de melhorar a eficiência dos processos de sorção. Nestes trabalhos, aumentos consideráveis sobre o valor da condutividade térmica foram constatados mas com a desvantagem de apresentarem uma maior resistência a difusão de massa em seu interior, fato que incentiva a uma continuidade de pesquisas tentando minimizar este problema. Vários outros estudos teóricos e experimentais continuam sendo feitos com o objetivo de aperfeiçoar sistemas de refrigeração por adsorção que além de ser atraente pelo uso da energia solar, destaca-se também pela não utilização de CFCs, como fluido de trabalho se enquadrando nas novas regulamentações relativos aos novos fluidos frigorígenos (protocolo de Montreal e de Kyoto). Neste presente trabalho, a motivação do estudo da viabilidade do uso do CPC é pela possibilidade de se conseguir temperaturas mais elevadas durante o período de insolação e menores temperaturas durante o período noturno. Uma das maiores limitações dos sistemas adsorptivos é a dificuldade de transferir calor para o ambiente, durante o processo de resfriamento do reator que deve ocorrer logo após a sua regeneração. Os coletores planos necessitam do uso de vitrais e isolantes térmicos para atingirem suas temperaturas de trabalho e que naturalmente dificulta este resfriamento. O uso do CPC pode a princípio contornar estes dois problemas. Para uma avaliação técnica da incorporação de um CPC, é realizada uma simulação numérica relativa a modelização matemática de todo o sistema frigorífico. Para esta modelização são usadas hipóteses e simplificações que já foram bem testadas e confrontadas com resultados experimentais obtidos em diversos trabalhos (Guillemintot et al, 1987) e (Gurgel e Klüppel, 1992), o que torna as simulações confiáveis.

A descrição detalhada dos sistemas adsorptivos para fins de refrigeração são bem apresentados nas citações acima. Resumidamente é formado basicamente por três trocadores de calor interligados (Reator adsorptivo, Condensador, Evaporador). O funcionamento destas máquinas é baseado na reação química entre dois compostos, que se apresentam um na forma sólida (adsorvente) e outro na forma líquida ou vapor (adsorbato). O frio é obtido durante o processo de adsorção no reator que provoca a evaporação do sorbato do evaporador.

## **2. COLETOR SOLAR CONCENTRADOR**

Concentradores solares apresentam como principal vantagem a possibilidade de se obter altas temperaturas de operação. O concentrador parabólico composto (CPC) foi inicialmente idealizado por (Winston, 1974), que demonstrou que entre os concentradores, este possui a maior eficiência de absorção de radiação difusa cuja fração coletada é inversamente proporcional à razão de concentração. Para o caso de baixas concentrações ( $RC < 3$ ), estudos de (Hsieh, 1981) demonstram que não há a necessidade de se fazer nenhum ajuste de posicionamento para rastreamento solar durante todo o ano. Sua forma característica apresenta superfícies refletoras em forma de parábolas truncadas capazes de concentrar a radiação solar em um absorvedor de forma tubular que recebe a radiação incidente através de sua abertura. Detalhes construtivos podem ser encontrados em (Silva, 1993). O CPC aqui idealizado (figura 1) teve suas dimensões obtidas através de um estudo de otimização realizado através de um modelo matemático desenvolvido para o sistema frigorífico.

## REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO SOLAR USANDO CPC

**J.C. Santos<sup>1</sup>, J.E. Silva Jr.<sup>1,2</sup>, F.P. Carvalho, R.P. Klüppel<sup>3</sup>,  
M.A.W. Cavalcanti, J.M. Gurgel**

UFPB/DTM/CPGEM/Laboratório de Energia Solar, e-mail: gurgel@les.ufpb.br

C.P. 5115, CEP 58051-970, João Pessoa - PB - Brasil

1- UFPB/CT/CPGEM

2- Escola Técnica Federal de Sergipe/UNED

3- UFPE/DEM

### Resumo

O trabalho apresenta um estudo da viabilidade técnica do uso de um coletor solar concentrador parabólico composto (CPC) com um absorvedor tubular de vidro. O objetivo deste CPC é o de regenerar um leito adsorvente, contido no interior do tubo, que compõe um reator adsorvente de um sistema de refrigeração por adsorção. É apresentado a modelização matemática e simulação numérica referente a tal sistema, que permitiu uma otimização do seu dimensionamento. Os resultados da simulação são comparados com os obtidos com um refrigerador operando sob as mesmas condições, porém usando um reator tubular inserido em um coletor solar plano. O uso do CPC mostrou-se viável como coletor solar tendo-se conseguido um COP superior quando confrontado com o sistema usando coletor plano.

**Palavras – chave:** Adsorção, Leito Granular, Sílica–gel, Sistema de Refrigeração, CPC.

### 1. INTRODUÇÃO

Os estudos da aplicação da adsorção sólida com fins de obtenção de frio têm sido realizados desde o fim da década de 1970 com os trabalhos de (Tchernev, 1979) e (Guilleminot et al , 1980), que construíram protótipos usando o par zeolita/água. O par sílica gel/água foi em seguida testado por (Vodianitskaia e Klüppel, 1984) e (Klüppel e Gurgel, 1987), com testes em dois protótipos. Tais sistemas apresentaram dificuldades para a obtenção de gelo conseqüente da limitação física da temperatura mínima em que a água (fluido de trabalho) pode ser atingida que corresponde a temperatura do ponto triplo. Para contornar este problema, outros pares frigorígenos foram estudados sendo o carvão ativado/metanol usado com resultados promissores (Boubakri et al. , 1985), (Passos, 1986) e (Pons e Grenier, 1987) dentre outros. Embora tenham feito gelo, havia a necessidade de avanços tecnológicos visando melhorar suas performances. Um dos problemas avaliados, é a baixa condutividade térmica dos leitos granulares. Diante disto, algumas tentativas de se intensificar a transferência de calor nos leitos porosos foram estudadas por (Guilleminot e Gurgel, 1990), que conseguiram um aumento do valor da condutividade térmica do leito e diminuição da resistência de contato leito granular/parede através de inserções metálicas

## Otimização Teórica/Experimental de um Coletor de Energia Solar Plano

Dalmo G. Gomes

Nide G. C. R. Fico Jr.

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Aeronáutica, 12228-900, São José dos Campos, SP, Brasil. E-mail: [nide@aer.ita.cta.br](mailto:nide@aer.ita.cta.br)

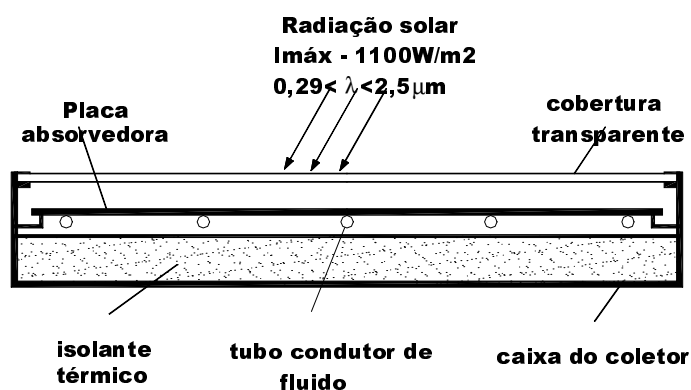
### Resumo

*O presente trabalho apresenta resultados obtidos na otimização de um coletor de energia solar de placas planas. Usando equações disponíveis na literatura projetou-se um coletor de aleta com degrau. Este foi construído e ensaiado em laboratório com objetivo de se minimizar as perdas por convecção através da superfície superior do coletor.*

**Palavras-chave:** energia solar, mecânica dos fluidos, transferência de calor

### 1. INTRODUÇÃO

Desde a pré-história a humanidade faz uso da energia solar. Civilizações antigas, como os Incas, sabiam como manter termicamente confortável o ambiente em suas moradias (Grolier,1993). Existe, até hoje, um grande interesse por parte dos pesquisadores no processo de absorção, armazenamento e utilização da energia solar, por ser esta uma fonte inesgotável de energia e de fácil obtenção, particularmente em um país como o Brasil. Um coletor de energia solar de placas planas, usualmente chamado de coletor solar, é um trocador de calor que pode ser projetado para aplicações que requerem temperaturas moderadas, ou seja, de até aproximadamente 100 °C acima da temperatura ambiente. Este tipo de equipamento pode ser utilizado em aquecimento de ambientes, mas sua principal aplicação é no aquecimento de água para uso doméstico. A energia solar incidente que é absorvida pelo coletor,  $I$ , é transferida para o fluido que escoar no seu interior (Duffie&Beckman,1980), conforme esquematizado na figura 1.



**Figura 1.** Esquema de um típico coletor de energia solar de placas planas.

Este processo começa pelo recebimento da energia solar radiante pela placa absorvedora a qual é transferida por condução para o tubo condutor de fluido e, finalmente, transferida por convecção do tubo para o fluido. As perdas de energia, que sempre existem, são provocadas

por processos de transferência de calor por convecção (natural e forçada) e radiação nas partes laterais, inferior e superior do coletor. A superfície superior é responsável pela maior parcela dessas perdas de energia (Agarwal& Larson,1981).

Segundo Duffie e Beckman (1980), o primeiro estudo detalhado da eficiência de coletores de energia solar de placas planas foi realizado por Hottel e Woertz (1942). O trabalho destes pesquisadores baseou-se no balanço de energia e nas medições experimentais em coletores de energia solar. Tabor (1958) modificou os cálculos das perdas de energia feitas, por Hottel e Woertz (1942), com o uso de novas correlações para transferência de calor por convecção entre duas placas planas e, incluindo também, valores de emitância dos vidros. Estas correlações permitiram estimar perdas de energia do coletor com superfícies seletivas, pois, pelo método anterior de Hottel e Woertz (1942), não eram obtidos resultados satisfatórios. Em 1959, no Laboratório de Energia Solar da Universidade do Arizona, Bliss (1959) combina em um “*fator de eficiência*” todas as variáveis que influenciam a eficiência de coletores de energia solar de placas planas. Este fator foi de extrema importância em projetos e cálculos de eficiência de vários tipos de coletores. Este trabalho ainda é importante fonte de referência.

Estudos de minimização das perdas de energia por convecção natural entre a cobertura de vidro e a placa receptadora de calor de coletores de placas planas (ver Figura 1) foram feitos por Malhotra e Rani (1980). No mesmo ano, Duffie e Beckman editam o livro “*Solar Engineering of Thermal Processes*”, aprimorando o trabalho de 1974. Agarwal e Larson (1981) avançam ainda mais no estudo do cálculo do coeficiente de perdas de energia na parte superior do coletor de placas planas, utilizando as equações propostas por Klein (1975).

Procurando economizar material da aleta, sem prejudicar sua eficiência, foram desenvolvidos perfis não uniformes como, por exemplo, o circular e o triangular. Entretanto a dificuldade na manufatura destes perfis faz com que, na prática, o perfil retangular seja usado. Hollands e Stedman (1992) desenvolveram estudos na otimização de placas absorvedoras de calor de coletores de energia solar com degraus na espessura da aleta. O objetivo destes autores era manter a eficiência da placa coletora e, ao mesmo tempo, obter economia de material. Ao contrário das aletas com perfis não uniformes, a aleta com degrau no perfil é de fácil fabricação. A confecção das aletas com duas lâminas de larguras diferentes proporcionam a formação de um degrau no perfil. Este processo de fabricação foi desenvolvido a partir do método patenteado por Olson, Thundal e Wilson (1981).

O objetivo do presente trabalho é realizar a otimização de um coletor de energia solar de placas planas. Assim, primeiramente foi feita uma avaliação teórica *de custo / fator de eficiência* em coletores de energia solar de placas planas em função da distância entre os centros dos tubos. Em seguida foi realizada uma segunda avaliação de *custo / fator de eficiência*, agora para aleta com degrau. A partir deste estudo teórico foi confeccionado um coletor otimizado, com degrau na aleta. Ensaio experimentais foram realizados neste coletor de energia solar. É importante salientar que para determinação de sua eficiência térmica foi utilizado o método descrito pela norma ASHRAE. Finalmente, foi realizado um estudo experimental para redução de perdas de energia por convecção forçada na superfície superior do coletor confeccionado. Uma solução clássica para redução dessas perdas de energia é a colocação de camadas de vidro adicionais na superfície superior. Neste trabalho pretende-se melhorar a eficiência do coletor através da colocação de paredes verticais no perímetro do coletor. Estas paredes funcionam como barreiras, reduzindo a velocidade do vento sobre o coletor, e portanto, minimizando as perdas de energia por convecção forçada.

## **2. PROJETO DO COLETOR**

A fim de se realizar os ensaios experimentais do presente trabalho foi projetado e construído um coletor solar. Como desejava-se um equipamento otimizado foram feitos

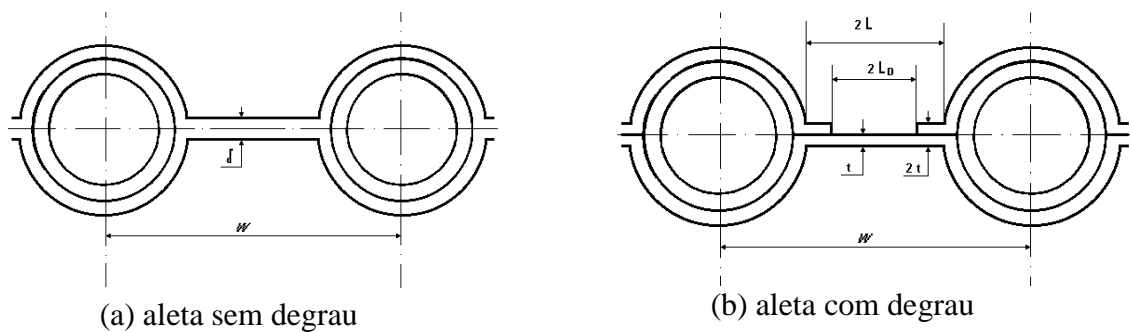
diversos estudos para minimizar a relação *custo / fator de eficiência* (Gomes, 1998). Os materiais considerados foram aço, aço galvanizado, alumínio e cobre. Uma primeira análise foi para o caso de aletas com perfis retangulares. Foram estudadas diversas placas com espessuras encontradas no mercado e também placas com espessuras diferentes, para análise da existência de uma espessura ótima em relação ao *custo / fator de eficiência* do coletor.

O fator de eficiência do coletor de energia solar,  $F'$ , representa a razão entre a energia líquida obtida e a energia adquirida se a superfície absorvedora do coletor estivesse na temperatura de entrada do fluido, com fluxo de calor uniforme (Bliss,1959):

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[ \frac{1}{U_L (D + (W - D) F)} + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]}, \quad (1)$$

onde três parâmetros adimensionais podem ser formados, são eles:  $(U_L W / C_B)$ , relativo à condutância da solda aleta-tubo,  $(U_L W / \pi D_i h_{fi})$  relativo à transferência de calor ao fluido nos tubos e também a  $(W / (D + (W - D) F))$ , relativo ao fator de eficiência da placa. Nesses parâmetros,  $U_L$  é o coeficiente global de troca de calor,  $D$  e  $D_i$  representam o diâmetro externo e interno respectivamente,  $W$  é a distância entre tubos,  $C_B$  condutância da solda entre aleta e tubo,  $F$  é o fator de eficiência da aleta e  $h_{fi}$  representa o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o tubo e o fluido.

O preço das placas não encontradas no mercado foram calculados proporcionais ao da espessura mais próxima encontrada no mercado. Em seguida foram escolhidas, para cada um dos quatro materiais, as espessuras ótimas para confecção do coletor com degrau no perfil, ver figura 2 (b). Em ambos os casos utilizou-se o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o tubo e o fluido,  $h_{fi}$ , para coletores de energia solar que estejam funcionando com água e com sistema termossifão (Bliss,1959) .



**Figura 2.** Perfis de um coletor de energia solar de placa plana.

Os resultados dos estudos teóricos mostraram que as aletas com degrau no perfil proporcionam valores do fator *custo / fator de eficiência* menores do que os obtidos para aletas retangulares. Isto significa que para todas as placas encontradas no mercado com perfil retangular, a quantidade de material das aletas pode ser reduzida e o fator *custo / fator de eficiência* ser ainda menor. Os resultados das otimizações dos quatro materiais analisados, no caso de aleta com degrau, estão na tabela 1 abaixo.

De acordo com a tabela 1, coletores confeccionados com aletas de alumínio com a introdução de um degrau no perfil da aleta foram os que obtiveram um valor *custo / fator de eficiência* menor (US\$ 63,79 / m<sup>2</sup>) entre os quatro tipos de materiais analisados. Houve uma

economia de 44 % de material utilizado na aleta causando uma diminuição no fator de eficiência do coletor de apenas 2,0 % em relação ao caso de aleta de espessura constante e igual a 0,8 mm. Esta queda de eficiência é considerada baixa em relação a economia de material obtida (ver figura 2).

**Tabela 1.** Espessuras e tamanhos dos degraus otimizados para os materiais encontrados nos mercados de São José dos Campos e São Paulo.

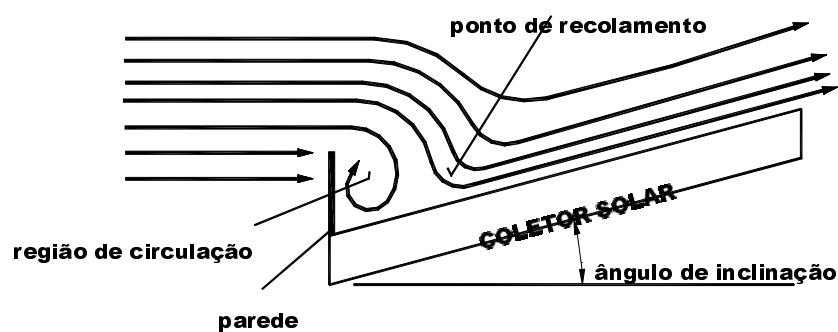
Material da aleta	Espessura da aleta, pt (mm)	Espessura da aleta, t (mm)	Valor( $L_D/L$ ) do degrau	Fator de eficiência do coletor %	Custo do coletor US\$/m <sup>2</sup>	Custo / Fator de eficiência US\$/m <sup>2</sup>
Aço	1,8	0,9	0,98	84,9	61,06	71,89
Aço galvanizado	1,0	0,5	0,72	85,6	60,80	70,97
Alumínio	0,8	0,4	0,88	86,1	54,96	63,79
Cobre	0,2	0,1	0,82	86,6	59,43	68,59

### 3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Neste trabalho propõe-se uma alternativa para a minimização das perdas de energia por convecção forçada pela superfície do coletor. Ao invés da solução clássica de se adicionar placas de vidro coloca-se, em todo o perímetro do coletor, uma barreira (ou parede) vertical com o objetivo de diminuir a velocidade do vento sobre o coletor (ver figura 3). Esta barreira cria uma região de recirculação do escoamento sobre o coletor que é proporcional a altura da mesma. Lembrando(McAdams, 1954) que o coeficiente de película pode ser escrito como:

$$h_w = 5,7 + 3,8 \cdot V \quad (\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad (2)$$

onde  $V$  é a velocidade do vento dada em metros por segundo. A região de recirculação sobre o coletor tende a diminuir o valor do coeficiente de filme,  $h_w$ , pois a velocidade do vento sobre o coletor é menor do que se não houvesse a parede ao longo do perímetro do coletor, portanto, o efeito da “barreira” é o de diminuir as perdas de energia pela parte superior do coletor. É importante salientar que neste trabalho apenas a barreira frontal foi utilizada.



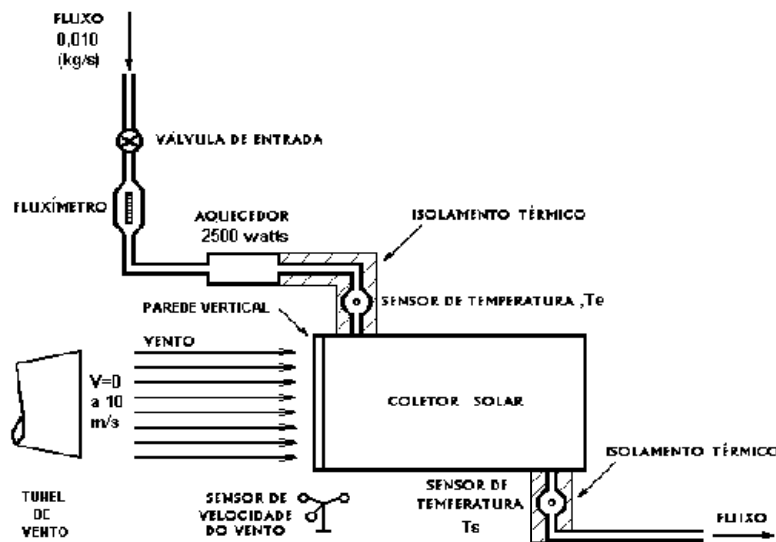
**Figura 3.** Linhas de corrente na parte superior do coletor solar com parede vertical.

### 3.1 Métodos e procedimentos utilizados

O método experimental usado para verificar as perdas de energia no coletor foi desenvolvido pelo monitoramento das temperaturas de entrada e saída no sistema em regime permanente. O objetivo é verificar as perdas de energia pela diferença de temperatura na entrada e saída do coletor submetido a várias condições preestabelecidas.

Foram feitos ensaios nos quais a diferença entre a temperatura de entrada,  $T_e$ , e a do ambiente,  $T_a$ , foi fixada em  $30\text{ }^\circ\text{C}$  e outros nos quais essa diferença era de  $60\text{ }^\circ\text{C}$ . O ângulo do coletor em relação a horizontal também foi variado. Os valores utilizados foram  $0$ ,  $15$  e  $30$  graus. Um outro parâmetro importante é a altura da parede,  $L_p$ . Os seguintes valores de  $L_p$  foram testados:  $0$ ,  $5$ ,  $11$ ,  $14$ ,  $18$  e  $22$  cm. Finalmente, a velocidade do vento,  $V$ , foi variada de  $2$  em  $2$  m/s, na faixa de  $0$  a  $8$  m/s.

O procedimento para medição das perdas de energia por convecção forçada pela parte superior do coletor foi o seguinte: inicialmente, sem vento atuando sobre o coletor, circula-se a água por dentro do coletor com uma vazão de  $0,020$  kg/s, e número de Reynolds baseado no diâmetro interno,  $Re_{Di} = 3150$ . Na entrada do coletor existe uma resistência térmica que aquece a água até que a temperatura desejada ( $30\text{ }^\circ\text{C}$  ou  $60\text{ }^\circ\text{C}$  acima da temperatura ambiente) seja alcançada. O fluxo de massa é o mesmo utilizado pela norma ASHRAE para o cálculo de desempenho do coletor. Aguarda-se o tempo suficiente para que a temperatura da água na entrada e na saída do coletor se estabilize, caracterizando o regime permanente. No coletor testado, tempo mínimo aguardado foi de  $30$  minutos, que é muitas vezes superior a sua constante de tempo. Depois anota-se as temperaturas de entrada, saída e ambiente além do fluxo de massa e o ângulo de inclinação. Ver esquema na figura 4.



**Figura 4.** Esquema para ensaio das perdas de energia do coletor solar confeccionado.

Após esta etapa do ensaio, liga-se o túnel de vento e regula-se a velocidade ( $0 \leq V \leq 8$  m/s) desejada sobre o coletor de energia solar. É preciso também colocar a parede na altura em que se deseja realizar o ensaio ( $0 \leq L_p \leq 22$  cm). Mantendo sempre constante a temperatura de entrada,  $T_e$ , aguarda-se o tempo suficiente para que a temperatura da água na saída do coletor se estabilize, caracterizando novamente o regime permanente. Mais uma vez, o tempo mínimo aguardado foi também de  $30$  minutos. De novo anota-se: as temperaturas de entrada, saída e ambiente, além do fluxo de massa, ângulo de inclinação do coletor, altura da parede e

velocidade do vento. O ensaio deve ser feito sem incidência de energia solar direta no coletor para que não haja interferência pela variação da intensidade solar.

### 3.2 Resultados experimentais

São apresentados a seguir resultados referentes às condições: velocidades de vento 5 m/s,  $T_e - T_a = 60\text{ }^\circ\text{C}$ , ângulos de inclinação,  $\beta$ , 0, 15 e 30 graus e uma cobertura de vidro.

Na tabela 2 é apresentada a redução de perdas por convecção forçada devido a colocação da parede na parte frontal do coletor. As condições de ensaio foram: velocidade de 5 m/s,  $T_e - T_a = 60\text{ }^\circ\text{C}$  e uma cobertura de vidro. Pode-se observar que para a parede de 5 cm de altura a incerteza dos resultados experimentais é grande o suficiente para impossibilitar qualquer tipo de análise.

**Tabela 2.** Redução percentual das perdas por convecção forçada pela parte superior do coletor em função da altura da parede,  $L_P$ . Velocidade do vento = 5 m/s,  $T_e - T_a = 60\text{ }^\circ\text{C}$ .

Altura da Parede $L_P$ (cm)	Redução das Perdas (%)		
	$\beta = 0\text{ grau}$	$\beta = 15\text{ graus}$	$\beta = 30\text{ graus}$
5	$0,7 \pm 0,7$	$1,3 \pm 0,7$	$0,7 \pm 0,7$
11	$2,0 \pm 0,7$	$3,3 \pm 0,6$	$2,6 \pm 0,6$
14	$6,0 \pm 0,6$	$6,5 \pm 0,6$	$5,8 \pm 0,6$
18	$7,3 \pm 0,6$	$7,1 \pm 0,6$	$7,1 \pm 0,6$
22	$9,9 \pm 0,6$	$8,4 \pm 0,6$	$8,4 \pm 0,6$

A tabela 3 apresenta as reduções de perdas de energia causadas pela introdução da parede na parte superior do coletor de energia solar para velocidades de 2, 4, 5, 6 e 8 m/s,  $T_e - T_a = 60\text{ }^\circ\text{C}$  e uma cobertura de vidro. A redução das perdas foi calculada comparando-se diferença entre a temperatura do fluido na entrada e na saída do coletor,  $(T_e - T_s)$ , para os casos com e sem barreira de vento, mantendo-se os demais parâmetros constantes. Os resultados obtidos demonstram que a parede de 22 cm é mais eficiente pois cria uma maior região de recirculação maior do que a parede mais baixa.

**Tabela 3.** Redução das perdas por convecção forçada pela parte superior do coletor em função de  $L_P$ . Velocidades do vento = 2, 4, 5, 6, 8 m/s,  $T_e - T_a = 60\text{ }^\circ\text{C}$ , e uma cobertura de vidro.

Velocidade do Vento (m/s)	Redução das Perdas (%)	
	$L_P = 14\text{ cm}$	$L_P = 22\text{ cm}$
2	$5,7 \pm 0,8$	$12,9 \pm 0,8$
4	$5,8 \pm 0,7$	$10,2 \pm 0,7$
5	$6,0 \pm 0,6$	$9,9 \pm 0,6$
6	$7,1 \pm 0,6$	$11,5 \pm 0,6$
8	$8,2 \pm 0,6$	$11,4 \pm 0,6$



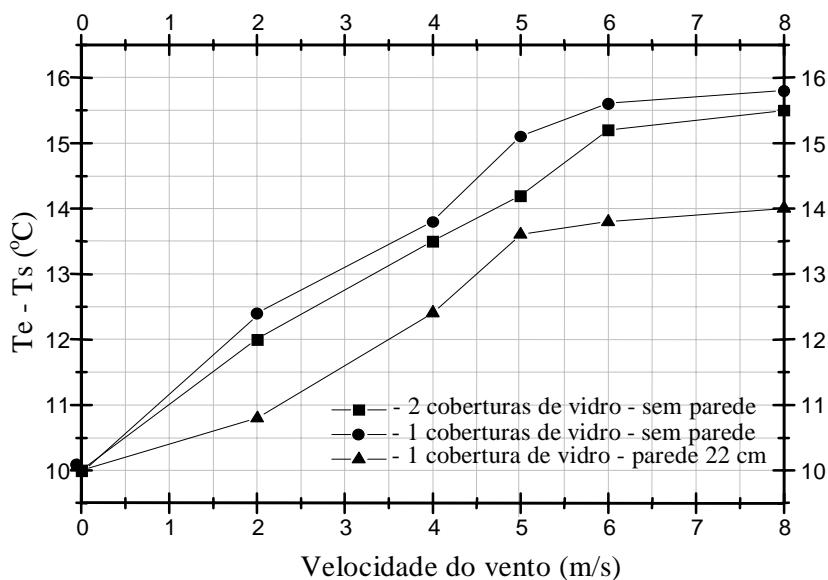
### 3.3 Análise comparativa dos métodos utilizados para redução de perdas de energia

A fim de se avaliar o potencial da parede como elemento redutor da perda de energia, na parte superior do coletor, por convecção forçada, os dados da figura 5 são bastante interessante. São apresentados três curvas: uma para o coletor com uma camada de vidro sem parede, outra para o coletor com uma camada de vidro e com uma parede frontal de 22 cm e finalmente com o coletor com duas camadas de vidro.

A velocidade do vento incidente foi variado de 0 a 8 m/s e a temperatura da água na entrada do coletor,  $T_e$ , é mantida fixa em 60 °C acima da temperatura ambiente,  $T_a$ . A diferença entre as temperaturas de entrada e de saída do fluido,  $T_e - T_s$ , está relacionada com as perdas por convecção através da superfície superior do coletor. Quanto maior  $T_e - T_s$ , maior a troca de calor entre o coletor e a corrente de ar que escoava sobre ele.

Para as condições do ensaio experimental nota-se que a pior situação é a do coletor sem parede e com apenas uma cobertura de vidro. Fato este, bastante conhecido na literatura. A colocação de uma segunda cobertura de vidro vem contribuir para um melhor desempenho do coletor principalmente, pois esta diminui as perdas de energia por convecção forçada (a segunda cobertura tem pouca influência nas perdas por radiação (Duffie&Beckman,1980). Finalmente, a colocação de uma barreira frontal ao escoamento mostra-se, nas condições ensaiadas, mais eficaz do que a solução clássica de se colocar uma segunda cobertura de vidro sobre o coletor de energia solar de placa plana.

É importante também salientar que este se trata de um primeiro estudo e que proporciona uma colaboração no avanço do estudo das perdas de energia por convecção forçada na parte superior do coletor de energia solar. Novos ensaios devem ser realizados, inclusive os de campo, fora do laboratório, a fim de que se possa avaliar mais profundamente os ganhos que poderão ser obtidos através do conceito introduzido nesse trabalho.



**Figura 5.** Gráfico comparativo dos métodos utilizados para redução das perdas de energia com valores de  $T_e - T_s$  por velocidade do vento com  $T_e - T_a = 60$  °C.

## 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi introduzido um conceito novo para se minimizar as perdas de energia por convecção forçada através da superfície superior de um coletor de energia solar de placas

planas. A idéia é a de se criar uma região de recirculação de escoamento sobre o coletor, diminuindo assim a velocidade do vento e, conseqüentemente o coeficiente de filme  $h_w$ . A introdução desta barreira proporciona uma diminuição nas perdas de energia, devido a uma região de recirculação de escoamento sobre o coletor. Notou-se uma melhor eficácia da barreira para velocidades de vento com ângulo de inclinação do coletor de 0 grau. Para as outras inclinações, 15 e 30 graus, as regiões de recirculação foram pouco menores. Observou-se também que para as condições estudadas, a introdução da parede é a melhor solução para minimizar as perdas de energia, com uma melhoria na redução das perdas de energia chegando até 9,7 % em comparação com o coletor com duas coberturas de vidro, e de até 12,9% em comparação com o coletor com uma cobertura de vidro e sem parede, para velocidade de vento de 2 m/s. Estes resultados podem ser considerados promissores e certamente são satisfatórios para o atual estágio da presente pesquisa.

## 5. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem o apoio da FAPESP que possibilitou a realização do presente trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS

- Agarwal, V. K. and Larson, D. C., 1981, "Calculation of the Top Loss Coefficient of a Flat-Plate Collector", *Solar Energy*, Vol 27, pp 69-71.
- Bliss, Raymond W., Jr., 1959, "The Derivations of Several 'Plate-Efficiency Factors' Useful in the Design of Flat-Plate Solar Heat Collectors", *Solar Energy Laboratory, Institute of Atmospheric Physics, University of Arizona, Tucson, Solar Energy*, Vol 3, pp 55-64.
- Duffie, John A., and Beckman, William A., 1980, "Solar Engineering of Thermal Processes", Wiley Interscience, New York.
- Gomes, Dalmo G., 1998, "Estudo de Otimização em Coletores de Energia Solar de Placas Planas", Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 127p.
- G. Olson, B. Thundal, and G. Wilson, 1981, "Advanced Solar absorber of Metallurgically Bonded Copper and Aluminum", *Proceedings, Solar World Forum, Brighton, England, Pergamon Press, Vol. 1, pp 163-168.*
- Hollands, K. G. T., and Stedman, B.A., 1992, "Optimization of an Absorber Plate Fin Having a Step-Change in Local Thickness", *Solar Thermal Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, N2L 3G1, Solar Energy*, Vol. 49, No. 6, pp 493-495.
- Hottel, H.C. and Woertz, B.B., 1942, "Performance of Flat-Plate Solar-Heat Collectors", *Transactions of the American Society Mechanical Engineers*, 64, 91.
- Klein S. A., 1975, "Calculation of Flat-Plate Collector Loss Coefficients", *Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, U.S.A., Solar Energy*, Vol 17, pp 79-80.
- Malhotra, A., Garg, H. P. and Rani, U., 1980, "Minimizing Convective Heat Losses in Flat Plate Solar Collectors", *Solar Energy*, Vol. 25 , pp 521-526.
- McAdams, W. H., 1954, "Heat Transmission", 3ª Edição, McGraw-Will Inc., New York.
- New Grolier Multimedia Encyclopedia, 1993, 6ª Ed., Versão 6.03 – Grolier Inc.
- Tabor, H., 1958, "Radiation, Convection and Conduction Coefficients in Solar Collectors", *Bulletin of the Research Council of Israel*, 6C, 155.

## **SIMULADOR DE RADIAÇÃO SOLAR. RESULTADOS, FUNCIONAMENTO E TESTES EM UM EQUIPAMENTO CONSTRUÍDO**

### **Marcelo Bezerra Grilo**

Doutorando em Engenharia Elétrica. UFPB/COPELE – Campina Grande, Paraíba.

[grilo@nerg.ufpb.br](mailto:grilo@nerg.ufpb.br) / [www.nerg.ufpb.br/~grilo](http://www.nerg.ufpb.br/~grilo) fone (083) 333 2967

### **Francisco Ilo Bezerra Cardoso**

Universidade de Pernambuco UPE/FESP. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica. Recife, PE, Brasil. (081) 9979 5898

**RESUMO.** O simulador de radiação solar é um equipamento que substitui a radiação solar, que chega a nível do solo, por uma radiação equivalente, porém de fonte artificial. O equipamento permite a pesquisa em sistemas que utilizam a radiação solar como fonte energética, possibilitando seu funcionamento para localidades com latitude e longitude diferentes, bem como de condições meteorológicas e de potência solar abrangentes. O simulador de radiação construído será utilizado na pesquisa em andamento que trata do desenvolvimento de um sistema para bombeamento de água usando energia solar, em um ciclo a absorção. É possível também sua utilização como fonte de energia para se estudar a influência da qualidade espectral da energia solar e da sua intensidade para o desenvolvimento morfológico de determinadas plantas. Neste trabalho, apresentam-se o projeto, as características construtivas e os resultados obtidos nos testes de um protótipo construído que utiliza material simples e de baixo custo.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Radiação Solar, Baixo Custo, Simulador Solar

## **1. INTRODUÇÃO**

Este trabalho apresenta dados de projeto, características construtivas e os resultados dos testes de um equipamento, que substitui a radiação solar por uma radiação equivalente porém de fonte artificial, utilizando-se lâmpadas incandescentes.

Ele é caracterizado por produzir radiação com um espectro equivalente a radiação solar que chega a nível do solo, com comprimentos de ondas na faixa de 0,100 a 2,500  $\mu\text{m}$ .

A radiação solar, suas características e propriedades, será apresentada em um breve estudo com a finalidade de familiarizar o leitor com a terminologia adotada. Também são apresentados alguns dados geográficos e meteorológicos da cidade de Campina Grande, na Paraíba, onde o equipamento foi construído e testado. Estes estudos preliminares justificam-se pela necessidade de se chamar a atenção para certos cuidados que devem ser observados ao se construir um equipamento desse tipo.

O equipamento testado tem baixo custo de fabricação e apresenta facilidade para manutenção e operação. Foi construído com material de baixo custo e disponível na região.

Este equipamento será utilizado para os testes, em laboratório, de funcionamento de um coletor solar bifásico. Este coletor especial, utiliza como fluido de trabalho uma mistura de

água e amônia, e sua finalidade é funcionar como um gerador em um ciclo termodinâmico de absorção, onde o vapor de amônia produzido é usado para acionar um mecanismo de bombeamento de água.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Antes de dar início a caracterização da parte experimental do simulador de radiação, apresenta-se um estudo resumido sobre o tema radiação e particularmente radiação solar. Esta apresentação contribui para familiarizar o leitor com a terminologia utilizada no trabalho, bem como dar aos iniciantes no tema uma visão panorâmica sobre o assunto.

Radiação solar é a radiação térmica com uma forma particular de comprimento de onda. A intensidade desta radiação depende basicamente das condições atmosféricas, da época do ano, do local ( latitude e longitude ) e da hora. A radiação térmica é a radiação eletromagnética emitida por um corpo em função de sua temperatura. Sabe-se que todo corpo com  $T \neq 0$  K, emite radiação.

O mecanismo de propagação da radiação é dado pela equação:  $c = \lambda \nu$ . Onde  $c$  é a velocidade de propagação da luz no vácuo,  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $\nu$  é a frequência. Na tabela 1, apresentam-se alguns tipos de radiação e suas respectivas faixas espectrais de comprimento de onda.

**Tabela 1.** Espectro eletromagnético em função do comprimento de onda  $\lambda$ .

TIPO DE RADIAÇÃO	FAIXA DE $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )
Radiação térmica	0,100 a 100,000
UV - Ultravioleta	0,001 a 0,350
Radiação visível	0,350 a 0,750
IV - Infravermelho	0,750 a 1000,000
Radiação solar a nível do solo	0,100 a 2,500

No simulador de radiação solar nos interessa produzir o máximo de radiação na faixa espectral da radiação solar a nível do solo. Isto será obtido utilizando-se lâmpadas incandescentes comuns que tenham uma determinada temperatura de emissão no filamento e que portanto emitam radiação térmica com qualidade espectral nas faixas do ultravioleta longo, do visível e do infravermelho curto. Os fabricantes de lâmpadas produzem lâmpadas especiais que podem gerar radiação específica nas faixas espectrais desejadas, essas porém têm um custo muito elevado.

As propriedades mais usuais da radiação incidente sobre uma superfície são a Irradiação (G), a Refletividade ( $\rho$ ), a Absortividade ( $\alpha$ ), a Transmissividade ( $\tau$ ), e a Emissividade. Aplicando-se um balanço de energia em um corpo, a soma de  $\rho + \alpha + \tau$  deve ser igual a 1 (100%). A constante solar é dada pelo termo Gcs, e vale  $1353 \text{ W/m}^2$ , este valor de irradiação é obtido em altitudes muito elevadas fora da influência da camada atmosférica da terra.

Na revisão bibliográfica sobre a utilização de equipamentos para simular radiação solar, constata-se a existência de poucos trabalhos e referências sobre o tema. Os trabalhos encontrados referem-se a equipamentos de alto padrão tecnológico e conseqüentemente custos muito elevados. VERNON (1979), apresenta o simulador utilizado pela NASA, e BISGAARD (1982), descreve as características de um simulador utilizado para testes de coletor solar na Universidade da Dinamarca. No Brasil, obteve-se a informação de que o laboratório de

energia solar da UFRGS, já construiu um equipamento para este fim, mas que está desativado. É possível que existam no Brasil outros equipamentos sendo utilizados, um dos resultados esperados com a publicação deste trabalho é estabelecer contato com esses usuários.

Na tabela 02, são apresentados alguns dados meteorológicos e geográficos para Campina Grande, cidade inserida na área conhecida como semi-árido nordestino, onde é possível se obter intensidade de radiação solar, a nível do solo, na faixa de 600 a 950 W/m<sup>2</sup>.

**Tabela 2.** Dados meteorológicos e geográficos da cidade de Campina Grande

Altitude	550	m
Latitude	7°	sul
Longitude	35°	W Gw
Temperatura Ambiente ( média máxima )	24,7	°C
Temperatura Ambiente ( média mínima )	21,5	°C
Irradiação ( média máxima )	950	W/m <sup>2</sup>
Irradiação ( média mínima )	600	W/m <sup>2</sup>

Apresentam-se, na tabela 3, algumas características construtivas e de custos do simulador de radiação solar de baixo custo, projetado e construído por GRILO (1999), na cidade de Campina Grande, Brasil, e algumas características do simulador de radiação construído por CASTRO (1994), na cidade de Toulouse, França.

Esta tabela tem a finalidade de comparar os materiais e o nível de caracterização tecnológica e de custos envolvidos em cada equipamento. Utilizando-se valores de março de 1999, data dos testes, verifica-se que o equipamento construído em Campina Grande representa um investimento de apenas 20% em relação ao simulador construído na França, sendo, entretanto, capaz de realizar com competência e qualidade as tarefas para as quais foi projetado.

**Tabela 3.** Principais características dos simuladores de GRILO e de CASTRO

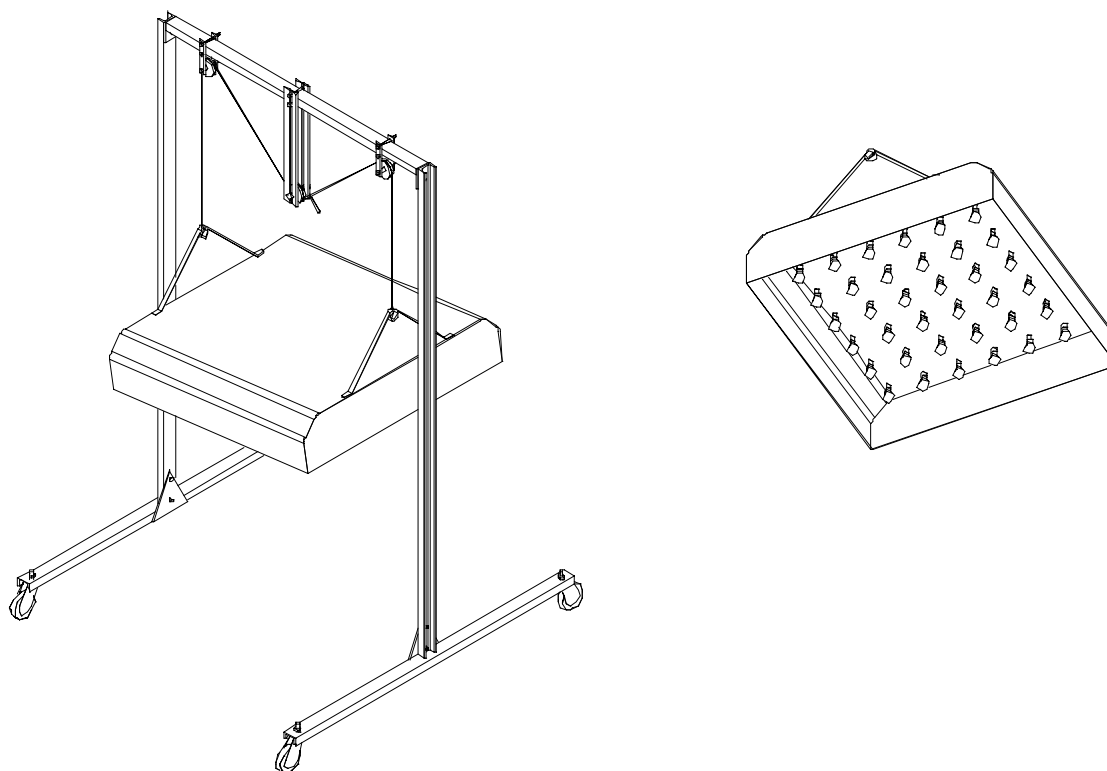
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>SIMULADOR DE BAIXO CUSTO CAMPINA GRANDE - BRASIL</b>	<b>SIMULADOR DE CASTRO TOULOUSE - FRANÇA</b>
Largura ( m )	1,40	0,50
Comprimento ( m )	1,40	2,00
Área ( m <sup>2</sup> )	1,96	1,00
Número de lâmpadas	36	10
Potência cada lâmpada ( W )	200	500
Tipo de lâmpada	Incandescente	Halogênio
Material do simulador	Chapa galvanizada	Aço Inox
<b>Custo aproximado ( US\$ )</b> Taxa do dia, US\$ 1.00 = R\$ 1,80	<b>132</b>	<b>660</b>

**Tabela 4.** Valores dos componentes do simulador solar de baixo custo

COMPONENTES	INVESTIMENTO ( US\$ )
Chapa galvanizada	15
Lâmpadas / Soquetes / Fios / Chaves	72
Madeira	12
Chapa de alumínio / parafusos	26
Tinta	07
<b>Total</b>	<b>132</b>

O equipamento construído e a experimentação realizada têm as seguintes características. A base do simulador de radiação é constituída por uma chapa de ferro galvanizada com dimensões de 1,40 m por 1,40 m, no interior do equipamento estão 36 pontos de luz, apropriadamente posicionados com soquetes de porcelana para resistir as altas temperaturas existentes.

Na figura 1, apresenta-se um desenho do equipamento construído.



**Figura 1.** Desenho do simulador no suporte e detalhe do posicionamento das lâmpadas

O critério para escolha da lâmpada utilizada como fonte emissora é aquele que contemple o binômio baixo custo e máxima eficiência. Elege-se a lâmpada incandescente de bulbo transparente de 200 W, porque ela tem uma temperatura no filamento irradiador em torno de

3 673 K. Aplicando-se a lei de Planck para este tipo de lâmpada, como pode ser visto em HOLMAN (1983), obtêm-se as características de radiação que este tipo de emissor tem:

- ✓ 0,4 % é irradiação no UV Ultravioleta
- ✓ 21,8 % é irradiação no V Visível
- ✓ 77,8 % é irradiação no IV Infravermelho

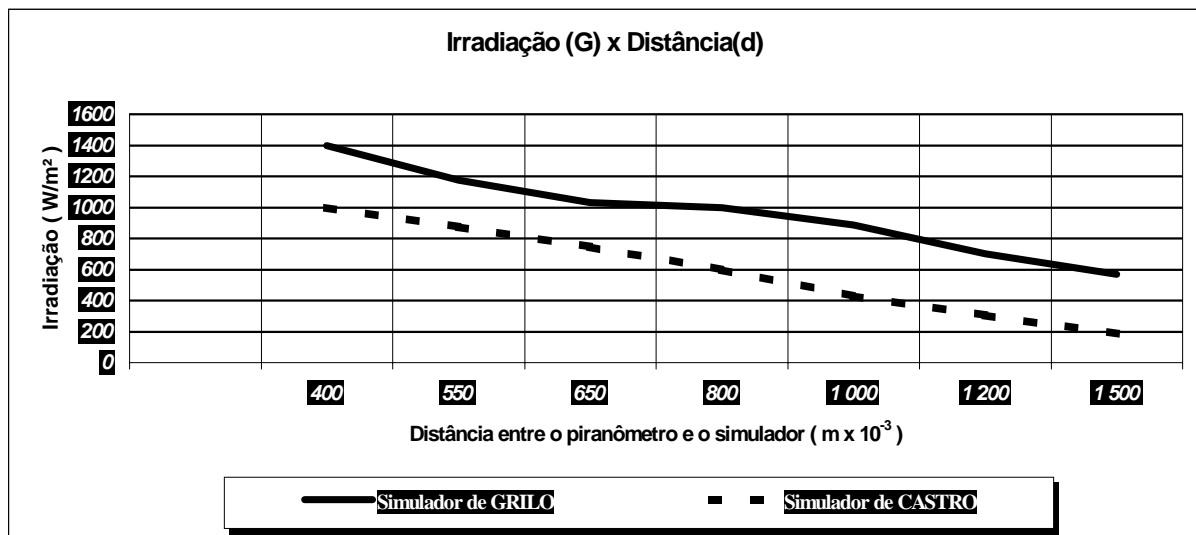
Para realizar os testes e medições, foi utilizado um piranômetro *Eppley*, modelo PSP referência número 28232F-3 com constante igual a  $8,75 \times 10^{-6} \text{ J/Wm}^2$ . Acoplado ao piranômetro utilizou-se um sistema de aquisição de dados *Zix Micrologger* fabricado pela *Campbell Scientific* com número de série 8461, do tipo RJV.

No Núcleo de Energia da UFPB tem um vídeo e um conjunto de fotografias do equipamento em teste, onde é possível observar a geometria, as proporções e demais características do equipamento testado, estas fotos foram obtidas com uma máquina fotográfica especial e digitalizadas diretamente no computador sem necessidade de revelação.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas dez baterias de testes, que geraram aproximadamente cem planilhas. A seqüência de testes foi estabelecida com a finalidade de medir a irradiação obtida no piranômetro, essa irradiação é função da distância entre o simulador e o piranômetro e da potência que sai das lâmpadas no simulador. Espera-se com este tipo de teste determinar qual a distância correta entre o emissor e o receptor da radiação. Por exemplo, qual a distância necessária entre o simulador e um receptor para que este receba uma irradiação de  $950 \text{ W/m}^2$ ?

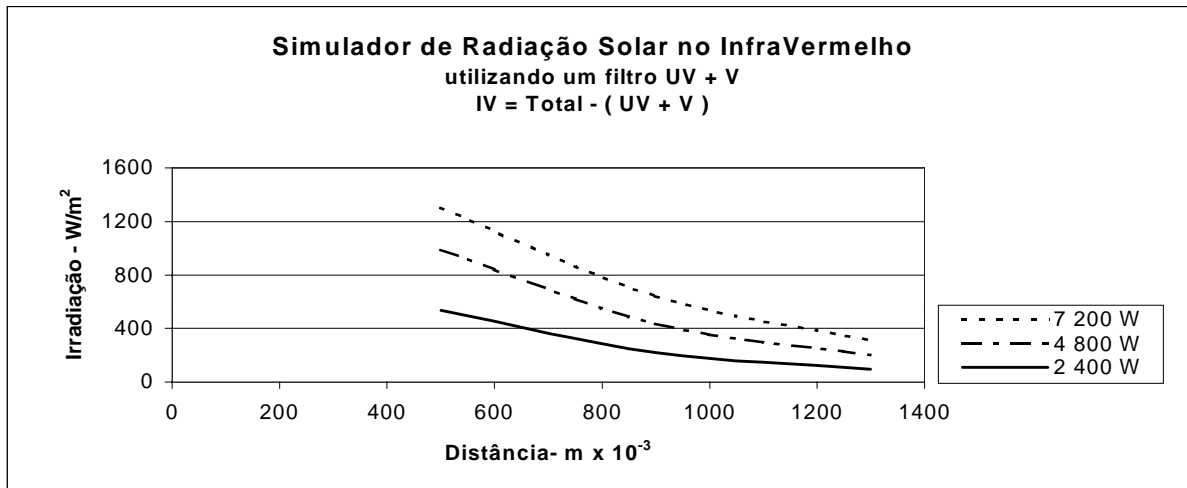
A figura 2, mostra os resultados obtidos no receptor, neste caso o piranômetro, quando se varia a distância entre este e o simulador. Na figura também é mostrada esta mesma relação para o simulador de CASTRO e que serve de comparativo entre os dois equipamentos. É possível observar que o simulador de GRILO tem capacidade de produzir irradiação na faixa equivalente a que realmente existe no Nordeste brasileiro, e até  $1 500 \text{ W/m}^2$ .



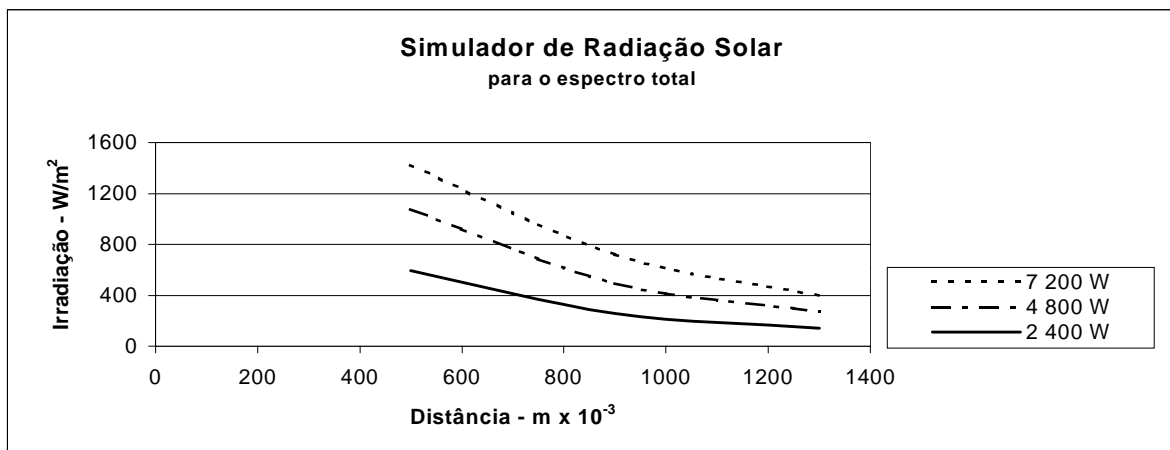
**Figura 2.** Irradiação obtida quando se varia a distância entre o simulador e o piranômetro

Os testes servem também para verificar a qualidade da radiação que chega no receptor, ou seja, a radiação deve estar na faixa espectral de  $0,100$  a  $2,500 \mu\text{m}$ , equivalente a que chega na superfície da terra quando proveniente do sol.

As figura 3 e 4, mostram os valores de irradiação obtidos no piranômetro para a faixa do espectro Infravermelho e para o espectro total. Comparando-se estas duas figuras observa-se que a radiação obtida para uma potência de partida de 7 200 W nas lâmpadas, apenas 1 200 W chega no receptor na faixa espectral do Infravermelho e 1 500 W chega no espectro total. Isto mostra que a radiação infravermelho é aproximadamente 80% da radiação total, o que está de acordo com o valor esperado teoricamente. Estas duas figuras mostram também que esta proporção de 80% se mantém quando a potência do emissor é de 4 800 W e 2 400 W.



**Figura 3.** Irradiação obtida na faixa do IV, variando-se a potência do simulador



**Figura 4.** Irradiação obtida para espectro total, variando-se a potência do simulador

#### 4. CONCLUSÕES

A figura 2, mostra que para se produzir irradiação entre 600 e 950  $W/m^2$ , basta variar a distância entre o simulador e o coletor solar entre 1,50 m e 0,70 m, e que essa irradiação pode chegar até 1 500  $W/m^2$  quando a distância entre o emissor e o receptor é de 0,50 m.

Para se utilizar um equipamento deste tipo, é necessário apenas que se conheça a faixa de irradiação incidente na localidade, e determinar, através da figura 2, qual a distância necessária entre o simulador e o coletor solar.



As figuras 3 e 4, mostram que o simulador construído produz radiação de qualidade, nas faixas espectrais esperadas.

Da análise dos dados obtidos nas medições, conclui-se que o equipamento construído e testado, apresenta resultados compatíveis com os esperados teoricamente.

Pode-se, portanto, afirmar que é possível e é viável, a construção e operação do simulador de radiação solar proposto.

### *Agradecimentos*

Ao Banco do Nordeste do Brasil - BNB, que apoia financeiramente o projeto Desenvolvimento de um Sistema para Bombeamento de Água usando Energia Solar, com Ciclo a Absorção, do qual este trabalho é parte.

## 5. REFERÊNCIAS

- BISGAARD, C., SVENDSEN, S.** 1982. Testing the efficiency of solar collectors at the Technical University of Denmark. SunWorld. Vol. 6 (4). pp. 112–113.
- CASTRO, Moema Soares.** 1994. Système de pompage de l'eau utilisant une pompe gás-lift et alimenté par énergie solaire. Thèse de Docteur. Toulouse, France. 145p.
- GRILO, Marcelo Bezerra.** 1999. Projeto, construção e testes de um simulador de radiação solar. Copele. UFPB, Campina Grande, Brasil. 57p.
- HANNA, G. B.** 1980. Investigation of a flat-plate solar collector performance with the use of a solar simulator. J. Eng. Sci. Riyadh. Vol. 6 (2). pp. 199-209.
- HOLMAN, Jack Philip.** 1983. Transferência de Calor. Tradução de Luiz Fernando Milanez, Editora McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, Brasil. 639p.

## SOLAR RADIATION SIMULATOR

**Abstract.** This paper is about the development of a radiation solar simulator. The solar radiation simulator is a device that substitutes the solar radiation by an equivalent artificial radiation in the laboratory. A well designed solar simulator allows the research of equipments that use the solar radiation as energy source, facilitating its operations at places with different latitude and longitude, as well as different meteorological conditions and including solar potencial. This paper presents the project and the characteristics of a solar radiation simulator, that uses simple and low cost materials, what makes its construction feasible in another laboratories of poor areas as the demi-arid area in the Brazilian Northeast.

**Keywords.** Solar Energy, Solar Radiation, Solar Radiation Simulator

# INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO REATOR NO DESEMPENHO DE UM REFRIGERADOR SOLAR À ADSORÇÃO OPERANDO COM CARVÃO-AATIVO/METANOL

**Ronald Borges Buere**

**Márcio Fonte Boa Cortez**

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: buere@demec.ufmg.br

**Evandro Ferreira Passos**

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Física, 36571-000, Viçosa, MG, Brasil. E-mail: epassos@mail.ufv.br

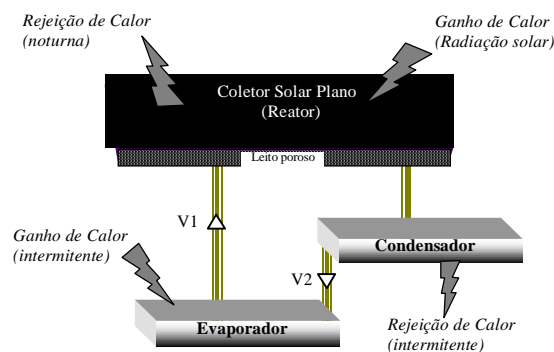
## Resumo

Uma análise teórica do reator de um sistema de refrigeração solar à adsorção, baseado em um modelo matemático representativo dos processos relativos ao fenômeno da sorção, é apresentada. O modelo matemático utilizado descreve a transferência de calor e massa durante o processo de dessorção, permitindo a avaliação do desempenho térmico do sistema. Diferentes concepções geométricas do reator, comuns na literatura, são consideradas na composição do sistema, possibilitando comparações de desempenho sob condições de operação definidas.

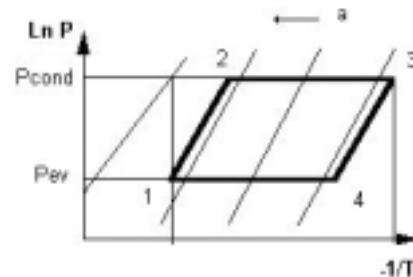
**Palavras-chave:** Refrigeração solar, adsorção, carvão ativo, leito poroso

## 1. INTRODUÇÃO

Um sistema de refrigeração solar à adsorção é composto, basicamente, de um reator (coletor solar) – constituído de um leito poroso, uma superfície absorvedora da radiação solar, uma cobertura transparente e isolamento térmico nas laterais e fundo – de trocadores de calor, condensador e evaporador, e de válvulas de retenção (figura 1).



**Figura 1** – Representação de um sistema de refrigeração à adsorção.



**Figura 2** – Ciclo de refrigeração no diagrama isostérico.

O ciclo de refrigeração nesta instalação é caracterizado por uma operação intermitente, completando-se em duas fases: regeneração ou aquecimento (etapa diurna) e produção de frio ou adsorção (etapa noturna). A figura 2 mostra o ciclo de refrigeração à adsorção, no diagrama isostérico onde estas fases podem ser identificadas – a fase de regeneração (1-2-3) compõe-se dos processos de aquecimento isostérico (1-2) e dessorção (2-3) e a fase de produção de frio (3-4-1) dos processos de resfriamento isostérico (3-4) e adsorção (4-1).

A fase de regeneração inicia-se com a incidência de radiação solar no reator, que provoca o aumento de sua temperatura e pressão. Nesta fase, tem-se um processo inicial no qual a massa de fluido refrigerante adsorvida no leito poroso permanece constante (processo isostérico) que ocorre até que a pressão interna do reator alcance o valor da pressão de condensação, quando então, inicia-se o processo de dessorção. Na dessorção, a radiação solar continua a aquecer o leito poroso e a pressão do reator é a pressão de condensação. O vapor de refrigerante dessorvido dirige-se ao condensador e, após condensado, atinge o evaporador.

A etapa de produção de frio inicia-se ao final do período de insolação, quando a temperatura e a pressão do reator começam a diminuir. Inicialmente, tem-se um processo de resfriamento isostérico que ocorre até que a pressão do reator alcance o valor da pressão de evaporação, momento em que se inicia o processo de adsorção e a realização do efeito frigorífico através do evaporador. Durante o processo de adsorção em que a temperatura do leito poroso continua a diminuir e a pressão interna do reator é imposta pelo evaporador, o vapor de refrigerante que se forma no evaporador (através da cessão de calor do espaço a ser refrigerado) dirige-se ao reator onde é adsorvido pelo leito poroso. Ao final da fase de produção de frio, a concentração de refrigerante adsorvida no leito poroso é, novamente, elevada e o reator encontra-se preparado para nova etapa diurna.

## 2. MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo matemático baseia-se em uma análise bidimensional, em regime transiente, das equações de condução de calor e conservação de massa em um reator adsorvivo de geometrias, tubular e plana, face às seguintes considerações:

- 1-A transferência de massa dentro do leito adsorvivo, ocorre somente na fase de vapor. O equilíbrio termodinâmico do par adsorvente/adsorvato é verificado a cada instante em todos os pontos do leito poroso;
- 2-A pressão é considerada uniforme a cada instante, em todo o leito poroso ( $\text{grad } P = 0$ );
- 3-O leito poroso em presença da fase adsorvida é considerado um meio contínuo e homogêneo, para efeito da condução de calor;
- 4-A resistência à difusão de massa intergranular e através dos poros é desprezada;
- 5-Não se considera a transferência de calor convectiva no interior do leito poroso.

### 2.1 – Equação de Dubinin e Astakhov

Na região do leito poroso, a concentração da fase adsorvida ( $a$ ) em função da temperatura ( $T$ ) e pressão ( $P$ ) pode ser determinada pela equação de estado de Dubinin e Astakhov:

$$a = W_0 \rho_{\text{sorb}}(T) \exp\left[-D \left(T \ln \frac{P_{\text{sat}}(T)}{P}\right)^n\right], \quad (1)$$

onde,  $a$  é a massa de sorbato por unidade de massa de adsorvente,  $W_0$  é a capacidade máxima de adsorção (volume de adsorvato/massa de adsorvente),  $\rho$  é a massa específica do sorbato líquido e  $D$  e  $n$  são parâmetros característicos do par adsorvente/adsorvato.

A variação de massa no interior do leito poroso, decorrente das variações de temperatura e pressão pode ser calculada através da diferenciação total da equação 1 em relação ao tempo:

$$\frac{da}{dt} = b(a, T, P) \left( \frac{d \ln P}{dt} - \frac{q_{st}}{RT^2} \frac{dT}{dt} \right), \quad (2)$$

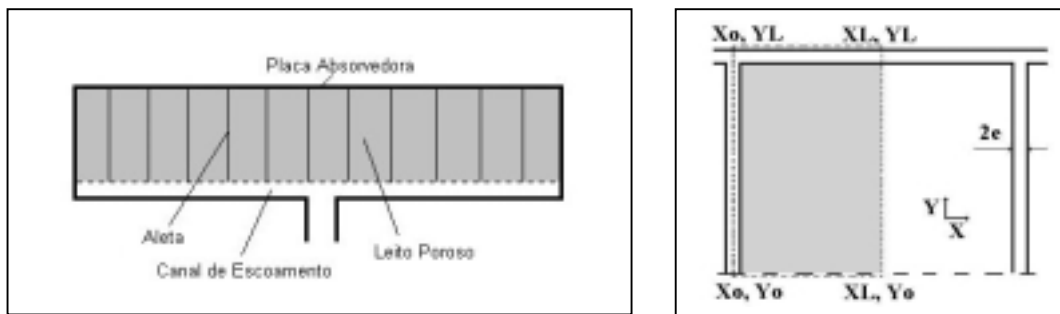
sendo,  $b(a, T, P) = aDnT^n \left( \ln \frac{P_{sat}(T)}{P} \right)^{n-1}$  e  $q_{st}$ , o calor isostérico de adsorção, dado por:

$$q_{st} = L + RT \ln \frac{P_{sat}}{P} + \frac{\alpha RT}{nD} \left( T \ln \frac{P_{sat}}{P} \right)^{1-n}, \quad (3)$$

onde  $L$  é o calor latente de vaporização e  $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica do sorbato.

## 2.2 – Reator Plano

O reator plano analisado possui configuração semelhante à encontrada em diversos trabalhos (Grenier & Pons, 1983; Passos, 1986; Guillemintot et al., 1987; Passos et al., 1989). O modelo é desenvolvido para uma região do reator compreendida entre duas aletas, cuja simetria permite a análise em meia-célula (figura 3).



**Figura 3** – Representação do reator plano e do domínio da solução.

Nas partes metálicas (placa absorvedora e aletas) a equação da condução de calor é:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \left( \frac{\rho c}{k} \right)_{met} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (4)$$

onde,  $k$ ,  $\rho$  e  $c$  são, respectivamente, a condutividade térmica, a massa específica e o calor específico à pressão constante do metal utilizado.

No leito poroso a equação é escrita como a seguir:

$$k_{lp} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_{st} \rho_{sorb} \frac{da}{dt} = [\rho_{sorb} (c_{sorb} + a(T, P)c_{sorb})] \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

Na região de contato entre as partes metálicas e o adsorvente, estabelece-se uma resistência térmica ( $h$ ). Considerando-se  $T_{met}$  e  $T_{lp}$ , respectivamente, as temperaturas do metal e do leito poroso na região de contato, pode-se escrever:

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_0+e} = h(T_{met} - T_{lp}), \quad -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y_L-2e} = h(T_{met} - T_{lp}). \quad (6)$$

As condições iniciais são fixadas em função das temperaturas, ambiente e do evaporador no início da fase de regeneração:

$$T(x, y, t = 0) = T_{amb}, \quad P(x, y, t = 0) = P_{sat}(T_{ev}). \quad (7)$$

Utilizando-se as equações 1 e 7, a concentração ( $a_0$ ) e a massa total de sorbato ( $M_{sorb}$ ) no início da regeneração podem ser determinadas:

$$a(T_0, P_0) = a_0, \quad M_{sorb}|_0 = \rho_{sorb} V_{lp} a_0, \quad (8)$$

onde,  $V_{lp}$  é o volume do leito poroso.

As condições de contorno são implementadas assumindo-se simetria em  $(x_0, y)$  e  $(x_L, y)$  e fluxo prescrito em  $(x, y_L)$  e  $(x, y_0)$ :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_L} = 0, \quad (9-a)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y_L} = S - U_t [T(x, y_L) - T_{amb}], \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y_0} = U_b [T(x, y_0) - T_{amb}], \quad (9-b)$$

onde  $S$  é a radiação solar absorvida pelo reator e  $U_t$  e  $U_b$  são os coeficientes globais de perda de calor pelas partes superior e inferior do reator, respectivamente. As expressões para determinação destes parâmetros são detalhadas em (Duffie & Beckman, 1991).

Durante o aquecimento isostérico, a concentração de sorbato varia, internamente, no leito poroso, permanecendo, entretanto, sua massa total, constante e igual à massa inicial:

$$\frac{d}{dt} \iint_A a(T(x, y), P) \rho_{sorb} dx dy = 0. \quad (10)$$

Aplicando a equação 10 sobre a equação 2, considerando a pressão uniforme, obtém-se:

$$\frac{d \ln P}{dt} = \frac{\iint b(a, T, P) \frac{q_{st}}{RT^2} \frac{dT}{dt} dx dy}{\iint b(a, T, P) dx dy}. \quad (11)$$

Durante a fase de dessorção, a pressão do sistema é imposta pelo condensador:

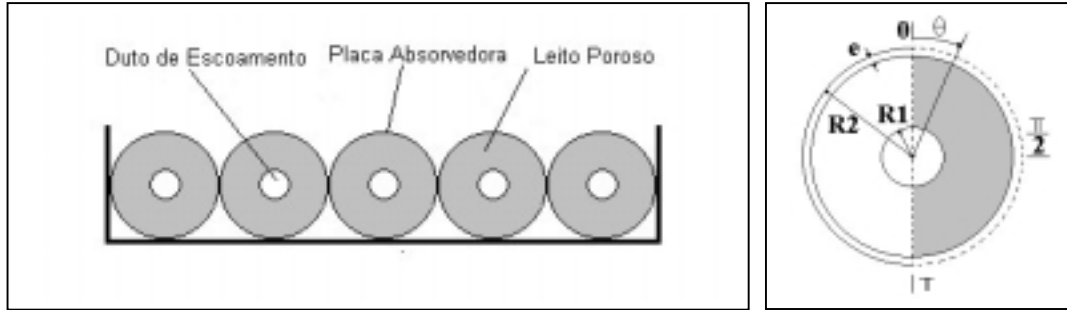
$$\frac{d \ln P}{dt} = \frac{d \ln P_{cond}}{dt}. \quad (12)$$

A seguinte expressão final é obtida para o leito poroso:

$$k_{lp} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \left[ \rho_{sorb} (c_{sorb} + a(T, P) c_{sorb}) + \rho_{sorb} b(a, T, P) \frac{q_{st}^2}{RT^2} \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{sorb} b(a, T, P) q_{st} \frac{d \ln P}{dt} \quad (13)$$

## 2.3 – Reator Tubular

O reator tubular estudado é semelhante ao utilizado por pesquisadores da Universidade Federal da Paraíba (Gurgel & Kluppel, 1992; Leite, 1997 e 1998). O modelo é desenvolvido para uma região do reator, compreendida entre a superfície externa do duto de escoamento e a superfície externa do tubo. A simetria deste tipo de reator permite a análise em uma porção de 1/2 de tubo, conforme mostrado na figura 4.



**Figura 4** – Representação do reator tubular e do domínio da solução.

Os processos que ocorrem no interior do reator tubular são descritos através da aplicação da equação da condução de calor bidimensional, transiente, em coordenadas cilíndricas a cada um de seus componentes (placa absorvedora e leito poroso). As condições iniciais são como as descritas para o reator plano e as condições de contorno são as seguintes:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{r,\theta} = 0, \text{ para } \theta = 0 \text{ ou } \theta = \pi, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r1,\theta} = 0, \quad (14-a)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r2,\theta} = S - U_t [T(r_2, \theta) - T_{amb}], \text{ para } 0 \leq \theta \leq \pi/2, \quad (14-b)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r2,\theta} = U_b [T(r_2, \theta) - T_{amb}], \text{ para } \pi/2 < \theta \leq \pi. \quad (14-c)$$

Conduzindo-se esta análise como na seção precedente, as seguintes expressões finais são obtidas para a região metálica e leito poroso, respectivamente:

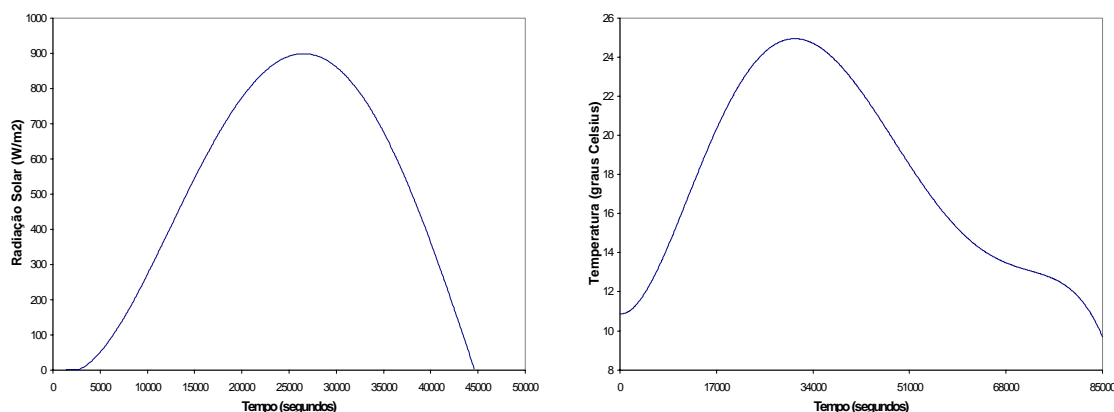
$$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = \left( \frac{\rho c}{k} \right)_{met} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (15-a)$$

$$\left[ \rho_{sorb} (c_{sorb} + a(T, P)c_{sorb}) + \rho_{sorb} b(a, T, P) \frac{q_{st}^2}{RT^2} \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{sorb} b(a, T, P) q_{st} \frac{d \ln P}{dt} = k_{ip} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) \quad (15-b)$$

A solução do conjunto de equações sujeitas às condições iniciais e de contorno é obtida mediante a utilização de um método numérico baseado na técnica de volumes finitos através do programa computacional *Conduct* (Patankar, 1991). O modelo devidamente implementado determina os campos de temperatura e concentração e a pressão do reator (conseqüentemente, a quantidade de massa de sorbato desorvida), a partir de dados de insolação e temperaturas, ambiente, de condensação e de evaporação.

### 3. METODOLOGIA DE ANÁLISE

Para a validação do modelo matemático implementado e avaliação do desempenho dos sistemas com reator plano e tubular, tomou-se como referência os estudos apresentados em (Passos, 1986 e Passos et al., 1989). Estes trabalhos, consideram um protótipo com reator plano, composto de uma superfície absorvedora em cobre, com pintura seletiva (absortividade de 0,97 e emissividade de 0,1), aletas em cobre, e cobertura de vidro (emissividade de 0,88). As dimensões da “meia-célula” apresentada na figura 3 são:  $x_L = 25$  mm e  $y_L = 51$  mm. O par adsorvente/adsorvato utilizado é o carvão ativo/metanol e o carvão ativo, especificamente, é o AC-35 cujas propriedades e parâmetros da equação de estado são:  $\rho = 460,0$  kg/m<sup>3</sup>,  $c_p = 1010,0$  J/kgK,  $W_o = 0,425$  l/kg<sub>sorv</sub>,  $D = 5,02 \text{ E-}7$  e  $n = 2,15$ .



**Figura 5** – Condições operacionais.

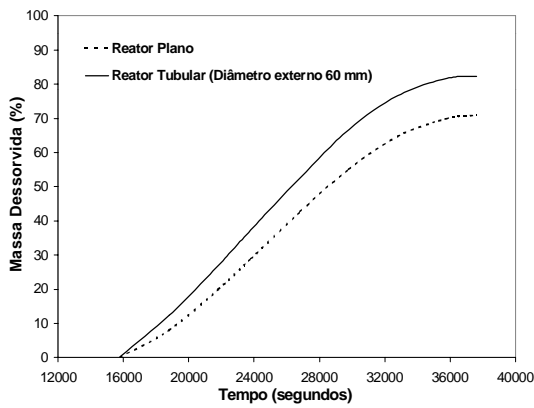
Para a análise comparativa adotou-se a quantidade de massa dessorvida, durante a fase de regeneração, como critério para avaliação do desempenho de cada sistema. Nas simulações, foram consideradas, então, para ambos os sistemas, as condições operacionais apresentadas na figura 5, a mesma temperatura do reator no início da regeneração, as mesmas temperaturas de condensação e evaporação, o mesmo coeficiente convectivo para o ambiente externo e o mesmo coeficiente global de perdas pela parte inferior do reator.

No dimensionamento do reator tubular foram consideradas duas situações. Inicialmente, a “meia célula” apresentada na figura 4 foi dimensionada de maneira a comportar a mesma quantidade, em massa, de sorvente seco contida na “meia célula” do reator plano (figura 3). No segundo caso, as dimensões foram definidas de forma que o reator tubular comportasse a mesma quantidade, em massa, de sorvente seco, contida no reator plano, por unidade de área de coleta. Definindo-se, então, o duto de escoamento com diâmetro de 16 mm (Gurgel & Kluppel, 1992, utilizaram um duto de escoamento de 15 mm) tem-se para o primeiro caso um tubo com diâmetro de 60 mm e, para o segundo caso um diâmetro externo de 70 mm. Em ambos os casos considera-se tubos com 1 m de comprimento e paredes de 1 mm de espessura.

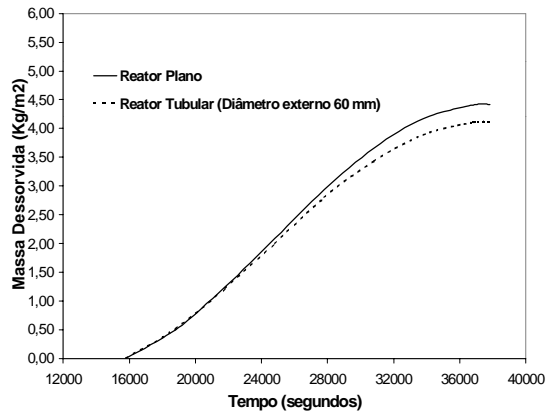
### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inúmeras simulações foram realizadas considerando diferentes temperaturas de condensação e evaporação. Os resultados mostraram que estas temperaturas afetam, significativamente, o desempenho dos sistemas – maiores quantidades de massa dessorvida são conseguidas quando o sistema opera com baixas temperaturas de condensação e altas temperaturas de evaporação. Os resultados apresentados a seguir foram obtidos para temperaturas de condensação e evaporação de 33°C e -10°C, respectivamente (valores

médios das temperaturas de condensação e evaporação utilizadas nas simulações), e podem ser considerados representativos de todos os demais resultados qualitativos encontrados.



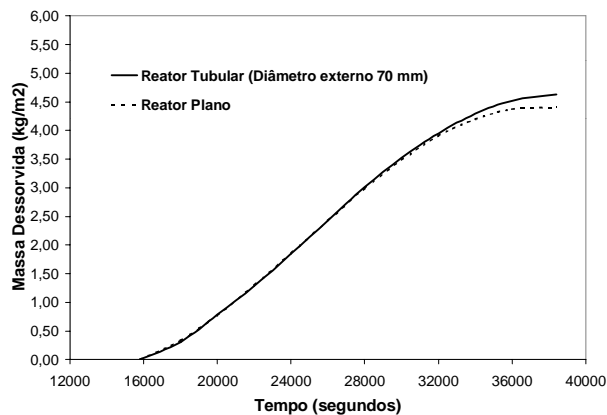
**Figura 6** – Massa dessorvida ao longo do tempo, em relação à massa inicial.



**Figura 7** – Massa dessorvida ao longo do tempo, por área de coleta.

Na figura 6 observa-se que a quantidade de massa dessorvida pelo reator tubular é significativamente superior à quantidade dessorvida pelo reator plano, quando analisados em termos da massa inicial. No reator tubular, entretanto, a quantidade de tubos, colocados lado a lado, necessária para preencher um metro quadrado de área é, aproximadamente, de 16 unidades. Esta mesma área comporta, aproximadamente, 20 “células” do reator plano. O melhor “fator de empacotamento” verificado para as células do reator plano, proporciona uma maior quantidade de massa dessorvida por metro quadrado de área de coleta (figura 7).

Conforme citado anteriormente, a utilização de tubos com 70 mm de diâmetro externo no reator tubular proporciona a mesma quantidade, em massa, de sorvente seco contida no reator plano por unidade de área de coleta. Desta forma, a massa inicial de adsorvato é a mesma para ambos os reatores. A quantidade de massa dessorvida pelos reatores, plano e tubular, ao longo do tempo, nesta condição, é mostrada na figura 8, onde se observa uma maior capacidade de dessorção por área de coleta para o reator tubular.



**Figura 8** – Massa dessorvida por área de coleta, ao longo do tempo.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise comparativa entre os reatores plano e tubular demonstrou que o reator tubular, nas condições estabelecidas para as simulações, possui uma capacidade de dessorção superior à verificada para o reator plano quando ambos comportam a mesma quantidade, em massa, de sorvente seco por unidade de área de coleta. A capacidade de dessorção do sistema com reator tubular foi, em média, 5% superior à do sistema com reator plano. Quando a quantidade de massa de sorvente seco contida no reator tubular é inferior à contida no reator plano, observa-se que uma maior quantidade de massa é dessorvida pelo reator plano, por unidade de área de coleta, e que o reator tubular dessorve maior quantidade em relação a massa inicial. Pode-se, então, concluir que a utilização de tubos de pequeno diâmetro externo na composição do reator tubular pode ser indicada para proporcionar boas quantidades de massa dessorvida em locais ou períodos de baixa insolação.

Neste trabalho, realizou-se apenas uma análise térmica dos reatores, não tendo sido considerado qualquer aspecto construtivo, como soldagem, montagem e custos envolvidos. Diante disto, para a proposição de sistemas reais, deve-se estabelecer uma análise criteriosa que contemple tanto o desempenho térmico do sistema, quanto os obstáculos à sua construção.

## 6. REFERÊNCIAS

- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991, "Solar Engineering of Thermal Processes", Wiley Interscience Publication.
- Grenier, P., Pons, M., 1983, "Experimental and Theoretical Results on the Use of an Activated - Carbon Intermittent Cycle for the Application to a Solar Powered Ice Maker", Proceedings of the ISES Conference Perth.
- Guillemot, J.J., Meunier, F., Pakleza, J., 1987, "Heat and Mass Transfer in a Non-Isothermal Fixed Bed Solid Adsorbent Reactor: a Uniform Pressure – Non-Uniform Temperature Case", Int. Journal Heat Mass Transfer, Vol. 30, No. 8, 1595-1606.
- Gurgel, J.M, Kluppel, R.P., 1992, "Simulação Numérica de um Sistema de Refrigeração por Adsorção", ENCIT-92.
- Leite, A.P.F., 1997, "Sistema Frigorífico à Adsorção Utilizando Carvão Ativado-Metanol com Regeneração por Energia Solar", COBEM-CIDIM/97, Baurú-SP.
- Leite, A.P.F., 1998, "Thermodynamic Analysis and Modeling of an Adsorption-Cycle System for Refrigeration from Low-Grade Energy Sources", J. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences, Vol. XX, No. 4, 518-531.
- Passos, E.F., 1986, "Etude des Couples Charbon Actif/Methanol et de leur Application a la Réfrigération Solaire", Tese de Doutorado No. 624, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Suisse.
- Passos, E.F., Escobedo, J.F., Meunier, F., 1989, "Simulation of an Intermittent Adsorptive Solar Cooling System", Solar Energy, Vol. 42, No. 2, 103-111.
- Patankar, S.V., 1991, "Computation of Conduction and Duct Flow Heat Transfer", Innovative Research Inc..

## ESTUDO E ANÁLISE DE REATORES FOTOCATALÍTICOS

**Geralda Gilvânia Cavalcante de Lima (\*)**

**Carlos Antônio Pereira de Lima (\*)**

**Fernando Fernandes Vieira (\*)**

**Zaqueu Ernesto da Silva (\*\*)**

**Carlos Antônio Cabral dos Santos (\*\*)**

(\*) Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Química, Caixa Postal 781, 58100-970, Campina Grande, PB, Brasil. E-mail: [gilvania@les.ufpb.br](mailto:gilvania@les.ufpb.br)

(\*\*) Universidade Federal da Paraíba, Laboratório de Energia Solar, CT/CPGEM-DTM, Caixa Postal 5115, 58051-970, João Pessoa, PB, Brasil

### **Resumo.**

Apesar do grande potencial de desinfecção e desintoxicação fotocatalítica solar de ar, água e esgotos, ainda é muito pequeno o uso desta tecnologia tanto comercialmente como industrialmente. Literaturas publicadas mostram que existem duas unidades em escala piloto para tratamento de efluentes uma nos EUA e outra na Espanha. Outras investigações de tratamento de esgotos reais industriais, embora não em escala de engenharia mostraram o potencial do processo solar onde os métodos de tratamento convencionais não tiveram sucesso.

Basicamente existem dois tipos de reatores: Concentrados que utilizam somente a radiação UV direta e os não concentrados que utilizam tanto a radiação difusa quanto direta e tem um potencial de baixo custo quando comparados com os concentrados.

O presente trabalho é uma revisão dos tipos e configurações de reatores existentes, bem como fontes de radiação e metodologia de construção. Finalmente são apresentadas recomendações para o desenvolvimento de novos projetos e implantação de sistemas fotocatalíticos.

**Palavras-chaves:** Fotocatálise, Fotoreatores, Degradação, Energia Solar

### **1 - INTRODUCAO:**

A fotocatalise tem sua origem na década de 70, quando pesquisas em células eletroquímicas começaram a ser desenvolvidas com os objetivos de produção de combustíveis fosseis a partir de materiais de baixo custo, visando a transformação da energia solar em química (Nogueira, 1995).

Em 1972 Fujishima e Honda relataram a decomposição fotocatalítica da água em eletrodos de  $\text{TiO}_2$  irradiado em uma célula eletroquímica gerando  $\text{H}_2$  e  $\text{O}_2$ . A partir desta época, muitas pesquisas foram dedicadas ao entendimento do processos fotocatalíticos envolvendo a oxidação da água e íons inorgânicos.

A destruição de compostos poluentes por fotocatalise é um assunto bastante discutido na literatura. A degradação fotocatalítica é conseguida com auxílio de um fotocatalisador, no caso um semicondutor ( $\text{TiO}_2$ ). Alguns semicondutores possuem a capacidade de transformar luz em outro tipo de energia, e neste caso a energia da luz absorvida pelo semicondutor resulta na promoção de um elétron a um nível de energia mais elevado produzindo radicais altamente reativos. Estes radicais são do tipo hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ) e podem oxidar e mineralizar compostos orgânicos. As moléculas orgânicas são decompostas e transformadas em água, dióxido de carbono e ácidos minerais. (Alberici, 1992)

A desintoxificação fotocatalítica tem muitas vantagens em relação aos processos convencionais de tratamento, pois evita o uso de outras substâncias químicas, como oxidantes e redutores. O catalisador pode ser reaproveitado do efluente tratado e a energia necessária ao processo pode ser fornecida por uma fonte limpa e inesgotável, como por exemplo o Sol.

## 2 – REATORES FOTOCATALITICOS

Nas últimas três décadas uma grande variedade de modelos e configurações de reatores fotoquímicos vem sendo estudados e desenvolvidos para aplicações específicas de destruição de poluentes. Estes reatores utilizam o fotocatalisador em suspensão (**slurry**) ou imobilizado em algum suporte, podem operar continuamente ou em batelada, em série ou paralelo, além do que estes sistemas podem ser aplicados tanto a sistema em fase líquida ou gasosa.

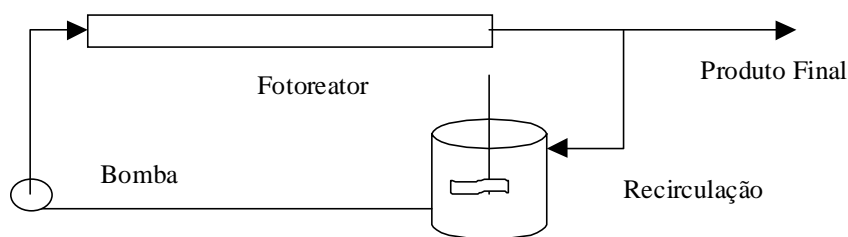
### 2.1 – Modo operacional

No caso do fotocatalisador em suspensão, o mesmo é misturado com o efluente, no entanto no final do processo as partículas devem ser separadas da solução através de filtração, ou centrifugação o que representa uma etapa adicional ao processo. Este problema não acontece quando utiliza-se o fotocatalisador imobilizado, este é impregnado sobre as paredes do reator (Matthews, 1987) ou em outra matriz, sendo do conhecimento, bolas de vidro (Serpone et al, 1986), areia (Matthews et al, 1992), fibras de vidro (Goswami, et al, 1997).

A oxidação fotocatalítica pode ser operada através dos seguintes modos:

1) Batelada: Neste modo, o efluente é armazenado no tanque e continuamente recirculado para o reator até que a destruição desejada seja alcançada. Operação deste modo requer um ou mais tanques de estocagem. Se o grau de destruição da água contaminada não for alcançado em um dia (operação solar), o sistema é operado no dia seguinte até o grau de destruição ser obtido. Alternativamente pode-se tratar o efluente no próprio tanque aberto a radiação.

2) Única passagem modo contínuo: Neste tipo a área do reator e a velocidade de fluxo são projetadas tais que a destruição desejada seja alcançada numa simples passagem. A velocidade de fluxo neste caso é normalmente baixa. A insolação solar varia durante o dia e portanto, a velocidade de fluxo contínuo deve ser ajustada de acordo com a variação da incidência de radiação solar. Em períodos de alta incidência solar (p.ex: próximo ao meio dia) o fluxo deverá ser aumentado para manter a concentração final desejada.



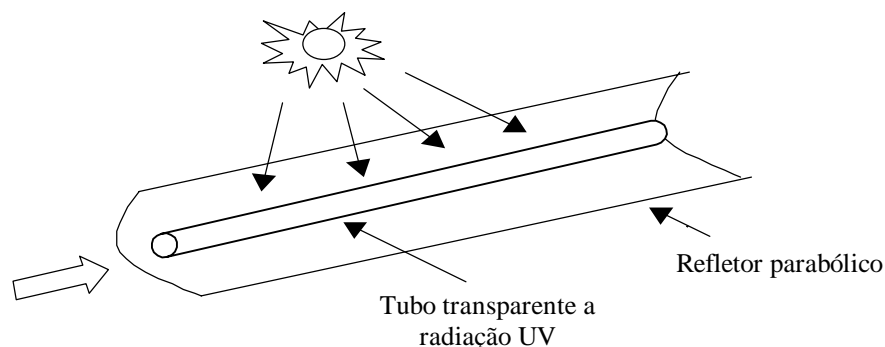
**Figura 1.** Esquema simplificado do sistema de tratamento fotocatalítico

## 2.2 – Configurações

Nos últimos anos muitos reatores fotocatalíticos foram desenvolvidos e testados. Eles se dividem em duas grandes classes principais quanto a absorção de luz: os concentrados que utilizam somente a radiação direta e os não concentrados que utilizam tanto a radiação direta como a difusa

### 2.2.1 - Reator de Calha Parabólica ( Parabolic Trough Reactor-PTR)

O Reator Concentrado de Calha Parabólica (Fig. 2), concentra os raios diretos da parte UV do espectro solar e pode ser caracterizado como um reator de fluxo de interno. Na faixa de comprimento de onda 300-400 nm ocorre a excitação do  $\text{TiO}_2$ . A intensidade de radiação direta e difusa que alcançam a superfície da terra neste comprimento de onda são quase iguais, isto significa dizer que o sistema concentrado só emprega metade da radiação disponível na região espectral especificada. Este tipo de reator foi construído e usado com bastante sucesso para desintoxicação solar nos USA em Albuquerque ( Laboratório Nacional da Sandia ) e na Califórnia ( Laboratório Livermore Lawrence) (Pacheco et al, 1993) e na Espanha em Almería ( Plataforma Solar de Almería, PSA) (Curcó et al, 1996).

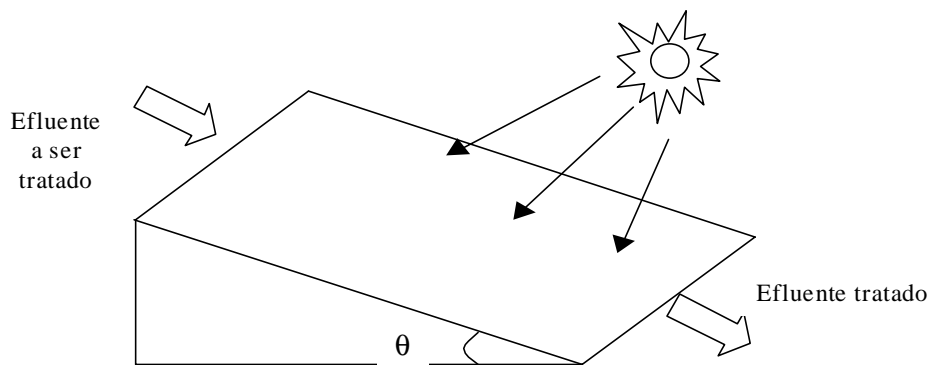


**Figura 2.** Reator de calha parabólica

### 2.2.2 - Reator de leito fixo de filme fino - (Thin-Film-Fixed-Bed-Reactor TFFBR)

A etapa de filtração para separação do fotocatalisador após a fotodegradação da solução de poluentes pode ser uma etapa difícil, considerando que o fotocatalisador é geralmente um pó bastante fino. A imobilização do fotocatalisador em um suporte estacionário apresenta-se como uma solução para este problema, onde a etapa de filtração é suprimida, simplificando o processo. O reator de leito fixo de filme fino (Fig. 3) é do tipo não concentrado, formado por uma placa impregnada com o fotocatalisador. Este tipo de configuração apresenta varias vantagens como: alta eficiência ótica, transferencia efetiva de

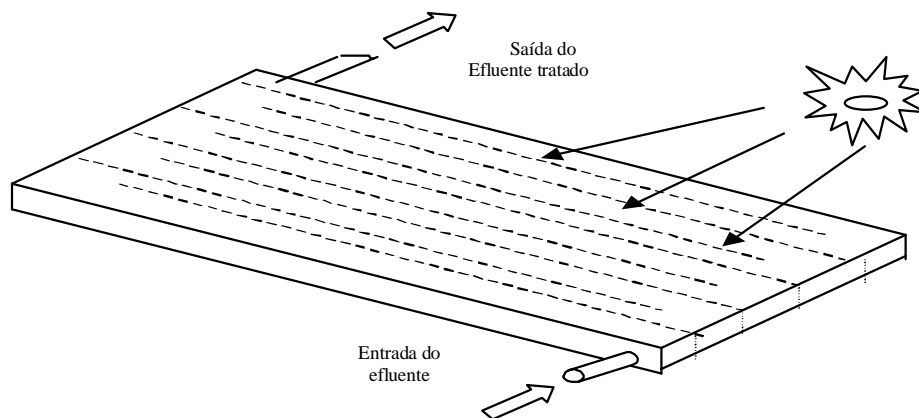
oxigênio dentro do filme líquido, não existe separação do fotocatalisador da água purificada, é de simples construção e apresenta baixo custo de investimento (Van Well et al 1997)



**Figura 3.** Reator filme fino fixo

### 2.2.3 - Reator de Dupla Chapa – (Double Skin Sheet Reator – DSSR)

Um novo tipo de reator não concentrado é o reator de dupla folha (fig. 4). Ele consiste de uma caixa estruturada transparente a radiação UV, na qual o catalisador juntamente com o efluente, formando uma suspensão circula através de bombeamento. Este tipo de reator emprega ambas as porções de radiação solar direta e difusa, mas após o processo de degradação o fotocatalisador precisa ser removido do líquido.

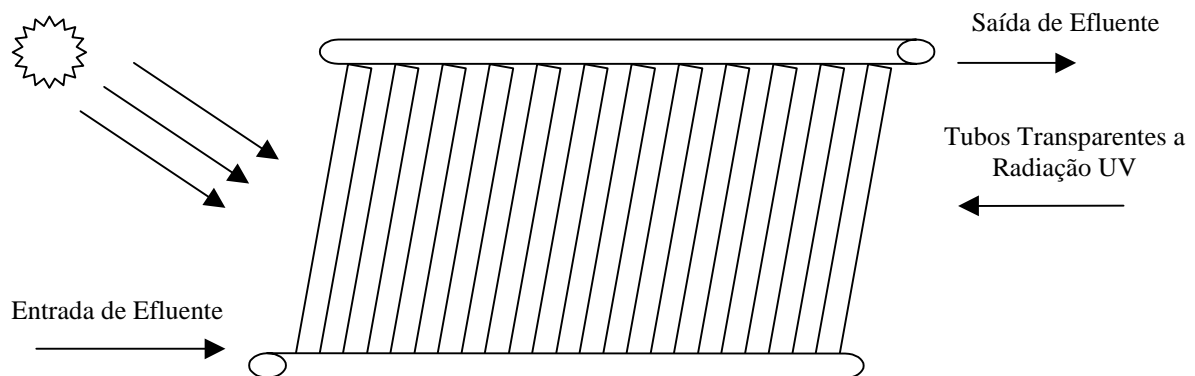


**Figura 4.** Reator de Dupla Chapa

### 2.2.4 - Reator de Fluxo Tubular - (Tubular Flow Reactor -TFR)

Outro tipo de reator não concentrado é o Reator de Fluxo Tubular (fig. 5), este reator consiste de tubos paralelos transparentes a radiação UV, conectados a cabeçotes por onde entra o efluente a ser tratado. No projeto deste tipo de reator, um fator importante deve ser levado em conta que é a relação entre o diâmetro do cabeçote e o diâmetro do tubo transparente para evitar recirculação do efluente dentro do reator, o que aumentaria

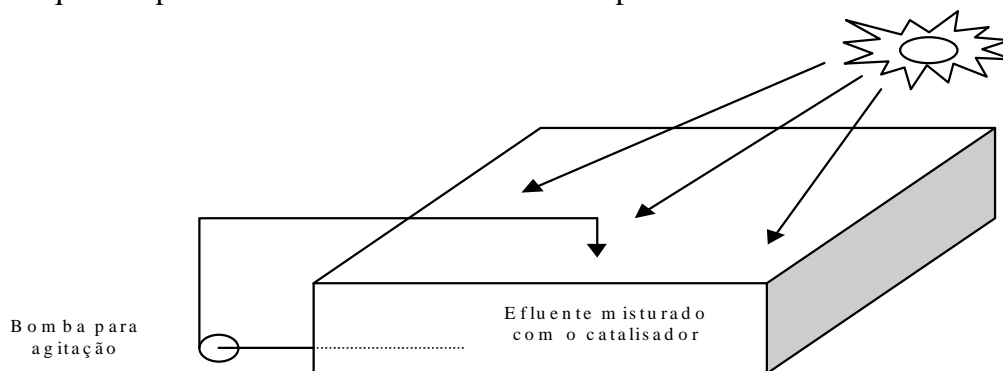
consideravelmente o tempo de exposição do efluente. O modo mais indicado de operação é o modo **slurry**.



**Figura 5.** Reator de Fluxo Tubular

### 2.2.5 - Reator Tanque (Shallow Pond Reactor - SPR)

Este tipo de reator não concentrado (fig. 6) consiste de um tanque aberto, onde o esgoto é misturado ao catalisador. Neste tipo de configuração o ar é borbulhado continuamente na água para promover a aeração e mistura. Esta configuração por ser de construção barata é indicado para indústrias, principalmente as que produzem milhões de m<sup>3</sup> de esgoto por dia e já tem uma grande lagoa que são usadas para tratamento biológico da água. Portanto, um processo de pré ou pós tratamento pode ser empregado fazendo uso da radiação solar UV e contendo lagoas para oxidação fotocatalítica de muitos compostos orgânicos que não podem ser consumidos diretamente pelas bactérias.



**Figura 6.** Reator Tanque

## 2.3 – Fontes de Iluminação

A energia necessária para ativar o fotocatalisador (TiO<sub>2</sub>) é superior a 3,2 e.V, isto corresponde a radiação ultravioleta, cujo comprimento de onda é menor do que 388 nm. Basicamente qualquer fonte de luz que emita radiação neste comprimento de onda pode ser usada para promoção das reações fotocatalíticas.

Um grande numero de pesquisas tem sido desenvolvidas com o uso de luz artificial, que podem ser classificadas de três formas: Tipo irradiação interna – onde a(s) lâmpada(s) são imersa(s) dentro do fotoreator (Tinucci et al 1993; Bahnemann et al 1993; Li & Zhang, 1996). Tipo irradiação externa – onde as lâmpadas são colocadas fora do fotoreator (Anheden

et al 1996; Preis et al 1997). Tipo irradiação distribuída – onde a luz é distribuída da fonte para o reator através de defletores e outros meios (Reeves et al, 1992).

A geração artificial de fótons necessária para desintoxificação de efluentes é a mais importante fonte de custos durante a operação fotocatalítica. Com um fluxo UV próximo à superfície da terra de 20 a 30 W/m<sup>2</sup>, o Sol dispõe de 0,2 a 0,3 mol de fótons/m<sup>2</sup>.h em 300 a 400 nm disponível para o processo (Welll et al, 1997). Isto sugere usar o Sol como uma sensível fonte de luz, econômica e ecológica. Um dos primeiros grupos a utilizarem a componente UV do espectro solar para a promoção de reações fotocatalíticas foi Ahmed & Ollis (1984), vários estudos desenvolvidos por (Matthews & McEvoy, 1992; Goswami et al 1993, Giménez et al, 1997) mostraram que é possível utilizar a luz solar como fonte de radiação ultravioleta, para o processo de fotodegradação tendo em vista que de 4 a 6% da radiação solar que atinge a terra, possui este comprimento de onda. Devido a estes fatores, a utilização da radiação ultravioleta (UV) do espectro solar para dirigir a oxidação fotocatalítica ganhou popularidade nos últimos anos

### 3 – DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS

Ao contrario do que possa parecer, o procedimento para projetar um sistema de desintoxificação fotocatalítico solar é bastante complexo, pois muitas variáveis interferem diretamente no processo como: seleção do reator, configuração (série ou paralelo), modo operacional (slurry ou matriz fixa), intensidade de radiação, carga de catalisador, velocidade de fluxo, controle de pH.

Basicamente o projeto de um sistema de desintoxificação solar segue os seguintes passos:

1 - Determinação experimental em laboratório do valor de  $k_0$  que é a constante de velocidade de reação ( $s^{-1}$ ) para cada um dos componentes presentes no efluente. Utiliza-se no projeto o menor valor encontrado.

2 - Correção do valor da constante de velocidade de reação, uma vez que a intensidade de radiação UV não é constante durante o dia e não pode ser controlada. Goswami (1995) mostra que a constante de velocidade deve ser corrigida para os vários tipos de configurações através de correlações apropriadas,

$$\frac{k}{k_0} = a \cdot \left[ \frac{I}{I_0} \right]^x, \quad (1)$$

a eq.1 vale para reatores concentrados do tipo PTR, e não concentrados TFR e DSSR, onde 'a' é uma constante dada pela razão entre a área exposta a radiação (m<sup>2</sup>) e o volume do reator (m<sup>3</sup>) e 'x' é um expoente de intensidade de radiação corrigido,  $k$  é a constante de velocidade ( $s^{-1}$ ) corrigida,  $I$  é a intensidade de radiação local (W/m<sup>2</sup>) e  $I_0$  a intensidade de radiação experimental (W/m<sup>2</sup>).

$$\frac{k}{k_0} = a \left( \frac{I}{I_0} \right) \left( \frac{\delta}{\delta_0} \right), \quad (2)$$

a eq. 2 acima é valida para reatores não concentrados do tipo TFFBR, onde  $\delta$  representa a espessura do filme (mm),

$$\frac{k}{k_0} = m \left[ \frac{I(A/V)}{I_0(A/V)_0} \right]^n \quad (3)$$

a eq. 3 é válida para reatores do tipo SPR, onde  $m$  e  $n$  são determinados experimentalmente.

3 - O próximo passo é determinar o tempo de residência necessário para exposição, este parâmetro é bastante influenciado pela ordem da cinética a considerando como modelo de primeira ordem temos

$$t = \frac{\ln\left(\frac{C_i}{C_f}\right)}{k} \quad (4)$$

onde:  $C_f$  é a concentração final do contaminante (mg/l),  $C_i$  é a concentração inicial (mg/l).

4 - Com base em todas estas informações, deve-se calcular a área de exposição necessária para que se alcance um determinado nível de degradação estabelecido no início do projeto

#### 4 – CONCLUSÕES

O uso da desinfecção e desintoxicação fotocatalítico solar é um método muito promissor para o tratamento de efluentes industriais e domésticos, principalmente pelo Sol ser uma fonte de energia barata e ecologicamente correta. A implantação de processos fotocatalíticos de efluentes em escala industrial ainda é um grande problema, visto que a engenharia do processo ainda encontra-se pouco explorada. O desenvolvimento e validação de modelos matemáticos que permitam simular fotoreatores, será uma importante contribuição no projeto destas unidades no grande desafio a ser vencido que é a mudança de escala de laboratório para a escala industrial.

A viabilidade econômica para implantação de um sistema fotocatalítico solar esta relacionado diretamente ao rigor da legislação ambiental vigente.

#### 8 - BIBLIOGRAFIA

- Ahmed, S., and Ollis, D. F., 1984, " Solar Photoassisted Catalytic Decom Positive of the Chlorinated Hydrocarbons Trichloroethylene and Trichloromethane," Solar Energy, Vol. 32, No. 5 , pp. 597-601.
- Alberici, R. M., 1992, " Fotodegradação de Fenol e Fenóis Clorados Catalizada por Dióxido de Titânio" Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, 91p.
- Anheden, M., Goswami, D. Y., and Svedberg, G., 1996, " Photocatalytic Treatment of Wastewater From 5-Fluorouracil Manufacturing," Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 118, pp. 2 -8.
- Bahnemann, D. W., Bockelmann, D., Goslich, R., Hilgendorff, M., and Weichgrebe, D., 1993, " Photocatalytic Detoxification: Novel Catalysts, Mechanisms and Solar Applications," In: Photocatalytic Purification and Treatment of Water and Air. Ollis, D. F. and Al-Ekabi, H. (eds), Elsevier, Amsterdam, pp. 301 - 319.



- Curcó, D., Malato, S., Blanco, J., and Giménez, J., 1996, "Photocatalysis and Radiation Absorption in a Solar Plant," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 44, pp. 199-217
- Fujishima, A., Honda, K., 1972, "Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode", *Nature*, Vol. 238, pp. 37-38.
- Giménez, J., Curcó, D., and Marco, P., 1997, "Reactor Modeling In the Photocatalytic Oxidation of Wastewater," *Water Science and Technology*, Vol. 35, No. 4, pp. 207-213.
- Goswami, D. Y., 1995, "Engineering o Solar Photocatalytic Detoxification and Disinfection Processes," *Advances in Solar Energy*, K. W. Boër, Ed., Vol. 10, American Solar Energy Society, Boulder, CO, pp. 165-209.
- Goswami, D. Y., Klausner, J., Mathur, D. G., Martin, A., Schanze, K., Wyness, P., Turchi, C., and Marchand, E., 1993, " Solar photocatalytic Treatment of Groundwater at Tyndall AFB: Field Test Results," proceedings of the 1993 Annual Conference American solar Energy Society, washington, D.C. April, pp. 235-239.
- Goswami, D. Y., Trivedí, D. M., and Block, S. S., 1997, "Photocatalytic Desinfection of Indoor Air," *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 119, pp. 92 -96.
- Li, X. Z., and Zhang, M., 1996, " Decolorization and Biodegradability of Dyeing Wastewater Treated by a TiO<sub>2</sub>-Sensitized Photo-oxidation Process," *Water Science and Technology*, Vol. 34, No. 9, pp. 49-55.
- Matthews, R. W., 1987, " Solar-electric water purification using photocatalytic oxidation with TiO<sub>2</sub> as a stationary phase," *Solar Energy*, Vol. 39, pp. 405-413.
- Matthews, R. W., and McEvoy, S. R., 1992, " Destruction of Phenol in Water with Sun, Sand and Photocatalysis," *Solar Energy*, Vol. 49, No. 6, pp. 507 - 513.
- Nogueira, R. F. P., 1995, " Fotodestruição de compostos Potencialmente Tóxicos Utilizando TiO<sub>2</sub> e Luz Solar, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, campinas, São Paulo, Brasil, 87p.
- Pacheco, J. E., Mehos, M., Turchi, C., and Link, H., 1993, "Operation of a Solar Photocatalytic Water Treatment System at a Superfund Site," In: *Photocatalytic Purification and Treatment of Water and Air*. Ollis, D. F. and Al-Ekabi, H. (eds), Elsevier, Amsterdam, pp. 547-556.
- Preis, S., Krichevskaya, M., and Kharchenko, A., 1997, "Photocatalytic Oxidation of Aromatic Aminocompounds in Aqueous Solutions and Groundwater From Abandoned Military Bases," *Water Science and Technology*, Vol. 35, No. 4, pp. 265-272.
- Reeves, R., Ohlhausen, R., Sloan, D., Pamplin, K., Scoggins, T., Clark, C., Hutchinson, B., and Green, D., 1992, " Photocatalytic Destruction of Organic Dyes in Aqueous TiO<sub>2</sub> Suspensions Using Concentrated Simulated and Natural Solar Energy," *Solar Energy*, Vol. 48, No. 6, pp. 413-420.
- Serpone, N., Borgarello, E., Harris, R., Cahill, P., and Bargarello, M., 1986, " Photocatalysis over TiO<sub>2</sub> supported on a glass substrate," *Solar Energy Materials*, Vol. 14, pp. 121-127.
- Tinucci, L., Borgarello, C, Minero, C., and Pelizzetti, E., 1993, " Treatment of Industrial Wastewaters by Photocatalytic Oxidation on TiO<sub>2</sub>," In: *Photocatalytic Purification and Treatment of Water and Air*. Ollis, D. F. and Al-Ekabi, H. (eds), Elsevier, Amsterdam, pp. 585-594.
- Van Well, M., Dillert, R. H. G., Bahnemann, D. W., Benz, V. W., and Mueller, M. A., 1997, " A Novel Nonconcentrating Reactor for Solar Water Detoxification," *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 116, pp. 2 - 7.

# $H_2$ CONTROL FOR VARIABLE-SPEED STALL-REGULATED WIND TURBINE

**Ronilson Rocha**  
**Peterson Resende**  
**José L. Silvino**

Federal University of Minas Gerais - CPDEE  
Cx. P. 209 - 30161-970 - Belo Horizonte, MG, Brasil

**Marcos V. Bortolus**  
Federal University of Minas Gerais - DEMEC  
Cx. P. 209 - 30161-970 - Belo Horizonte, MG, Brasil

## **Abstract**

This paper presents an  $H_2$  control application for a variable speed stall regulated wind turbine drive system. The main purpose is to increase energy conversion efficiency and to reduce mechanical stress of the wind turbine. The control system performance is analyzed for MOD-2 wind turbine system.

**Keywords:** Wind Energy, Modeling,  $H_2$  Control.

## **1. INTRODUCTION**

The simplest configuration of a wind energy conversion system uses a stall-regulated wind turbine, where the power is naturally limited by aerodynamic efficiency decreasing due to stall effect (Novak et al., 1995). The turbine speed may be maintained constant when the generator is directly connected to the fixed-frequency utility grid, but, in this case, it is not possible to control the amount of power delivery by turbine to the generator. However, efficiency, mechanical stress and noise questions are better solved through variable speed operation. In this case, the generator is associated with power electronic converters, allowing power regulation by speed turbine adjustment (Novak et al., 1995).

Since wind system characteristics are highly dependent of wind speed, the quality of its control depends upon the stochastic properties of the controller. In this case, where disturbance rejection and noise suppression are important, the  $H_2$  philosophy is particularly appropriate to controller design, offering robustness both to disturbances and system uncertainties (Grimble, 1994; Rocha et al., 1999).

In this paper, a linearized mathematical model of stall-regulated wind turbine is proposed and used to design an  $H_2$  controller. A control strategy is proposed to increase the wind energy extract for variable speed operation. The control purposes are to attenuate torsional modes and to avoid fortuitous instabilities caused from wind turbulence and phenomena just as wind shear and aerodynamic stall. The proposed control scheme is analyzed through of simulation of MOD-2 wind turbine-generator system.

## 2. WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM MODEL

The basic wind turbine drive system is composed by a wind turbine coupled at an electrical generator, directly or through gearbox, which can be adequately represented by approximated 2-mass model shown in Fig. 1. Supposing gearbox as ideal, this mechanical system can be described by:

$$J_t \dot{\omega}_t + D_t \omega_t = Q_a - Q_m - D_{hg} (\omega_t - \omega_g) \quad (1)$$

$$J_g \dot{\omega}_g + D_g \omega_g = D_{hg} (\omega_t - \omega_g) + Q_m - Q_g \quad (2)$$

$$Q_m = K_{hg} \int (\omega_t - \omega_g) dt \quad (3)$$

where  $\omega_t$ = turbine speed,  $\omega_g$ = generator speed,  $J_t$ = turbine inertia,  $J_g$ = generator inertia,  $D_t$ = turbine damping,  $D_g$ = generator damping,  $D_{hg}$ = shaft damping,  $K_{hg}$ = shaft stiffness,  $Q_a$ = aerodynamic torque,  $Q_g$ = generator torque and  $Q_m$ = shaft torque.

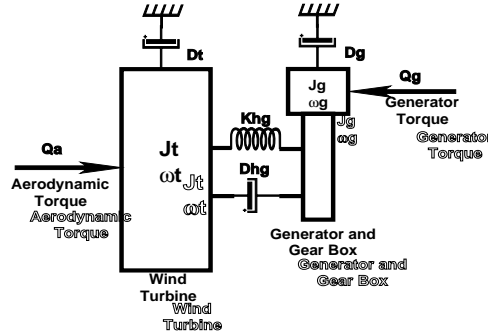


Figure 1: Wind turbine drive system model

The aerodynamic torque  $Q_a$  is better evaluated using dimensionless power coefficient  $C_p$  and torque coefficient  $C_q$ , which define the turbine ability to convert kinetic energy of moving air to mechanical power or torque (Novak et al., 1995):

$$Q_a = \frac{1}{2} \rho S R \frac{C_p}{\lambda} V^2 = \frac{1}{2} \rho S R C_q V^2 \quad (4)$$

where  $\rho$ = air density,  $S$ = rotor area,  $R$ = turbine radius,  $V$ = wind speed and  $\lambda$  is a parameter known as tip-speed ratio, defined as:

$$\lambda = \frac{R \omega_t}{V} \quad (5)$$

Both coefficients  $C_p$  e  $C_q$  are nonlinear functions of tip-speed ratio  $\lambda$  as shown in Fig. 2. It is possible to identify two distinct regions in turbine operation. The region “A” is stable and characterized by a negative slope, corresponding to normal region of turbine operation. The region “B” corresponds to aerodynamic stall, where aerodynamic torque

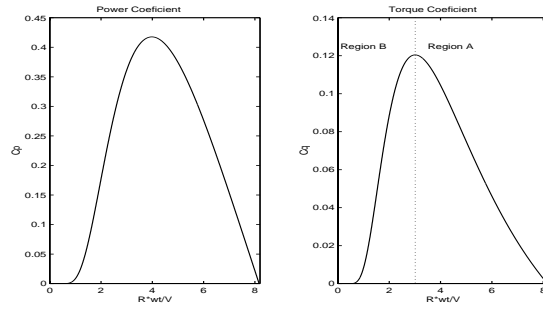


Figure 2:  $C_p(\lambda)$  and  $C_q(\lambda)$  of MOD-2 wind turbine

drops suddenly. This region is unstable and characterized by a positive slope. For control design, a linearized aerodynamic torque in region “A” can be used in modelling without degeneration of results (Novak et al., 1995; Rocha et al., 1999). The time derivative of aerodynamic torque  $Q_a$  for maximum  $C_p$  is:

$$\dot{Q}_a = \alpha \dot{V} + \gamma \dot{\omega}_t \quad (6)$$

where  $\alpha$  and  $\gamma$  can be easily calculated from wind turbine data by:

$$\alpha = \left. \frac{\delta Q_a}{\delta V} \right|_{opt} = \frac{1}{2} \rho A R C_{pmax} \left( 2 \frac{V}{\lambda_{opt}} - 1 \right) \quad (7)$$

$$\gamma = \left. \frac{\delta Q_a}{\delta \omega_t} \right|_{opt} = -\frac{1}{2} \rho A R^3 \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^2} \quad (8)$$

The electrical generator is the link between mechanical energy and electricity. It can be connected to electrical load directly or through electronic devices used to process the generated electrical energy. In last case, the generator torque is virtually independent of system dynamics (Novak et al., 1995), and its adjustment provides a way to regulate turbine speed and system efficiency, consisting in only manner to control a stall-regulated wind turbine. From equations (1), (2), (3) and (6), a linearized state model for stall-regulated wind turbine can be given by:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u + \boldsymbol{\xi} \quad (9)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{c}\mathbf{x} + \eta \quad (10)$$

where  $\mathbf{x}^T = [ Q_a \ \omega_t \ \omega_g \ Q_m ]$ ,  $\mathbf{u} = Q_g$  and  $\boldsymbol{\xi}^T = [ \alpha \dot{V} \ 0 \ 0 \ 0 ]$ . The vector  $\boldsymbol{\xi}$  is the disturbance on aerodynamic torque due to wind speed fluctuation  $\dot{V}$ , which can be assumed as white noise with zero mean in steady state (Wasynczuk et al., 1981). The measurement noise is represented by  $\eta$  and matrices  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{b}$  and  $\mathbf{c}$  are given by:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \gamma \frac{1}{J_t} & -\gamma \frac{D_t + D_{hg}}{J_t} & \gamma \frac{D_{hg}}{J_t} & -\gamma \frac{1}{J_t} \\ \frac{1}{J_t} & -\frac{D_t + D_{hg}}{J_t} & \frac{D_{hg}}{J_t} & -\frac{1}{J_t} \\ 0 & \frac{D_{hg}}{J_g} & -\frac{D_{hg} + D_g}{J_g} & \frac{1}{J_g} \\ 0 & K_{hg} & -K_{hg} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{J_g} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c} = [ 0 \ 0 \ 1 \ 0 ]$$

### 3. $H_2$ TECHNIQUE

A feedback control design consists essentially in to find a controller  $K$  which assures stability, performance and robustness requirements, minimizing sensitivity  $S$  and complementary sensitivity  $T$  functions. However, it is not possible to minimize simultaneously

$S$  and  $T$ , since that (Safonov et al., 1981):

$$S(s) + T(s) = I \quad (11)$$

Then, a compromise must be established between stability, performance and robustness requirements, favoring sensitivity  $S$  or complementary sensitivity  $T$  in accordance with relative importance of disturbance/reference and uncertainties power at each frequency (Safonov et al., 1981; Stein & Athans, 1987).

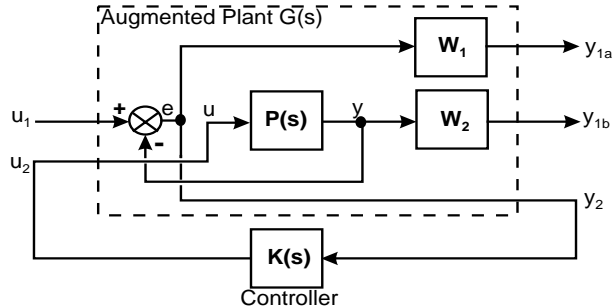


Figure 3: Plant Augmentation

This control problem can be formalized as  $H_2$  optimization problem to find a controller  $K$  which stabilizes internally the augmented system of figure 3, given by:

$$P(s) = \left[ \begin{array}{c|cc} A & B_1 & B_2 \\ \hline C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{array} \right] \quad (12)$$

so that  $H_2$  norm of transfer matrix between outlet and noise is minimized. This optimization problem is equivalent to conventional problem LQG (Grimble, 1994; Stein & Athans, 1987), involving a cost function:

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left\{ \int_0^T \begin{bmatrix} x^T & u_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1^T \\ D_{12}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 & D_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^T \\ u_2^T \end{bmatrix} \right\} \quad (13)$$

with correlated white plant noise  $\xi$  and white measurement  $\eta$  entering the system via the channel  $\begin{bmatrix} B_1 & D_{21} \end{bmatrix}$  associated with correlation function:

$$E \left\{ \begin{bmatrix} \xi(t) \\ \eta(\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi^T(t) & \eta^T(\tau) \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} B_1 B_1^T & B_1 D_{12}^T \\ D_{12} B_1^T & D_{12} D_{12}^T \end{bmatrix}^T \delta(t - \tau) \quad (14)$$

In this way, The  $H_2$  optimal controller  $K$  is realizable through of resolution of two Riccatti equations to find a full-state feedback  $K_c$  and a Kalman filter with residual gain matrix  $K_f$ .

#### 4. CONTROL DESIGN

The turbine speed is the most important variable on wind turbine control, mainly for stall-regulated wind turbines. To obtain the maximum efficiency on energy conversion in subnominal speed range, the wind system must operate at constant tip-speed ratio  $\lambda$  to maintain the maximum  $C_p$ . The block diagram of proposed control strategy is shown in Fig. 4.

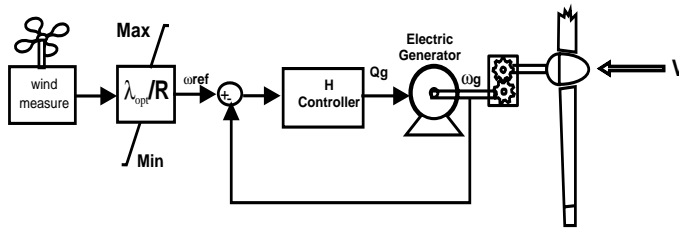


Figure 4: Control block diagram

Due to direct dependence of speed reference with wind speed in this control strategy, sudden variations of wind speed can excite torsional modes, inducing unacceptable mechanical stress in wind turbine. Thus, the design control specification must assure a good attenuation for torsional modes, as well to harmonic frequencies introduced by wind fluctuation and other aerodynamic force sources as wind shear and stall effect. It is necessary to avoid the operation in stall region to assure better performance of wind energy conversion system.

The aerodynamic behavior of the wind turbine is nonlinear, dependent on wind speed and may change over time due to contamination of blade surfaces. Because of complexity of the interaction of the rotor with wind-field, it is not possible to quantify the uncertainty in the aerodynamic models. However, according to (Leith & Leithead, 1997), practical experience indicates that 10 dB is an appropriate gain margin and roughly 60 degrees the appropriate phase margin. The close loop poles have to be placed as far away as possible from frequencies of large amounts of fluctuation energy in the wind and other sources of force to avoid instabilities in system operation.

## 5. SIMULATION RESULTS

The performance of the proposed  $H_2$  controller was simulated using the MOD-2 wind turbine-generator system complete model given by (Wasynczuk et al., 1981), which data are shown in table 1. The weighting functions  $W_1(s)$  and  $W_2(s)$  are selected as:

$$W_1(s) = 40 \frac{s + 1.1}{(s + \epsilon)(1.1s + 1)} \quad (15)$$

$$W_2(s) = \frac{(s + 2.5)^2}{s + 1500} \quad (16)$$

Table 1: MOD-2 system data referred to a 2.5 MVA base and 1.84 rad/sec

$J_t$	$D_t$	$J_g$	$D_g$	$K_{hg}$	$D_{hg}$
37,413	$2,024 \times 10^{-2}$	2,091	$3,01 \times 10^{-2}$	28,4	1,831

The integral action is incorporated in weighting  $W_1(s)$  with the inclusion of term  $1/(s + \epsilon)$ , where  $\epsilon$  is a very small variable, aiming to achieve a zero steady-state error and disturbance reduction. The Bode diagrams for close-loop system shows cross-over frequency around 20 rad/s, gain margin about 10 dB and phase margin as 61 degrees, which assures the robustness design specifications. The dynamic behavior of this controlled MOD-2 system when submitted at wind fluctuation and a step on wind speed are

shown respectively in Figs. 5 and 6. In both simulations, the aerodynamic torque  $Q_a$  is corrupted with ripple torque due to aerodynamic forces sources just as wind shear, tower shadow, stall phenomenon, etc.

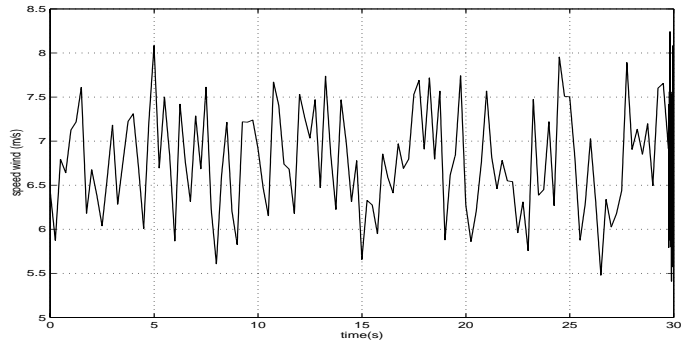
The generator speed control was relatively accurate as shown in figures 5.b and 6.b. Since speed reference is directly dependent of wind speed, a noise is added to the system due to wind fluctuation that reduces the system lifetime. Thus, it is necessary to filter the speed reference signal, although sometimes this function is performed by anemometer inertia. From figures 5.c and 6.c, it is noted that electrical torque  $Q_g$  tend to oppose the aerodynamic torque  $Q_a$ , providing a fast speed adjustment and better ripples attenuation. The system operates around optimal tip-speed ratio as shown in 5.d and 6.d, assuring good efficiency for wind energy conversion system.

## 6. CONCLUSION

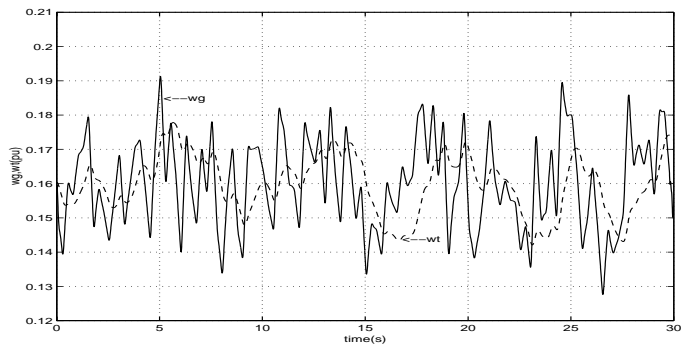
A simplified wind system model is proposed and considerations for energy conversion efficiency maximization and mechanical stress reduction are presented. A speed controller for the wind system is designed using  $H_2$  technique to assure control requirements. The control system performance is verified through of simulation of MOD-2 wind turbine-generator system. The simulation results show good  $H_2$  performance, since the wind energy conversion system operated near optimal tip-speed ratio even with wind speed disturbances with a good ripple torque attenuation.

## 7. REFERENCES

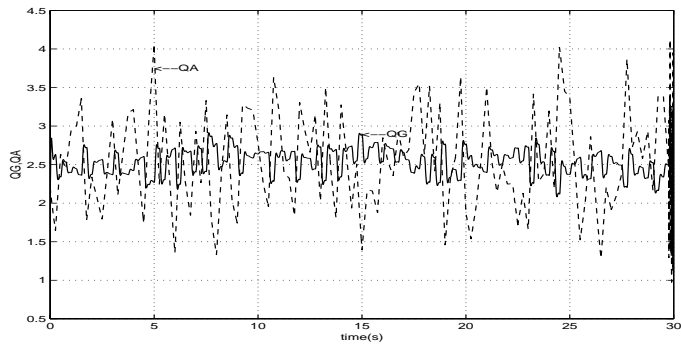
- Grimble, M. J., 1994, Robust industrial control - Optimal design approach for polynomial system, Prentice Hall International, New York, USA.
- Leith, D. J., & Leithead, W., 1997, Implementation of wind turbine controllers, Technical Report, Department of Electronic & Electrical Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, UK.
- Novak, P., Ekelund, T., Jovik, I. & Schmidtbauer, B., 1995, Modeling and control of variable-speed wind-turbine drive-system dynamics, IEEE Control Systems, vol. 15, n. 4, pp. 28-38.
- Rocha, R., Resende, P., Silvino, J. L. & Bortolus, M. V., 1999, Modeling and LQG/LTR discrete control of a wind energy conversion system, 15th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Águas de Lindóia, Brazil.
- Safonov, M. G., Laub, A. J. & Hartmann, G. L., 1981, Feedback properties of multi-variable systems: the role and use of the return difference matrix, IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 26, n. 1, pp. 47-65.
- Stein, G. & Athans, M., 1987, The LQG/LTR procedure for multivariable feedback control design, IEEE trans. on Automatic Control, vol 32, n. 2, pp. 105-114.
- Wasynczuk, O., Man, D. T. & Sullivan, J. P., 1981, Dynamic behaviour od a class of wind turbine generators during random wind fluctuations, IEEE trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 100, n. 6, pp 2837-2845.



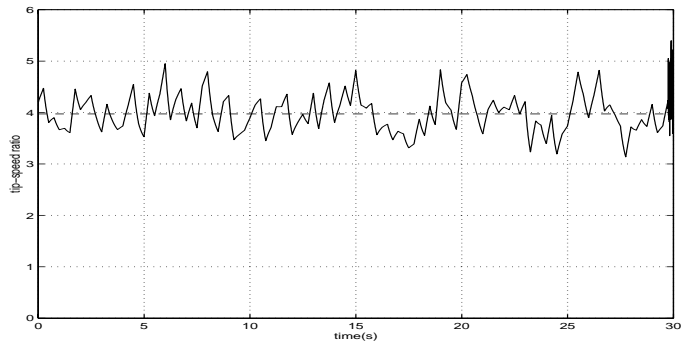
(a) Wind speed



(b) Generator and wind turbine speeds



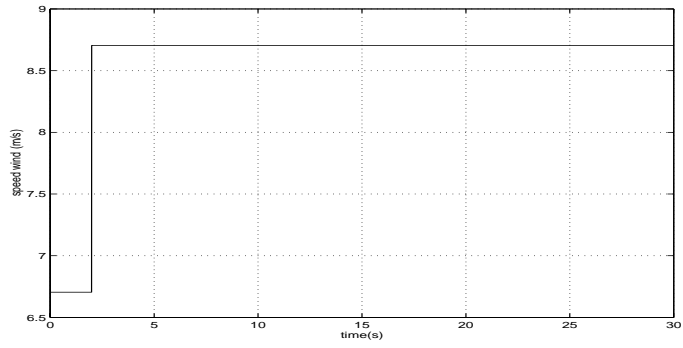
(c) Aerodynamic and generator torques



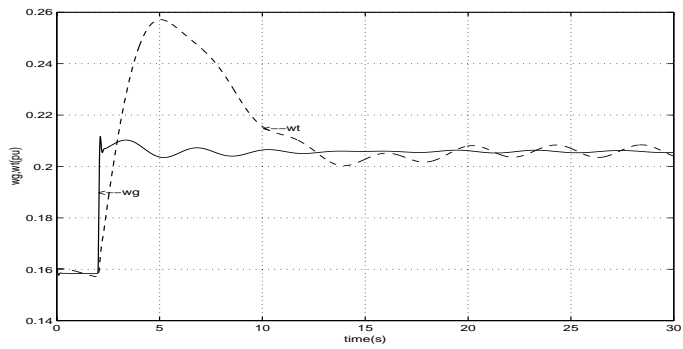
(d) Tip-speed ratio

Figure 5: System behaviour with wind fluctuation

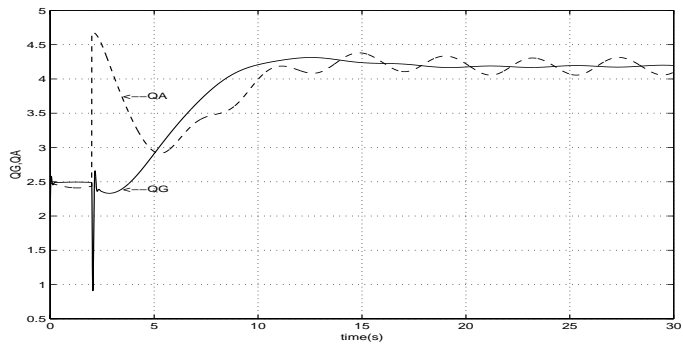




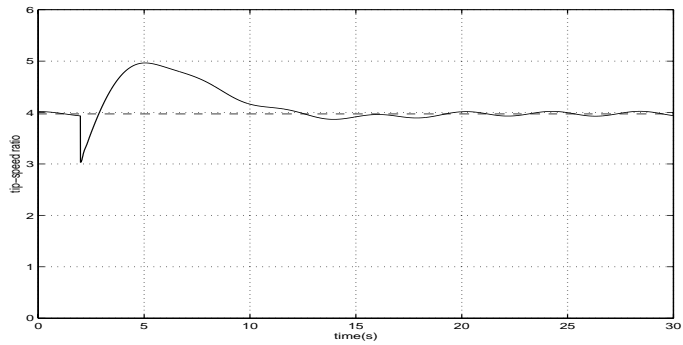
(a) Wind speed



(b) Generator and turbine speeds



(c) Aerodynamic and generator torques



(d) Tip-speed ratio

Figure 6: System behaviour with step on speed wind

# CONTRIBUIÇÃO DE ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE ÁGUAS SANITÁRIAS: ESTUDO DE UM CASO EM PORTUGAL

**J. Abel Andrade**

Departamento de Engenharia Mecânica  
Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Instituto Politécnico do Porto  
R. António Bernardino de Almeida 431, 4200-072 PORTO  
Portugal

## Resumo

Esta comunicação descreve o plano de monitorização para avaliação dos parâmetros relevantes do sistema de aquecimento de águas sanitárias misto, gás/energia solar, implementado num edifício de habitação social, na cidade de Vila do Conde, Portugal. Os resultados obtidos pelo plano de monitorização, para três das dezasseis habitações existentes no edifício, indicam que a contribuição solar para aquecimento de água sanitárias é de 50% atingindo cerca de 80% no período de Verão e de 40% no período de Inverno.

**Palavras-chave:** energia solar, água quentes sanitária, consumo de energia

## 1. INTRODUÇÃO

As energias renováveis, e em particular a energia solar, foram sempre encaradas com grande desconfiança pelos sectores da energia convencional. No entanto, hoje em dia, existem motivações que justificam a promoção das energias alternativas, algumas delas, como o caso da energia solar, com condições de mercado mais favoráveis.

O aumento na procura deste tipo de soluções alternativas pode ser atribuído, na sua generalidade, à combinação entre o aumento do custo das formas convencionais de energia com o aumento da consciencialização no que diz respeito à diminuição dos danos ecológicos.

As necessidades de energia para aquecimento das águas sanitárias são uma percentagem elevada das necessidades totais sendo superiores a 15 kWh/m<sup>2</sup>.ano como é indicado em (Buhring & Silva, 1999) pelo que representam uma parcela a considerar num contexto de racionalização de energia.

A utilização de equipamento de combustão, como por exemplo o uso de caldeiras para aquecimento de águas domésticas, pode criar problemas na qualidade do ar interior pela formação de gases de combustão, (Zorraquino *et al.*, 1999). A caracterização destas emissões é estabelecida por índices de emissão referidos em Marques & Pinho (1998), cujos limites são indicados na norma europeia EN297 (1997) e por WHO (1987).

Como complemento do exposto, e atendendo a que a energia solar é uma fonte energética disponível para todos, a utilização de sistemas de aquecimento de água por recurso à tecnologia dos painéis solares tem sofrido um aumento considerável quer em Portugal quer no Brasil como referido em (Krezinger *et al.*, 1998).

A análise do comportamento térmico de sistemas tais como edifícios e seus equipamentos, incluindo-se aqui os sistemas de aquecimento de águas quentes sanitárias, é essencial para o melhor conhecimento das suas características e potencialidades assegurando-se assim uma base sólida que permita a sua divulgação como instrumento de utilização.

Existem duas opções de estudo referidas por Laret (1990) como sendo a via numérica e a experimental. A simulação numérica é hoje em dia muito frequente, utilizada entre outros por Laret (1990) e Morejon (1998). Esta situação não é alheia ao facto dos resultados serem obtidos num curto espaço de tempo pelo desenvolvimento da tecnologia de computação.

A segunda via da experimentação é bastante mais morosa pelo que tem menos adeptos e na qual apenas se analisa, geralmente, o comportamento de equipamentos individualmente como sendo o caso do estudo da eficiência de caldeiras a gás, (Marques & Pinho, 1998 ) ou da influência de fogões a gás na qualidade do ar interior, (Zorraquino *et al.*, 1999).

Estes dois tipos de estudo devem ter um desenvolvimento em conjunto para que a experimentação valide o processo numérico. No entanto, o comportamento de sistemas térmicos quando em funcionamento regular apresenta-se com características diferentes por acção de imponderáveis como seja o modo de estar das pessoas que os utilizam diariamente. Assim torna-se fundamental que se processe uma via complementar às anteriores que caracterize o funcionamento dos sistemas quando integrados na situação de real.

O estudo apresentado insere-se neste último contexto, permitindo quantificar em termos operacionais de funcionamento a contribuição da energia solar, através da tecnologia dos painéis solares, para o aquecimento das águas quentes sanitárias em três habitações da cidade de Vila do Conde, Portugal. Simultaneamente permite demonstrar que a utilização de energias alternativas, tal como a energia solar, pode resultar numa redução do consumo de energia de origem fóssil e da melhoria da qualidade ao ambiente interior.

## **2. CARACTERIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO**

O edifício objecto deste estudo encontra-se localizado na cidade de Vila do Conde, Portugal, e é constituído por 16 apartamentos distribuídos por 4 pisos. Dos diferentes apartamentos, 3 encontram-se monitorizados com a finalidade de avaliar, durante o período de ocupação, o consumo de energia assim como a qualidade de conforto como referido por Fernandes *et al.* (1997). A escolha dos apartamentos a avaliar foi baseada numa previsão de consumo de energia para aquecimento ambiente constante do estudo PLEA88 (1992).

Os apartamentos são designados neste estudo por X, Y e Z e qualquer um destes tem uma área de 80 m<sup>2</sup> e com um nível de ocupação de 3 pessoas.

O aquecimento de águas sanitárias é realizado em caldeira a gás e é auxiliado por um conjunto de seis colectores solares por cada quatro habitações, em altura, correspondendo a 3m<sup>2</sup> de superfície colectora por habitação. Os colectores encontram-se localizados no terraço do edifício com uma orientação a Sul e uma inclinação de 36°.

O esquema deste sistema de aquecimento de águas sanitárias é apresentado na figura 1.

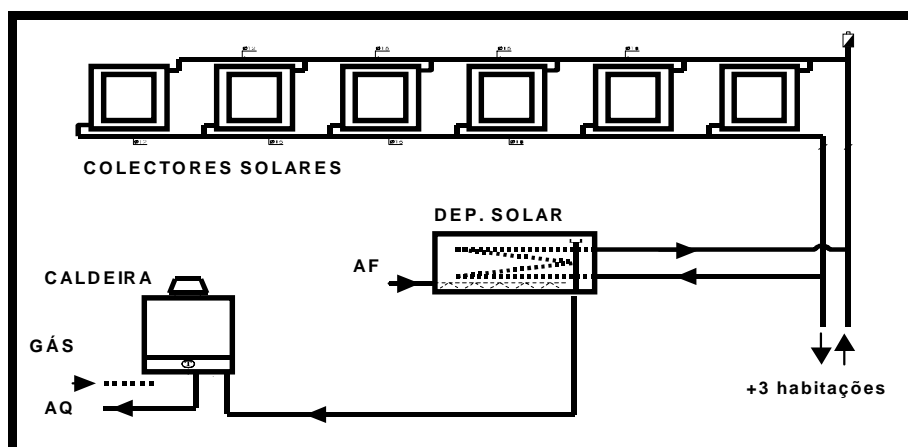


Figura 1 - Sistema de Aquecimento de Águas Sanitárias

A água circula em circuito fechado nos colectores solares, agrupados em paralelo, e pelos depósitos de água quente solar existentes em cada uma das habitações. Cada depósito tem um capacidade de 150 litros o que corresponde aos valores normalmente utilizados, 50 a 100 litros por  $m^2$  de colector.

A bomba circuladora é comandada por um controlo cuja actuação assegura o seu funcionamento sempre que o nível de radiação solar incidente atinge um valor pré-fixado. Existe ainda um controlo com actuação diferencial de temperaturas ( $4^{\circ}C$ ) entre a entrada e saída dos colectores. Para além destes dois existe um temporizador que coloca a bomba em funcionamento durante 2 minutos em cada período de 10 minutos.

A circulação de água do circuito primário no depósito de cada habitação é controlada por válvula termostática pré-regulada para  $55^{\circ}C$  o que significa que quando a temperatura da água acumulada no depósito é inferior à temperatura fixada, a válvula abre e a água em circulação passa pelo depósito.

O aquecimento suplementar da água, sempre que necessário, é realizada numa caldeira a gás do tipo WRS 325 de uma empresa sediada em Portugal.

Entre as alternativas para o circuito de águas quentes sanitárias a equipa responsável pelo projecto dos sistemas térmicos optou pela colocação da caldeira e depósito solar em série pelo que a água fria sanitária entra no respectivo depósito onde recebe um primeiro aquecimento e depois segue para a caldeira onde recebe o aquecimento final, se necessário.

Apesar do sistema de controlo implementado garantir uma temperatura de utilização de água de  $55^{\circ}C$  a temperatura é muita vezes inferior por os utilizadores desligarem manualmente a caldeira quando consideram que a temperatura da água do depósito solar é suficiente para as actividades como por exemplo o acto de lavagem de louça.

### 3. PLANO DE MONITORIZAÇÃO

O plano de monitorização para avaliar a contribuição solar no aquecimento de águas sanitárias insere-se num programa de monitorização mais amplo com objectivos descritos em Fernandes (1997). Este, para além do estudo de parâmetros ambientais relativos ao conforto térmico envolve a avaliação do consumo de energia por fontes de energia utilizadas nas habitações e que são o gás, a electricidade e a energia solar.

Deste modo poder-se-á avaliar a contribuição da energia solar no aquecimento de águas sanitárias mas também a sua participação no consumo global das habitações.

A energia solar captada nos painéis solares tem como única utilização no edifício o aquecimento de água sanitária. No entanto, o aquecimento das águas sanitárias tem como energia complementar a energia térmica proveniente da combustão do gás na caldeira. Assim, nas águas quentes sanitárias podem ser contabilizadas duas quantidades de energia térmica. Uma fornecida pelo depósito solar - proveniente dos colectores solares, e outra realizada na própria caldeira.

Do exposto, para análise da contribuição solar no aquecimento da água sanitária torna-se necessário avaliar o consumo de gás na caldeira, a energia térmica recebida pela água no depósito solar e a energia térmica recebida pela água na caldeira de acordo com o esquematizado na figura 2.

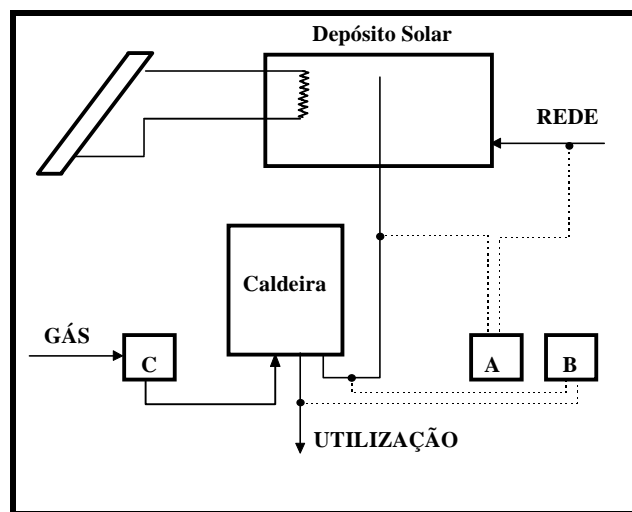


Fig. 2 - Esquema de monitorização do sistema de águas quentes sanitárias

A determinação do consumo de gás requer a instalação de um medidor de caudal de gás no circuito de alimentação da caldeira - contador C, Fig. 2. Os medidores a utilizar são do tipo volumétrico. A partir do caudal volumétrico e considerando o poder calorífico do gás é calculado o seu valor energético em termos de kWh.

O consumo de energia associada às águas quentes é avaliado em termos de energia térmica pela utilização de medidores de energia térmica. A distribuição dos medidores de energia térmica pelos pontos chave da rede de águas sanitárias é feito do seguinte modo:

- Entre a entrada e saída do depósito solar para contabilizar a energia recebida pela água sanitária quando passa pelo depósito solar - Contador A, Fig. 2.
- Entre a entrada e saída da caldeira que permite contabilizar a energia recebida pela água sanitária quando passa na caldeira - Contador B, Fig. 2.

Nos casos em que as necessidades de água quente, em termos de temperatura, forem inferiores às temperaturas da água que chegam à caldeira, esta não provoca a queima de gás e o medidor de energia térmica não é activado. Este apenas apresentará consumo quando houver elevação de temperatura entre a entrada e saída da água na caldeira. Os medidores de energia térmica a utilizar são do tipo medidores de entalpia.

#### 4. RESULTADOS

Os resultados apresentados da avaliação da monitorização efectuada nas habitações X, Y e Z são relativos a um período de 2 anos, de Abril de 1996 a Março de 1998.

A energia solar é contabilizada em termos de energia térmica recebida pela água sanitária no depósito solar. No entanto, a água sanitária recebe uma energia complementar na caldeira proveniente da queima de gás.

Atendendo a que a energia térmica recebida pela água na caldeira é proveniente da combustão de gás e que o caudal volumétrico deste se encontra avaliado pelo processo de monitorização implementado pode-se estabelecer a relação entre a energia solar contabilizada no depósito solar e a energia correspondente ao consumo de gás. A transformação do consumo de gás em energia térmica foi baseada num factor de 25.8 kWh/m<sup>3</sup>. Os resultados obtidos para o período referido de 2 anos, e traduzidos em termos anuais, são os constantes da tabela 1.

Tabela 1 - Consumos de energia para AQS (kWh)

	X		Y		Z	
	Gás	Solar	Gás	Solar	Gás	Solar
kWh/ano	706	578	453	482	645	799
%	55	45	49	51	45	55

A análise dos valores anteriores permite concluir que o consumo de energia para aquecimento de água quente sanitária é, em média, de 15 kWh/m<sup>2</sup>.ano como é indicado em (Buhring & Silva, 1999). Simultaneamente, verifica-se que a importância da energia térmica proveniente do depósito solar é de cerca de 50% em relação à energia térmica resultante da combustão do gás na caldeira o que equivale a uma redução para metade do produto resultante de uma fonte poluente como é a queima de gás com benefício evidente para a qualidade do ar interior. Aquele valor é inferior ao utilizado normalmente para efeito de análise económica dos sistemas de aquecimento de águas quentes sanitárias por recurso a painéis solares. Esta diferença de valores pode ser justificada na premissa de se considerar o rendimento da caldeira de 90% como referido na literatura de promoção de equipamento e de resultados experimentais apontarem apenas para 80%, (Pilão, 1998), enquanto os resultados da monitorização a este edifício apontam para um rendimento de apenas 60%.

A contribuição solar não é constante ao longo do ano. Nos períodos de Verão a energia disponível ao nível dos colectores solares é maior pelo que a energia térmica armazenada nos depósitos solares é superior. Nestas condições o consumo de gás será inferior naqueles períodos uma vez que a temperatura de saída da água da caldeira não é alterada pelos utilizadores durante o ano.

A contribuição do gás e da energia solar para AQS ao longo dos 24 meses de monitorização para os três apartamentos em estudo é indicado na figura 4.

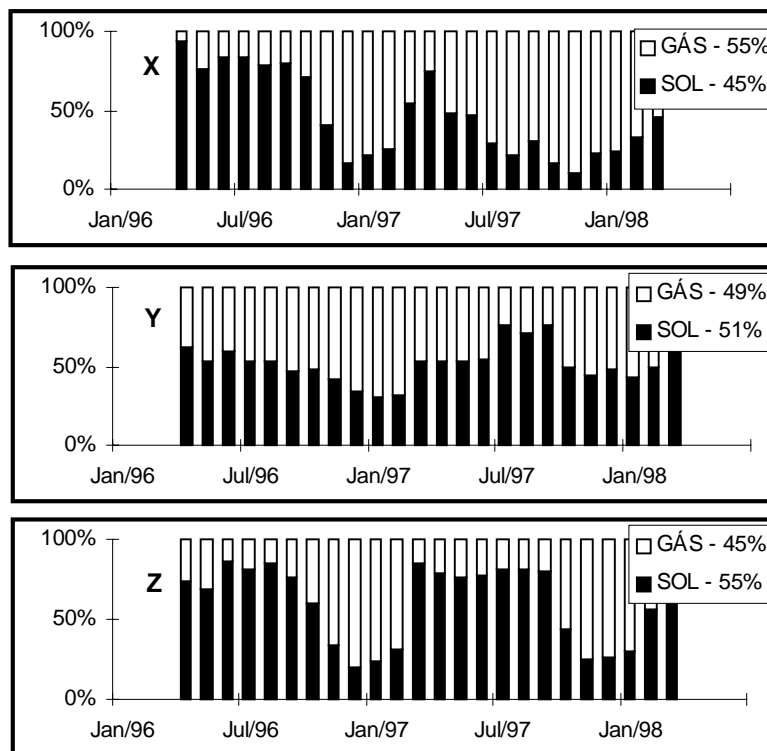


Fig. 4 - Repartição de energia para AQS

Estes dados demonstram que a percentagem de energia solar atinge cerca de 80 % no período de Verão e que no período de Inverno apenas aproximadamente 40% da energia solar contribui para o aquecimento de águas quentes sanitárias. Verifica-se também que mesmo nos meses mais quentes a temperatura da água proveniente dos depósitos solares não é suficiente para a satisfação das necessidades pois existe sempre consumo de gás que fornece o complemento de energia.

A inclinação existente dos colectores de 36°, por opção do instalador, e não de 42°, valor recomendado para Portugal, ao influenciar a energia recebida pela água também contribui para o decréscimo da contribuição solar no período de Inverno. A opção por uma inclinação superior favoreceria este período com desvantagem pouco significativa no período de Verão. O facto dos utilizadores desligarem, por sua livre vontade, a caldeira no período de Verão, para determinado tipo de utilização justifica, por si, o aquecimento excessivo da água neste período. Um outro aspecto que condiciona o conjunto de valores apresentados resulta do diagrama de consumos de água quente que se concentra na parte final do dia. Assim, a orientação dos colectores deveria ser mais para Oeste de modo a aproveitar a radiação solar nas horas mais próximas do consumo.

O esquema de monitorização implementado permite realizar medições de energia térmica recebida pela água no depósito solar - Solar, (contador B, fig.2) e a energia recebida pela água na caldeira - Caldeira, (contador A, fig.2) pela combustão do gás.

Os valores para o período referidos são indicados na tabela 2

Tabela 2 - Consumos de energia térmica (kWh)

	X		Y		Z	
	Caldeira	Solar	Caldeira	Solar	Caldeira	Solar
kWh/ano	457	578	281	482	385	799
%	44	56	37	63	33	67

A análise da tabela demonstra que para o aquecimento das águas sanitárias a contribuição da energia térmica proveniente dos colectores solares e transferida para a água sanitária ao nível do depósito solar é preponderante (cerca de 60% ) em relação à energia recebida pela água na caldeira e resultante da queima de gás.

Verifica-se que a energia térmica recebida pela água na caldeira é bastante inferior ao que lhe é fornecido pela combustão do gás, tabela 2. Esta diferença está associada a dois factores. Um deles é o coeficiente de transformação do caudal volumétrico de gás ( $m^3$ ) em energia (kWh) que tem em conta o poder calorífico do gás. A aproximação feita teve em consideração o tipo de gás comercializado e valores de poder calorífico tabelados. O segundo factor é o tipo de caldeira utilizada e a sua eficiência térmica. A permuta de calor entre a queima do gás e a recebida pela água não tem uma eficiência unitária. Acresce o facto que o tipo de utilização não é de modo algum aproximado ao de regime permanente.

## 5. CONCLUSÃO

Como síntese podem-se indicar, como relevantes, os seguintes aspectos:

Descrição de uma instalação de monitorização montada num edifício em Vila de Conde para avaliação da contribuição solar no aquecimento da água quente sanitária.

A utilização da energia solar através de painéis solares permite a diversificação de energias utilizadas.

A substituição da energia térmica proveniente da queima do gás pela utilização da energia solar reduz substancialmente o risco de contaminação do ambiente interior.

A análise da energia para aquecimento de águas quentes sanitárias evidencia a importância da contribuição solar em especial no período de Verão enquanto nos meses de menor incidência solar a contribuição é reduzida mas ainda significativa.

A eficiência das caldeiras a gás apresentaram valores inferiores aos normalmente referidos na literatura por razões de diferentes condições de funcionamento. Num caso em regime permanente e no outro por funcionamento descontínuo.

## 6. REFERÊNCIAS

- Buhning, A., Silva, P., 1999, “Heat supply in passive houses with a compact ventilation device and integrated exhaust air heat pump”, 6. th International Energy Agency Heat Pump Conference, Berlim, Alemanha.
- EN 297:1994/prA3:1996/prA5:1997, 1997, “Gas-fired central heating boiler. Type B11 and B11BS boilers, fitted with atmospheric burners of nominal heat input not exceeding 70 kW, Final report”, CEN, Brussels.



- Fernandes, E. O., Andrade, J. A., Garcês, L. P., 1997, “Potencial da energia solar em habitação social - Estudo de um caso em Vila do Conde”, VIII Congresso Ibérico de Energia Solar, Porto.
- Krezinger, A., Oliveski, R. C., Siqueira, A. M., 1998, “Um novo algoritmo para cálculo de perdas térmicas em reservatórios de água quente de sistemas solares”, 7. Th Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences, Rio de Janeiro, Brasil.
- Laret, L., Palero, I., 1990, “Hot water heating systems: design of models, network simulation and validations”, Proceeding of the third International Conference of System Simulation in Buildings, Liège, Bélgica.
- Marques, M. G., Pinho, C., 1998, “The coupling between environmental impact and the second law analysis of water heaters”, 7. th Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences, Rio de Janeiro, Brasil.
- Morejon, C. F. M., Hackenberg, C. M., 1998, “Simulação de sistemas termo-solares: código TRANSYS”, 7. th Brazilian Congress of Engineering and Thermal Sciences, Rio de Janeiro, Brasil.
- Plea 88, 1992, “Edifício no terreno da antiga feira do gado - Análise do comportamento térmico”, Protermia.
- Rosa Maria Pilão, R. M., 1996, “Estudo do Comportamento Térmico de Esquentadores Domésticos a Gás”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia do Porto.
- WHO, World Health Organization. Regional Office for Europe, 1987, “Air Quality Guidelines for Europe”. European series, nº 23 Who regional publications, Copenhagen, Dinamarca.
- Zorraquino, J. V. M., Diaz, V. J. C., Lucena, I. L., 1999, “Impacto de los aparatos de cocción a gas sobre la calidad de aire interior”, V Congresso Iberoamericano de Ar Condicionado e Refrigeração, Lisboa, Portugal.

# ASPECTOS GERENCIAIS EM SISTEMAS DE ELETRIFICAÇÃO RURAL FOTOVOLTAICA DOMICILIAR

**Heitor Scalabrini Costa**

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência, Núcleo de Apoio a Projetos de Energias Renováveis, 50.740 – 530, Recife – PE,  
Tel (Fax): (081) 271 – 8255 E-mail: naper@npd.ufpe.br

## **Resumo**

A disponibilidade financeira, mesmo limitada, tem possibilitado a instalação de inúmeros sistemas fotovoltaicos para diversas aplicações no Brasil. O êxito de projetos e programas depende, além dos recursos financeiros, de um conjunto de elementos adicionais, para satisfazer as necessidades elétricas dos usuários. Estes elementos de natureza técnica e não técnica requer adequada atenção no momento de planejar e executar estes projetos e programas. Neste trabalho é descrita uma proposta baseada na organização comunitária local, que leva em conta a participação dos usuários na gestão das instalações fotovoltaicas. Neste esquema, os usuários devem se envolver no processo de eletrificação, tanto na definição dos usos da eletricidade que receberão, como das ações de operação e manutenção dos sistemas. Uma estrutura organizativa e de gestão local (técnica, administrativa e financeira) em torno do projeto/programa contribuirá para o principal objetivo que é de manter uma qualidade aceitável dos serviços elétricos fornecidos pelos sistemas fotovoltaicos. Nesse processo é necessário enfatizar a necessidade de se criar uma nova cultura de fornecimento e uso da energia elétrica, promover a aceitação e a apropriação da tecnologia pelos usuários, desenvolver esquemas de eletrificação descentralizada sustentável, e estabelecer uma estrutura organizativa local em torno do projeto.

**Palavras chaves:** Sistema fotovoltaico domiciliar, Sustentabilidade, Gerenciamento.

## **1. INTRODUÇÃO**

Nos últimos anos os sistemas fotovoltaicos (FV) têm demonstrado seu potencial técnico no fornecimento de eletricidade para numerosas aplicações em áreas rurais, evidenciando o setor da eletrificação rural.

Os sistemas FV são parte integrante de grandes programas de eletrificação rural descentralizada em distintas partes do mundo - Argentina, África do Sul, Bolívia, Índia, México, Zimbábue, entre outros. Tem-se documentado muitas experiências sobre as barreiras e dificuldades de difusão, e também como superá-las; tanto na área técnica, como nas áreas de organização, políticas energéticas e financiamento.

No Brasil a eletrificação rural com sistemas fotovoltaicos se iniciou em escala significativa entre 1992 e 1994, mediante projetos pilotos em cooperação com organismos estrangeiros, principalmente Alemanha (projeto Eldorado) e os Estados Unidos (DOE/NREL). O Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios-PRODEEM, concebido e coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, em 1995, é quem tem levado a

cabo a tarefa de levar energia elétrica às comunidades rurais não servidas pela rede elétrica convencional com fontes renováveis de energia.

Segundo informações não oficiais, no final de 1999 mais de 3 MW de potência instalada de sistemas fotovoltaicos forneciam eletricidade para domicílios, escolas, centros comunitários, telefonia rural e bombeamento de água. Apesar do país contar com uma estrutura institucional básica, que poderia servir à disseminação dessa tecnologia, muito pouco se fez no sentido de garantir a sustentabilidade das instalações.

Inicialmente, foram as concessionárias de energia (Companhias Energéticas de Pernambuco, Ceará, Bahia, Alagoas, Minas Gerais, entre outras), que ficaram com a responsabilidade da instalação, assistência técnica e capacitação dos usuários. Com exceção da CEMIG, que ainda hoje mantém um programa de pré-eletrificação com sistemas fotovoltaicos, as outras concessionárias abandonaram esta opção energética para as áreas rurais.

Neste trabalho são identificados os aspectos técnicos e não técnicos que podem constituir em barreiras para a disseminação da tecnologia fotovoltaica para as aplicações domiciliares. É reforçada a importância da organização local comunitária (associações, sindicatos) na gestão técnica, administrativa e financeira das instalações.

## **2. REQUERIMENTOS PARA A SUSTENTABILIDADE DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

O fornecimento energético desenvolvido principalmente através de unidades de produção e distribuição, altamente centralizadas, nem sempre é a melhor opção quando se trata de satisfazer as necessidades energéticas do setor rural. Isto se deve, em parte, ao alto nível de dispersão das populações nas zonas rurais, às baixas demandas de energia existentes nestas regiões e, em alguns casos, a dificuldade nos acessos às comunidades afastadas.

No esquema tradicional de eletrificação rural pela extensão da rede, a interação do usuário com a tecnologia de eletrificação comercialmente adotada, é mínima. Na eletrificação com sistemas fotovoltaicos, faz-se necessário uma participação ativa do usuário na compreensão e no manejo da tecnologia, além de um conhecimento do meio físico, social, econômico e ambiente em que a tecnologia se insere. Estes elementos, acima apontados, fazem com que o processo de eletrificação com sistemas fotovoltaicos seja mais completo que o tradicional, pois vai além da simples instalação de equipamentos.

As comunidades/usuários devem ter um papel preponderante no processo de eletrificação. Não dispondo de capacidade técnica autônoma, ela necessita de um grupo técnico que terá um papel importante, desde a concepção e instalação, até o acompanhamento dos projetos implantados. A participação das Organizações Não Governamentais, que atuam na capacitação e no acompanhamento de projetos, permite o envolvimento de entidades/técnicos com experiências comprovadas na área do desenvolvimento rural.

As experiências nacionais e internacionais de utilização das energias renováveis, em particular na eletrificação rural fotovoltaica, têm mostrado que a disseminação desta tecnologia é uma tarefa complexa, pois implica antecipar e resolver problemas de caráter técnico/engenharia, econômico, de infra-estrutura, social e de gestão.

É necessário, visto a complexidade do problema, que a intervenção de equipes multidisciplinares levem em conta aspectos críticos de natureza técnica e não técnica (Huacuz, 1999), que garantam a gestão sustentável e o êxito dos projetos de eletrificação rural com energia solar fotovoltaica. Os aspectos técnicos estão relacionados ao desempenho dos diferentes componentes/elementos do sistema (módulo fotovoltaico, bateria, controlador de carga, divisor de tensão, luminárias, fiação e interruptores). Nos aspectos não técnicos, são

analisados os interesses e vontade política, os fatores humanos (usuário, instalador e o promotor da tecnologia), a participação dos usuários, a capacitação, a infra-estrutura e o acompanhamento das instalações, visando à assistência técnica.

## **2.1. Aspectos técnicos**

### **2.1.1 Módulo fotovoltaico**

O módulo fotovoltaico constitui-se no elemento mais confiável, que, praticamente, não necessita de manutenção, dentre os componentes dos sistemas fotovoltaicos de eletrificação rural. Os outros componentes necessitam de manutenção em maior ou menor grau. Alguns requerem maior desenvolvimento e melhoras significativas no desempenho.

O caso mais grave que pode ocorrer com o módulo, é a quebra do seu vidro de cobertura. A infiltração de água é que pode, ao longo de dias (meses), debilitar o funcionamento do gerador, reduzindo assim a energia elétrica gerada.

### **2.1.2 Bateria**

É o elemento crítico nos sistemas fotovoltaicos. Pode ser danificada com sobrecargas e descargas profundas e por práticas impróprias de operação e manutenção.

A maioria dos projetos de eletrificação rural utiliza baterias automotivas, chumbo-ácidas, que são mais comumente encontradas e mais baratas. As baterias denominadas de “solares”, são menos disponíveis e mais caras. Na literatura, pouco existe sobre avaliações e diagnósticos sistemáticos ou estudos de desempenho, que comprovem a superioridade das baterias solares no âmbito da eletrificação rural. Verifica-se a importância deste elemento, cuja principal função, é o de armazenar a energia e disponibilizá-la quando o usuário a necessitar.

A segurança com as baterias nas instalações fotovoltaicas residenciais é muito importante, pois existe perigo de explosão e corrosão. Para se prevenir acidentes, é recomendável que elas não sejam instaladas em dormitórios e nem em áreas de maior circulação. São recomendáveis locais com boa ventilação, ficando a bateria isolada do chão (por exemplo, o uso da madeira é uma boa solução). Estes cuidados devem ser levados em consideração.

### **2.1.3 Controlador de carga**

Os controladores eletrônicos de carga (também conhecidos como reguladores de tensão), têm como propósito proteger a bateria contra sobrecargas e descargas excessivas. São elementos fundamentais, possibilitando estender a vida útil das baterias, além de protegê-las contra sobrecarga e sobredescarga.

### **2.1.4 Luminárias**

Uma luminária fluorescente completa DC é composta do tubo luminoso (lâmpada), do reator inversor eletrônico (RIE) e da estrutura mecânica.

O RIE tem a função de adaptar os parâmetros elétricos da saída da fonte de alimentação aos parâmetros elétricos da entrada da lâmpada.

A forma de onda na saída do RIE é uma indicação da sua qualidade e custo. Ela depende do método de conversão e filtragem utilizadas para suavizá-la e eliminar os harmônicos indesejáveis, resultantes do processo de conversão. No caso do RIE com onda senoidal, apesar de serem mais caros, são os que apresentam um desempenho mais adequado à

aplicação em domicílios rurais com energia solar fotovoltaica, não apresentando interferência no rádio e na televisão.

### **2.1.5 Instalação elétrica**

Um elemento que muitas vezes não é mencionado em sistemas fotovoltaicos domiciliares é a instalação elétrica. É necessária a existência de normas técnicas e, também, o seu cumprimento.

Os condutores utilizados são na forma de fios (rígido) e cabos (flexível) isolados. A intensidade de corrente elétrica máxima admissível, que circula nos condutores, é fixada em função da secção e do tipo do condutor.

No dimensionamento dos condutores, para uma instalação fotovoltaica, deve-se minimizar as perdas ôhmicas, ou seja, otimizar a secção do condutor de maneira a limitar a queda de tensão, ao limite de 2 % da tensão de operação.

### **2.1.6 Interruptores**

Sugere-se que os materiais empregados nas instalações elétricas dos sistemas fotovoltaicos, instalados nas áreas rurais, sejam de boa qualidade. Isto se faz necessário para evitar problemas e manter um fornecimento regular de energia elétrica residencial.

É digna de menção a não opção pelo uso de interruptores do tipo “pêra” nas instalações. Tal dispositivo é inadequado pois, apresenta problemas nos contatos liga-desliga, após alguns meses de uso.

### **2.1.7 Divisor de tensão**

A tensão de operação nos domicílios é fixada pela bateria interligada, em geral 12 VDC. Os usuários necessitam de outras tensões para alimentar, o rádio e/ou o aparelho de som. O divisor de tensão comumente utilizado fornece 6 e 9 VDC.

## **2.2 Aspectos não técnicos**

### **2.2.1 Vontade política**

Entre os elementos não técnicos indispensáveis para assegurar a sustentabilidade dos projetos e programas de eletrificação rural com energias renováveis, está a vontade política para reconhecer o direito do cidadão à energia elétrica. Esta vontade deve ser traduzida em leis, regulamentos e ações, que garantam este direito e estabeleça as responsabilidades do Estado nos diferentes níveis.

### **2.2.2 Fatores humanos críticos**

Identifica-se três elementos como fatores críticos para a sustentabilidade das instalações fotovoltaicas.

#### O usuário

Os principais beneficiários das instalações fotovoltaicas pertencem aos setores excluídos da sociedade. As principais características comuns nestas comunidades rurais estão enumeradas a seguir:

- São marginalizadas pelo poder público;
- Não estão familiarizadas com tecnologia moderna e não têm experiência no uso da eletricidade;
- Apresentam carências significativas quanto a equipamentos de uso coletivo e familiar;
- Deficiências na comunicação com o exterior (estradas, TV, rádio, ...);
- A organização social é em torno da família;
- Utilizam estratégias mistas de sobrevivência (autoconsumo, pequena comercialização, emigração, ...);
- Hegemonia da “palavra” sobre a “escrita” (elevados índices de analfabetismo);
- Baixa população (30 a 50 casas, ≈ 200 habitantes);
- Similaridades em relação ao grau de desenvolvimento sócio-econômico (renda econômica fixa: aposentadoria, pouca ou nenhuma especialização profissional, ...) e com relação aos usos e padrões de demanda de energia;
- Atividade econômica predominante ligada ao setor primário (agricultura familiar).

O fato destes moradores não estarem familiarizados com o uso da eletricidade, requer um tratamento especial no que concerne a sua capacitação no manejo e uso da energia solar fotovoltaica, além da própria gestão (administrativa, técnica e financeira) de tais equipamentos.

#### O instalador

No campo, caso os instaladores não estejam sensibilizados e capacitados a realizar um bom trabalho, um número de circunstâncias podem forçá-los a se desviar das especificações técnicas estabelecidas, implicando em uma baixa qualidade das instalações.

#### O promotor

Comumente, são técnicos das companhias energéticas, das Universidades e de Organizações Não Governamentais que têm a função de influenciar a comunidade para utilizar os sistemas fotovoltaicos. Pode ser verificado que mesmo entre os promotores, existe um descrédito (pela falta de informações), sobre a operacionalidade dos sistemas solares.

Em muitos casos não existe uma preocupação maior na escolha das comunidades rurais que serão beneficiadas pela eletricidade solar. Em várias situações, a própria escolha não leva em conta aspectos técnicos-sociais, econômicos e organizativos da comunidade selecionada.

### **2.2.3 Participação dos usuários**

Tradicionalmente, o usuário tem sido considerado como um objeto, no processo de eletrificação rural convencional pela extensão da rede elétrica.

No caso do uso das fontes renováveis de energia, com geração elétrica local, o usuário deve se envolver no processo. Tanto na definição dos usos da energia, como nas ações de operação e manutenção das instalações. Não se deve esquecer, também, da necessidade da gestão administrativa, técnica e financeira dos sistemas instalados.

Para ser sustentável ao longo do tempo, o processo de eletrificação rural fotovoltaica, deve ser orientado no sentido da confiabilidade do serviço oferecido, onde a meta mais importante é a satisfação das necessidades dos usuários.

#### **2.2.4. Capacitação**

A capacitação e informação são uma exigência quando se trata de implantar eletrificação rural fotovoltaica. Grandes esforços de capacitação e informação são necessários. O usuário é um dos objetivos maiores da capacitação. Na maioria dos casos, a eletricidade é um fator completamente novo na vida destas pessoas, o que requer uma extensa campanha de informação e educação, que motive o uso racional da eletricidade proporcionado pelos sistemas fotovoltaicos. O usuário participa diretamente na manutenção preventiva requerida por tais equipamentos. A capacitação técnica dos usuários deve ser feita através de cursos sobre o uso e a gestão dos sistemas com energia solar, não esquecendo a formação do eletricista solar da comunidade.

O treinamento e capacitação fornecidos aos usuários permitem que o gerenciamento técnico, administrativo e financeiro destas instalações, sejam realizados pelos próprios beneficiários da eletricidade solar.

#### **2.2.5 Infra-estrutura**

Outro aspecto muito importante para a sustentabilidade das instalações autônomas fotovoltaicas diz respeito à necessidade de uma infra-estrutura para bem atender aos sistemas instalados nas áreas rurais.

As disponibilidades locais de peças para reposição e serviços de manutenção são dois aspectos fundamentais para o bom êxito dos projetos em longo prazo. Um sistema fotovoltaico deve funcionar pelo menos 20 anos fornecendo energia elétrica.

#### **2.2.6 Acompanhamentos dos projetos**

O acompanhamento através de visitas periódicas, tem demonstrado que a manutenção preventiva e, em alguns casos, corretiva, pode e deve ser realizado por membros da própria comunidade, que devem receber treinamento para exercerem esta tarefa. É o caso do papel fundamental do “eletricista solar”, que são membros (dois ou três) da própria comunidade, que devem receber informações e treinamento adequados, para realizarem a assistência técnica dos equipamentos instalados na comunidade em que vivem.

Não havendo um acompanhamento sistemático destas instalações, a probabilidade do insucesso da eletrificação rural com energia solar é muito grande.

### **3. GERENCIAMENTO LOCAL E PARTICIPATIVO**

Assim como a tecnologia de geração de energia elétrica, através da conversão fotovoltaica da energia solar, o gerenciamento ou o acompanhamento da mesma tem que ser descentralizado. Isto é, o aspecto fundamental para garantir a sustentabilidade dos programas com eletrificação fotovoltaica é a divisão de responsabilidades. A Organização Comunitária Local (OCL) deve se responsabilizar pela gestão técnica, administrativa e financeira dos sistemas fotovoltaicos instalados na comunidade.

As principais vantagens desta proposta é que a OCL responderá pelas necessidades locais e pela administração. As desvantagens são da carência de recursos financeiros, e dos desvios dos recursos para outras necessidades mais imediatas da comunidade.

No tocante à capacitação, um problema bastante constatado na prática, é o deslocamento de técnicos de localidades distantes, como a capital do Estado, até o local da instalação defeituosa, quando surge um mau funcionamento nos sistemas. Isto encarece muito a solução do problema, além de acarretar um tempo maior para sua correção, que em muitas situações o

próprio usuário poderia resolver. Para solucionar tais questões relativas à capacitação dos usuários, algumas sugestões e propostas são recomendadas:

- Criação de um programa regular para a capacitação dos moradores;
- Plano de capacitação técnica com acompanhamento e monitoramento para todo o sistema antes e depois da implantação;
- Capacitação em três níveis: eletricitista rural e para o usuário (nível local), um nível intermediário através de técnicos da prefeitura e/ou ONG's (regional) e por último, em nível central (estadual) através do órgão gestor;
- Priorizar a capacitação do usuário com a formação dos eletricitistas e com o aumento de informações sobre a energia solar;
- Descentralizar a capacitação para um maior envolvimento a nível regional na assistência técnica;
- Reduzir as barreiras de informação a fim de aumentar a troca de experiências entre a comunidade e os responsáveis pela tecnologia.

No que diz respeito à assistência técnica, uma questão essencial é a dificuldade de aquisição de peças de reposição. Apesar da bateria ser um dos equipamentos que apresentam maiores problemas, devido, principalmente, ao término da vida útil da mesma, pode ser facilmente substituída por baterias automotivas, que resolvem parcialmente o problema. Porém, o mesmo não ocorre perante a aquisição dos demais componentes dos sistemas, e isto também tem sido uma questão bastante preocupante. Para resolver o problema da manutenção e assistência técnica, são recomendadas as seguintes sugestões:

- Maior ênfase (priorizar) à assistência técnica local, pois se trata de um nível de permanente apoio;
- Criação de um pequeno estoque de peças sobressalentes (inversores para lâmpadas, fusíveis, entre outros) e anexá-lo ao kit básico que compõe um sistema fotovoltaico;
- Criação de um fundo auxiliar na associação de moradores para manter um pequeno estoque de peças;
- Maior negociação com fornecedores de peças para a redução dos custos na compra em “quantidade”;
- Maior conscientização e mobilização da comunidade, objetivando a redução da dependência com os órgãos governamentais;
- Repassar a propriedade dos equipamentos para a organização comunitária local.

Com este tipo de acompanhamento e assistência, através da divisão de responsabilidades, pode-se otimizar este processo de acompanhamento, além de tornar mais rápido a manutenção quando necessário.

Para garantir a sustentabilidade (entendido aqui como a garantia da boa qualidade do serviço elétrico fornecido pelo sistema, ao longo da vida útil do gerador fotovoltaico, 20 anos) destas instalações, propõem-se as seguintes ações:

- seleção de comunidades não eletrificadas conjuntamente com parceiros locais (ONG's, Prefeitura, Sindicato dos Trabalhadores Rurais - STR), em função de critérios físicos, energéticos, organizativos, sociais e econômicos;
- Caracterização sócio-econômica e energética, familiar e comunitária;
- Promoção e divulgação da energia solar fotovoltaica nos encontros municipais realizados com esta finalidade;
- Especificações técnicas e econômicas do projeto;



- Capacitação da comunidade através de treinamento dirigido aos usuários;
- Instalação participativa dos equipamentos;
- Gestão comunitária para assistência técnica e reposição de peças (criação do fundo comunitário);
- Acompanhamento do projeto.

#### **4. CONCLUSÕES**

Uma parte importante do esforço de eletrificação nas pequenas comunidades rurais distantes da rede, até então não contemplada na política de eletrificação rural, poderia ser levado a cabo mediante a disseminação de sistemas autônomos fotovoltaicos. O objetivo seria de dotar as residências de energia elétrica (iluminação, e outras aplicações) em curto prazo.

Requer-se entretanto, de uma política coerente que permita fortalecer e, sobretudo, ampliar este esforço, provendo as comunidades de um nível energético suficiente para iniciar as atividades produtivas que permita seu desenvolvimento econômico.

Algumas das principais barreiras sócio-econômicas-culturais encontradas que oferecem resistência à implantação da tecnologia estão listadas abaixo:

- A diferença entre a energia solar e a convencional, dificulta a aceitação por parte dos usuários, pelo fato de inicialmente não darem credibilidade;
- Alguns usuários mais ambiciosos e com um poder aquisitivo um pouco maior que os demais, não se contentam com a carga que poderá ser conectada ao sistema;
- Outros muito conservadores não aceitam que seja instalado o sistema em suas casas, pois receiam que com a chegada de informações, seus filhos sofram má influência;
- Algumas comunidades preferem esperar pelo cumprimento de promessas políticas para com a chegada da energia elétrica convencional;
- Os programas com a energia solar fotovoltaica precisam de recursos financeiros para, posteriormente, ser feita a manutenção nos equipamentos; porém, existem determinados usuários que não assumem a responsabilidade com a organização comunitária local, dificultando assim, o bom funcionamento da mesma e do sistema;
- Para muitos usuários, é lógico pensar que se alguma instituição/órgão do governo trouxe o sistema, outra (ou a mesma) deverá repará-lo, então não apoiam as iniciativas da organização local, dificultando o trabalho da mesma.

Em contraposição com a extensão das redes de combustíveis convencionais, o uso de tecnologias renováveis requer uma alta participação e organização local. As experiências mundiais, levadas a cabo, até o momento, demonstram que o grau de organização das comunidades, a compreensão das prioridades, expectativas e necessidades dos usuários, treinamento adequado dos usuários e a existência de manutenção regular dos equipamentos, são fundamentais para o êxito dos projetos.

#### **5. REFERÊNCIAS**

- Huacuz, J. M., 1999, “Energias sostenibles en zonas rurales dentro del proceso de modernización del sector en América latina y el Caribe”, Comunicação privada, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, México, 71 p.

# USO DE DIODOS DE *BYPASS* E DE BLOQUEIO NA PROTEÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

**Lúcio Almeida Hecktheuer**

**Arno Krenzinger**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 90050-170, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: laheck@vortex.ufrgs.br

## **Resumo**

Em sistemas fotovoltaicos constituídos por módulos associados em série e em paralelo, faz-se necessário introduzir dispositivos de proteção, geralmente diodos, a fim de evitar danos e perdas de potência do sistema devido a diferenças entre as características elétricas das células nos módulos e possíveis sombreamentos das mesmas. O presente trabalho tem por objetivo apresentar estes tipos de proteções e também uma análise do comportamento elétrico de dois módulos, disponíveis no mercado consumidor, contendo diodos *bypass* ligados em diferentes configurações. Verifica-se que os diodos *bypass* e de bloqueio, quando corretamente conectados no sistema, evitam que um módulo funcione como carga para outros, dissipando uma potência muito grande que possa causar danos ao sistema. Também atuam no sentido de evitar um decréscimo muito acentuado da potência efetiva da associação quando há sombreamento de módulos.

**Palavras-chave:** Sistema fotovoltaico, Energia solar, Proteção

## **1. INTRODUÇÃO**

Quando se trabalha com sistemas fotovoltaicos de potências elevadas, faz-se necessário associar módulos em série e em paralelo a fim de se conseguir valores de tensão e corrente apropriados para a aplicação que se deseja. Segundo vários autores, entre eles (Zilles, 1993; Gupta e Milnes, 1981), as diferenças entre as características elétricas e possíveis sombreamentos de módulos podem ocasionar danos ao sistema devido ao sobreaquecimento de células. Para evitar os problemas advindos destas situações indesejadas, mas que ocorrem ao longo da vida útil do sistema, deve-se acrescentar dispositivos de proteção, geralmente diodos, que são colocados em pontos estratégicos do circuito do sistema com o objetivo de evitar o aparecimento de pontos quentes nos módulos e conseqüente perdas de potência. O funcionamento destes diodos foram previamente descritos em (Gonzalez e Weaver, 1980; Ilceto et al, 1998) entre outros. Outros métodos como o da manipulação da resistência paralela na fabricação das células e o uso de diodos *bypass* incorporado em cada uma das células dos módulos conforme citados por (Roche, Outhred e Kaye, 1995), ainda são pouco utilizados e merecem maiores estudos.

## 2. PROTEÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM DIODOS

A proteção de módulos fotovoltaicos que compõem um sistema, faz-se, preferencialmente, com o uso de diodos de *bypass* e de bloqueio, evitando assim o aparecimento de pontos excessivamente quentes nos módulos, o que pode vir a prejudicar o funcionamento do sistema. A seguir, são apresentadas as formas de se proteger sistemas fotovoltaicos com o uso de diodos de *bypass* e de bloqueio.

### 2.1 Diodo de *bypass*

Em associações série de células fotovoltaicas (módulos), as mesmas estão sujeitas a funcionarem como carga para as demais células. Neste caso, corre-se o risco de se ter uma tensão negativa aplicada nos seus extremos que seja maior que a sua tensão de “*breakdown*”, ocasionando uma dissipação de potência exagerada sobre ela e, por conseqüência, provocando um aquecimento que pode causar danos à célula. Esta situação pode ocorrer devido a não identidade ou por sombreamento de células. Nestas situações, ao conectar-se um diodo em anti-paralelo com os extremos das células (diodo *bypass*), o mesmo ficará diretamente polarizado e, portanto, permitirá que a corrente circule por ele. Assim sendo, a célula em questão não contribui na conversão da energia elétrica, mas, também não se comporta como carga para as demais células. Se a célula for idêntica às demais e não estiver sombreada, o diodo *bypass* ficará reversamente polarizado, não permitindo que por ele circule corrente. Este diodo *bypass* deve ser capaz de conduzir toda a corrente gerada pela associação série e sua tensão limiar de condução deve ser a menor possível.

Na prática, não se colocam diodos *bypass* em paralelo com cada uma das células associadas, mas sim com grupos delas. A Fig. 1 mostra como são ligados os diodos *bypass* em módulos fotovoltaicos (associações de N células em série) disponíveis no mercado.

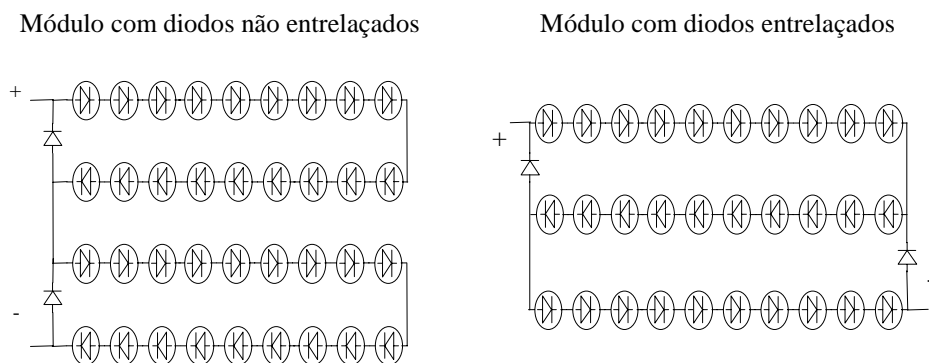


Fig. 1 Ligações de diodos *bypass* em módulos fotovoltaicos

Em módulos fotovoltaicos com diodos *bypass* ligados de forma entrelaçada, se tem disponível apenas um valor de tensão nominal para o módulo, por exemplo 12 V, e nos outros módulos dois valores de tensão (6 V e 12 V).

### 2.2 Diodo de bloqueio

Sistemas fotovoltaicos constituídos por vários ramos em paralelo, cada qual podendo ser constituídos por N módulos associados em série, podem ser protegidos contra correntes reversas dos outros ramos através de diodos de bloqueio conectados em série em cada um dos

ramos. Essa corrente reversa é causada pela diferença de tensão dos ramos devido a situações indesejadas já citadas anteriormente.

O ramo que apresenta uma menor tensão fica sujeito a funcionar como carga para os demais ramos. Desta forma, parte ou toda a corrente gerada pelos ramos que apresentam maior tensão fluirá pelo ramo de menor tensão, ocasionando um aquecimento neste último ramo e perda de potência do sistema. O uso de diodos de bloqueio ligados em série com os módulos de cada ramo, conforme é mostrado na Fig. 2, evitam o aparecimento de correntes reversas.

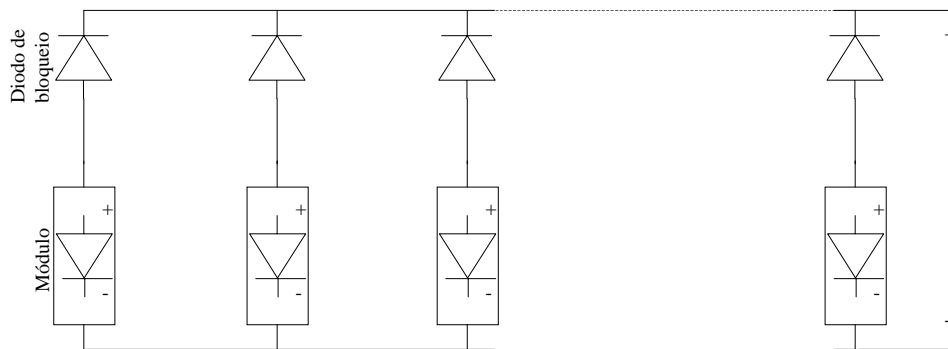


Fig. 2 Associação paralelo de módulos fotovoltaicos com diodos de bloqueio

Os diodos de bloqueio ocasionam uma queda de tensão de aproximadamente 1 V (valor este que depende do tipo de diodo utilizado), o que pode ser importante em sistemas de menor porte. Para reduzir significativamente esta queda tensão, pode-se substituir o diodo de bloqueio por fusíveis. Com o fusível, as células do módulo do ramo de menor tensão não correm o risco de serem danificadas mas não se evita a perda de potência do sistema visto que por este ramo circulará uma corrente reversa.

Quando a energia elétrica do sistema fotovoltaico é armazenada em baterias, pode-se utilizar um diodo de bloqueio com o seu catodo ligado no terminal positivo do banco de baterias com o objetivo de não permitir a sua descarga em períodos de escuridão ou de muito baixa radiação solar (células fotovoltaicas comportando-se como diodos polarizados diretamente). O inconveniente desta solução é que se tem, nos períodos em que o sistema está gerando energia elétrica, uma perda de potência que é dissipada no próprio diodo de bloqueio.

Com o objetivo de minimizar estas perdas, pode-se utilizar diodos do tipo Schottky, os quais apresentam, segundo (Boylestad, 1986), uma queda de tensão da ordem de 0,2 V quando polarizados diretamente. Em sistemas que operam com tensões superiores a 24 V, torna-se necessário utilizar-se diodos de junção P-N que suportam tensões reversas maiores, embora provoquem uma perda de potência maior, pois a queda de tensão, quando em polarização direta, é na ordem de 0,7 V (diodos de silício).

Esta aplicação do diodo de bloqueio, atualmente é de muito pouco uso, visto que há modernos reguladores de carga de baterias que possuem dispositivos de chaveamento interno que desconectam os módulos da carga durante a noite. Mesmo sem a utilização destes reguladores, a aplicação do diodo é questionada, pois a queda de tensão que ele provoca durante o dia proporciona uma perda de energia que pode ser, em determinados casos, maior que a perda de energia durante a noite, sem a sua presença.

## 2.3 Ligação de diodos de proteção em sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos que utilizam um número maior de módulos a fim de obter-se valores de tensão e corrente apropriados para a aplicação desejada, em geral utilizam simultaneamente associações em série e em paralelo. Nestes casos, a proteção dos módulos é conseguida utilizando-se, também simultaneamente, os diodos de *bypass* e de bloqueio.

A Fig. 3 mostra como devem ser ligados os diodos de proteção em um sistema composto por módulos ligados em série paralelo.

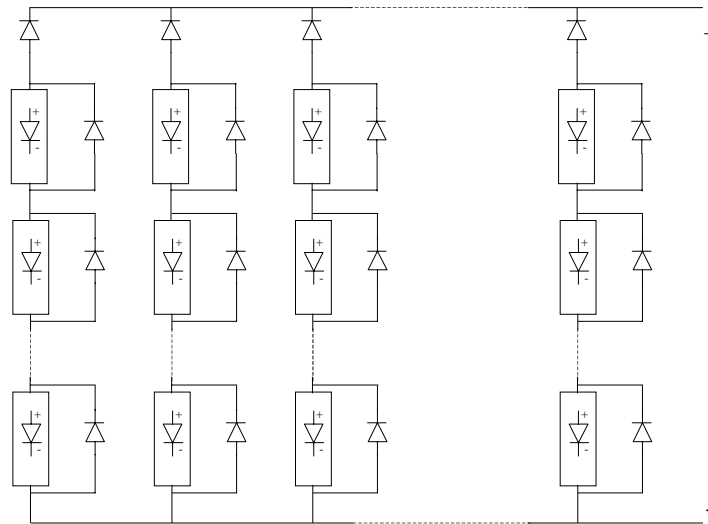


Fig. 3 Associação série paralelo de módulos fotovoltaicos com diodos de proteção

## 3. DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE LIGAÇÕES DE DIODOS *BYPASS*

Com o objetivo de analisar o comportamento dos módulos quando funcionando com tensões reversas, situação em que os diodos de bloqueio devem atuar, foram traçadas curvas dos módulos com algumas células sombreadas. Esta situação de polarização reversa em módulos fotovoltaicos acontece não só com a presença de sombras nos módulos mas também quando a associação está funcionando em curto-circuito ou circuito aberto.

Os dois módulos que foram testados possuem diferentes ligações dos diodos de *bypass*, (diodos entrelaçados ou não entrelaçados conforme Fig.1). Com diodos entrelaçados, a máxima tensão reversa é de aproximadamente 1,4 V mais 1/3 da tensão do módulo e com diodos não entrelaçados ao redor de 1,4 V.

Geralmente, módulos com 30 ou 33 células (apenas três colunas de células interligadas em série), apresentam diodos *bypass* ligados entrelaçados e módulos com 36 células (quatro colunas de células interligadas em série) apresentam diodos *bypass* não entrelaçados, nos quais tem-se disponível as tensões nominais, conforme ligação, de 12 V ou 6 V. Nos módulos com diodos *bypass* entrelaçados, tem-se disponível apenas uma tensão, geralmente 12 V.

Nas Fig. 4 e 5, são mostradas as curvas de dois módulos (um com diodos não entrelaçados e outro com diodos entrelaçados), nas situações de sombreamento e não sombreamento de células.

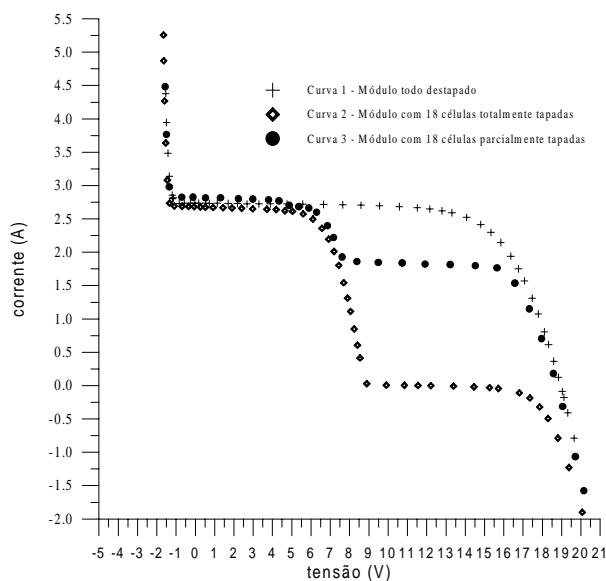


Fig. 4 Curva de módulo fotovoltaico com diodos *bypass* não entrelaçados

A ligação dos diodos *bypass* de forma convencional (não entrelaçados), onde cada diodo está ligado em paralelo com apenas um grupo de células, limita a tensão reversa de funcionamento do módulo, não deixando que as células, individualmente, dissipem uma quantidade muito grande de potência.

Quando tem-se um sombreamento total ou parcial de uma célula, por ela circulará apenas parte da corrente que pode circular pelas células não sombreadas. A outra fração de corrente circulará pelo diodo *bypass* de modo que, pelo grupo de células que não estão sombreadas, circula a soma das duas correntes mencionadas. No caso de sombreamento total de uma célula, toda a corrente que circula pelas células não sombreadas circulará também pelo diodo *bypass* que provoca uma queda de tensão de aproximadamente 0,7 V.

Na ligação de diodos entrelaçados, onde cada diodo está conectado em paralelo com dois grupos de células ligadas em série, tem-se duas situações distintas de comportamento dos diodos quando houver sombreamento de células. Estas situações são diferenciadas com relação a coluna onde está a célula sombreada.

Quando se tem uma célula da fileira central totalmente sombreada, o módulo comporta-se como se tivesse dois grupos de células e diodo *bypass* ligados em paralelo. Nesta situação, a corrente de curto-circuito tem seu valor duplicado com uma conseqüente redução da tensão de circuito aberto. Isso já não ocorre se a célula sombreada estiver colocada numa das fileiras laterais. É interessante chamar a atenção sobre os efeitos que o sombreamento parcial da fileira central de módulos com diodos de *bypass* entrelaçados podem produzir sobre o resultado em avaliações descuidadas de sistemas em operação. Muitas vezes o técnico faz uma leitura de corrente de curto-circuito e tensão, sem perceber que a poeira no módulo pode estar causando um falso aumento na corrente do mesmo.

Com os diodos entrelaçados, quando tem-se um sombreamento total de uma célula, a tensão de circuito aberto é reduzida a menos de 1/3 da tensão de circuito aberto sem sombreamento (tensão equivalente de um grupo de células em série menos a queda de tensão sobre um diodo *bypass*). Já com o uso de diodos não entrelaçados, esta tensão fica reduzida a pouco menos da metade da original, sem sombreamento.

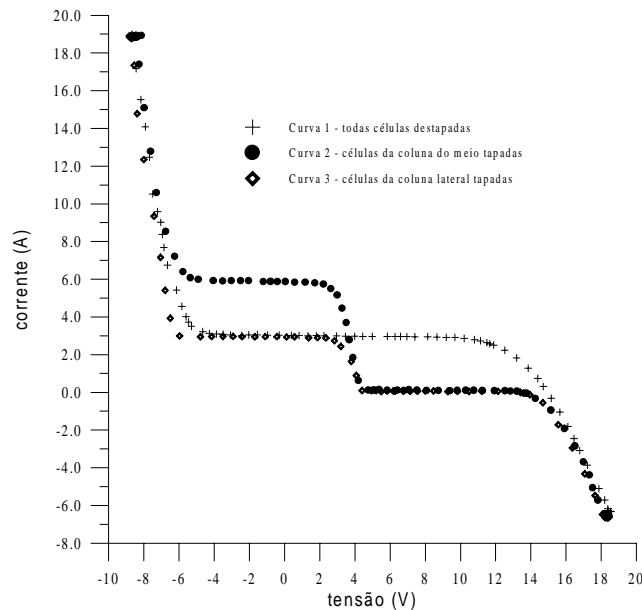


Fig. 5 Curva de módulo fotovoltaico com diodos *bypass* entrelaçados para uma irradiância de  $930 \text{ W/m}^2$  e temperatura constante de  $67.4 \text{ }^\circ\text{C}$

#### 4. CONCLUSÕES

A proteção de sistemas fotovoltaicos mais difundida e usada é através da utilização de diodos. Quando se tem módulos associados em série, a proteção é feita colocando-se em anti-paralelo com cada módulo um diodo de *bypass*. Para módulos associados em paralelo, liga-se em série com cada módulo um diodo de bloqueio. Associações fotovoltaicas série-paralelo são protegidas utilizando-se, simultaneamente, diodos de *bypass* e de bloqueio.

Dois tipos de ligações de diodos *bypass* (entrelaçados ou não entrelaçados) são bastante utilizadas e aplicadas em módulos comerciais. Os módulos que apresentam diodos *bypass* entrelaçados limitam a tensão reversa aplicada em aproximadamente  $1,4 \text{ V}$  mais  $1/3$  da tensão do módulo enquanto que os com diodos *bypass* não entrelaçados limitam ao redor de  $1,4 \text{ V}$ . Ambas as configurações de ligação dos diodos *bypass* limitam a tensão reversa a ser aplicada nos módulos e, em situações não desejadas de funcionamento do sistema (sombreamento ou defeito de um módulo), minimizam a redução do fator de forma da curva característica I-V da associação e perdas de potência.

#### 5. REFERÊNCIAS

Boylestad, R., Nashelsky, L., 1986, “Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos”, Prentice-Hall do Brasil, 3.ed., Rio de Janeiro, Brasil, 700p.

Gonzalez, C. C., Weaver, R., 1980, “Circuit Design Considerations for Photovoltaic Modules and Systems”, Proceeding of the 14<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, CA, pp. 528-535.

Gupta, A., Milnes, A. G., 1981, “Effects of Shading and Defects in Solar Cell Arrays”, Proceeding of the 15<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Orlando, FL, pp. 1111-1116.

Iliceto, A. et al, 1998, "Assessment of Blocking and Bypass Diodes Application in PV Power Plants", Anais do 2<sup>th</sup> World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, pp. 2108-2111, Vienna, Austria.

Roche, D, Outhred, H., Kaye, R. J., 1995, "Analysis and Control of Mismatch Power Loss in Photovoltaic Arrays", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 3, pp. 115-127.

Zilles, R., 1993, "Modelado de Generadores Fotovoltaicos Efectos de la Dispersion de Parametros", Tese de Doutorado, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid, España, 146p.



# **CARACTERIZAÇÃO DA BANCADA DE CIRCULAÇÃO NATURAL DE SISTEMAS DE RESFRIAMENTO DE EMERGÊNCIA EM REATORES NAVAIS E EM REATORES AVANÇADOS**

**Luiz Alberto Macedo**

**Benedito Dias Baptista Filho**

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN-CNEN/SP, Divisão de Termo-Hidráulica  
Cx. Postal 11049, CEP 05422-970, São Paulo SP, Brasil. E-mail : lamacedo@net.ipen.br

## **Resumo**

O desenvolvimento de sistemas passivos de resfriamento de emergência de reatores avançados ainda depende de investigações de alguns processos de circulação natural. A Bancada de Circulação Natural do IPEN foi concebida para a realização de estudos considerando linhas de desvio, que interligam a saída da fonte fria com a saída da fonte quente. Este trabalho, além de descrever a bancada e resumir suas características de projeto, apresenta resultados da sua caracterização hidráulica, consistindo de medidas de perda de pressão e sua correlação em termos de fatores de atrito, apresenta ainda resultados de testes de calibração do sistema de medição de potência e de vazão e, dos primeiros experimentos em circulação natural. Esses experimentos envolveram transitórios em circulação natural com a aplicação de degraus de potência. Os resultados mostraram um comportamento não linear do medidor de vazão magnético, bem como uma dependência com a temperatura do fluido. O conjunto: circuito/instrumentação/sistema de aquisição de dados é adequado para os propósitos de pesquisa de sistemas passivos de resfriamento de emergência.

**Palavras-chave:** Circulação Natural, Segurança Passiva, PWR, ALWR.

## **1. INTRODUÇÃO**

Aspectos econômicos e de segurança dirigiram o setor nuclear ao desenvolvimento de novos conceitos de reatores nucleares e de sistemas de segurança. Há alguns anos se iniciou o desenvolvimento dos conceitos de “reatores avançados,” com a introdução de aperfeiçoamentos tecnológicos, plantas com elevada padronização, redução na demanda de controle, redução na demanda de suprimento de energia elétrica de emergência, e o uso de componentes mais robustos, ou seja, imunes a falhas, conforme Layman *et al.* (1991). Na linha dos reatores de água pressurizada (PWR) destaca-se a adoção de conceitos de reatores navais militares que utilizam sistemas de resfriamento de emergência com características passivas, utilizando o fenômeno da circulação natural. O presente trabalho descreve uma bancada para experimentos em circulação natural (BCN) e resume suas características de projeto. Além disso apresenta os resultados da caracterização hidráulica da bancada, que consistiram em medidas de perda de pressão em diversos trechos, sua correlação em termos de fatores de atrito, os resultados de testes de calibração do sistema de medição de potência e o primeiro resultado de experimento em circulação natural. Esses resultados tratam de transitórios em circulação natural a baixas potências (até 2300 W), com a aplicação de degrau de potência iniciado em condições de equilíbrio. Existem diversos trabalhos sobre circulação natural, tais como apresentados por Zvirin, 1981 e Lavrador, 1994. As principais diferenças entre esses

trabalhos e os propostos para a BCN estão na utilização de linhas de desvio entre a fonte quente e a fonte fria, para controle de temperatura e, na concepção do trocador de calor. Os resultados utilizando as linhas de desvio não são apresentados nesse trabalho.

## 2. DESCRIÇÃO DA BANCADA

O Circuito de Circulação Natural apresentado em Baptista F. *et al.*(1999) e representado esquematicamente na Figura 1, foi concebido nos moldes de um sistema de remoção de calor residual de um reator PWR avançado. É composto de um aquecedor elétrico e um trocador de calor constituído por dois tubulões horizontais com um feixe vertical de tubos imersos em um tanque de água. O trocador de calor é alimentado por gravidade a partir de um reservatório elevado. Além desses componentes e da instrumentação descrita adiante, foi instalada uma bomba para realizar operações de calibração e determinação das características hidráulicas do sistema. A tubulação é de cobre, com 22 mm de diâmetro externo e 0,6 mm de espessura. O aquecedor e todas as tubulações são isolados com calhas de lã de vidro de 25 mm de espessura, encamisadas com alumínio. As válvulas instaladas nas linhas principais do circuito são do tipo esfera. Para o controle da vazão no secundário do trocador de calor foi instalada uma válvula globo e um rotâmetro devidamente calibrado.

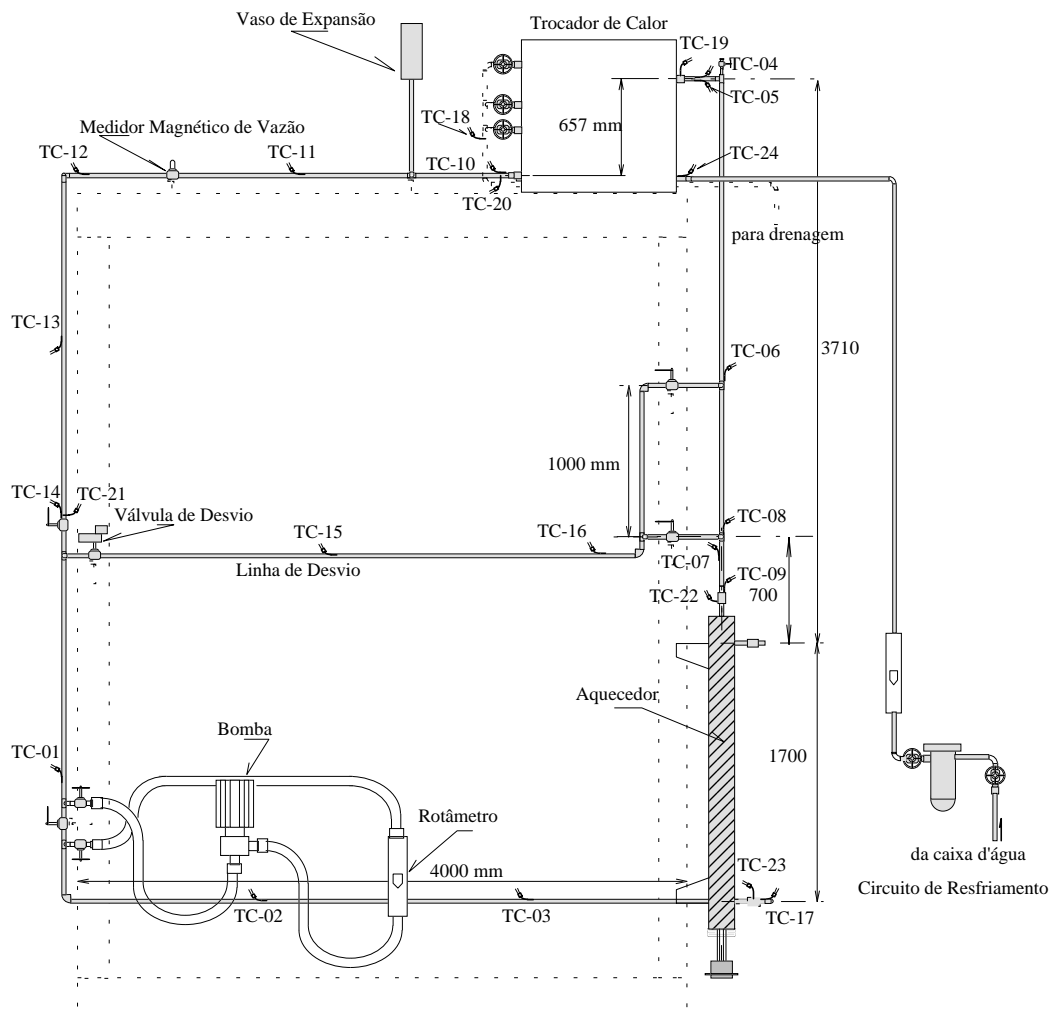


Figura 1. Esquema do Circuito de Circulação Natural

O aquecedor elétrico, projetado para uma potência máxima de 10 KW, é de aço inoxidável austenítico e possui três resistências tubulares em “U”. O trocador de calor foi totalmente construído em cobre, com dois tubulões de 1 ¾ pol., interligados por 18 tubos de 3/8 pol. imersos em um reservatório com volume de 0,202 m<sup>3</sup>. Com a finalidade de estudar o comportamento de sistemas de circulação natural com linhas de desvio foi instalada uma interligação da “perna-fria” com a “perna-quente” do circuito, contendo uma válvula esfera com atuador motorizado e duas ramificações isoladas por meio de válvulas esfera. Na linha principal do circuito, foi instalado um medidor de vazão tipo magnético ajustado para a faixa de vazão máxima de 0,1 kg/s. Ao longo do circuito foram instalados 24 termopares (TC), sendo 5 do tipo T de 1,5 mm e 19 do tipo K de 0,5 mm de diâmetro. O acompanhamento e registro das temperaturas e da vazão é feito por um sistema de aquisição de dados em plataforma PC. Ao longo do circuito foram ainda instaladas 4 tomadas de pressão que permitem determinar os coeficientes de perda de carga de trechos do sistema em condições de circulação forçada, utilizando um transmissor de pressão diferencial tipo capacitivo. O controle de potência é realizado por meio de uma fonte de alimentação variável. O controlador de potência pode receber o sinal de controle advindo de uma fonte externa ou de uma saída do sistema de aquisição de dados que é constituído por uma placa de aquisição de dados, um computador (PC), um bloco terminal isolado, um módulo condicionador de sinais e um bastidor.

### 3. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA

A caracterização hidráulica do circuito foi feita circulando-se água ao longo de cada trecho, conforme Figura 2, onde se queria determinar a perda de carga ( $\Delta P$ ) para se determinar coeficientes de perda de pressão ou de atrito. As medidas de  $\Delta P$  nos diversos trechos foram realizadas com um transmissor de pressão diferencial na faixa de 0 a 130 mmH<sub>2</sub>O. Com as quatro tomadas de pressão foram selecionados onze (11) trechos de interesse. Os comprimentos equivalentes para perda de pressão ( $L_{eq}$ ) obedecem a:

$$\Delta P = f L_{eq} / D_h \rho v^2 / 2 \quad (1)$$

onde  $\Delta P$  é a perda de pressão (N/m<sup>2</sup>),  $f$  o fator de atrito,  $L_{eq}$  o comprimento equivalente (m),  $D_h$  o diâmetro hidráulico (m),  $\rho$  a massa específica da água (kg/m<sup>3</sup>) e  $v$  a velocidade de escoamento (m/s).

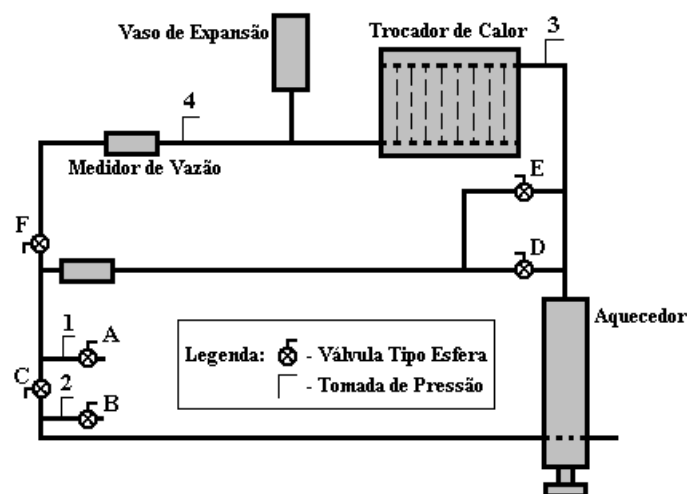


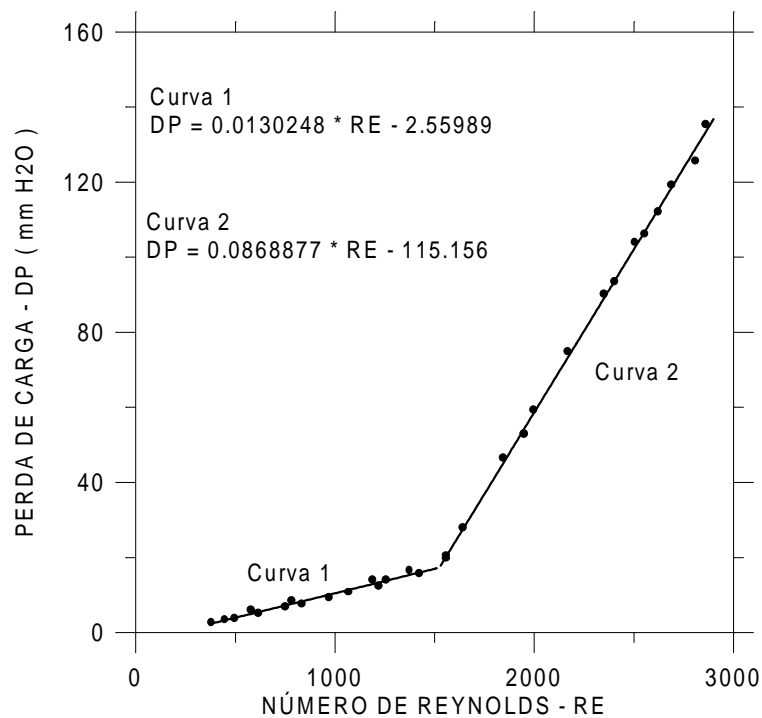
Figura 2 - Elementos para Caracterização Hidráulica da Bancada

Para correlacionar o fator de atrito ( $f$ ) foi seguido o seguinte procedimento: em cada trecho selecionado foi variada a vazão, medida por meio de um rotâmetro previamente calibrado; a partir do início da faixa de medição do transmissor de pressão, iniciou-se o registro da correspondente perda de pressão; em cada condição foi registrada a temperatura da água para determinação das suas propriedades físicas; conhecida a vazão ( $Q$ ), a perda de carga ( $\Delta P$ ), e as propriedades da água e, para o comprimento equivalente de cada trecho ( $L_{eq}$ ), baseados em dados tabelados conforme Crane (1977), foi utilizada a Eq.(1) para se obter o valor do fator de atrito ( $f$ ). Esse procedimento foi repetido para cada trecho (Tabela 1).

**Tabela 1 - Trechos Selecionados da Bancada**

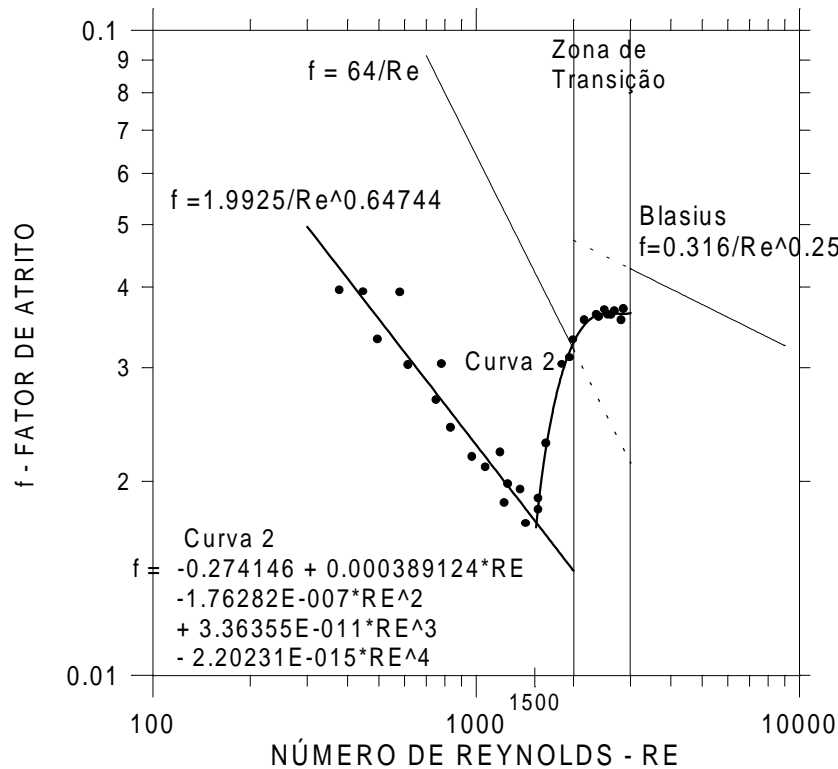
Trecho	Vazão (kg/h)	Válvula A	Válvula B	Válvula C	Válvula D	Válvula E	Válvula F
2 - 1	23 - 167	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta
2 - 3	25 - 207	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta
3 - 4	25 - 206	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta
4 - 1	26 - 123	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta
1 - 2	25 - 167	Aberta	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada
2 - D - 1	25 - 210	Aberta	Aberta	Fechada	Aberta	Fechada	Fechada
2 - E - 1	28 - 220	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Aberta	Fechada

A Figura 3 exemplifica o correlacionamento da perda de carga ( $\Delta P$ ) com o Número de Reynolds ( $Re$ ) apresentando os resultados para o trecho 2-1 da Bancada. Podemos observar a mudança de comportamento da perda de carga no ponto em torno de  $Re \approx 1500$ .



**Figura 3 - Gráfico Perda de Carga vs. Número de Reynolds – Trecho 2 – 1**

Na Figura 4 são mostrados os resultados na forma de correlação do fator de atrito. Observa-se que os testes atingem a zona de transição. Na faixa de regime laminar foi obtido um fator de atrito um pouco inferior ao da curva de Hagen-Poiseuille ( $f=64/Re$ ). Na zona de transição ( $Re = 2000$  a  $3000$ ) a curva tende a manter o comportamento esperado porém atingindo valores pouco inferiores aos da curva de Blasius.



**Figura 4 - Gráfico Fator de Atrito (f) vs. Número de Reynolds (Re) – Trecho 2-1**

As correlações obtidas permitiram observar que o coeficiente de atrito é intrínseco à bancada, sendo dependente de características geométricas. Conclusões similares foram apresentadas por Zvirin, 1981.

#### 4. CALIBRAÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA

A potência elétrica é registrada a partir de um sinal enviado pelo variador de potência ao sistema de aquisição de dados, sendo necessário uma calibração feita por meio de balanço térmico no aquecedor, em regime permanente. Foram realizados vários testes nos quais, para uma dada vazão e após constatação de regime permanente, eram registradas as temperaturas de entrada e saída do fluido no aquecedor (termopares TC-23 e TC-22 da Figura 1). Uma vez conhecidas as temperaturas são calculadas as entalpias do fluido na entrada e saída do aquecedor, e determinada a potência térmica. A Tabela 2 e a Figura 5 mostram os resultados dos testes que permitiram estabelecer uma relação matemática entre a potência elétrica medida (P) e potência térmica (PT) correspondente:

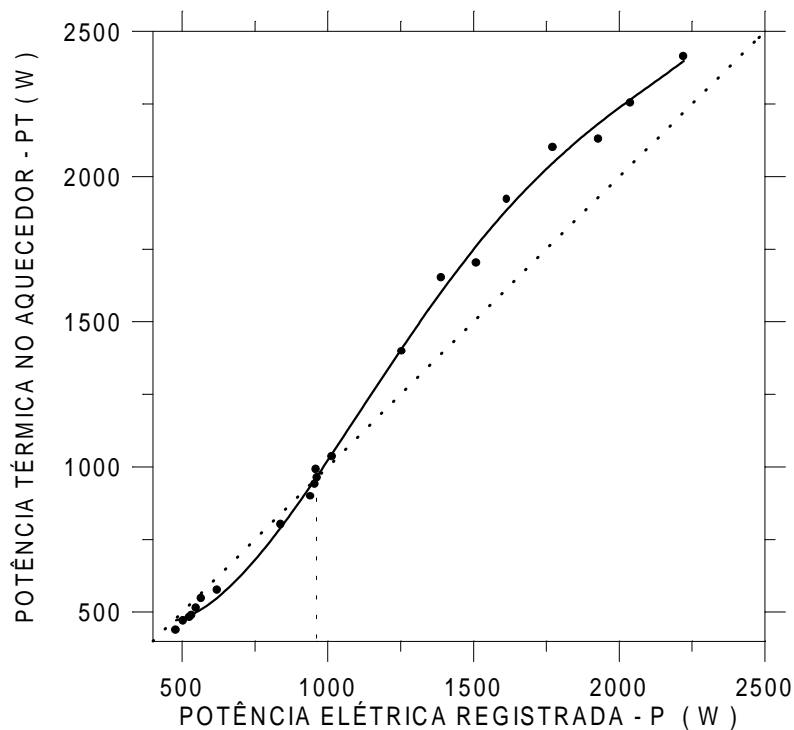
$$PT = 1101,11 - 3,36037P + 0,0053635P^2 - 2,46258 \cdot 10^{-6} P^3 + 3,81456 \cdot 10^{-10} P^4 \quad (2)$$

#### 5. CALIBRAÇÃO DO MEDIDOR DE VAZÃO

Observou-se que o “zero” do medidor magnético de vazão depende da temperatura do sensor (há um “drift”). Apesar de pequena, essa variação é importante na faixa de vazão obtida em circulação natural. Para essa calibração foram realizados testes variando a temperatura da água, e correlacionando os resultados com a temperatura da superfície externa do tubo, lida através do termopar TC-11. Esta curva de calibração é mostrada na Figura 6.

**Tabela 2 - Medidas de Potência Elétrica e Potência Térmica no Aquecedor**

Vazão Calibrada (kg/h)	Potência Elétrica (W)	Potência Térmica (W)	Vazão Calibrada (kg/h)	Potência Elétrica (W)	Potência Térmica (W)
49.57142	478,8758	438,8363	76.62865	2037,572	2253,46
40.55234	526,3383	482,1864	40.55234	505,4192	468,8121
55.58414	548,757	513,5013	49.57142	565,3466	546,6509
68.61169	531,8062	488,739	45.56294	1509,442	1702,605
68.61169	622,0453	576,5872	59.59262	1930,816	2127,695
68.61169	839,3052	801,3026	89.65622	2221,587	2413,641
78.6329	957,3925	940,3346	90.65834	1255,77	1397,601
78.6329	1015,583	1035,852	92.66257	1391,145	1652,478
37.54598	941,5403	898,6062	92.66257	1614,425	1920,87
49.57142	960,7579	992,1406	92.66257	1771,631	2101,329
77.63078	964,6798	962,2681			

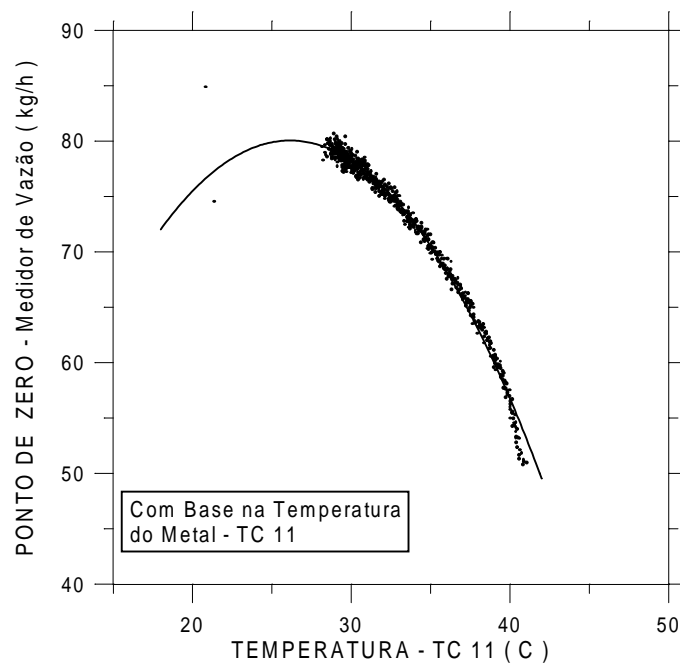


**Figura 5 - Curva de Calibração de Potência da Bancada**

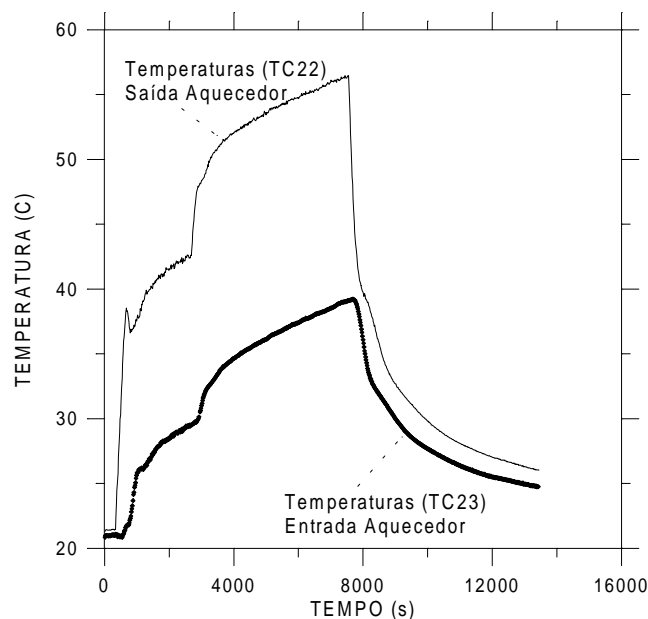
## 6. EXPERIMENTO EM CIRCULAÇÃO NATURAL

Neste item é apresentado o primeiro experimento em circulação natural realizado após a calibração. O experimento consistiu de dois transitórios de aumento de potência, partindo-se da condição inicial de fluido parado na temperatura ambiente, e concluído antes de ser atingido o regime permanente com o desligamento do aquecedor. O primeiro degrau de potência foi de aproximadamente 1.500 W e o segundo elevou a potência a aproximadamente 2.200 W. Após duas horas do início o aquecedor foi desligado, sendo mantido o resfriamento e registrados os dados por mais 1:40h. As temperaturas registradas na entrada e saída do aquecedor ao longo do transitório são mostradas na Figura 7. Os valores registrados de potência e vazão, bem como a potência térmica fornecida ao fluido pelo aquecedor, calculada

por meio de balanço térmico, são mostrados na Figura 8. A potência térmica calculada, mostrada no diagrama da Figura 8, confirma que o sistema não atingiu regime permanente.



**Figura 6 - Calibração do Ponto de Zero do Medidor de Vazão**

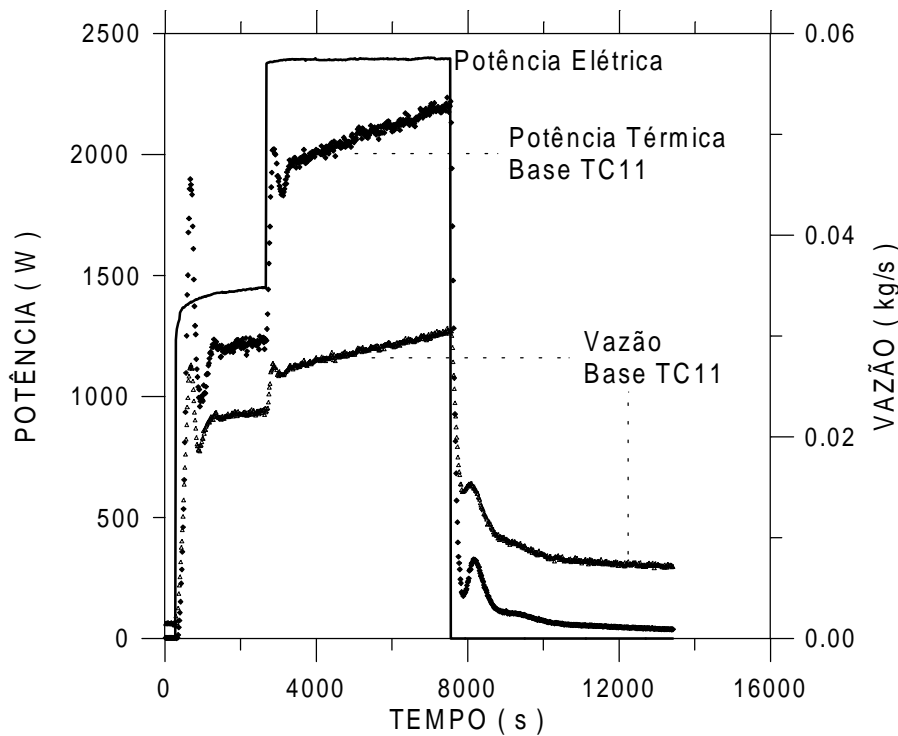


**Figura 7 – Temperaturas de Entrada e Saída do Aquecedor ao longo do Transitório**

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na operação em circulação natural, após a calibração da bancada, demonstram que a instrumentação do circuito está adequada para os seus propósitos experimentais. A potência do aquecedor em conjunto com a altura total do circuito e o diâmetro da tubulação, são adequados para a obtenção de vazões facilmente mensuráveis na faixa especificada para o medidor de vazão. Apesar de não ter sido atingido o regime permanente, mas considerando o fato de ter sido utilizada uma vazão bem inferior que a

máxima possível para o secundário, pode ser previsto que a capacidade do trocador de calor é adequada para a realização dos experimentos idealizados. O sistema de controle de potência e o sistema de aquisição de dados operaram adequadamente, demonstrando precisão e estabilidade. Esta fase inicial demonstrou que medidores magnéticos de vazão são adequados para instalações experimentais em circulação natural, desde que tomados cuidados adicionais para sua calibração em função da temperatura. Essa conclusão deu início a uma nova pesquisa sobre utilização de medidores magnéticos sob condições de temperatura variável. Os resultados confirmaram ainda conclusões de outros autores quanto à diferença dos fatores de atrito, comprovando a necessidade de caracterização hidráulica de cada circuito experimental.



**Figura 8 - Comparação entre Potências e Vazão ao longo do Transitório**

## 6. REFERÊNCIAS

- Baptista F., B.D., Gonçalves, I.M.P., Macedo, L.A., Almeida, J.C. e Santos, S.C., 1999, “Circuito Experimental para Pesquisa de Sistemas de Resfriamento de Emergência de Reatores Avançados”, VII Congresso Geral de Energia Nuclear – CGEN, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- Crane Co., 1977, “Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipes”, England.
- Layman, W. H., Marston, T. U. e Sugnet, W. R., 1991, “Update on the ALWR Program: The Future of Nuclear Power in the USA”, Nuclear Engineering International, Advanced Reactors, USA, pp.23-31.
- Lavrador, M. B. , 1994, “Análise Experimental de Circulação Natural em um Circuito Fechado”, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Zvirin, Y., 1981, “A Review of Natural Circulation Loops in Pressurized Water Reactors and Others Systems” , Nuclear Engineering and Design 67, p. 203-225, North Holland Publishing Company.