

ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM COLETOR SOLAR ARMAZENADOR

Daniel Sampaio Figueira

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - Via do Conhecimento km 01, Caixa Postal 571, 85501-970, Pato Branco, PR.
E-mail: dfigueira@cpovo.net

Arno Krenzinger

UFRGS, Escola de Engenharia – PROMEC – Rua Sarmento Leite, 425, 90050-170, Porto Alegre, RS.
E-mail: arno@mecanica.ufrgs.br

Horácio Antonio Viello

UFRGS, Depto de Engenharia Mecânica, Rua Sarmento Leite, 425, 90050-170, Porto Alegre, RS.
E-mail: vielmoh@mecanica.ufrgs.br

Resumo. O propósito deste trabalho é apresentar um estudo experimental e numérico de um coletor solar armazenador de energia via calor sensível, tendo ar como fluido de trabalho. Para atingir este objetivo, o trabalho é dividido em duas etapas. A primeira consiste na montagem de um sistema de aquisição de dados interfaceado a um microcomputador via serial RS232. Nessa etapa, foram instalados 16 sensores de circuito integrado para temperatura, 8 sensores resistivos PT100 e dois sensores de radiação solar. A segunda etapa consiste na simulação numérica, via Volumes Finitos, do comportamento térmico dos diversos elementos constituintes do sistema. Tratando-se de um modelo transiente, os dados de entrada são o campo inicial de temperaturas da massa armazenadora de energia, a temperatura do ar ambiente externo, as descargas e temperaturas de ar nos canais do coletor e a radiação solar incidente. Posteriormente, como condições de contorno, são fornecidas a temperatura ambiente e a radiação solar incidente, ao longo do tempo. Através da montagem experimental, obtiveram-se várias curvas da temperatura do ar aquecido fornecido pelo sistema, a transmitância das coberturas e os gradientes térmicos ao longo da massa armazenadora. Através da simulação numérica é possível prever o campo de temperatura em qualquer instante de tempo e a vazão do ar fornecida pelo sistema.

Palavras chave: energia solar, radiação solar, coletor de aquecimento de ar, armazenamento de energia

1. Introdução

A principal dificuldade do uso da energia solar consiste no seu armazenamento térmico, pois durante o dia, quando a energia é captada, é o período de menos necessidade de calor e à noite não há mais energia solar disponível. Uma das soluções adotadas para esse problema consiste em usar na construção elementos com elevada capacidade térmica.

Como uma opção para resolver o desconforto térmico produzido pela carência ou excesso de energia solar, foi construído no LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR -UFRGS- um sistema passivo mostrado na Fig. 1. Esse sistema não requer o uso da eletricidade e nem partes móveis para operação. O projeto e os primeiros ensaios experimentais estão descritos em Corbella et al., 1981, e uma análise numérica do coletor armazenador e do prédio em Viello, 1981.

O sistema consiste em uma parede inclinada, espessa, pintada de preto e um vidro colocado de modo a deixar um espaço para a circulação de ar. A radiação solar aquece a parede preta e essa aquece o ar que é introduzido no interior do prédio por termossifão. A energia absorvida pelo ar é disponível para uso imediato. O tempo necessário para o calor atravessar a parede depende da difusividade térmica da pedra, da diferença de temperatura entre as superfícies exteriores e interiores da parede e de sua espessura. De acordo com Baruch, 1998, para cada 10 cm de concreto existe um atraso nos picos de temperatura de 2 a 2,5 horas.

O propósito deste trabalho é apresentar uma análise experimental e numérica do comportamento térmico desse sistema de aquecimento solar de ambientes. Para obter a solução numérica foi discretizada, pelo Método dos Volumes Finitos, a equação de difusão de calor transiente em duas dimensões. Na formulação das equações lineares optou-se pelo emprego das diferenças centrais no espaço e formulação explícita no tempo.

2. Funcionamento do Sistema

O Coletor Solar está instalado na face norte do prédio do Laboratório de Energia Solar da UFRGS, possui cerca de 24 m², é constituído de uma massa espessa de concreto (inclinada 50°) com uma superfície absorvente de tijolo e possui uma cobertura dupla de vidro colocada de modo a deixar um espaço para a circulação de ar. A Figura 1 ilustra, em escala, o desenho do sistema.

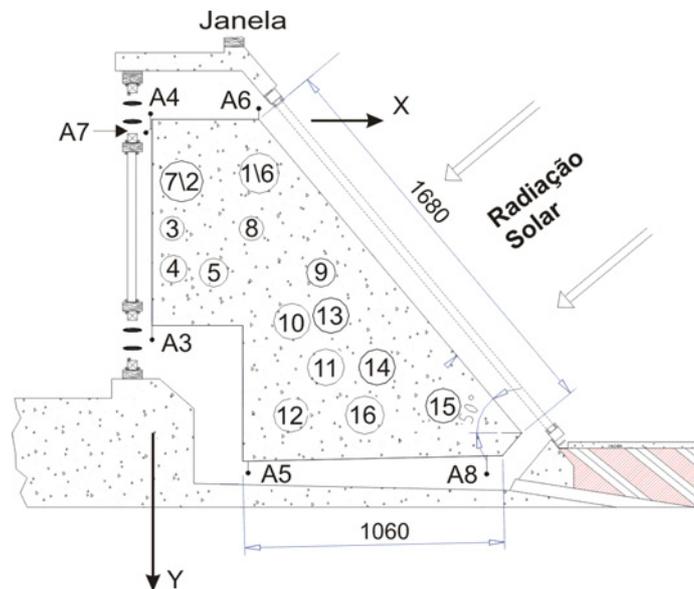


Figura 1. Coletor Solar com distâncias em mm e as posições internas dos sensores de temperatura CI e PT100.

Para um melhor entendimento de seu funcionamento é importante conhecer as características físicas do vidro. O vidro comum, utilizado no coletor acumulador, comporta-se de maneira diferente em relação aos comprimentos de onda da radiação que incide sobre a sua superfície. De acordo com Duffie e Beckman, 1991, o vidro é bastante transparente à radiação incidente com comprimentos de onda de $0,3 \mu\text{m}$ a $2,5 \mu\text{m}$ (espectro solar) e altamente absorvedor para comprimentos de onda próximos e maiores que $5 \mu\text{m}$ (infravermelho). Devido a esta propriedade seletiva, o vidro absorve a radiação emitida pela superfície coletora do sistema. Tendo o vidro a característica de ser bom absorvedor desta radiação, é também bom emissor. A energia absorvida pelo vidro e pela superfície coletora aquece o ar interno do duto contribuindo para um aumento da temperatura de todos os elementos internos da construção. Desta forma, o vidro além de permitir que a energia solar incidente seja transmitida à superfície absorvedora, reduz a perda de calor por radiação emitida por esta superfície, e impede as perdas por convecção pela ação do vento.

Levando em conta o valor da difusividade térmica dos materiais, o sistema pode ser dimensionado de tal forma que a máxima temperatura da superfície absorvedora e a máxima temperatura da parede interna do mesmo estejam defasadas em algumas horas. Dessa maneira a máxima entrega de calor para o ambiente começa após cessar a radiação solar.

3. Montagem Experimental

3.1. Características dos Sensores Utilizados

Na montagem experimental foram usados dois tipos de sensores de temperatura: resistência de platina PT100 e sensor eletrônico LM35DZ. O princípio de funcionamento de um PT100 se baseia na propriedade que apresenta a maioria dos metais de variar sua resistência elétrica ao variar sua temperatura. De acordo com Holman, 1971, os sensores de platina satisfazem uma função onde a resistência varia linearmente com a temperatura, ou seja, $R=f(T)$:

$$R = R_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (1)$$

onde: R_0 é a resistência do PT100 na temperatura de referência, T_0 é a temperatura de referência e α é o coeficiente térmico. De acordo com Preobrazhenski, 1980, a maioria dos metais puros tem um coeficiente térmico positivo de resistência elétrica entre $0,004 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $0,006 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

O PT100 apresenta inúmeras qualidades, tais como: alto grau de precisão ao medir a temperatura, não são oxidáveis, possuem boa resistência mecânica, alta reprodutibilidade dos valores a serem medidos, usando circuito adequado podem ser usados a grandes distâncias, são mais estáveis que os termopares, sua curva de resistência elétrica em função da temperatura é mais linear que os termopares e facilidade para montar um sistema de aquisição de dados com vários sensores.

Todos os sensores PT100 foram conectados no multiplexador através do sistema a quatro fios. O uso de tal técnica se deve ao fato de que a medida de resistência a quatro fios é o método que fornece os resultados mais exatos para pequenas resistências. Através desse sistema, os efeitos das resistências dos fios, cabos, do multiplexador e dos contatos são automaticamente reduzidos. Essa técnica é adotada, normalmente, quando são necessários longos cabos entre o sensor e o conversor A/D.

Para medir a temperatura do interior da massa acumuladora térmica e da sua superfície, foram utilizados sensores de circuito integrado LM35DZ. Esses sensores apresentam as seguintes características: boa repetitividade ao medir temperatura, alcance de 0°C até +100°C, facilidade para montar um sistema de aquisição de dados, operam de 4 a 30 volts, trabalham com menos de 60 μ A de corrente, baixo aquecimento: cerca de 0,08°C.

Para medir a radiação solar que atravessa a cobertura e a radiação incidente na cobertura foram usados dois sensores fotovoltaicos como piranômetros. Zanesco, 1991, demonstrou que a qualidade do piranômetro fotovoltaico construído no Laboratório de Energia Solar classifica o mesmo como de primeira classe. Nesta montagem experimental, foram utilizados esses piranômetros com calibração obtida pela comparação com um piranômetro Eppley modelo PSP, considerado como padrão secundário.

Para a medida das diversas temperaturas e radiação solar envolvida foi utilizado um sistema de aquisição de dados Agilent 34970A, equipado com multímetro interno que permite leituras de até 6 ½ dígitos e interfaceado a um microcomputador via porta serial RS232. O sistema permite ler até 60 canais divididos em 3 multiplexadores com 20 canais cada. É possível ler até 600 dados por segundos em um canal ou escanear até 250 canais por segundos. O sistema de aquisição de dados é comandado através de um software desenvolvido pela HP. Esse software permite que seja feita a configuração individual de cada canal. Os dados são coletados com intervalos de um minuto e armazenados no disco rígido.

3.2. Descrição

Foram instalados 16 sensores de temperatura CI no interior da massa armazenadora térmica. Para inserir um sensor, o mesmo é fixado na extremidade de uma haste de madeira e colocado no interior de um tubo de pvc. Durante a construção do sistema foram deixados vários furos em posições internas conhecidas. A Figura 1 mostra as diversas posições internas ocupadas por cada sensor CI. Foram instalados 8 sensores PT100 que estão assim identificados: “Ti” monitora a temperatura interna do laboratório, “Te” monitora a temperatura externa do laboratório e os outros “A3”, “A4”, “A5”, “A6”, “A7” e “A8” ocupam posições ao longo do duto, conforme mostra a Fig. 1. Existem ainda mais 3 sensores CI que monitoram as temperaturas externa e interna do vidro, e a temperatura da superfície coletora. Além dos sensores citados, há 2 sensores de radiação solar, um na parte externa da cobertura e outro na parte interna. Através da radiação medida por estes sensores pode-se determinar a transmitância do sistema de dupla cobertura. Os 16 sensores CI, e os 8 PT100 estão discriminados na Tab.1, com seu respectivo canal e posição

Tabela 1. Numeração dos sensores de temperatura com seu respectivo canal e posição.

CI	Canal	Posição
1	201	P1
2	202	P2
3	203	P4
4	210	P5
5	211	P6
6	213	P7
7	217	P8
8	204	P9
9	205	P10
10	206	P12
11	305	P13
12	215	P14
13	207	P15
14	208	P16
15	212	T1
16	216	Vi1

PT100	Canal	Posição
1	101	Ti
2	102	Te
3	103	A3
4	104	A4
5	105	A5
6	106	A6
7	107	A7
8	108	A8

4. Método dos Volumes Finitos

O método numérico adotado para integrar as equações diferenciais que descrevem o sistema foi o Método dos Volumes Finito, conforme descrito por Patankar, 1980.

A primeira malha adotada para simular o comportamento térmico do sistema está representada na Fig. 2. Ao todo foram 3 malhas. A parte hachurada da figura apresenta isolamento térmico. Foi empregada a técnica de volumes parciais na fronteira.

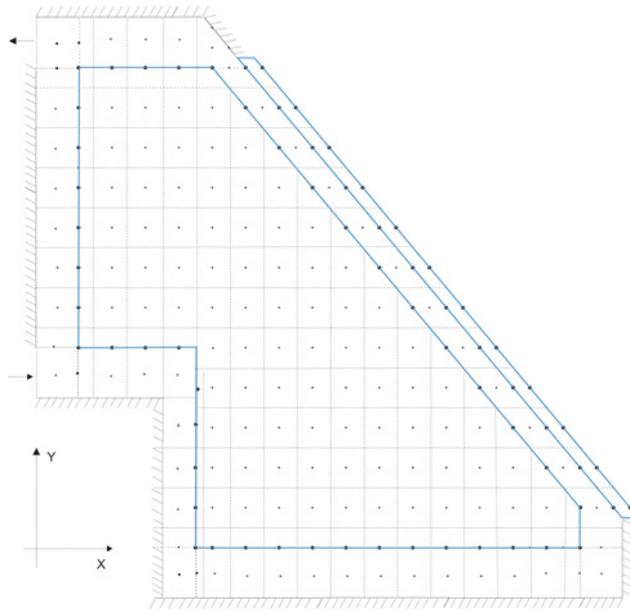


Figura 2. Malha computacional adotada para a solução bidimensional.

4.1. Formulação do Problema Numérico

O problema consiste em determinar os campos de temperatura, em intervalos regulares de tempo. Os volumes da malha acima possuem as seguintes dimensões: 0,10m x 0,12 m. Usando essas dimensões está assegurado que a superfície coletora forma um ângulo de 50,2° com a horizontal. Tendo em vista que o sistema possui uma superfície inclinada de 50°, esse modelo se ajusta satisfatoriamente. Neste modelo adotado, considera-se a difusividade térmica do concreto ciclópico (predominância de granito, por sua relativamente grande difusividade térmica), $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e as coberturas sem capacidade térmica.

A equação geral em coordenadas cartesianas, em duas dimensões, com termos advectivos, difusivos e fonte é

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho c_p u T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho c_p v T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S \quad (2)$$

onde k é a condutividade térmica do material, ρ é a sua massa específica, c_p o calor específico à pressão constante, u é a componente da velocidade na direção x , v é a componente da velocidade na direção y e S é o termo fonte.

Na massa acumuladora térmica - concreto, tem-se somente difusão de calor, portanto os únicos termos que sobram são o difusivo e o transiente. Considera-se um sólido homogêneo com calor específico, condutividade térmica e massa específica constante, o resultado é a equação de Fourier para duas dimensões:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Observe na Fig. 2 que a massa acumuladora térmica está limitada por diversos canais, trocando calor por convecção com o ar que flui através deles. Esses canais obedecem a seguinte equação:

$$\dot{m} c_p \frac{\partial T}{\partial x} - h \Delta z (T_s - T_{ar}) = 0 \quad (4)$$

onde \dot{m} indica a descarga de ar no canal, c_p é o calor específico à pressão constante, h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, Δz é a profundidade do canal – considerado unitário neste modelo, T_s é a temperatura da superfície da massa acumuladora na fronteira com o canal e T_{ar} é a temperatura média do ar.

4.2. A Integração das Equações Diferenciais.

A Figura 3 representa um volume genérico do interior da massa acumuladora térmica com seus respectivos vizinhos. Considera-se que a profundidade, Z , possui dimensão unitária, desta forma, a área de troca de calor entre “P”

e “E” é Δy , o mesmo ocorre entre “P” e “W”. A área de troca de calor entre “P” e “N” é Δx , o mesmo ocorre entre “P” e “S”. Observe que as letras minúsculas “n” e “s” são as faces das fronteiras de P ao longo de eixo y e que as letras minúsculas “w” e “e” são as faces das fronteiras de P ao longo do eixo x.

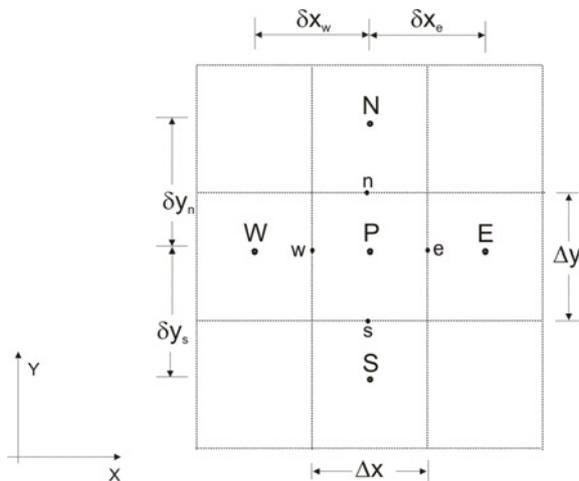


Figura 3. Volume genérico do interior da massa acumuladora térmica

Integrando a Eq. 3, sobre um volume de controle “P” genérico, mostrado na Fig. 3, ao longo de um intervalo de tempo de t a $t+\Delta t$:

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{dT}{dx} \Big|_e - \frac{dT}{dx} \Big|_w \right] \Delta y dt + \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{dT}{dy} \Big|_n - \frac{dT}{dy} \Big|_s \right] \Delta x dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \right] \Delta x \Delta y dt \quad (5)$$

As derivadas interiores podem ser avaliadas nas faces entre as fronteiras do volume P, ao adotar-se um perfil linear de temperaturas, da seguinte forma:

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{(T_E - T_P)}{\delta x_e} - \frac{(T_P - T_W)}{\delta x_w} \right] \Delta y dt + \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{(T_N - T_P)}{\delta y_n} - \frac{(T_P - T_S)}{\delta y_s} \right] \Delta x dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \right] \Delta x \Delta y dt \quad (6)$$

Neste ponto é necessário assumir uma hipótese de como as temperaturas T_P , T_E , T_W , T_S e T_N variam no intervalo de tempo de t a $t+\Delta t$. Será usada a hipótese que a temperatura é constante ao longo do intervalo de integração Δt , método totalmente explícito. Para resolver o sistema de equações algébricas lineares resultante é útil escrever a solução da equação acima da seguinte maneira:

$$a_P^0 T_P = a_E T_E^0 + a_W T_W^0 + a_S T_S^0 + a_N T_N^0 + (a_P^0 - a_E - a_W - a_S - a_N) T_P^0 \quad (7)$$

onde

$$a_E = \frac{k \Delta y}{\delta x_e}, \quad a_W = \frac{k \Delta y}{\delta x_w}, \quad a_S = \frac{k \Delta x}{\delta y_s}, \quad a_N = \frac{k \Delta x}{\delta y_n} \quad \text{e} \quad a_P^0 = \frac{\rho c_P \Delta x \Delta y}{\Delta t}$$

Onde o expoente “0” nos símbolos das temperaturas refere-se ao valor da temperatura no passo de tempo anterior. Uma vez conhecendo-se as propriedades térmicas do concreto, estabelecendo-se um campo de temperatura inicial e definindo-se um passo de tempo (Δt), pode ser resolvida a Eq. 7.

Tendo em vista que as fronteiras apresentam meio volume finito, com condição de contorno de 3ª espécie, será mostrada uma fronteira genérica, com exceção da fronteira da superfície coletora que apresenta trocas térmicas por radiação com a cobertura. A Figura 4 mostra um volume genérico da fronteira com seus respectivos vizinhos. Observe que o volume “S” representa um volume genérico do canal.

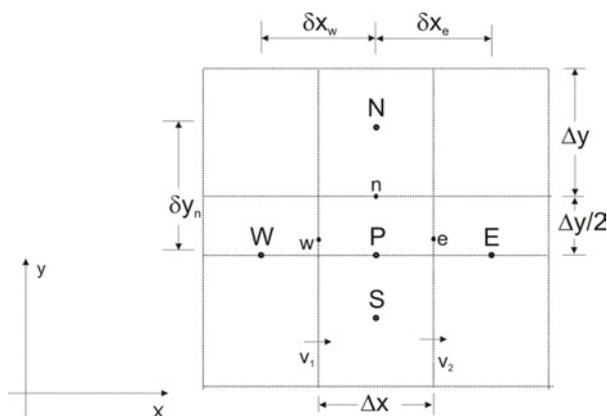


Figura 4. Volumes da fronteira do Coletor Solar com seus respectivos vizinhos

Integrando a equação de Fourier sobre o volume genérico P, da Fig. 4, ao longo de um intervalo de tempo de t a $t+\Delta t$, obtém-se:

$$\int_t^{t+\Delta t} \left[\left. \frac{dT}{dx} \right|_e - \left. \frac{dT}{dx} \right|_w \right] \Delta y dt + \int_t^{t+\Delta t} \left[\left. \frac{dT}{dy} \right|_n - \left. \frac{dT}{dy} \right|_s \right] \Delta x dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \right] \Delta x \Delta y dt \quad (8)$$

Igualando-se os fluxos de calor condutivo com o convectivo na fronteira, obtém-se:

$$q_s = k \left. \frac{dT}{dy} \right|_s = \frac{k \Delta x}{\delta y_n} (T_N - T_P) = h \Delta x (T_P - T_S) \quad (9)$$

onde h é o coeficiente médio de troca de calor por convecção entre o ar que está fluindo pelo canal e o volume pertencente a massa acumuladora térmica. Resolvendo as integrais da Eq. 8 e substituindo todos os fluxos de calor inclusive o convectivo da Eq. 9, obtém-se:

$$\left[\frac{k \Delta y (T_E^t - T_P^t)}{2 \delta x_e} - \frac{k \Delta y (T_P^t - T_W^t)}{2 \delta x_w} + \frac{k \Delta x (T_N^t - T_P^t)}{\delta y_n} - h \Delta x (T_P^t - T_S^t) \right] \Delta t = \frac{\Delta x \Delta y \rho c_P}{2} (T_P^{t+\Delta t} - T_P^t) \quad (10)$$

Seguindo a mesma metodologia proposta por Patankar, 1980, escreve-se a Eq. 10 da seguinte forma:

$$a_P^0 T_P = a_E T_E^0 + a_W T_W^0 + a_S T_S^0 + a_N T_N^0 + (a_P^0 - a_E - a_W - a_S - a_N) T_P^0$$

onde:

$$a_E = \frac{k \Delta y}{2 \delta x_e}, \quad a_W = \frac{k \Delta y}{2 \delta x_w}, \quad a_S = h \Delta x, \quad a_N = \frac{k \Delta x}{\delta y_n} \quad e \quad a_P^0 = \frac{\rho c_P \Delta x \Delta y}{2 \Delta t}$$

As equações dos canais são obtidas a partir da integração da Eq. 4. Tendo em vista que os canais verticais e horizontais apresentam equações similares será mostrado um canal genérico, exceção ao canal sob a 1ª cobertura.

A Figura 5 mostra um volume genérico dos canais – verticais e horizontais - com seus respectivos vizinhos.

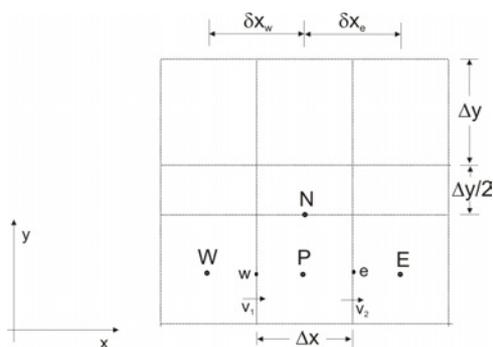


Figura 5. Volumes genéricos do canal com seus respectivos vizinhos

Integrando a Eq. 4, sobre um volume de controle “P” genérico, mostrado na Fig. 5 e lembrando que “ Δx ” é área de troca de calor por convecção entre o volume “P” e o volume “N”, para uma profundidade unitária, obtém-se:

$$\dot{m} c_p (T_e^t - T_w^t) - h \Delta x (T_N^t - T_P^t) = 0 \quad (11)$$

Neste modelo supõe-se que a variação de temperatura ao longo do canal seja linear, desta forma pode-se afirmar que:

$$T_P^t = \frac{T_e^t + T_w^t}{2} \quad (12)$$

Substituindo a Eq. 12 na Eq. 11 e reescrevendo-a na forma numérica:

$$a_P^0 T_P^0 = a_N T_N^0 + (B + C + D) T_w^0 \quad (13)$$

onde:

$$a_N = 2\Delta x h, \quad B = -\Delta x h, \quad C = 2\dot{m} c_p, \quad D = -B + C \quad \text{e} \quad a_P^0 = 2D$$

A Figura 6 mostra um volume genérico do canal sob a 1ª cobertura com seus respectivos vizinhos. Observe que o volume “P”, pertencente ao canal, troca calor por convecção com os volumes “W” e “E”.

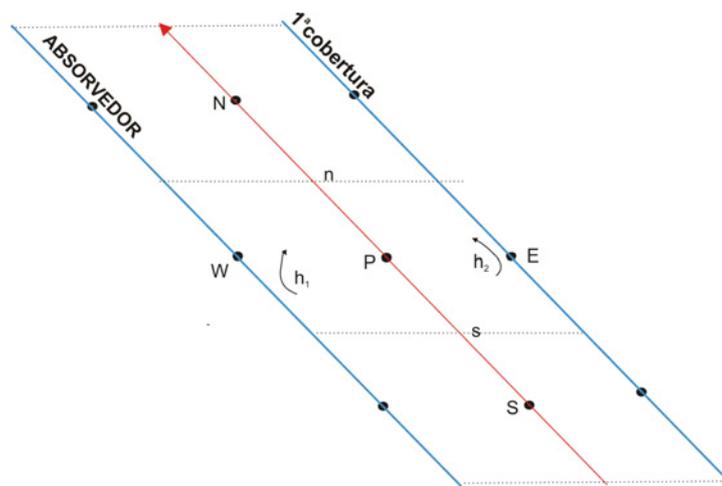


Figura 6. Volumes genéricos do canal sob a 1ª cobertura com seus respectivos vizinhos

Fazendo um balanço de energia em termos de fluxo, para um volume genérico P, obtém-se:

$$A_{50} h_1 (T_w^t - T_P^t) + A_{50} h_2 (T_E^t - T_P^t) = \dot{m}_H c_p (T_n^t - T_s^t) \quad (14)$$

onde:

$$A_{50} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \quad h_1 \text{ é o coeficiente de troca de calor por convecção entre o ar que flui pelo canal e a superfície}$$

absorvedora, h_2 é o coeficiente de troca de calor por convecção entre o ar que flui pelo canal e a 1ª cobertura e \dot{m}_H é a descarga de ar nesse canal.

A variação de temperatura ao longo do canal é linear, desta forma pode-se afirmar que:

$$T_P^t = \frac{(T_n^t + T_s^t)}{2} \quad (15)$$

Substituindo-se a equação 15 na equação 14 e explicitando-se o T_n^t obtém-se:

$$T_n^t = \left[\frac{A_{50}h_1(T_W^t - 0.5T_s^t) + A_{50}h_2(T_E^t - 0.5T_s^t) + \dot{m}_H c_p T_s^t}{0.5A_{50}h_1 + 0.5A_{50}h_2 + \dot{m}_H c_p} \right] \quad (16)$$

5. Resultados Experimentais

Usando o sistema de aquisição de dados nos dias 26, 27 e 28 de fevereiro de 2003 foram obtidas diversas curvas relativas ao comportamento térmico do sistema. Todas as medidas foram feitas com intervalo de 2 minutos. Através das respostas dos piranômetros foi possível calcular a transmitância do sistema de dupla cobertura. A figura 7 mostra o resultado da transmitância da cobertura dupla do coletor solar. Observa-se que no período próximo das 12 horas a transmitância solar atinge cerca de 54 %. Esse resultado refere-se ao efeito global da irradiância direta mais a irradiância difusa.

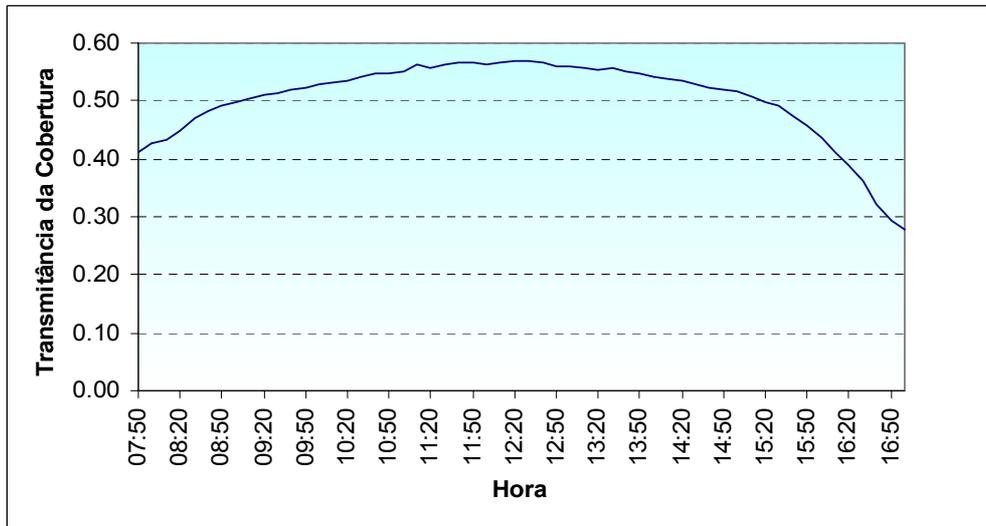


Figura 7. Transmitância solar da cobertura dupla do sistema, para um período diurno

A Figura 8 mostra os resultados obtidos para os sensores PT100 que monitoram o interior do duto do canal. Observe que a temperatura externa (Te) e a interna (Ti) alternam-se durante o período diurno e noturno, o que mostra que o Laboratório possui um bom isolamento térmico. Essa figura indica que a temperatura máxima do ar atrasa de 2 a 3 horas em relação ao pico da irradiância solar. Todas as temperaturas monitoradas no interior do duto apresentam características semelhantes. O sensor “106” está colocado após a superfície absorvedora, de tal forma que é o primeiro a receber o fluxo de ar aquecido, sua temperatura é a mais elevada e chega próximo de 60 °C.

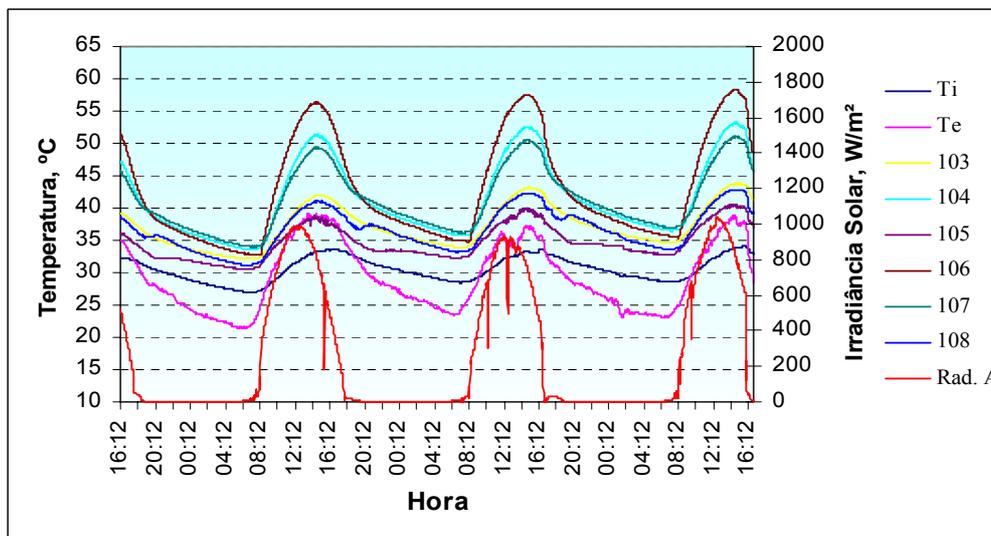


Figura 8. Temperaturas medidas no interior do duto e irradiância solar externa da cobertura.

6. Resultados Numéricos

A Figura 9 mostra o resultado obtido com uma malha de 1617 volumes finitos. Esse resultado foi encontrado para um dia de fevereiro, às 15 horas. Essa figura ilustra o efeito das isotermas apenas na massa acumuladora térmica.

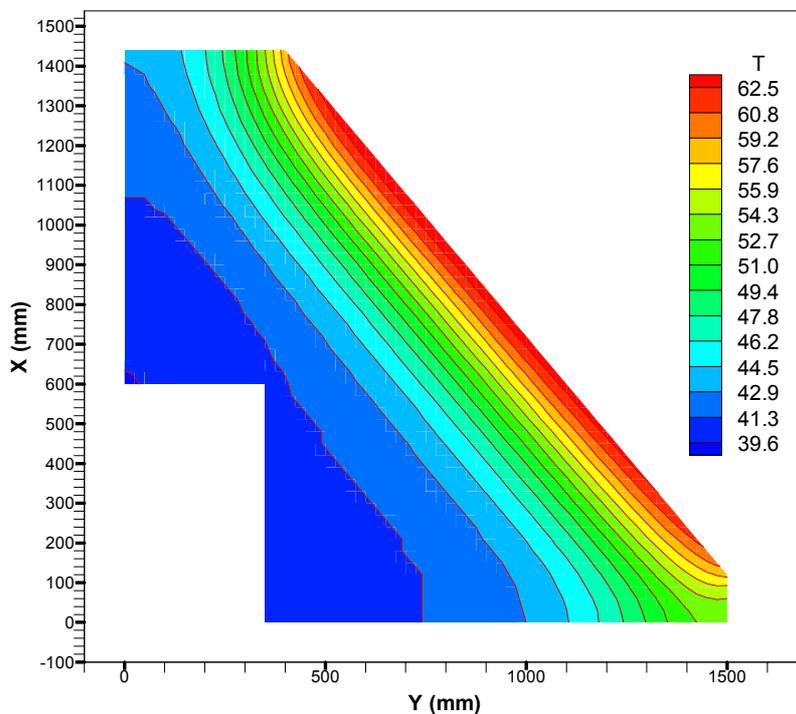


Figura 9. Isotermas obtidas através da simulação numérica às 15 horas de um dia de fevereiro

A Figura 10 ilustra uma das malhas incluindo os canais anterior e posterior.

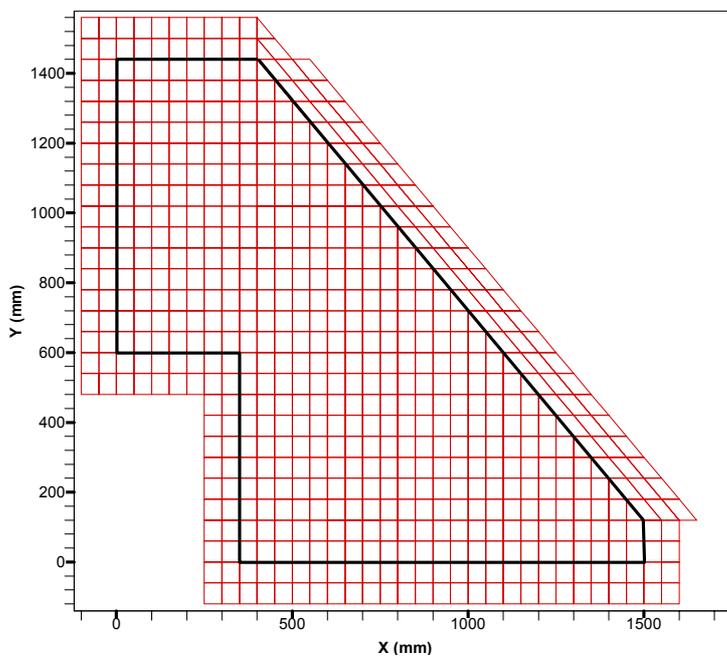


Figura 10. Malha incluindo os canais anterior e posterior.

A Figura 11 ilustra o efeito produzido quando o programa interpola temperaturas do coletor acumulador solar com as temperaturas do canal. Essa maneira de visualizar o campo de temperatura mostrou ser bastante rica, pois há uma

dificuldade muito grande em entender uma seqüência extensa de números ao longo do tempo. Essa figura ilustra o campo de temperatura obtido para um dia do mês de fevereiro às 20 horas.

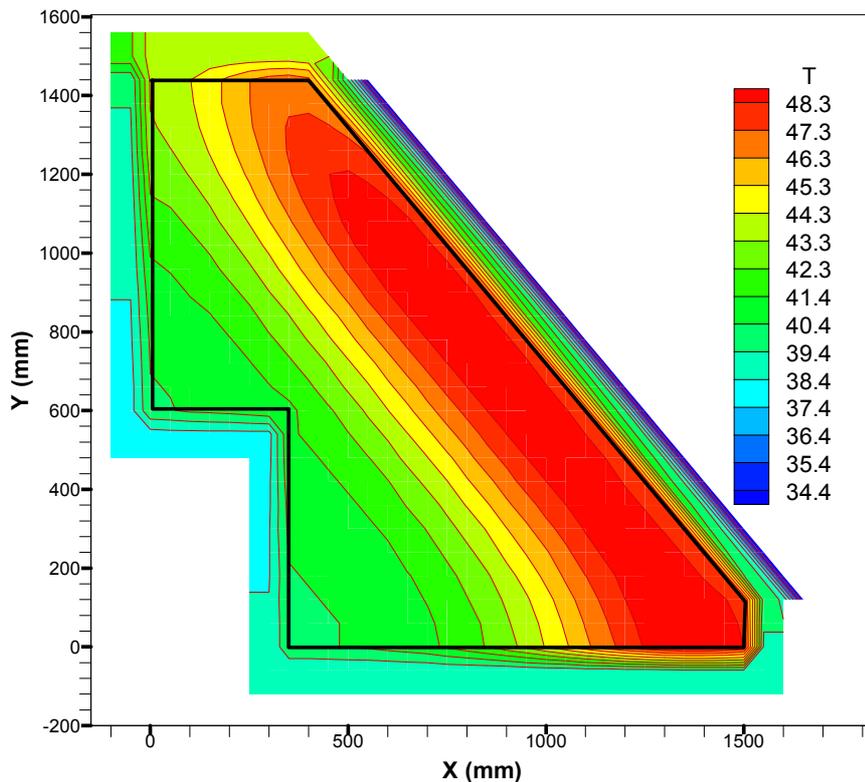


Figura 11. Interpolação das temperaturas do sistema num dia do mês de fevereiro às 20 horas.

7. Validação da Simulação Numérica

Dos 14 sensores CI instalados no interior da massa acumuladora térmica, 6 serviram de estudos comparativos com os resultados numéricos. O método adotado para o estudo comparativo consiste em localizar as coordenadas dos volumes finitos, em uma determinada malha, que mais se aproximam às coordenadas reais dos sensores CI. A Figura 1 ilustra a posição interna dos diversos sensores. A tabela 2 mostra as coordenadas dos sensores CI e as coordenadas que mais se aproximam na malha que será usada para estudos comparativos. Observe que este método apresenta uma incerteza das coordenadas que corresponde a um volume inteiro.

Para realizar essa comparação experimental versus resultados numéricos foram escolhidos os dias 27 e 28 de fevereiro. O sistema de aquisição de dados coletou 1440 dados, para cada sensor instalado no coletor solar, com intervalo de 2 minutos entre uma medida e outra.

Tabela 2. Numeração dos sensores de temperatura com suas respectivas coordenadas.

Posição do sensor	X(m)	Y(m)	T(X±1,Y±1)
P1	0,397	0,250	T(16,40)
P2	0,082	0,250	T(3,40)
P5	0,236	0,664	T(9,26)
P6	0,417	0,230	T(17,40)
P9	0,722	0,650	T(29,26)
P10	0,578	0,824	T(23,20)

Na figura 12 são apresentados os resultados numéricos e experimentais obtidos para os sensores localizados nas posições P1 e P2. Observe que o programa de simulação numérica reproduz perfeitamente as variações de temperatura ao longo do tempo. Nota-se, nesses gráficos, que a temperatura é uma função periódica ao longo do tempo o que já era esperado.

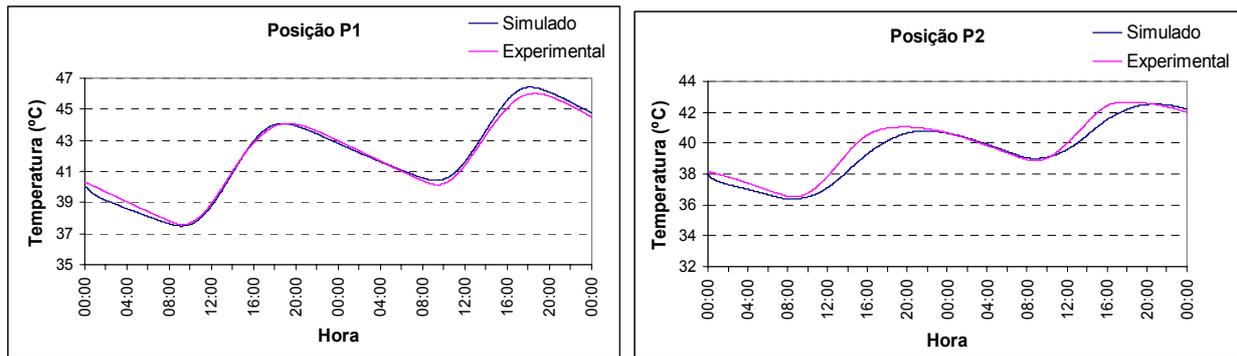


Figura 12. Comparação entre resultados experimentais e resultados numéricos para as posições P1 e P2.

A Figura 13 ilustra a comparação entre os resultados teóricos e os experimentais para os sensores que ocupam as posições P5 e P6. Observe que a simulação numérica reproduz a curva de variação de temperatura ao longo do tempo com boa aproximação. O pequeno desvio da curva experimental para a numérica na posição P5 deve-se ao fato de que existe uma dificuldade no estabelecimento do campo de temperatura inicial e nem sempre o campo estabelecido é o mais apropriado.

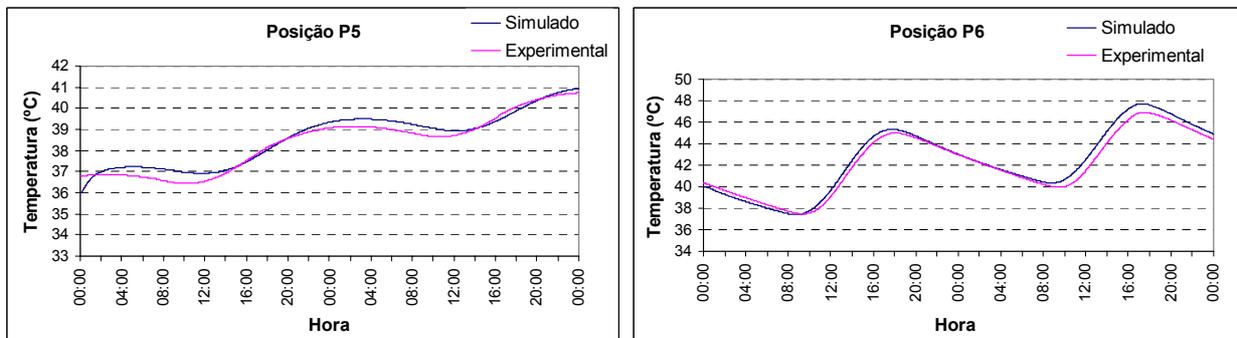


Figura 13. Comparação entre resultados experimentais e resultados numéricos para as posições P5 e P6.

A Figura 14 ilustra a comparação entre os resultados simulados e os experimentais para os sensores que ocupam as posições P9 e P10.

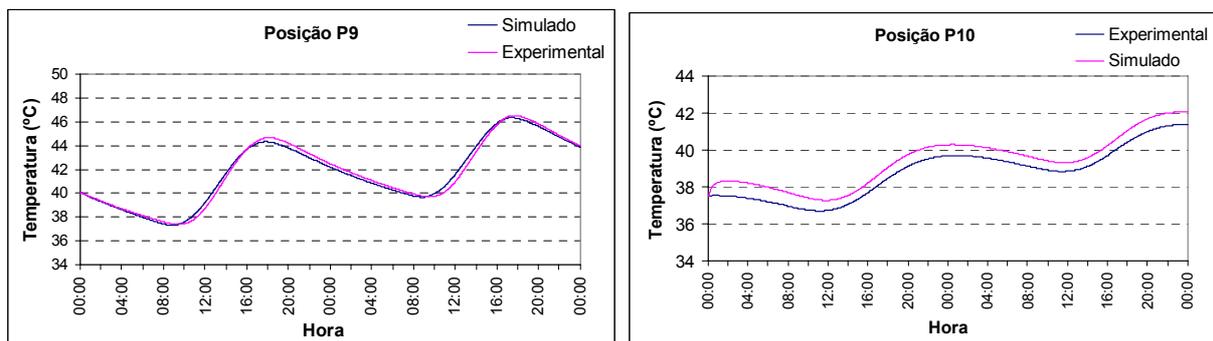


Figura 14. Comparação entre resultados experimentais e resultados numéricos para as posições P9 e P10.

8. Conclusão

Neste trabalho foram apresentadas e discutidas as características de um sistema passivo de aquecimento. Para obter a sua caracterização foi montado um sistema de aquisição de dados usando 24 sensores de temperatura e 2 piranômetros fotovoltaicos. Obteve-se o valor da transmitância solar do sistema de dupla cobertura, a qual atinge valores próximos de 55 % nos horários de pico de irradiância. Pode-se, através da montagem experimental, avaliar o tempo de atraso da

temperatura do ar aquecido fornecido pelo sistema. Foi resolvida a equação da energia bidimensional transiente via método numérico. Essa simulação numérica permite calcular os campos de temperatura do sistema e avaliar os gradientes térmicos ao longo do tempo.

9. Agradecimentos

“O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil”

10. Referências

- Baruch, G, 1998, “Climate Consideration in Building and Urban Design”, VN Reinhold, New York, 464 p, pp. 162-163.
- Corbella, O.D.; Vielmo, H. A. And Keppeler, R. O., 1981, “Edificio Solar para el Laboratorio de Energia Solar de la UFRGS-Porto Alegre-Brasil”, VII Reunion de Trabajo y Simposio Latino Americano sobre Aprovechamiento de la Energia Solar en la Arqitetura, 1981, Rosario, Argentina.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, “Solar Engineering of Thermal Processes”, second edition, Ed. John Wiley & Sons, New York, USA, pp. 231-234
- Holman, J. P., 1971, “Experimental Methods for Engineers “, second edition, McGraw-Hill Book Company, New York
- Patankar, S. V., 1980. “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere”, New York
- Preobrazhenski, V. P., 1980, “Mediciones Termotécnicas y Aparatos para Efectuarlas”, Editor Mir, Moscow, pp. 208-215, Vol. I, pp. 244-248.
- Vielmo, H. A., 1981. “Modelo Matemático para Simular o Comportamento do Sistema Passivo do Laboratório de Energia Solar da UFRGS”, Dissertação de Mestrado, PPGEMM, UFRGS, Porto Alegre, RS.
- Zanescio, Izete, 1991, “Análise e Construção de um Piranômetro Fotovoltaico”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre, Brazil, pp. 5-8.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL SOLAR COLLECTOR-STORAGE THERMAL BEHAVIOR ANALYSIS

Daniel Sampaio Figueira

Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - Via do Conhecimento km 01, Caixa Postal 571, 85501-970, Pato Branco, Pr.
E-mail: dfigueira@cpovo.net

Arno Krenzinger

UFRS, Depto Engenharia de Materiais – Osvaldo Aranha, 99/ 711, 90035-190, Porto Alegre, RS.
E-mail: arno@mecanica.ufrgs.br

Horácio Antonio Vielmo

UFRGS, Depto Engenharia Mecânica - Sarmiento Leite, 425, 90050-170, Porto Alegre, RS.
E-mail: vielmoh@mecanica.ufrgs.br

Abstract. The purpose of this work is to present an experimental and numerical study of a solar collector-storage that use air as work fluid. In order to reach these objectives, the work is divided in two stages. The first consists of the assembly of a data acquisition system controlled by a computer. In this stage, 16 integrated circuit temperature sensors, 8 PT100 sensors and two pyranometers were installed. The second stage consists in the numerical simulation, through finite volumes, of the thermal behavior of the different elements that constitute the system. Because this simulation uses a transient model, the input data of the software are the temperatures at different points of the body of the collector-storage, the incoming radiation on its collecting surface, the outdoor ambient air temperature and the air mass flow rate and temperature into the channels. From the experimental assembly were obtained several curves of the temperature of the warmed air supplied by the system, the transmittance of the coverings and gradients across the storage mass. The numerical simulation allows to calculate the field of temperature of the wall at any instant of time and the air outflow.

Keywords. solar energy, solar radiation, air heating collectors, energy storage