

Desenvolvimento de um calorímetro para verificação do Fator Solar de vidros e janelas

Deivis Luis Marinoski ¹, Saulo Guths ¹, Roberto Lamberts ¹, João L. Armelin ² e Simone M. Oliveira ²

Resumo – Este estudo apresenta o desenvolvimento do projeto e construção de um calorímetro solar para verificação do Fator Solar em vidros e janelas. O Fator Solar (FS) é um dos índices de desempenho termoenergético mais importantes para esses produtos. Esse índice representa a fração de ganho térmico devido à radiação solar que a abertura transmite para o interior da edificação. Uma vez que a radiação solar incidente nas janelas é uma das variáveis de maior influência sobre a carga térmica dos edifícios, o conhecimento do FS contribui para a escolha e aplicação correta dos diferentes tipos de vidros e janelas existentes. Quando associado à simulação computacional e outros processos de análise, o FS possibilita a elaboração de projetos melhores e mais eficientes. Assim, o conhecimento das propriedades e a aplicação de elementos construtivos que melhorem a eficiência energética dos edifícios brasileiros são de interesse para o setor elétrico, uma vez que resulta em menor necessidade de investimentos na geração e transmissão de energia.

Palavras-chave – Calorímetro; Instrumentação; Fator Solar; Vidros e Janelas.

I. INTRODUÇÃO

As janelas podem ocupar desde uma pequena fração da área da fachada ou até mesmo chegar a compor grandes paredes envidraçadas, constituindo a maior parte do envelope construtivo. Por isso em muitos casos elas são consideradas um elemento dominante na aparência da edificação. Além dos fatores estéticos, as aberturas apresentam originalmente outras funções tais como permitir a passagem da luz e a ventilação. Também é reconhecida a sua influência psicológica na satisfação, saúde e produtividade dos ocupantes [1]. Mas com a evolução da tecnologia algumas dessas funções passaram a ser supridas através de sistemas artificiais, visando o conforto e a manutenção de condições ambientais estáveis de moradia e trabalho. Deste modo, atrelou-se diretamente esse elemento ao uso e também aos custos com energia.

A radiação solar incidente nas janelas é um fator muito significativo sobre o consumo de energia gerado pelas cargas

de resfriamento e aquecimento. Exemplos quantitativos do impacto das aberturas sobre o consumo de energia pode ser observado através de diversas pesquisas. Nos EUA, estimou-se que no ano de 1994, existia uma área de janelas de aproximadamente 1,77 bilhões de metros quadrados no setor residencial, os quais eram responsáveis pelo consumo de $1,7 \cdot 10^{15}$ BTU/ano (498 TWh/ano). Desses, $1,3 \cdot 10^{15}$ BTU/ano (76,5%) eram usados para aquecimento e $0,4 \cdot 10^{15}$ BTU/ano (23,5%) para resfriamento. Isto representava mais de 2% do consumo total de energia do país na época [2]. Em 2004, uma nova pesquisa destacou que caso fosse considerado o setor residencial juntamente com o comercial, então as janelas seriam responsáveis por uma demanda de 1465 TWh/ano, ou seja, mais de 5% da energia consumida anualmente no país [1]. Ainda, estudos e simulações energéticas de edifícios comerciais na cidade de Hong Kong, mostraram que o consumo de energia com ar condicionado está entre 50% e 60% do uso total de energia elétrica. Sendo o ganho de calor solar, principalmente através das janelas, o maior responsável pela carga de resfriamento [3].

Tendo em vista estes números, países como EUA, Canadá, Reino Unido, Suécia, Austrália e outros, têm desenvolvido nos últimos anos, iniciativas buscando minimizar os custos com o consumo de energia atribuído às aberturas. Os governos desses países têm investido em projetos de pesquisas com o objetivo de compreender melhor os processos físicos de transmissão de luz e calor através das janelas e também de determinar as propriedades dos materiais que as compõem. As linhas de pesquisa têm se subdividido em estudos na área teórica, experimental, desenvolvimento de softwares e elaboração de normas. Esses conhecimentos têm dado suporte para ações tais como a criação de sistemas de certificação, onde índices de desempenho energético dos produtos colocados no mercado são determinados, proporcionando um indicativo para uma melhor escolha.

O Fator Solar (FS) é um dos mais importantes índices de desempenho energético de vidros e janelas. Esse índice representa a fração de ganho térmico, devido à radiação solar, que a abertura transmite diretamente e que é absorvido e reemitido pela mesma para o interior da edificação. O FS é dado como um número adimensional entre 0 e 1. Esse valor pode ser especificado apenas para o vidro ou ser indicado para todo o conjunto da janela [4]. O conhecimento do FS, associado à simulação computacional e outros processos de análise, possibilita a elaboração de projetos de edificações melhores e mais eficientes.

Os calorímetros solares são dispositivos comumente utilizados nas pesquisas relacionadas com a avaliação de desempenho térmico de janelas. Através desses sistemas é possível

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

Título do Projeto: Desenvolvimento de Métodos de Avaliação de Transferência de Calor em Janelas, código ANEEL 0394-108/2003; Ciclo 2002/2003.

¹ UFSC (e-mails: deivis@labeee.ufsc.br; lamberts@labeee.ufsc.br; saulo@lmpt.ufsc.br).

² FURNAS (e-mail: armelin@furnas.com.br, simone@furnas.com.br).

realizar medições para determinar o FS sob condições reais de utilização ou situações específicas de teste. No caso de sistemas de aberturas complexos (proteções solares, vidros prismáticos, etc.) os resultados das medições são utilizados para auxiliar o processo de certificação de janelas.

Dado que é através das janelas que se têm uma parcela considerável de calor trocado, torna-se indispensável o desenvolvimento de métodos de caracterização desse fenômeno. Esse projeto visa a implementação uma bancada de medição espectral de meios semitransparentes, que permitirá avaliar as propriedades radiantes (transmissividade, absortividade e emitância) em cada comprimento de onda. Incluem-se vidros e também os novos tipos de películas que começam a ser utilizadas no Brasil sem uma correta avaliação de seu comportamento em um país de clima quente e úmido.

II. PROJETO DO CALORIMETRO

Como referencial teórico e embasamento técnico para o projeto e construção do calorímetro em questão, foi realizado previamente um levantamento do estado-da-arte dos dispositivos existentes ao redor do mundo [5], [6], [7], [8].

Devido à complexidade do projeto do dispositivo final, foram elaborados subprojetos para cada um dos componentes básicos do equipamento (absorvedores de calor, sistema de resfriamento, sistema de monitoramento e trailer de abrigo), os quais são apresentados a seguir.

A. Absorvedores de calor

Os absorvedores são cavidades posicionadas do lado interno da janela. Eles absorvem o calor solar que penetra através da janela, permitindo que este seja quantificado e removido por um sistema de refrigeração.

Dois processos de medição podem ser aplicados para medir o ganho de calor solar através da janela. O método fluximétrico, onde um sensor plano, composto pelo agrupamento de centenas de micro termopares, gera um sinal proporcional a diferença de temperatura devido ao fluxo de calor transmitido. E o método calorimétrico, onde em função da diferença de temperatura do líquido (água) que resfria o absorvedor de

calor, na entrada e na saída do mesmo, é calculado o ganho térmico levando em conta a vazão e o calor específico do líquido.

Para o desenvolvimento desse projeto utilizou-se duas cavidades (ou absorvedores de calor). Uma, denominada “principal”, com abertura de medição de 1500 x 1200 mm, onde podem ser testadas janelas em tamanho real. E uma segunda, denominada “referência”, com abertura de medição de 500 x 500 mm, que pode ser utilizado como padrão comparativo para a cavidade principal ou para teste rápidos com vidros. Na cavidade principal foi utilizado o método calorimétrico e na de referência o método fluximétrico. A inovação desse projeto é a aplicação dos dois métodos de medição em um mesmo equipamento.

B. Sistema de resfriamento

Um sistema de resfriamento é necessário para remover o calor que adquirido através dos absorvedores. Este sistema de resfriamento foi concebido no formato de um grande banho termostático, composto por uma unidade condensadora (1,5HP), reservatório de água (150 litros) e resistências aquecedoras (3000W). A água do reservatório é bombeada e circula pelas cavidades em um circuito fechado. O controle de temperatura desse sistema é realizado por um software que gerencia também a aquisição de dados dos sensores de monitoramento.

A Figura 1 apresenta o esquema de montagem do banho térmico composto pelo sistema condensador e reservatório. O sistema condensador é instalado externamente ao trailer que abrigará o conjunto completo do calorímetro. Já a estrutura do reservatório será fixada internamente, de onde partirão as conexões para circulação de água através dos absorvedores. Para o sistema condensador está prevista uma proteção metálica contra as intempéries.

C. Trailer de abrigo

Uma vez que a montagem de um calorímetro envolve a utilização de diversos componentes, definiu-se que esses seriam abrigados em um trailer. A opção pelo trailer baseou-se na facilidade de movimentação que esse tipo de veículo permite e também pela proteção às intempéries.

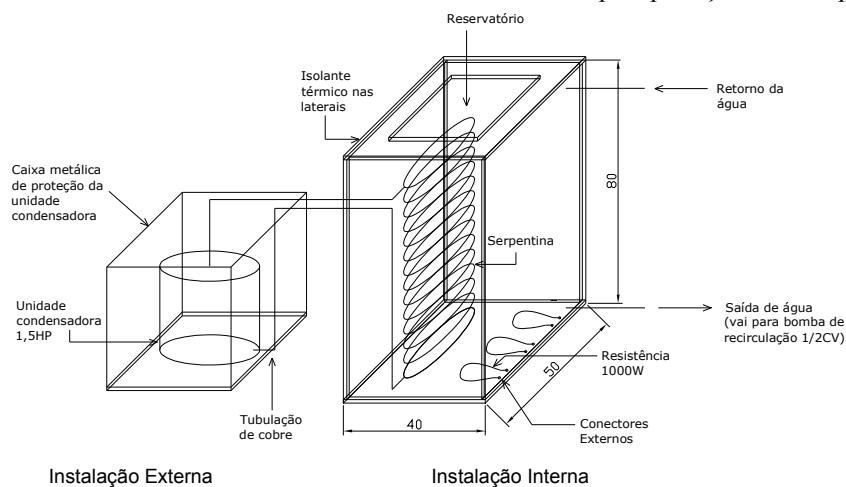


Figura 1. Desenho esquemático para montagem do banho térmico (cotas em cm, sem escala)

As dimensões principais adotadas para o trailer (altura x comprimento x largura) foram determinadas a partir da definição das características dos componentes internos (absorvedores de calor e sistema de resfriamento). Levou-se também em consideração as necessidades de movimentações internas durante a instalação, monitoramento e manutenção dos sistemas.

Desta forma, optou-se pelo projeto e construção de um trailer com dimensões de 1,90 m x 3,50 m x 1,60 m e com capacidade de carga para aproximadamente 350kg. Foram previstas no projeto duas portas traseiras de acesso, também duas aberturas laterais (para a cavidade principal e referência) e uma plataforma frontal. Sob o assoalho da parte traseira foram previstos dois macacos para apoio e nivelamento, e na dianteira foi prevista uma roda auxiliar para facilitar as movimentações. Toda a estrutura é sustentada por um eixo simples e suspensão com feixe de molas e amortecedores sobre rodas.

Para a fixação das amostras de janelas que serão testadas no calorímetro, foi projetada uma moldura de madeira no perímetro da abertura principal de medição. Essa moldura servirá como marco da janela e tem dimensões de 1500 mm x 1200 mm. Internamente, a moldura tem também a função de dar suporte para a fixação da cavidade principal de absorção de calor. Foi projetada também uma moldura em madeira para a fixação da cavidade de referência, com dimensões de 600 x 600 mm (alterada mais tarde para 500 x 500 mm devido à necessidade de ajuste na dimensão dos sensores de fluxo de calor). A utilização da madeira como material de fabricação da moldura foi admitida devido as suas características de bom isolamento térmico, baixo peso e boa resistência.

A Figura 2 apresenta um esquema do arranjo interno dos diversos componentes que compõem o sistema completo do calorímetro e estão alojados na parte interna e também na plataforma externa do trailer.

D. Distribuição elétrica e hidráulica

Para alimentar os equipamentos que estão abrigados no trailer foram previstas instalações elétricas no interior do ca-

lorímetro. Já as ligações hidráulicas foram realizadas através da utilização de mangueiras flexíveis de PVC reforçado. Uma bomba de recalque é usada para forçar a circulação do líquido pelas cavidades. Nas entradas de cada uma das faces das cavidades (5 faces na cavidade principal e uma face na cavidade de referência) foram instalados registros de gaveta para regulagem da vazão. Por fim, no retorno do líquido para o reservatório instalou-se um medidor de vazão na saída de cada uma das cavidades. Os medidores de vazão permitem tanto a leitura direta, por meio de um mostrador analógico, como também a leitura de um sinal digital para verificação da vazão no sistema de aquisição de dados.

E. Sistema de monitoramento e controle

Diversos sensores de monitoramento são utilizados para verificar as condições ambientais e o fluxo de calor na estrutura do calorímetro. A Tabela 1 apresenta um resumo com os tipos de sensores utilizados, quantidades e pontos de instalação. Tanto a quantidade como o tipo de sensores foram definidos em função das necessidades de informações para o cálculo de ganho de calor e posteriores análises de incertezas nos resultados. Previamente à instalação foi realizada a calibração desses dispositivos.

Tabela 1. Sensores de monitoramento utilizados

Tipo de sensor	Aplicação	Qtd.
Piranômetros	Radiação solar horizontal e no plano de medição	2
Anemômetro	Velocidade do ar externo e no interior da cavidade principal	2
Fluxímetros	Ganho de calor na cavidade de referência e fugas de calor duas cavidades	6
Termopares	Temperatura em diversas superfícies, água e ar	27
Termistor	Junção de referência dos termopares	1
Medidor de vazão	Saída da cavidade principal e de referência	2
Medidor de coef. de convecção	Plano de medição externo	1
Total		41

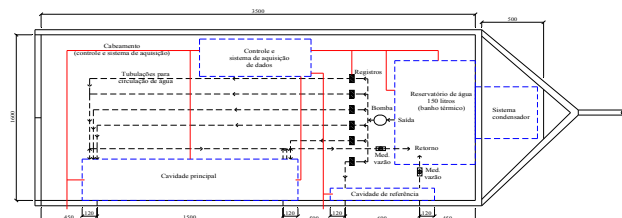


Figura 2. Esquema da distribuição interna dos componentes (vista em planta, cotas em mm, sem escala)

Para realizar a aquisição contínua dos dados durante o período de medição é utilizado um sistema de condicionamen-

to e gravação do sinal gerado pelos sensores de monitoramento. Esse sistema foi desenvolvido pela equipe de eletrô-

nica do LMPT (Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas da UFSC).

Basicamente o funcionamento do sistema de aquisição segue a seguinte lógica (Figura 3): inicialmente os sinais em micro voltagem são lidos individualmente nas placas de aquisição. Essas placas por sua vez estão ligadas a um multímetro digital que transmite o sinal por um cabo serial para um micro computador. Já os sensores que respondem em baixa voltagem são lidos diretamente por um componente intermediário desenvolvido no LMPT (chamado TUR), o qual também controla as placas de aquisição. O TUR está ligado a uma placa mãe que se comunica com um software específico no micro computador. O software por sua vez, gerencia o armazenamento do sinal e realiza a conversão para as unidades típicas de cada variável.

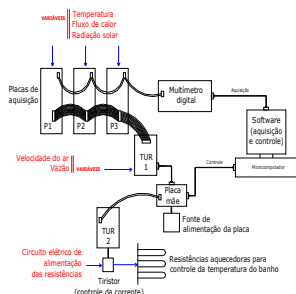


Figura 3. Esquema de funcionamento do sistema de aquisição e controle

III. CONSTRUÇÃO DO CALORÍMETRO

A construção do calorímetro ocorreu a partir da montagem de cada um dos componentes fabricados em separado. Alguns desses componentes foram produzidos simultaneamente para acelerar o processo de construção. Antes da montagem todos os sensores de monitoramento foram calibrados e testados. O fluxograma da Figura 4 apresenta a seqüência de fabricação e montagem aplicada em 6 etapas. A seguir é exibido um resumo com imagens e detalhes da fabricação dos principais componentes utilizados no calorímetro.

A. Fabricação dos absorvedores de calor

A fabricação da cavidade principal foi realizada pela empresa Solares Aquecimento Solar Ltda (Florianópolis – SC). A estrutura da cavidade é formada por cinco peças: 4 laterais e o fundo (Figura 5). Essas peças foram montadas através da soldagem, corte e dobra de chapas de cobre com espessura de 0,89 mm. Nas faces externas da cavidade foi soldada uma serpentina de tubos de cobre que fazem parte do sistema de resfriamento. Essa configuração consiste em dois tubos de maior diâmetro nas extremidades (22 mm) e tubos de menor diâmetro (9,3 mm) espaçados regulamente a cada 50 mm, ligados aos tubos das extremidades.

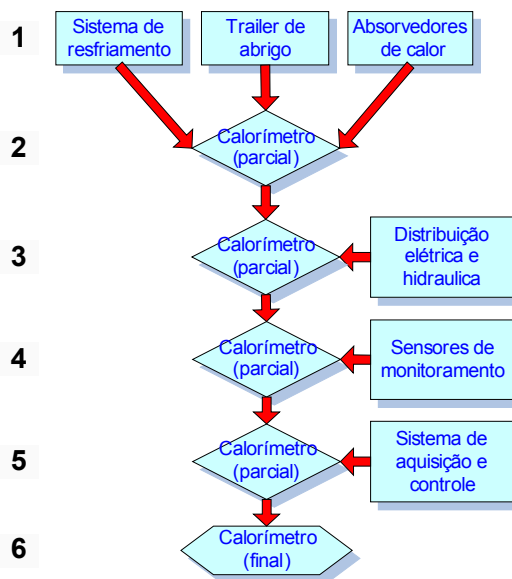


Figura 4. Fluxograma da seqüência de montagem do calorímetro

Envolvendo toda a superfície externa da cavidade, sobre a serpentina de cobre, foi previsto um isolamento térmico formado por uma camada de lã de vidro de aproximadamente 70 mm de espessura. O isolamento é preso ao corpo da cavidade após a colocação da mesma no calorímetro e da instalação do sistema de resfriamento. O conjunto cavidade e isolamento serão recobertos por uma caixa metálica de proteção com pintura eletrostática na cor branca (Figura 6). Essa caixa protetora é fixada diretamente na estrutura do calorímetro, não tendo nenhum contato térmico com a cavidade.



Figura 5. Vista do lado interno da cavidade



Figura 6. Isolamento térmico em lã de vidro e caixa protetora

A fabricação da cavidade de referência foi realizada no LabTermo (Laboratório de Ciências Térmicas da UFSC). Para a fabricação da cavidade foi utilizada uma chapa de cobre com espessura de 3 mm e dimensões de 50 cm x 50 cm. Na parte posterior dessa chapa foi fixada uma serpentina de cobre com diâmetro externo de 3/8".

Esta chapa de maior espessura foi empregada para tornar possível manter a planicidade necessária durante a colagem dos fluxímetros na face frontal. Devido à espessura da chapa o processo de fixação da serpentina foi bastante difícil, sendo necessário um processo de soldagem utilizando uma liga de fósforo e cobre (foscooper). A estrutura completa é formada pela chapa de cobre presa a uma esquadria de madeira (Figura 7 e Figura 8), posteriormente fixada ao trailer.



Figura 7. Vista posterior da cavidade de referência (detalhe da serpentina)



Figura 8. Vista frontal da cavidade de referência (detalhe do plano de colagem dos fluxímetros)

Fabricação do sistema de resfriamento

A fabricação do banho térmico foi realizada pela empresa Matiola Refrigeração Ltda (São José – SC). O reservatório de água foi fabricado em inox 304 número 24, obedecendo às dimensões internas especificadas de 40 x 50 x 80 cm, e sendo protegido com isolamento de 60 mm de poliestireno expandido, externamente revestido por chapa epóxi pintada na cor branca.

No interior do reservatório foi instalada uma serpentina de cobre e também as três resistências aquecedoras previstas (Figura 9). A fiação de ligação das resistências ficou exposta na parte frontal do reservatório para que, posteriormente, fossem conectadas à alimentação elétrica.

O sistema condensador utilizado para a refrigeração é da marca Danfoss, modelo HCM018, com potência nominal de 1,5HP, e alimentação 220V monofásica. O sistema tem dimensões de 50 x 70 x 4,2 cm, e peso de aproximadamente 45 kg. A Figura 10 mostra a vista geral do banho térmico construído.

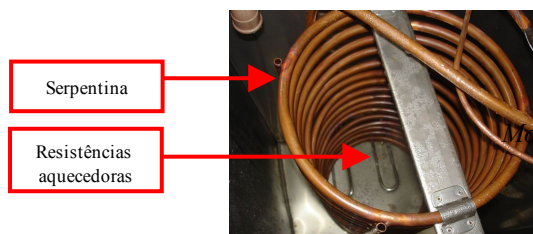


Figura 9. Serpentina e resistências aquecedoras no interior do reservatório

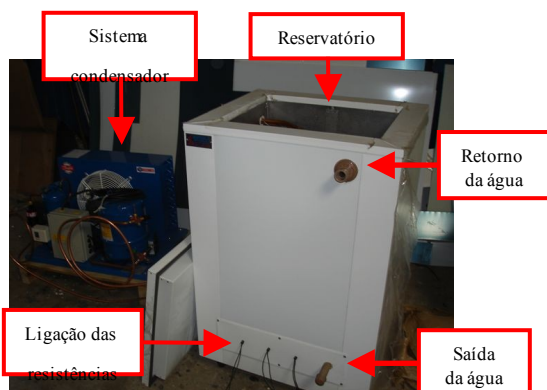


Figura 10. Vista geral do banho térmico

Fabricação do trailer de abrigo

A fabricação do trailer foi realizada pela empresa Pirâmide Reboques Indústria Metalúrgica Ltda (Joinville - SC). O chassi de sustentação foi fabricado em perfis de viga U de

100 mm galvanizado. Já as molduras de madeira para fixação das cavidades e das amostras de janela foram fabricadas em madeira de lei (Figura 11).

O fechamento lateral foi realizado através de chapas galvanizadas com acabamento em pintura na cor branca, e para o assoalho da parte interna foram utilizadas tábuas de madeira de lei. Já no piso da plataforma externa foram aplicadas chapas de aço galvanizado. A Figura 12 mostra o acabamento final do trailer.



Figura 11. Molduras de madeira nas aberturas para as cavidades



Figura 12. Vista externa do trailer acabado

Desenvolvimento do sistema de aquisição e controle

Além da ligação dos componentes físicos de aquisição e controle (TURs, Placas, fontes, tiristor, multímetro, micro-computador e cabeamento), um software específico é necessário para gerenciar o funcionamento do sistema. Uma versão beta deste software, em linguagem C++, foi desenvolvida no LMPT para atender as necessidades do sistema de aquisição e controle do calorímetro

A Figura 13 apresenta a interface de comunicação entre o programa e os dispositivos de aquisição (multímetro e placas mãe). Já na Figura 14 é apresentada a interface de aquisição e controle. Essa interface está organizada em 5 abas (janelas) para monitoramento: cavidade principal, cavidade de referência, sistema de resfriamento, variáveis ambientais e resultados.

Montagem do calorímetro

Após a fabricação individual dos 3 primeiros conjuntos de componentes (absorvedores de calor, sistema de resfriamento e trailer de abrigo), foi iniciada a etapa de montagem do calorímetro.

O primeiro componente a ser instalado no trailer de abrigo foi o sistema de resfriamento (banho térmico). Essa instalação foi realizada diretamente na empresa fornecedora, por se tratar de um trabalho especializado.

O sistema condensador foi fixado através de parafusos sobre a plataforma metálica na parte dianteira do trailer (Figura 15). O posicionamento externo do sistema foi previsto para facilitar a dissipação do calor retirado da água do reservatório e também para reduzir o nível de ruído na área interna do trailer. Sobre o sistema condensador foi montada uma cobertura em chapa metálica para proteção contra as intempéries, além de grades laterais para evitar o acesso de pessoas não autorizadas ou danos aos componentes.

O reservatório de água foi instalado do lado interno do trailer junto à parede de fechamento da parte dianteira (Figura 16). Já a fixação do reservatório foi realizada diretamente no piso de madeira do trailer por meio de parafusos. Após isso, a tubulação do gás refrigerante que passa pela serpentina no interior do reservatório foi conectada ao sistema condensador e revestida com isolante térmico.

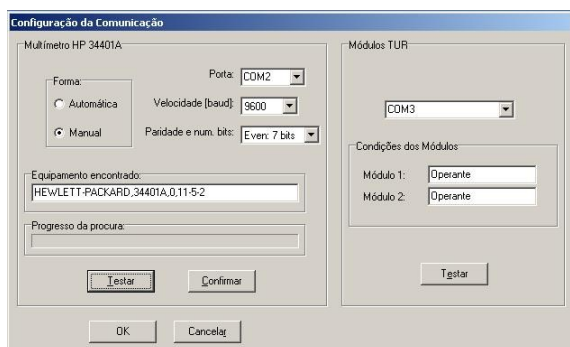


Figura 13. Interface de comunicação

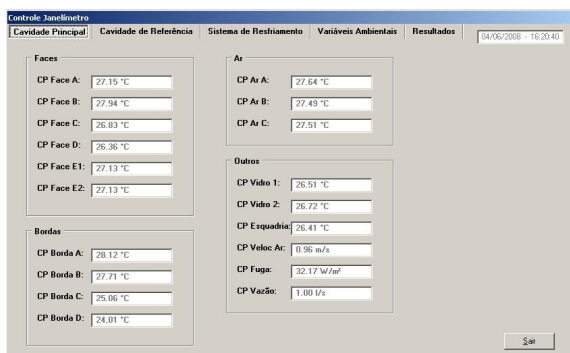


Figura 14. Interface de monitoramento



Figura 15. Sistema condensador instalado na plataforma dianteira do trailer



Figura 16. Reservatório de água instalado no interior do trailer

O segundo componente a ser instalada do trailer de abrigo foi a cavidade principal. Previamente a fixação da estrutura de cobre, as bordas da moldura de madeira (marco da janela) foram isoladas termicamente com a aplicação de uma camada de poliestireno expandido.

Depois disso a cavidade foi fixada na moldura de madeira através de parafusos auto-atarraxantes. A Figura 17 mostra a vista externa da cavidade principal já instalada. Posteriormente a superfície interna da cavidade foi pintada com uma tinta de propriedades conhecidas (absortividade e emissividade iguais a 0,95 e 0,86, respectivamente) – Figura 18.

O terceiro componente instalado no trailer de abrigo foi a cavidade de referência. Antes da instalação, foram soldados os conectores de mangueira nas extremidades de entrada e saída da serpentina. Também foram colados na superfície externas 4 sensores de fluxo de calor, os quais foram previamente pintados com a mesma tinta já mencionada.



Figura 17. Vista externa da cavidade principal já instalada no trailer



Figura 18. Pintura da cavidade principal

No lado externo foi ainda aplicado um isolante térmico (poliestireno expandido com espessura de 15 mm) no perímetro dos sensores, para o ajuste das dimensões da cavidade (50 x 50 cm). A Figura 19 mostra a configuração interna da instalação (sem o isolamento do fundo), enquanto a Figura 20 apresenta a visão externa da cavidade de referência ainda sem o vidro.



Figura 19. Detalhe interno da cavidade de referência já instalada no trailer



Figura 20. Vista externa da instalação da cavidade de referência (sem o vidro)

Após a colocação das cavidades e do banho térmico iniciou-se o trabalho de montagem das instalações elétricas e hidráulicas.

O quadro de distribuição do sistema elétrico foi instalado na lateral do trailer oposta às cavidades. Este foi fixado sobre uma chapa de madeira, onde também serão instalados os componentes do sistema de aquisição de dados. A alimentação do quadro é realizada a partir de uma ligação externa subterrânea conectada a fiação (espera) deixada sob o piso.

A fiação do sistema elétrico foi fixada de maneira aparente, aproveitando o espaço formado pelos perfis metálicos que compõem a estrutura do trailer, sendo o acabamento realizado com calhas de PVC. Já o aterramento, foi ligado na própria estrutura do trailer, de maneira que eventuais descargas elétricas sejam conduzidas para o solo através dos apoios metálicos (frontal e traseiro) de sustentação do veículo. Um ponto de iluminação no teto e uma tomada para ligação de um ventilador (usado como exaustor/insuflador) junto à porta de entrada, também foram instalados conforme previstos no projeto executivo.

Também o sistema hidráulico foi montado, sendo realizadas as conexões entre a entrada e saída das serpentinas de cada uma das faces das cavidades, aos respectivos registros. Esses últimos, por sua vez, são ligados a uma bomba que força a circulação da água do banho termostático através das faces das cavidades (Figura 21 e Figura 22).

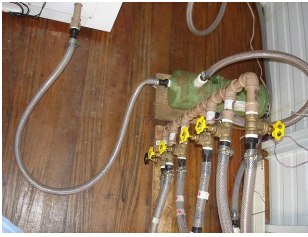


Figura 21. Ligação da bomba e barrilete com registros de controle de fluxo



Figura 22. Vista geral das conexões hidráulicas

Para facilitar a operação e melhor acomodação de alguns dos equipamentos (multímetro e micro computador) usados no sistema de aquisição de dados, foi construída uma banca de madeira fixada na parede do trailer. Os demais componentes eletrônicos do sistema de aquisição (TURs, placas, fontes, tiristor) foram fixados na mesma placa de madeira onde já havia sido instalado o quadro de distribuição elétrica. A Figura 23 mostra os componentes do sistema de aquisição instalados no trailer.



Figura 23. Layout da instalação dos componentes do sistema de aquisição e controle

Por fim, a Figura 24 apresenta a vista externa do calorímetro após a montagem ter sido finalizada.



Figura 24. Vista externa do calorímetro após o fim da montagem

IV. PRIMEIRA FASE DE TESTES

A. Calibração

Finalizada a construção do calorímetro, iniciou-se o processo de calibração do equipamento. Foram então instalados os vidros de referência (incolor, 3 mm) nas duas cavidades (Figura 25 e Figura 26). A vedação e fixação dos vidros foram realizadas através de suportes de madeira e adesivo vedante de silicone. Já os termopares colocados sobre os vidros foram fixados com cola epóxi e fita adesiva transparente, sendo as juntas de medição também protegidas da radiação direta através do uso de papel aluminizado.



Figura 25. Vidro 3mm instalado para a calibração da cavidade principal



Figura 26. Vidro 3mm permanentemente instalado na cavidade de referência

Após alguns ajustes preliminares, o primeiro teste de calibração foi então realizado. O teste teve início às 10h00min da manhã, quando foram acionados os sistemas de resfriamento (banho térmico), bombeamento e aquisição de dados e controle. No entanto, a medição só passou a ser realizada efetivamente a partir das 11h50min, se estendendo até as 12h30min. Durante esse período compreendido entre o acionamento dos sistemas (10h) e o início da medição (11h50min) foram realizados os ajustes manuais das vazões nas faces, permitindo a estabilização da temperatura das cavidades.

Em relação às condições ambientais observadas no período de teste, destaca-se que se mantiveram estáveis, com céu claro e sem vento. Em especial a radiação solar incidente no plano da janela (RAD janela), que está diretamente associada ao resultado do FS, apresentou uma variação muito pequena (16W/m^2 ou 2% em relação a média, que foi de 749W/m^2), como mostra a Figura 27. Ainda, durante o período de medição, foram registrados os valores de velocidade do ar externo e radiação global horizontal, cujos valores médios encontrados são respectivamente, $0,9\text{m/s}$ e 574W/m^2 . Já os ângulos de incidência da radiação solar no plano da janela, calculados para o horário de início e fim da medição nesse dia, foram de $45,6^\circ$ e $46,5^\circ$, respectivamente.

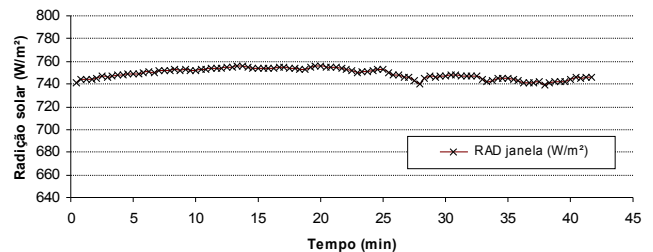


Figura 27. Variação da radiação solar incidente no plano de medição

No caso medição realizada através da cavidade principal (cp), observou-se que esta amplitude de variação no calor

retirado através do fluido é quase que integralmente repassado ao valor do FS medido. Isso ocorre uma vez que as perdas (ou ganhos) pelas faces e pelo ar são comparativamente pequenas em relação ao ganho de calor no fluido, enquanto a radiação incidente (RAD janela) se mantém praticamente constante. A Figura 28 apresenta a variação do FS medido na cavidade principal (FS_{Scp}) ao longo do teste, também o valor médio calculado para o período (FS_{Scp_médio}), e ainda o valor teórico estimado através da simplificação proposta pela NBR 15220-2 [9], em que $FS = U \cdot a \cdot R_{se} + \tau$ (adotando para o vidro incolor 3mm em um ângulo de incidência de 45°: $\tau=0,81$ e $\alpha=0,10$ [5]; e os valores médios calculados para a condição de teste: $U=1,07W/m^2K$ e $R_{se}= 0,21 m^2K/W$).

Analisando esses resultados é possível dizer que a diferença observada (9,1%) entre o valor médio do FS medido (0,75) e o valor teórico (0,83) está em um patamar aceitável, tendo em vista as condições de teste. No entanto, o desvio padrão ainda é elevado ($\pm 0,26$ ou em termos percentuais 33,8% do valor médio).

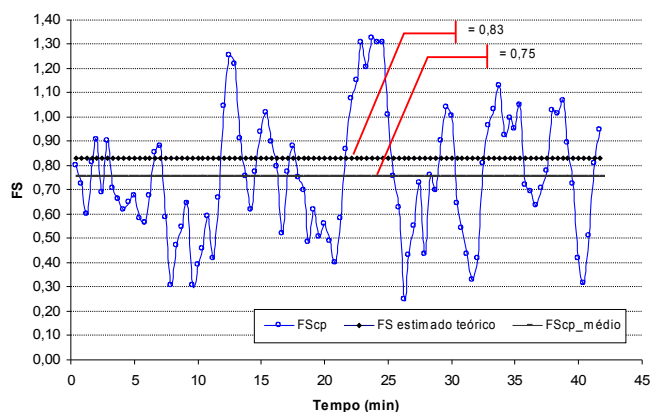


Figura 28. Fator solar medido no primeiro teste de calibração (ângulo de incidência = 45°)

B. Discussão

A principal causa para esse desvio elevado é atribuída diretamente a variações acentuadas do ΔT da água entre a entrada e a saída da cavidade principal ao longo da medição. A partir dessa informação algumas medidas serão tomadas. Além do melhor ajuste do controle da temperatura da água do banho, também será analisada a influência de variações na temperatura da junção de referência dos termopares usados no monitoramento, bem como possíveis problemas no funcionamento desses sensores.

Em relação à cavidade de referência, esse primeiro teste demonstrou a necessidade de uma nova calibração dos fluxímetros. Essa nova calibração será realizada in loco, sob as mesmas condições de utilização em que os sensores são submetidos durante uma medição.

Ainda outra medida para melhorar a precisão dos resultados será minimizar a influência das perdas (ou ganhos) de calor, sendo que nos próximos testes, tanto as faces das cavidades como as mangueiras de circulação de água, serão envolvidas com isolante térmico.

Destaca-se que uma verificação computacional e matemática, e também a verificação de incertezas dos valores do Fa-

tor Solar, serão aplicadas ao final da etapa de calibração, quando os ajustes mencionados acima já tenham sido efetuados.

V. CONCLUSÕES

O conjunto completo do calorímetro já foi concluído, estando o equipamento agora em fase de calibração. Após o término dessa etapa, o valor do FS de diferentes tipos de vidros, proteções solares, ou janelas completas (incluindo esquadrias) poderá ser determinado, sendo o equipamento utilizado para certificação desses elementos.

O conhecimento das propriedades térmicas e ópticas de vidros e janelas é de grande importância, uma vez que esses elementos têm impactos diretos no consumo de energia das edificações. Neste sentido, a aplicação de elementos que melhorem a eficiência energética dos edifícios brasileiros é de interesse para o setor elétrico, uma vez que reduz a necessidade de investimentos na geração e transmissão de energia.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Carmody, J.; Selkowitz, S.; Lee, E.; Dariush, A.; Willmert, T. *Window Systems for High-Performance Buildings*. 1a Edição, NY, USA, 2004.
- [2] Frost, K.; Eto, J.; Arasteh, D.; Yazdani, M. *The national energy requirements of residential windows in the U.S.: today and tomorrow*. Proceedings on Energy Efficiency in Buildings, August 1996.
- [3] Li, D. H. W. and Lam, J. C. *Solar heat gain factors and the implications to building designs in subtropical regions*. Energy and Buildings v. 32, p. 47-55, 2000.
- [4] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *ASHRAE Fundamentals Handbook 2005*. Capítulo 31 – Fenestration. Atlanta, GA, USA, 2005.
- [5] Harrison, J. S. e van Wonderen, S. J. *Evaluation of Solar Heat Gain Coefficient for Solar-Control Glazings and Shading Devices*. ASHRAE Transactions 104(1), p. 1051-1062, 1998.
- [6] Tseng, C.C. and Goswami, D. Y. Effect of Tilt Angle and Temperature Difference on Solar Heat Gain Coefficient Measurement of Fenestration System. ASHRAE Transactions, AT-01-10-2, p 684-690, 2001.
- [7] Lawrence Berkeley National Laboratory, *LBN Facilities*. 2007. Disponível em: <<http://windows.lbl.gov/facilities/default.htm>>. Acesso em: Novembro de 2007.
- [8] Collins, M.R. and Harrison, S.J. *Estimating the solar heat and thermal gain from a window with and interior venetian blind*. 2004, ASHRAE Transactions 110(1): 486-500.
- [9] NBR15220-2. *Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.