

## APLICAÇÕES DA TERMOGRAFIA NA ANÁLISE TÉRMICA DE SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR.

**A. Krenzinger**

Laboratório de Energia Solar - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
 Escola de Engenharia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre, Brasil  
 Tel/Fax. 55(51)33166841 e-mail: arno@mecanica.ufrgs.br

**RESUMO:** A termografia é uma técnica que permite o registro do campo de temperaturas de uma cena focalizada, através da medição da energia radiante infravermelha emitida pelos objetos do campo de visão da câmera termográfica. Neste trabalho são apresentadas uma rápida descrição sobre o funcionamento de uma câmera termográfica e diversas aplicações da termografia como ferramenta auxiliar na pesquisa de formas de utilização da energia solar, incluindo análise térmica de edificações, equipamentos de conversão térmica e de conversão fotovoltaica da energia solar. Exemplos de imagens termográficas são apresentados para mostrar a potencialidade desta técnica juntamente com suas limitações e possíveis erros devido às reflexões do infravermelho nas superfícies de vidro.

**Palavras chave:** termografia, infravermelho, câmera termográfica, campo de temperatura.

### RADIAÇÃO TÉRMICA

Todo corpo emite radiação eletromagnética devido ao movimento das cargas elétricas das suas partículas. Este movimento caracteriza a energia interna do corpo e é proporcional à sua temperatura. A radiação emitida em um amplo espectro que vai desde o ultravioleta ( $\lambda=0,1 \mu\text{m}$ ) até o final do infravermelho ( $\lambda=1000 \mu\text{m}$ ) é denominada *Radiação Térmica*. O fluxo de energia irradiado por um corpo depende de sua temperatura na quarta potência e das características de sua superfície. A qualidade da radiação emitida também depende da temperatura do corpo. O emissor ideal, chamado de corpo negro limita o máximo fluxo de radiação térmica que pode ser emitido por uma superfície, conforme definido pela equação de Planck (1) para a potência emissiva espectral:

$$E_b(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]} \quad (1)$$

onde  $h$  é a constante de Planck,  $k$  é a constante de Boltzmann,  $c$  é a velocidade da luz,  $T$  é a temperatura absoluta e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

A Figura 1(a) mostra  $E_b(\lambda, T)$  para diferentes temperaturas próximas da temperatura ambiente, entre 0 e 40 $\mu\text{m}$ . A área abaixo das curvas representa a potência emissiva total e é dada pela equação de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \int_0^{\infty} E_b(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (2)$$

onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann. O ar não é totalmente transparente à radiação infravermelha. De fato há bandas de comprimentos de onda que são fortemente absorvidos por vibrações ou rotações das moléculas que constituem a atmosfera. A Figura 1(b) mostra as mesmas curvas de  $E_b(\lambda, T)$  da Figura 1(a), porém representada apenas entre 2 $\mu\text{m}$  e 15 $\mu\text{m}$  e depois da radiação absorvida por 300 metros de atmosfera em um dia típico de céu claro. Observa-se que, para estas temperaturas, o intervalo entre 7 $\mu\text{m}$  e 14 $\mu\text{m}$  é mais apropriado para medir a radiação térmica à distância, pois a faixa entre 3 $\mu\text{m}$  e 5 $\mu\text{m}$  tem menor potência nas temperaturas mais baixas.

Um corpo real tem uma potência emissiva menor do que a de um corpo negro. A razão entre a potência emissiva monocromática da superfície de um corpo e potência emissiva monocromática de um corpo negro a mesma temperatura é chamada emitância monocromática  $\epsilon(\lambda)$  e a razão entre a potência emissiva total da superfície e a potência emissiva total de um corpo negro é chamada emitância hemisférica ou simplesmente emitância.

$$\epsilon = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon(\lambda) E_b(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4} \quad (3)$$

Em princípio as superfícies tem um comportamento espectral de emitância monocromática qualquer, mas para muitas superfícies reais é aceitável considerar que  $\epsilon(\lambda)$  seja invariável com o comprimento de onda. Uma superfície com esta propriedade é chamada de *superfície cinza*. Com respeito à distribuição espacial da radiação térmica, é possível que a superfície tenha emitância variável com a direção. Para simplificar este comportamento, assume-se que algumas superfícies emitem e refletem radiação difusa em todas as direções de forma proporcional ao cosseno do ângulo formado com a normal da mesma, sendo então chamadas de *superfícies lambertianas*. Em um outro extremo estão as superfícies que refletem como um espelho, são chamadas refletores especulares.

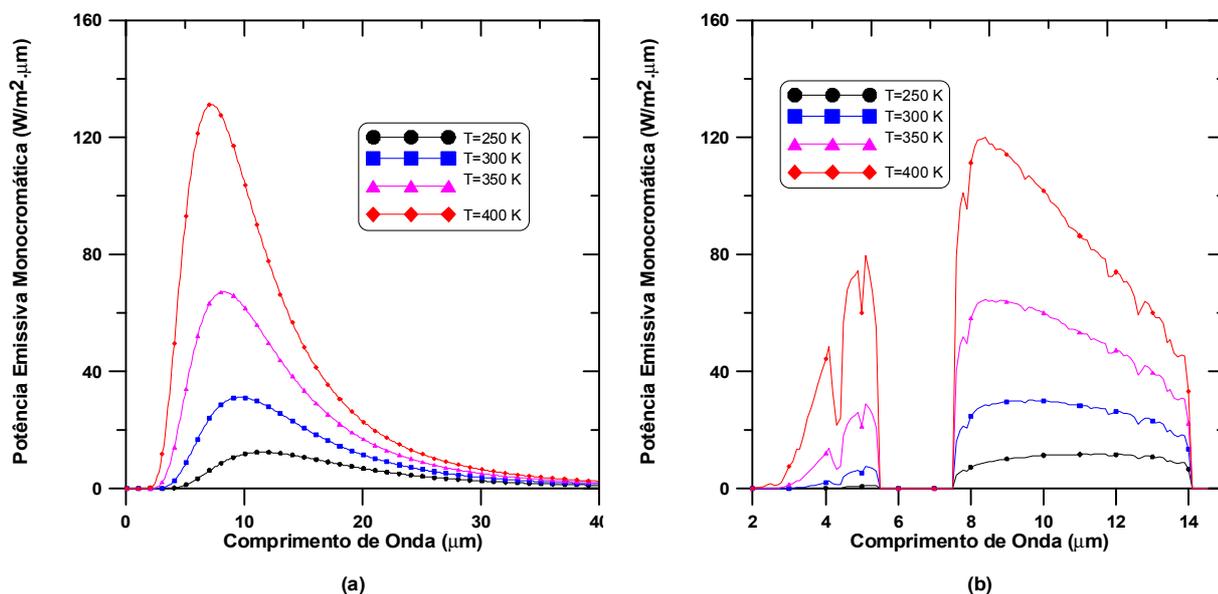


Figura 1. Curvas de potência emissiva espectral: (a) para o corpo negro a 4 temperaturas entre 0 e 40  $\mu m$  e (b) para as mesmas superfícies, entre 2  $\mu m$  e 15  $\mu m$ , depois de atravessar uma camada de 300 metros de ar.

## RADIÔMETROS E CÂMERAS TERMOGRÁFICAS

Do que foi exposto, pode-se deduzir que é bastante viável determinar temperaturas das superfícies de sólidos medindo o fluxo de radiação emitido na faixa espectral entre 7  $\mu m$  e 14  $\mu m$  (também na faixa de 3,5  $\mu m$  a 5  $\mu m$ ), mesmo a uma boa distância do objeto emissor. Para realizar tal tarefa é necessário um radiômetro capaz de atuar como sensor nesta região do infravermelho. Há vários equipamentos comerciais que normalmente utilizam um sensor de radiação com resposta espectral muito mais ampla mas limitam a radiação incidente na faixa espectral citada através de filtros. Estes radiômetros são chamados "termômetro sem contato" e medem a temperatura através da média da radiação infravermelha captada dentro de seu campo de visão. Quando se toma uma certa distância do objeto que está sendo estudado é difícil precisar sua focalização em um termômetro sem contato. Além disto, muitas vezes vários objetos e em várias temperaturas fazem parte do campo visual e a determinação detalhada deste "campo de temperaturas" pode ser necessária para o estudo. Neste caso o equipamento indicado é uma câmera termográfica, que registra uma imagem de todo o campo de visão, onde o brilho é proporcional à radiância de cada objeto (ou segmento de objeto) presente na cena.

O plano focal da câmera termográfica é formado por um arranjo de um grande número de sensores de radiação, que detectam de forma diferencial a irradiância incidente neste plano. Esta irradiância, por sua vez, constitui uma imagem que reproduz o campo de radiação infravermelha emergente dos objetos presentes no campo de visão do equipamento. A imagem é projetada através de lentes transparentes à radiação infravermelha na banda de interesse (o uso do germânio é comum na fabricação destas lentes) de forma totalmente análoga aos sistemas óticos utilizados em câmeras fotográficas. De fato, uma câmera termográfica é muito similar a uma câmera fotográfica digital, onde os materiais das lentes são diferentes e os arranjos de sensores de luz são substituídos por arranjos de sensores térmicos. A Figura 2 (a) mostra um diagrama da captura de imagem, onde uma imagem térmica no plano focalizado é projetada para uma imagem térmica no plano do sensor através das lentes e onde aparece também a interferência de um objeto quente sendo refletido pelo objeto focalizado e registrando sua presença na imagem capturada.

Os detectores matriciais são comumente fabricados a partir de processos de deposição de óxidos metálicos formando pequenos termistores, cuja resistência elétrica é fortemente dependente da temperatura. Estes detectores são chamados de micro-bolômetros e tem dimensões da ordem de 50  $\mu m$  de lado cada pixel. Isto significa que um conjunto de 76.800 sensores que formam um arranjo de 320 X 240 detectores ocupa uma área de apenas 16 mm X 12 mm. A Figura 2(b) mostra uma microfotografia (como exemplo publicado por ODA et al, 2003) do plano dos sensores que formam o plano que recebe a imagem das lentes. Cada pixel recebe irradiância proporcional à radiância de um ponto (ou região) do campo de visão das lentes e aumenta sua temperatura proporcionalmente à radiação absorvida. A temperatura atingida por cada detector é medida eletronicamente e transferida através de um sistema de varredura que resulta em uma seqüência de pulsos de tensão. Um

algoritmo então pode calcular a radiossidade do objeto observado a partir da temperatura do sensor e, principalmente, o campo de radiossidade dentro do campo de visão das lentes a partir das diferenças de temperaturas entre os detectores do arranjo. Finalmente a radiossidade é transformada em uma matriz de temperaturas dos objetos no campo de visão, levando em consideração alguns dados fornecidos pelo operador do equipamento, como a emissividade dos objetos e a temperatura do entorno. Posteriormente os dados desta matriz são processados e utilizados para formar uma imagem em tons de cinza onde cada intensidade corresponde à suposta temperatura de um dos pontos do objeto focalizado. Em um segundo processamento, estes tons de cinza são artificialmente substituídos por cores de uma paleta com 256 opções, resultando em uma imagem que revela a distribuição de temperaturas em todo o campo visual com ótima resolução (geralmente de 0,1°C).

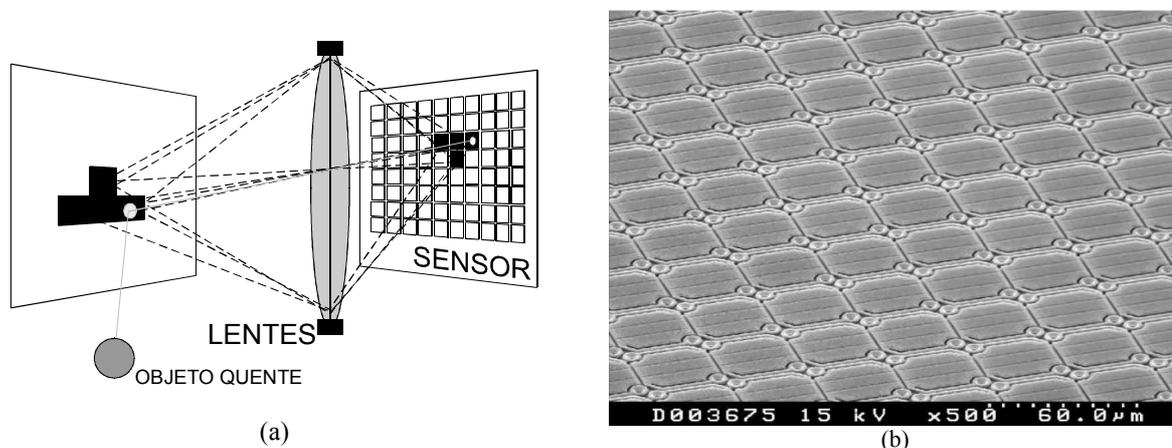


Figura 2 (a) Diagrama mostrando a projeção de uma imagem térmica sobre o sensor de uma câmera termográfica, sendo que a imagem é formada pela emissão do objeto focalizado e pela reflexão de um objeto quente externo. (b) Microfotografia MEV de um arranjo de sensores do tipo micro-bolômetro para câmera termográfica em dois aumentos 500 vezes Fonte: (ODA et al., 2003)

## TERMOGRAFIA DE VIDROS

Como os vidros recobrem quase todos os equipamentos de captação de energia solar é importante ressaltar algumas características importantes e cuidados que devem ser tomados na termografia de vidros.

Os vidros são opacos ao infravermelho para comprimentos de onda maiores do que 4 μm. O fato do vidro ser transparente para a luz visível e para a maior parte da radiação solar e ao mesmo tempo resistente aos raios ultravioletas faz com que seja o material mais utilizado na cobertura de equipamentos de captação de energia solar. Sua função primordial é de proteger os captadores sem impedir o ingresso da radiação solar. Nos coletores solares térmicos a característica de ser opaco no infravermelho é muito útil, propiciando o aparecimento do "efeito estufa", o qual potencializa o aquecimento dos mesmos.

O vidro comum tem uma reflexão muito pequena no visível e no infravermelho, da ordem de 4% na interface ar/vidro, com índice de refração diminuindo linearmente de 1,5 a 1,2 entre 0,4 μm e 7 μm. Entre 8 μm e 9 μm o índice de refração do vidro cai para cerca de 0,5 e em 10 μm tem um pico bastante pronunciado com valor de cerca de 2,5 retornando a 1,5 em 12 μm. Estas variações no índice de refração fazem com que o vidro tenha um maior coeficiente de reflexão justamente na faixa espectral de operação das câmeras termográficas. Para incidência normal o valor de refletância pode ser considerado 0,15 e a emitância do vidro é seu complementar: 0,85. Para ângulos diferentes a refletância do vidro pode ser obtida pelas Lei de Snell da Refração (Equação 4) e da Equação de Fresnell (Equação 5), considerando respectivamente o índice de refração para o ar igual a 1 (n<sub>1</sub>=1) e para o vidro igual a 2,25 (n<sub>2</sub>=2,25). A Figura 3 mostra o resultado gráfico da Equação 5. Havendo objetos refletidos durante o período de medição, esta curva pode ser utilizada para avaliar a interferência e, se possível, corrigir o erro causado pela reflexão.

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (4)$$

$$\rho = \frac{1}{2} \left( \frac{n_1 \cos(\theta_1) - n_2 \cos(\theta_2)}{n_1 \cos(\theta_1) + n_2 \cos(\theta_2)} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{n_1 \cos(\theta_2) - n_2 \cos(\theta_1)}{n_1 \cos(\theta_2) + n_2 \cos(\theta_1)} \right)^2 \quad (5)$$

A Figura 4 mostra o efeito resultante destas propriedades do vidro. As imagens superiores (a) e (b) são imagens visuais, onde são vistas uma cafeteira e uma forma de gelo. Na Figura 4 (b) a cafeteira é vista através de uma placa de vidro que foi inserida entre a mesma e a forma de gelo. As imagens (c) e (d) mostram as termografias correspondentes às imagens (a) e (b) respectivamente. Nota-se na imagem (d) que a lâmina de vidro faz a cafeteira desaparecer e, em seu lugar, é observado o reflexo da forma de gelo.

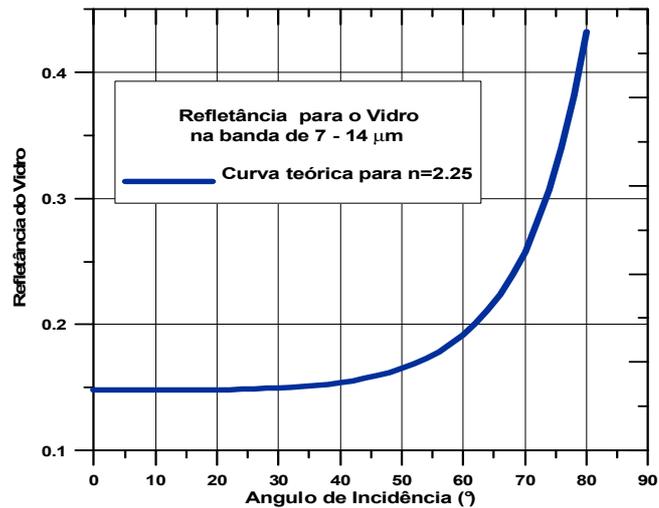


Figura 3. Curva de refletância do vidro na banda de radiação infravermelha onde as câmeras termográficas são sensíveis.

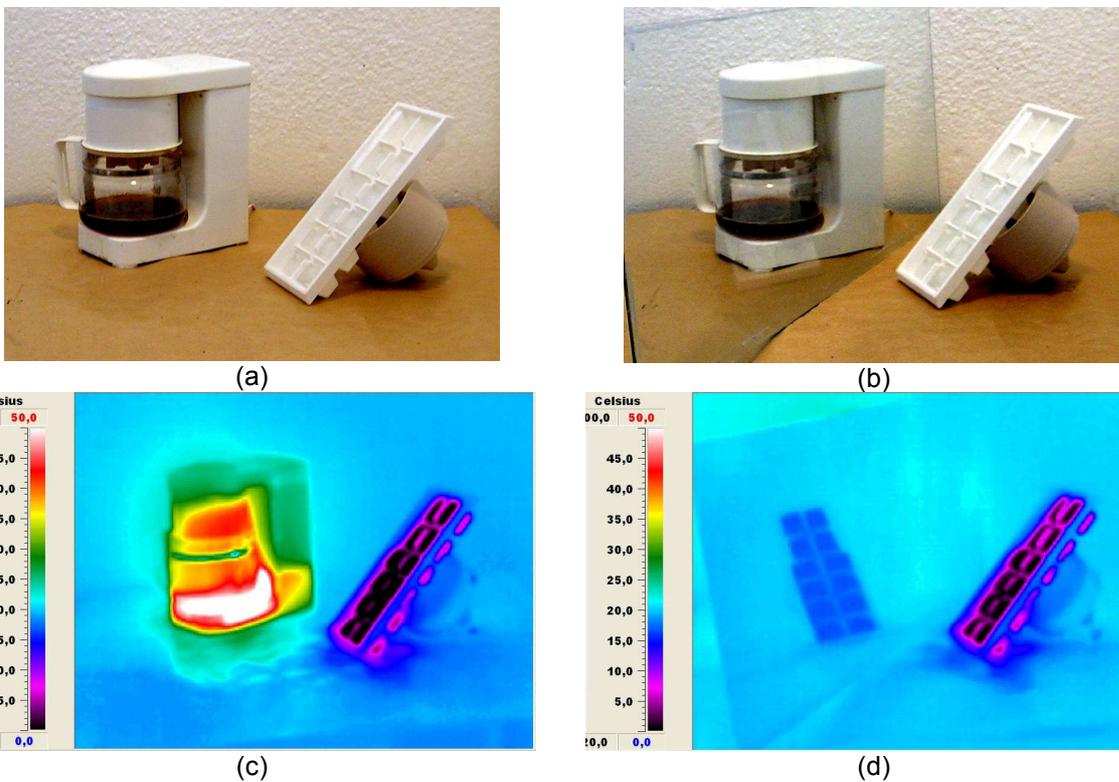


Figura 4 Demonstração do efeito da presença de um vidro em uma termografia: o vidro esconde a cafeleira e reflete o gelo. As imagens (a) e (b) são imagens visuais sem e com vidro, correspondentes às termografias (c) e (d) respectivamente.

#### APLICAÇÕES DA TERMOGRAFIA A PESQUISA EM ENERGIA SOLAR.

O leque de aplicações da termografia dentro da área de pesquisa em energia solar é tão amplo quanto em outras áreas de engenharia. Para a finalidade deste trabalho, os campos de pesquisa vinculados com energia solar foram divididos em aplicações de tecnologias de ambientes construídos, conversão térmica, conversão fotovoltaica e análise do comportamento térmico de componentes.

##### *Imagens Termográficas Aplicadas à Tecnologia do Ambiente Construído*

Neste item há um grande número de aplicações para termografia, que incluem a detecção da presença de umidade (Al-Kassir et al. 2005) em paredes, isolamento de telhados (DOE 2005), transferência de calor por janelas (BNL,1995), etc. Os exemplos apresentados aqui estão reunidos nas Figuras 5(a), (b), (c) e (d). A Figura 5(a) mostra como se pode fazer uma análise de transferência de calor através de janelas. A termografia identifica com precisão a temperatura das superfícies de vidro e permite medir a radiossidade dos mesmos. Analisando a temperatura interna e externa das lâminas de vidro, pode-se estimar o fluxo de calor por condução desde que se conheça a espessura das mesmas. Pela área também é possível estimar o efeito total de radiação proporcionado pelas janelas e medir o efeito do aquecimento solar no piso e outros objetos do interior da construção. A Figura 5(b) mostra uma termografia das telhas em um telhado de uma residência no período noturno.

Observa-se que o topo das telhas apresenta temperatura de 2°C a 4°C mais baixa que o resto do corpo das telhas, efeito esperado pelos fatores de visão de troca radiante entre uma telha e o céu e entre telhas adjacentes. Através da análise da temperatura das telhas, conhecendo condições ambientais, como temperatura ambiente e velocidade do vento, é possível estimar o fluxo de calor transferido através dos telhados e a qualidade do isolamento das coberturas das edificações. A imagem termográfica apresentada na Figura 5(c) mostra a capacidade de medir à distância, com parte de uma cidade sendo registrada em período diurno, no final de uma tarde. Observa-se que algumas regiões se sobressaem por aquecimento devido à incidência da radiação solar. Finalmente a imagem apresentada na Figura 5(d) mostra a água quente escorrendo de uma torneira. A água tem emissividade alta e permite uma media bem precisa de sua temperatura por termografia.

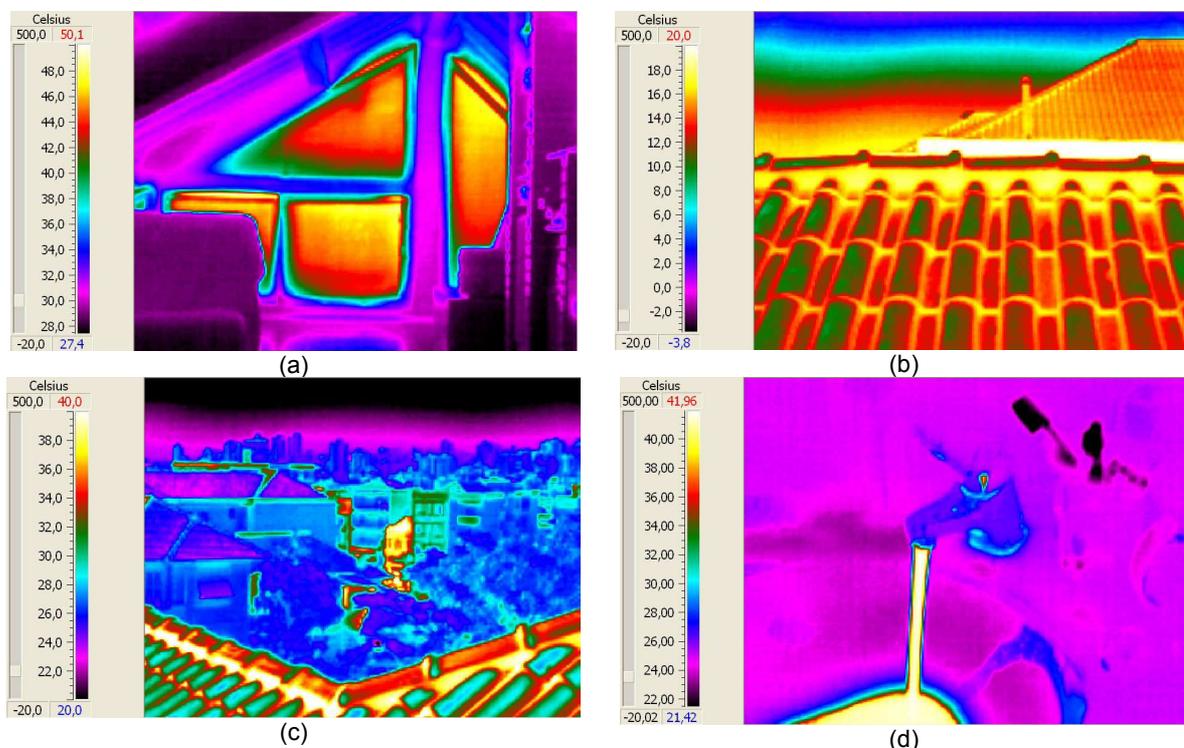


Figura 5 (a) Interior de residência mostrando temperaturas altas nas superfícies de vidro da janela irregular (b) telhado de residência durante a noite (c) parte de cidade durante o dia e (d) torneira com água quente.

#### Imagens Termográficas Aplicadas à Conversão Térmica da Energia Solar

Talvez esta seja a área mais óbvia de aplicações da termografia. Temperatura e fluxo de calor são grandezas presentes em praticamente todos os experimentos desta área.

A termografia pode registrar pequenas variações de temperatura ao longo de um tubo por onde circula água quente, por exemplo. Pode auxiliar a determinar coeficientes de perdas térmicas em coletores solares e em reservatórios de água quente. Pode também ser utilizada para detectar pontos críticos de *vazamento térmico*, isto é, zonas de um sistema isolado onde o fluxo de calor é mais intenso.

Infelizmente (para o uso desta técnica) o vidro é opaco à radiação e uma termografia frontal de um coletor solar convencional revela a temperatura da superfície do vidro e a transferência de calor por radiação, mas não permite a análise da distribuição de temperaturas em uma grade de tubos do absorvedor sob o vidro. Para ensaios específicos, pode-se retirar o vidro e registrar o campo de temperaturas do absorvedor, facilitando análises de qualidade de contato entre chapa e tubos ao circular água quente pelo coletor, podendo ser determinada a eficiência de aleta. Ainda para fins de pesquisa, o coletor pode ser temporariamente coberto por um filme de polietileno ou polipropileno, polímeros que apresentam transparência na região de sensibilidade da câmera. Evidentemente o comportamento do coletor solar estará afetado, inclusive pela mudança do efeito estufa com as coberturas plásticas, mas isto pode ser levado em conta no momento de analisar os resultados encontrados.

Coletores solares para aquecimento de água sem cobertura de vidro, mais comumente utilizados para aquecer água de piscinas ou para projetos de pré-aquecimento, são facilmente termografados, permitindo analisar a evolução da temperatura ao longo de sua superfície durante sua operação. A própria água da piscina pode ter a temperatura de sua superfície analisada por um termógrafo.

Finalmente as técnicas de termografia podem ser utilizadas em sistemas de concentração para analisar indiretamente os efeitos da distribuição de irradiância sobre a superfície receptora. Imagens dos absorvedores de coletores concentradores revelam a uniformidade da iluminação no foco e permitem detectar problemas de isolamento. Técnicas de termografia foram usadas para avaliação da performance térmica de absorvedores de sistemas solares de concentração no NREL (DOE,2006).

Como exemplos de termografias nesta área são apresentadas as Figuras 6(a) e 6(b). A Figura 6(a) mostra a termografia de dois coletores solares, sendo que o que está em primeiro plano teve seu vidro retirado, mostrando nitidamente a tubulação por

onde passa a água. O coletor em segundo plano mostra apenas a temperatura do vidro e seu reflexo, onde nuvens podem ser visualizadas. A Figura 6(b) mostra a distribuição de temperaturas do absorvedor do coletor em primeiro plano da Figura 6(a), exibindo o detalhe de uma zona no absorvedor com temperatura acima do esperado. Esta “mancha” na imagem identifica falhas na soldagem dos tubos. Depois a placa absorvedora, cuja soldagem fora realizada por trás, foi extraída e examinada, sendo esta suspeita de falha na soldagem confirmada.

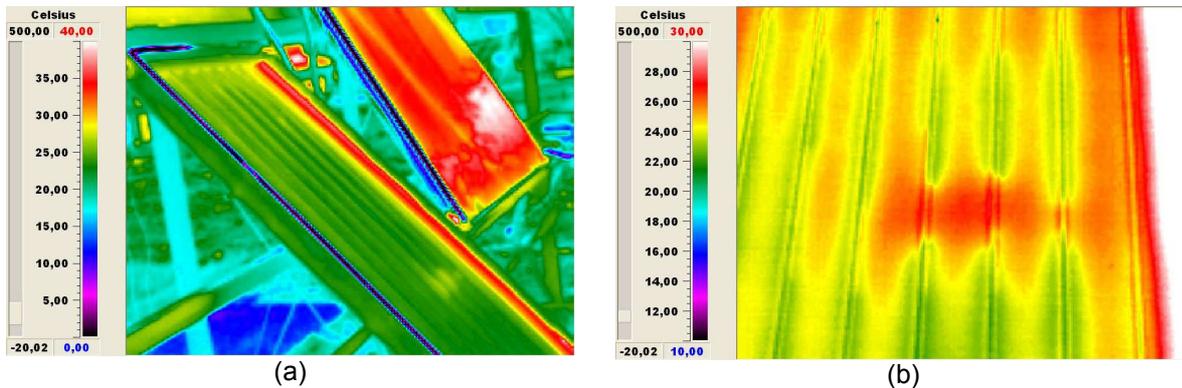


Figura 6 (a) Termografia de um coletor solar, fabricado com chapa de cobre e tubos de cobre pintados de preto, do qual foi retirado o vidro da cobertura e, em segundo plano, um coletor solar com seu vidro. (b) Termografia da placa absorvedora do coletor sem cobertura, mostrando o aquecimento anômalo devido a falhas na soldagem dos tubos à placa.

#### Imagens Termográficas Aplicadas à Conversão Fotovoltaica da Energia Solar

No setor da energia solar fotovoltaica a termografia também é muito útil. Como nas outras aplicações, além de poder determinar a temperatura de objetos sem contato com os mesmos, a termografia de dispositivos fotovoltaicos permite uma visualização de todo o campo de temperaturas em vez de um único ponto. Desta forma verifica-se que é muito fácil analisar a distribuição de temperaturas em células e módulos fotovoltaicos.

As análises térmicas em células de silício mono e policristalino, reversamente polarizadas com uma fonte, pode mostrar problemas de fugas de corrente por efeito de resistências paralelas, introduzidas por algum procedimento indesejado na fabricação. O mesmo ocorre com células de filmes finos (Powala e Dimler, 2003). Isto pode ser detectado facilmente com o uso da termografia, conforme mostrado em King et al., 2000.

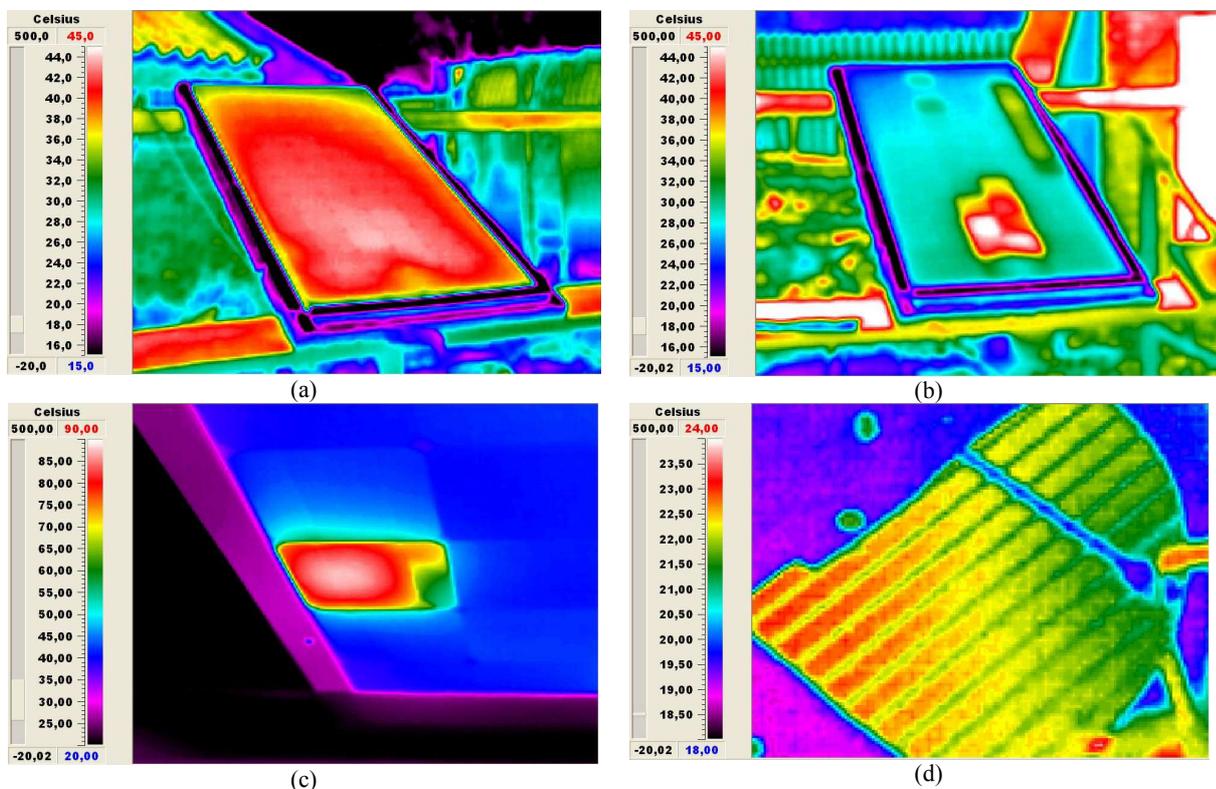


Figura 7 (a) Termografia de módulo fotovoltaico, isolado por trás, em equilíbrio térmico com o ambiente, na condição de circuito aberto. (b) Mesmo módulo fotovoltaico, no mesmo dia em condições ambientais similares, conectado em curto circuito. (c) Termografia posterior de parte de um módulo fotovoltaico com uma célula rachada, que aqueceu até 90°C e (d) Termografia de uma célula fotovoltaica sem encapsulamento iluminada por uma lâmpada.

Os módulos fotovoltaicos em operação podem ter suas temperaturas monitoradas com termografias. Observa-se que em circuito aberto as células estabelecem temperaturas muito parecidas. Mesmo com a termografia sendo realizada pela face frontal, com a cobertura de vidro, é possível identificar temperaturas diferentes nas células porque as mesmas estão laminadas em contato condutivo com o vidro.

A Figura 7(a) mostra um módulo fotovoltaico, isolado termicamente por trás e termografado pela frente. As temperaturas no vidro variam de 37°C a 45°C segundo a informação direta da termografia, sem aplicação de nenhuma correção pelo efeito da reflexão do céu no vidro. Com os módulos em operação, na região de máxima potência, também a temperatura estabelecida em um módulo saudável é muito similar entre as células. A Figura 7(b) mostra uma imagem termográfica do mesmo módulo, mas em curto-circuito. A potência solar convertida em eletricidade na maioria das células acaba sendo dissipada em umas poucas, ressaltando uma zona bem mais aquecida.

A Figura 7(c) mostra a distribuição de temperaturas em um módulo fotovoltaico com uma célula rachada, também em curto-circuito. A termografia foi feita pela parte posterior do módulo, na superfície de Tedlar, e a célula danificada chega a atingir 90°C, enquanto o resto do módulo está a 40°C. Este procedimento parece ser muito útil para identificar defeitos em módulos fotovoltaicos. A Figura 7(d) mostra um exemplo de possibilidade de análise térmica em uma célula fotovoltaica sob ensaio.

*Termografia Aplicada ao Estudo do Comportamento Térmico de Componentes de Sistemas de Conversão da Energia Solar*  
Evidentemente as aplicações termográficas para pesquisa em energia solar não se aplicam exclusivamente aos equipamentos conversores e aos elementos de construção. Cada periférico utilizado em alguma instalação que aproveita a energia solar tem a possibilidade de ser estudada através de técnicas termográficas.

Como exemplos destas aplicações, as Figuras 8(a) e (b) apresentam diferentes aspectos da análise térmica dos inversores utilizados no sistema fotovoltaico conectado à rede do Laboratório de Energia Solar da UFRGS. A Figura 8(a) mostra o dissipador de um dos inversores operando em uma temperatura de 60°C. Observa-se que a temperatura entre as diferentes aletas do dissipador é bem uniforme. Como é esperado, a crista de cada aleta tem uma temperatura um pouco mais baixa do que o corpo e, pelo gradiente térmico, pode ser estimado seu desempenho. Os dissipadores operam em regime de convecção natural.

A Figura 8(b) mostra que os dissipadores dos 3 inversores apresentam diferentes temperaturas de operação, do primeiro plano para o fundo, respectivamente, 60°C, 55°C e 50°C. Esta diferença ocorre apesar dos 3 inversores serem do mesmo modelo, porque os mesmos estão conectados com diferentes potências de módulo fotovoltaicos, nominalmente: 1600Wp, 1400Wp e 1200Wp.

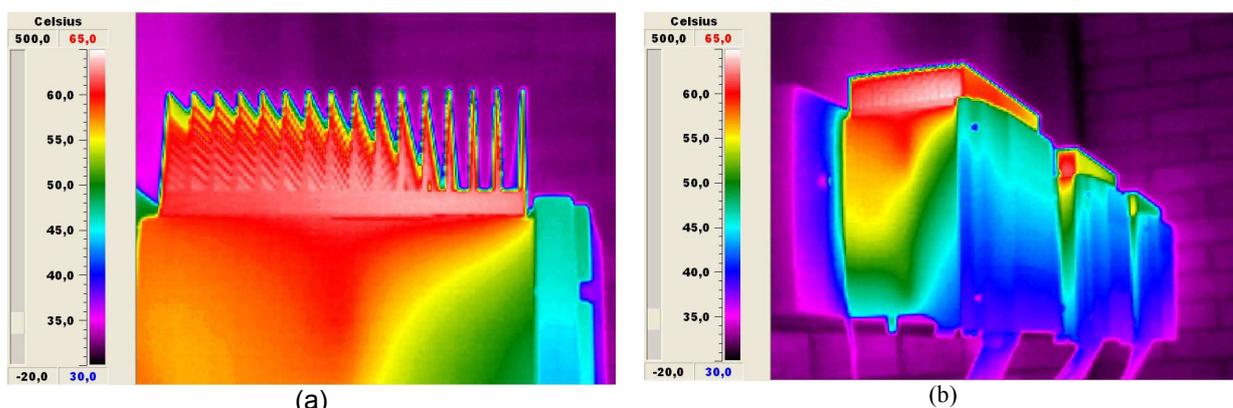


Figura 8. (a) Aletas do dissipador de um inversor em convecção natural. (b) Diferença térmica entre os 3 dissipadores dos inversores, ocasionado por potências fotovoltaicas diferentes.

## SOFTWARE DE PÓS-PROCESSAMENTO

É normal que um equipamento termográfico venha sempre acompanhado de um software de pós-processamento de imagens, para melhor analisar e extrair dados das mesmas. As imagens apresentadas neste trabalho foram obtidas com um equipamento produzido pela empresa Thermoteknix (2006), cujo modelo é identificado por VISIR Ti200. Esta câmera é acompanhada por um software básico que permite realizar uma série de tarefas no computador, depois de adquirir as imagens. Além deste software, tem sido também utilizado no Laboratório de Energia Solar da UFRGS um software produzido no próprio Laboratório, denominado PROIR (Krenzinger e Vera, 2006). Este último permite converter uma imagem em uma matriz de dados de temperatura, ou opcionalmente dados de radiosidade, com formato compatível com programas comerciais de plotagem de gráficos. Esta ferramenta amplia a possibilidade de examinar um determinado fenômeno com mais exatidão. É possível exportar dados para representá-los em gráficos de perfil de temperatura e gerar análises estatísticas, como um gráfico de frequências de temperaturas em uma área selecionada da imagem. Um exemplo desta possibilidade é apresentado na Figura 9, com um gráfico em 3D da distribuição de temperaturas da célula fotovoltaica rachada, apresentada anteriormente na Figura 7(c), agora em uma condição diferente de temperatura, com o máximo no entorno de 75°C.

## CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou algumas possibilidades e limitações do emprego de uma câmera termográfica como ferramenta na pesquisa do comportamento térmico de elementos utilizados na conversão de energia solar. Foi apresentada a necessidade de corrigir os efeitos da reflexão e opacidade do vidro quando os equipamentos de conversão de energia solar são termografados pela cobertura. A termografia demonstrou possibilidades de diagnosticar defeitos e peculiaridades relacionados com a distribuição de temperatura em diversas aplicações relacionadas com energia solar e principalmente permitir examinar o mapeamento do campo de temperaturas de um objeto ou de um grupo de objetos com excelente resolução.

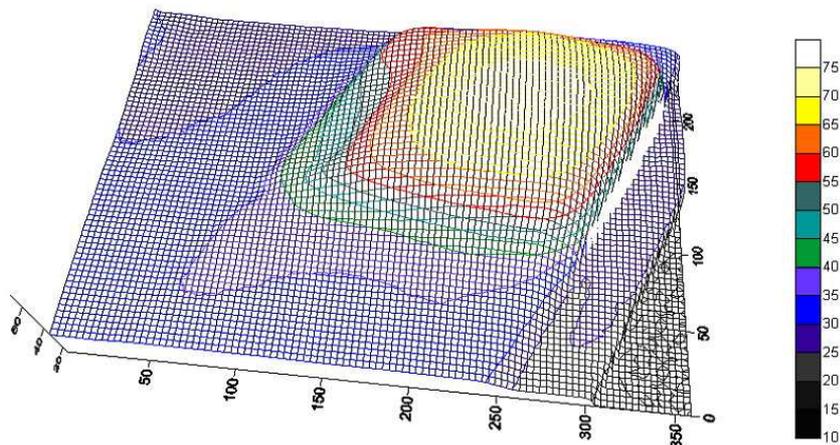


Figura 9. Gráfico tridimensional indicando a distribuição de temperaturas sobre uma célula fotovoltaica com defeito, obtido a partir de dados exportados pelo programa PROIR.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil pelo apoio financeiro.

## REFERENCIAS

- Al-Kassir, A.R., Fernandez,J., Tinaut F.V., Castro F.. (2005) Thermographic study of energetic installations. Applied Thermal Engineering 25 183–190.
- BNL (1995). Fenestration R&D news, Lawrence Berkeley National Laboratory, Energy & Environment Division, Building Technologies Program. Berkeley, 12 pp.
- DOE (2006). U.S.Department of Energy Solar Energy Technologies Program, FY 2005 Annual Report.Denver, 218 pp.
- DOE (2005) . DOE Building Technologies Programa - Zero Energy Homes folder. Denver, 6 pp.
- King, D. L., Kratochvil, J. A., and Quintana, M. A., T. J. McMahon (2000), Applications for Infrared Imaging Equipment in Photovoltaic Cell, Module, and System Testing. Sandia National Laboratory Technical Report (disponível em <http://www.sandia.gov/pv/docs/PDF/kingquin.pdf>)
- Krenzinger, A., Vera, L.H.(2006),Desenvolvimento de Software de Pós-Processamento de Imagens Termográficas. Trabalho submetido ao 11th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences (ENCIT-2006),Curitiba.
- Oda, N., Tanaka, Y., Sasaki,T., Ajisawa, A., Kawahara, A., Kurashina, S. NEC Res. & Develop., Vol. 44, n° 2, 2003.
- Powala,M. Dimler, B. (2003). New Developments in CIGS Thin Film Solar Cell Technology. 3th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka
- Termoteknix (2006) - [www.termoteknix.com](http://www.termoteknix.com)

**ABSTRACT:** Thermography is a technique that allows recording the temperature field of a target scene, through measurement of the infrared radiation that exit from the objects that are in the field of view of the thermographic camera. In this paper there are presented a quick description about how a thermographic camera works and several thermography applications as auxiliary tool in solar energy research, including building thermal analysis, thermal conversion and photovoltaic conversion devices. Thermographic images are presented as examples for showing the possibilities associated with this technique as well as its limitations and possible errors due to the IR reflections in the glass surfaces.

**Keywords:** Thermography, thermographic images, infrared radiation, temperature field.