

ISSN 0104-1347

Termopilhas de filmes finos a vácuo por evaporação de metais

Thin film vacuum-thermopiles by metal evaporation

João Francisco Escobedo¹, Valéria de Almeida Frisina², Reinaldo Prandini Ricieri² e Modesto Antonio Chaves²

Resumo - Descreve-se um método de obtenção de termopilhas a vácuo usando processo fotolitográfico e evaporação de metais. Foram elaboradas termopilhas tipo preto/branco nas configurações estrela e disco-concêntrico, e tipo preta, ambas de bismuto/antimônio, depositados em substrato de vidro, acrílico, kapton e mylar. A avaliação foi determinada através da análise dos parâmetros: sensibilidade (Vm^2/W), responsividade (V/W) e constante de tempo (s) em condições de campo. Os resultados mostraram que o desempenho das termopilhas é dependente do tipo de substrato, apresentando variações de 1,5s - 9,8s para a constante de tempo; $7,7 Vm^2/W$ - $99,98 Vm^2/W$ para sensibilidade e de $0,15V/W$ - $47,90 V/W$ para a responsividade. Sugestões para a otimização do método são apresentadas e discutidas em função dos problemas ainda existentes deste desenvolvimento tecnológico.

Palavras-chave: termopilhas, evaporação de metais, filme fino.

Abstract - This paper presents a description of the method for vacuum thermopiles acquisition using photolithographic and metal evaporation process. Black/White in the star and disc-concentric configuration and black thermopiles have been constructed, both with bismuth/antimony thermopairs, and deposited in glass, acrylic, kapton and mylar substrates. The assessment has been determined in field conditions through the parameter analyses: sensitivity (Vm^2/W), responsivity (V/W) and time constant (s). The results have showed the thermopile performance is substrate dependent, ranging from 1.5s - 9.8s for the time constant; $7.7 Vm^2/W$ - $99.98 Vm^2/W$ for sensitivity and $0.15V/W$ - $47.90V/W$ for responsivity. Suggestions to the still existing problems related to this technological approach have also been presented and discussed.

Key words: thermopiles, metal evaporation, thin film

Introdução

A termopilha é na atualidade, o sensor de radiação mais utilizado na detecção das irradiâncias solar global, difusa e direta (ROBINSON, 1966; COULSON, 1975 e IQBAL, 1982). As razões da escolha estão associadas à característica da não seletividade na absorção da luz solar; por responder linearmente em largo intervalo de irradiância; esta-

bilidade, reprodutibilidade e não necessitar de fonte externa de energia. Basicamente, é constituída por uma bateria de termopares em série associada a um absorvedor de radiação: a função do circuito termoeletrico é converter indiretamente a energia da radiação incidente em energia elétrica através de um efeito térmico do absorvedor. Se a termopilha tiver N termopares de constante termoeletrica α_{AB} em $V/^\circ C$, a força eletromotriz gerada (V_{AB}) para uma variação infinitesimal dT é expressa por:

¹Depto Recursos Naturais /FCA/UNESP – CEP 18618-000 Botucatu/SP

²Pós-Graduação em Energia na Agricultura/FCA/UNESP, CP 237, CEP 18618-000, Botucatu-SP - e-mail: escobedo@fca.unesp.br

$$V_{AB} = N \int_{T_r}^T \alpha_{AB} dT \quad (1)$$

A performance da termopilha pode ser calculada em dois estágios. No primeiro (efeito primário) o aumento de temperatura produzido pela radiação é calculado em função dos parâmetros térmicos como a capacidade térmica total H em Joule por grau Kelvin (J/K) e condutividade térmica total K em Watts por grau Kelvin (W/K) do absorvedor. No segundo estágio (efeito secundário), o aumento de temperatura é utilizado para calcular a característica do sinal de saída representado pela responsividade (V/W) ou sensibilidade de resposta (Vm^2/W).

Quando um fluxo de radiação Φ (ω) incide no absorvedor da termopilha, o aumento de temperatura provocado ΔT pode ser calculado através do balanço de energia, ou seja:

$$H \frac{d(\Delta T)}{dt} + K \cdot \Delta T = \Phi \quad (2)$$

onde:

$$H = \frac{d(\Delta T)}{dt} = m \cdot c_p \cdot \frac{d(\Delta T)}{dt}$$

é a taxa de calor absorvida; m a massa da termopilha; c_p o calor específico do substrato; $K\Delta T$ o calor perdido através da condução térmica entre o detector e a fonte fria. Assumindo a potência radiante como sendo uma função periódica do tipo: $\Phi_o = \Phi e^{j\omega t}$, onde: Φ_o = amplitude da radiação senoidal e $\omega = 2\pi f$. Tem-se para a equação diferencial linear a solução:

$$\Delta T = \Delta T_o \cdot e^{-(K/H)t} + \frac{\Phi_o \cdot e^{j\omega t}}{(K + j\omega H)} \quad (3)$$

O primeiro termo da equação é a parte transiente do aquecimento da termopilha, e quando o tempo aumenta este termo decresce exponencialmente, tendendo a zero. Assim ele pode ser eliminado sem nenhuma perda generalizada na variação da temperatura ΔT . Assumindo que ϵ é a emissividade do absorvedor, pode-se escrever que a variação de temperatura ΔT devido a um fluxo de radiação incidente na termopilha é:

$$\Delta T = \frac{\epsilon \cdot \Phi_o \cdot e^{j\omega t}}{K + j\omega H} \quad (4)$$

tomando o módulo da expressão (4), tem-se que:

$$\Delta T = \frac{\epsilon \cdot \Phi_o}{K \{1 + \omega^2 (H/K)^2\}^{1/2}} \quad (5)$$

A relação (H/K) possui dimensão de tempo e é denominada constante de tempo (τ). Como $1/\epsilon$ é igual aproximadamente a 0,368, a constante de tempo fica definida como o tempo necessário para que a milivoltagem gerada na termopilha alcance 0,632 vezes o seu valor de equilíbrio. Este parâmetro determina para o sensor ou o instrumento que dele faz uso, a velocidade de resposta. Se a condutância térmica (K) for elevada, a termopilha responderá rapidamente (constante de tempo baixa). Se contudo, a termopilha possuir grande capacidade térmica (H), sua resposta temporal será lenta (constante de tempo elevada). Assim, a constante de tempo é dada por:

$$\tau = H/K \quad (6)$$

e a equação (5) pode ser escrita, como:

$$\Delta T = \frac{\epsilon \cdot \Phi_o}{K \{1 + \omega^2 \tau^2\}^{1/2}} \quad (7)$$

Substituindo (7) em (1), tem-se que:

$$V_{AB} = \frac{N \cdot \epsilon \cdot a \cdot \Phi_o}{K \{1 + \omega^2 \tau^2\}^{1/2}} \quad (8)$$

A relação V_{AB}/Φ_o (VW^{-1}) é denominada: responsividade de R e define para a termopilha a amplitude do sinal gerado em Volts por Watts de potência radiante incidente. Para frequência de resposta muito baixa, o produto $\omega^2 \cdot \tau^2$ é muito menor que 1, ou seja $\omega^2 \cdot \tau^2 \ll 1$, de forma que a equação $\tau = H/K$ pode ser expressa aproximadamente por:

$$R = \frac{N \cdot \epsilon \cdot a}{K} \quad (9)$$

Uma pequena condutância térmica, e elevados valores do número de termopares, constante termoelétrica e emissividade, geram alta responsividade. Nestas condições, a equação (6) mostra que se tem uma limitação prática na performance do detector, pois ele terá uma constante de tempo elevada. Relacionando-se as equações (1) e (6), através de K , tem-se a responsividade em função da constante de tempo, por:

$$R = \frac{N \cdot \epsilon \cdot a}{H} \cdot t \quad (10)$$

que mostra a dependência de proporcionalidade entre estes dois parâmetros operacionais.

De acordo com as equações (6) e (10) a escolha das características operacionais em termos da responsividade e constante de tempo para uma determinada termopilha consiste basicamente em selecionar adequadamente o número de termopares, tipos de metais, capacidade e condutividade do absorvedor. Para alguns tipos de aplicações é interessante termos responsividade elevada e baixa constante de tempo, como é o caso dos radiômetros solares.

Apesar da constituição e princípio serem bem conhecidos, a construção da termopilha não é simples: o ponto crítico reside na obtenção padronizada do circuito de termopares, considerando o número elevado de junções para pequena área de absorção. Alguns métodos são conhecidos cientificamente como eletrodeposição e a vácuo. Pelo processo de eletrodeposição, como mostram os trabalhos de FARIAS (1985) e MARUR & PINTO (1992), é possível obter termopilhas depositando-se um metal sobre o outro. Um exemplo é a termopilha de cobre/constantan, onde o cobre é depositado no fio de constantan. Este método, por exigir excessivos cuidados na limpeza, controle na eletrodeposição e tempo longo de operação no depósito metálico, do ponto de vista industrial, compromete a produção seriada, inviabilizando-o para fins comerciais. O método à vácuo, usando técnicas de filmes finos obtidos por evaporação metálica modernizou-se rapidamente em função do crescente desenvolvimento tecnológico dos processos litográficos ou microfotolitográficos de alta resolução como mostram os trabalhos de HARRIS (1946), BOIVIN & SMITH (1978), KODOTO (1989) e BACIOCCHI et al. (1990). As vantagens do método estão no controle de qualidade na obtenção do circuito de termopares da termopilha ou microtermopilha. Vários fabricantes que comercializam radiômetros solares utilizam o mé-

do à vácuo, porém os mantêm na forma de segredo industrial.

Considerando que o Brasil é um país em desenvolvimento e que pesquisas nas áreas de aproveitamento da energia solar, meteorologia, ciências térmicas, biológicas e agrárias vem obrigando a importação destes equipamentos a custos muito elevados, sem a mínima condição de atender o monitoramento sobre toda a extensão do território nacional, objetivou-se neste trabalho, a elaboração de um método simples de construção de termopilhas a vácuo com viabilidade tecnológica para estimular a industrialização de radiômetros solares no país a custos moderados.

Material e métodos

A denominação TERMOPILHA DE FILME FINO POR EVAPORAÇÃO DE METAIS refere-se às termopilhas cujo circuito de termopares são depósitos metálicos finos, obtidos através de processo fotolitográfico e técnica de evaporação metálica.

Basicamente ela é composta de um extrator de calor (peça metálica) e um substrato cujo circuito de termopares está depositado na face inferior e, na face superior o revestimento diferencial ordenadamente depositado: seção absorvedora na bateria de junções ativas e seção refletora nas junções passivas.

Dois tipos de termopilhas foram projetadas: preto/branco e o preto. O tipo preto/branco foi elaborado nas configurações disco concêntrico e estrela. Na configuração disco concêntrico, o circuito de termopares está distribuído radialmente no absorvedor e possui as baterias de junções passivas nas extremidades e no meio do circuito, as junções ativas (Figura 1a). O circuito de termopares possui 36 termopares ou 72 junções. Na geometria estrela, o circuito está distribuído em espiral e possui as baterias de

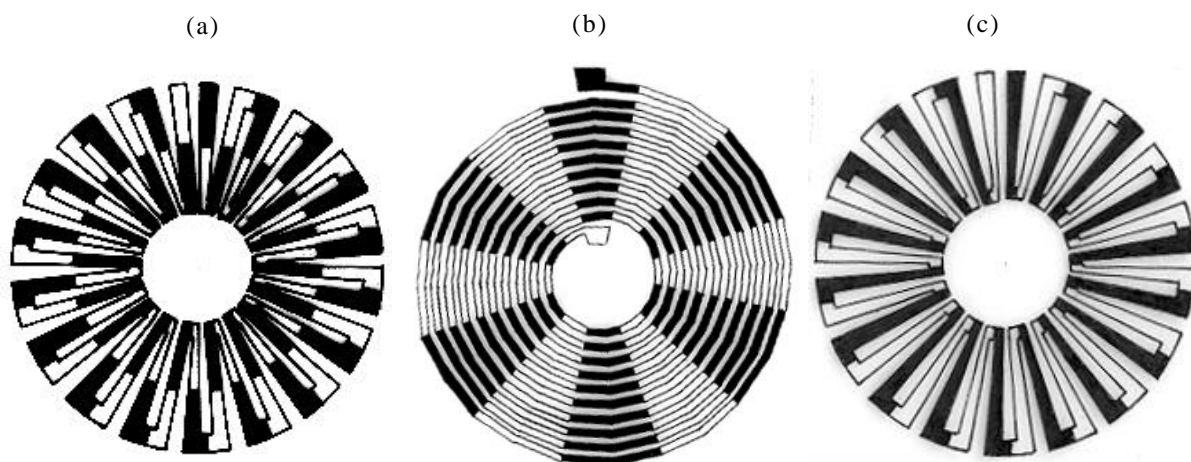


Figura 1. Esquema da termopilha disco concêntrico (1a), estrela (1b) e preta (1c).

termopares dispostas no sentido radial de forma alternada, ativa e passiva (Figura 1b). O circuito contém 60 termopares ou 120 junções. O tipo de termopilha preto foi desenvolvido conforme o circuito termoeétrico da Figura (1c). Nesta configuração, o circuito de termopares está distribuído radialmente com as baterias posicionadas na seguinte forma: no extremo superior as junções passivas, e no extremo interior, as junções ativas. O número de termopares da termopilha preta é 30.

Neste trabalho os interesses foram concentrados em termopilhas para uso solar e o método de filmes finos permitiu a construção de termopilhas selecionando-se os parâmetros da equação (10): número de termopares, seleção dos metais, substrato e extrator de calor. Termopilhas para medidas de luz laser tiveram um desenvolvimento em separado como mostra o trabalho de ZÍLIO & ESCOBEDO (1991).

Número de termopares (N): 60 foi o número de termopares máximo atingido. O limite é estabelecido pelo processo fotolitográfico. Este número proporcionou grande amplificação do sinal elétrico e não causou dificuldade visual na obtenção do circuito de termopares durante a evaporação dos dois metais.

Metais: A seleção dos dois metais foi feita pelo valor da constante termoeétrica. Dois outros fatores foram levados em consideração nesta escolha, a saber, os metais não devem mudar seu potencial termoeétrico após evaporados, como é o caso das ligas, e, os filmes devem ser resistentes a contatos mecânicos de modo a suportar as cargas das tintas absorvedoras e refletoras. Dos pares metálicos citados na literatura (BUDDE, 1983; DERENIAK & CROWE, 1984), o **bismuto/antimônio** cujo $\alpha_{AB} = 109 \mu\text{V}/\text{C}$ foi o que preencheu os requisitos.

Substrato: Uma vez definidos o número de termopares e metais, a seleção do substrato foi a mais importante, pois praticamente permitiu a definição das características desejadas de responsividade e constante de tempo. O substrato além de ser o suporte do circuito tem como principal função realizar as trocas de calor entre o absorvedor térmico e o extrator de calor, considerando-se que o circuito metálico possui massa desprezível. A capacidade térmica deve ser baixa e a condutividade alta. Outra característica importante na escolha do substrato foi o polimento superficial do material. Para uso na radiometria solar os substratos de filme de poliamida (kapton), mylar (25 μm), acrílico (0,5mm) e vidro (0,5mm), testados previamente, satisfizeram ambas as condições. O kapton, em particular por ser um filme resistente a altas temperaturas, e por existir comercialmente sob diversas espessuras, foi estudado separadamente. Os

resultados mostraram pequenas diferenças nos valores da constante de tempo e sensibilidade e finalmente optou-se pelo tipo que possui a espessura de 25 μm cuja utilização comercial é mais acentuada (ESCOBEDO et al., 1992).

Extrator de calor: A fonte fria da termopilha é componente responsável pelo escoamento do calor do absorvedor para o ambiente. Quanto maior a condutividade térmica, mais eficiente é a retirada de calor do absorvedor. O metal selecionado foi o alumínio que, além de possuir boa condutividade térmica, tem baixo custo, é de fácil usinagem e permite bom acabamento. Para otimizar este componente foram necessários muitos testes preliminares até serem atingidas as configurações mostradas na Figura (2a) para vidro e acrílico e Figura (2b) para o kapton e mylar.

As termopilhas foram elaboradas em 3 etapas: obtenção das máscaras metálicas; obtenção do circuito de termopares e montagem.

Máscaras Metálicas: Para elaboração dos circuitos de termopares das Figuras (1a), (1b) e (1c), obedeceu-se à característica fundamental das termopilhas preto/branco e preta, projetando-se por técnicas fotolitográficas as junções ativas posicionadas na parte preta e as passivas na parte branca (termopilha preta/

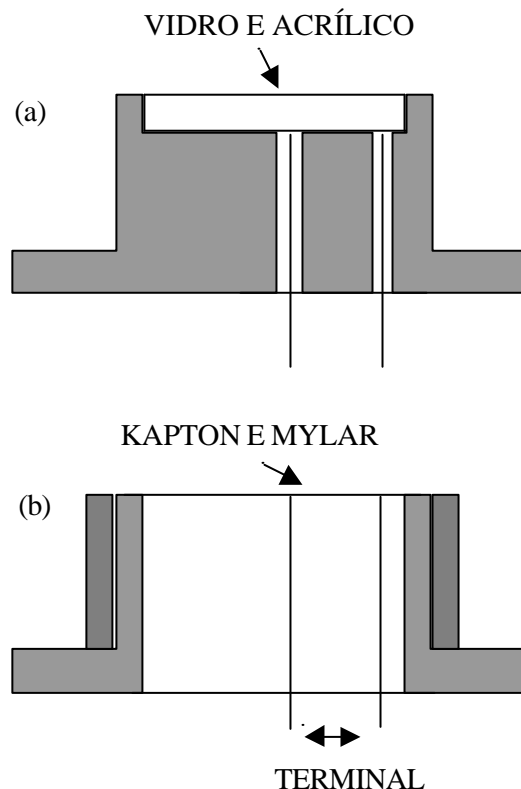


Figura 2. Extrator de calor das termopilhas com substratos de: (a) acrílico e vidro; (b) Kapton e mylar.

branca) ou onde não incide a radiação (termopilha preta). O "lay out" dos circuitos foi projetado em escala ampliada onde foi definido previamente, o número de termopares, largura e espaçamento das trilhas condutoras.

As máscaras metálicas foram obtidas em quatro etapas: A primeira consistiu em separar os circuitos de termopares projetados em dois circuitos complementares A e B. Para exemplificar utilizou-se o caso da termopilha estrela com 60 termopares (Figura 3). Tanto o circuito A como o circuito B possuem as mesmas dimensões e superpostas formam o circuito original A + B. Nesta fase, tomou-se cuidado com as dimensões, a fim de se evitar erros posteriores na acoplagem das máscaras e o comprometimento da deposição dos metais. Na segunda parte, os circuitos A e B foram transportados para filmes fotográficos positivos e reduzidos até as dimensões estabelecidas previamente: termopilha preto/branco ($\phi = 25$ mm) e termopilha preta ($\phi = 30$ mm). Esta operação foi realizada com uma máquina copiadora, ampliadora e redutora AGVA, com capacidade de redução de quatro vezes. Os filmes fotográficos e soluções reveladoras são fabricados pela KODAK. Na terceira etapa, os fotolitos com os circuitos A e B foram transportados para placas metálicas de cobre. Utilizou-se folhas de cobre com espessura de 0,06mm

que foram submetidas previamente à limpeza com auxílio de lixa e álcool isopropílico para remoção de gorduras e partes oxidadas. Após a limpeza as folhas de cobre foram revestidas com filme fotopolimérico tipo Riston fabricado pela Du Pont na forma de filme laminar. Para aderência perfeita na folha de cobre o conjunto foi aquecido a 110°C. Em seguida, os fotolitos foram colocados sobre o conjunto filme-placa e expostos à luz ultra violeta com potência de 2000W durante 20s permitindo deste modo a polimerização do revestimento, enquanto que a área protegida pelos fotolitos não se polimerizou. Desta forma, os circuitos A e B ficaram gravados no filme fotopolimérico.

Na etapa final, a placa de cobre revestida com o filme foi colocada em banho revelador à temperatura ambiente com carbonato de sódio a 1% e a remoção do filme não polimerizado foi feita com revelador RISTON S-100%. Finalmente, as placas foram introduzidas em banhos com cloreto de amônia a 48°C, onde as partes não polimerizadas foram corroidas, produzindo-se as máscaras metálicas A e B.

Evaporações: Antes da evaporação dos dois metais, os substratos passaram por rigoroso processo de limpeza à base de álcool para se eliminar as gorduras que freqüentemente impedem a perfeita adesão de filmes finos em superfícies. Os circuitos de termopares

foram obtidos em duas evaporações sucessivas. Na primeira, fixou-se a máscara metálica A sobre o substrato em suporte próprio da câmara de evaporação, com o vapor do bismuto se depositando exatamente sobre as linhas definidas pela máscara. Para a segunda evaporação substituiu-se a máscara A pela máscara B repetindo-se a operação para o antimônio, fechando-se o circuito de termopares. A espessura selecionada para os filmes depositados foi da ordem de 0,3 μ m e obtidos em uma evaporadora BALZERS BAK 600 tipo "box coater" do Instituto de Física e Química de São Carlos/SP. Essa evaporadora possui uma câmara de evaporação com capacidade de até 100 termopilhas e um sistema de controle dos parâmetros de evaporação, onde um microprocessador permite o controle automático da espessura da camada de filme depositado, taxa de deposição, pressão da câmara, potência de aque-

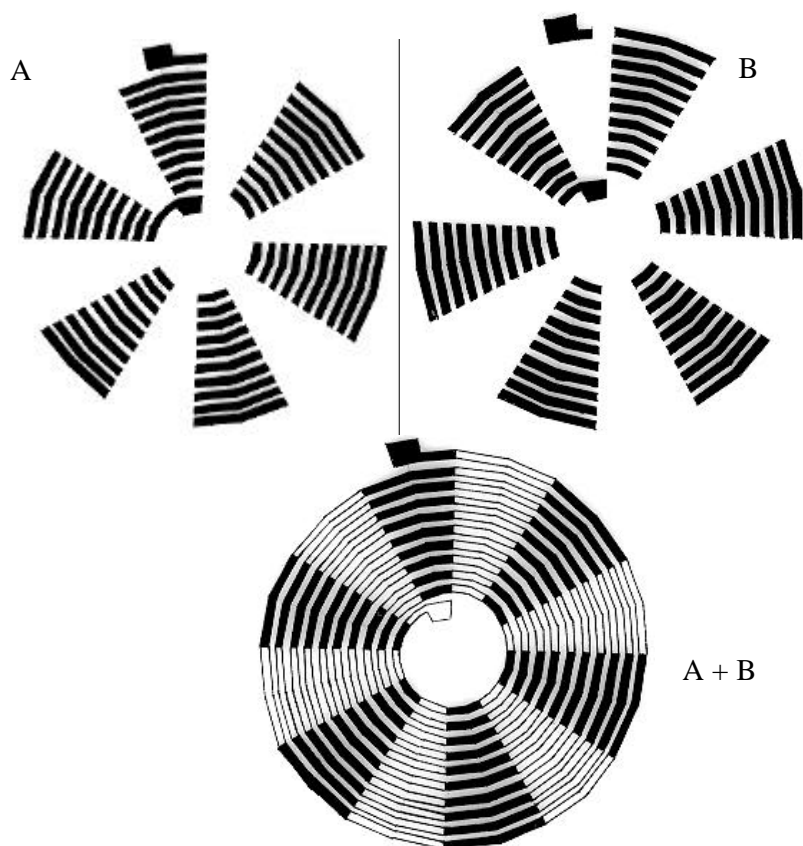


Figura 3. "Lay out" da termopilha estrela com 60 termopares.

cimento dos cadinhos e dispositivos para girar os substratos.

Montagem das termopilhas: Obtidos os circuitos de termopares nos substratos, estes foram vistoriados para se verificar a existência de curto circuito entre as trilhas metálicas, que certamente comprometeria a simetria da absorção. Em seguida, os substratos de kapton e mylar foram centralizados sobre o suporte e prensados por um anel, ficando totalmente esticado e livre de rugosidade (Figura 2a). Para o caso do acrílico e vidro, os discos foram colocados no extrator de calor conforme mostra a Figura (2b). Em ambos os casos para a extração dos sinais elétricos das termopilhas nos polos terminais (+) e (-), fios de bitola de cobre foram colados com tinta prata que após seca torna-se condutora de eletricidade.

Com os circuitos de termopares instalados em seus suportes (extrator de calor), pintou-se as baterias de termopares conforme mostram as configurações da Figura (4): revestimento preto nas junções ativas e revestimento branco nas junções passivas. Na termopilha disco concêntrico, o absorvedor recebeu revestimentos de anéis concêntricos na sequência branco-preto-branco; na termopilha estrela, os revestimentos preto-branco foram depositados na forma de setores circulares de forma alternada, e na termopilha preta, o revestimento constituído de dois discos concêntricos, de alumínio nas junções passivas e o preto nas junções ativas.

As termopilhas foram calibradas através de ensaios experimentais com radiação solar determinando-se a constante de tempo (s) e a sensibilidade de resposta (Vm^2/W). As termopilhas utilizadas como referência foram da Eppley PSP com sensibilidade igual a $9,48 \times 10^{-6} Vm^2/W$ e Kipp-Zonen CM5 com sensibilidade igual à $13,04 \times 10^{-6} Vm^2/W$ instalados em piranômetros. Para a determinação da constante de tempo as termopilhas foram submetidas a estímulos de radiação que produziram curvas de aquecimento e quando cessados, curvas de resfriamento. Na obtenção da sensibilidade, os piranômetros aos pares (protótipo x referência) foram submetidas a medidas simultâneas de irradiâncias solares, entre 0 e $1000W/m^2$ ao longo de um dia de exposição.

Foram avaliados 8 tipos de termopilhas com variações na configuração, substrato, área, nas seguintes especificações:

- 3 termopilhas disco concêntrico em **substratos de vidro, kapton e mylar** ($\phi = 25$ mm) com 36 termopares;
- 3 termopilhas estrela em substrato acrílico, kapton e mylar ($\phi = 25$ mm) com 36 termopares;

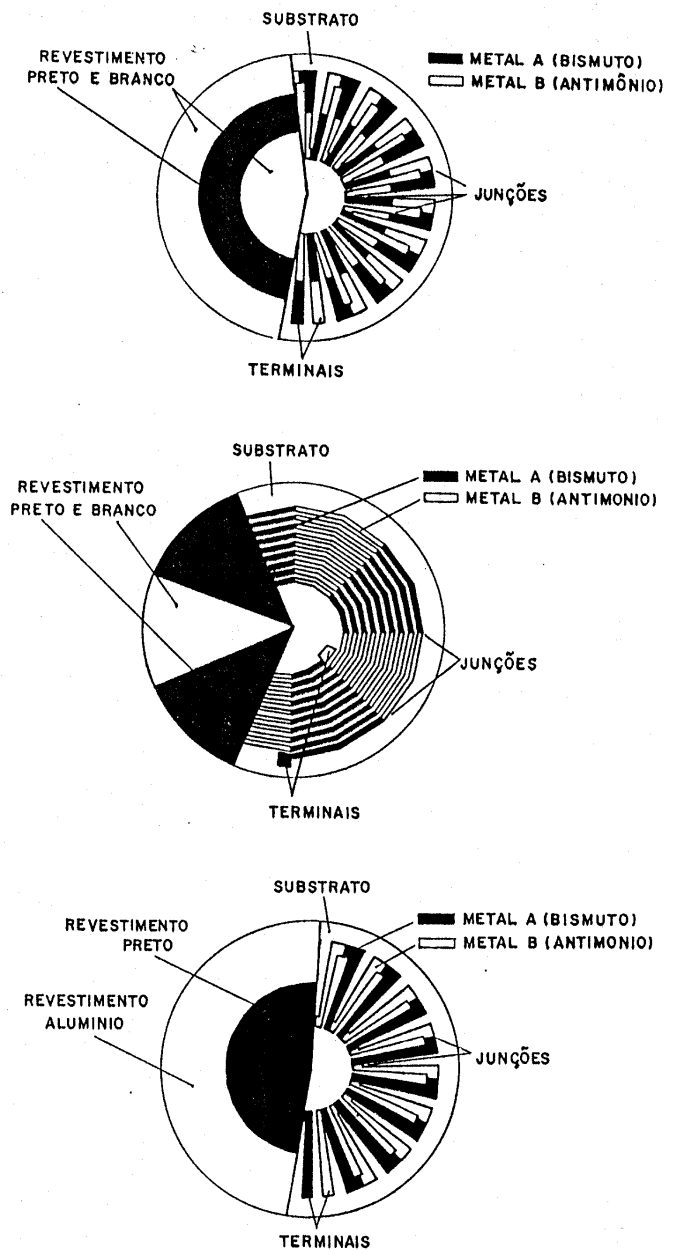


Figura 4. Vista parcial (superior e inferior) das termopilhas com revestimento preto/branco e preto/alumínio.

- 2 termopilhas preta em substrato kapton e **mylar** ($\phi = 32$ mm) com 30 termopares;

Na aquisição dos dados, foi usado um DATALOGGER 21X da CAMPBELL, operando na frequência de 1 Hz e armazenada média de 5 minutos. As curvas de resposta das termopilhas utilizadas para obtenção da constante de tempo foram obtidas por um registrador potenciométrico de 4 ½ dígitos.

Resultados e discussão

A constante de tempo (τ) - tempo necessário para que o sensor atinja 63,2% do valor do equilíbrio térmico para determinado estímulo luminoso na fase de aquecimento e tempo de resposta (T) - tempo para que o sensor atinja a estabilidade, calculados a partir das curvas para cada termopilha são apresentados na Tabela (1).

Tabela 1. Constante de tempo (τ) e tempo de resposta (T) das termopilhas disco concêntrico em substrato de vidro, kapton e mylar; estrela em substrato acrílico, kapton e mylar; preto em substrato kapton e mylar, em segundos (s).

	Disco Concêntrico			Estrela			Preto	
	Vd	Kp	My	A _{cr}	Kp	My	Kp	My
τ (s)	9,8	1,5	4,0	5,2	2,2	4,2	3,6	3,6
T (s)	30,0	6,0	12,0	24,0	6,0	8,0	12,0	18,0

* Vd = vidro; Kp = kapton; My = mylar; A_{cr} = acrílico.

Os resultados mostram que as constantes de tempo variaram aproximadamente entre 1 s a 10s para os três substratos, sendo mais rápidas para os substratos de kapton, mylar, acrílico e vidro, respectivamente, muito embora não haja uma diferença significativa entre os três primeiros. A diferença nos valores das constantes de tempo entre os grupos kapton/mylar e acrílico/vidro deve-se às diferenças das capacidades térmicas, quer seja pela massa ou calor específico, e da condutividade dos quatro materiais. Já o tempo de resposta, região do patamar das curvas, os resultados obtidos com o kapton e mylar foram consideravelmente melhores que os substratos de acrílico e vidro, independentemente do tipo de termopilha.

Os valores simétricos das constantes de tempo observados em cada curva - constante de tempo igual na fase de aquecimento e resfriamento, demonstram que nos quatro substratos o balanço de energia se estabelece de maneira similar, tanto quando o sensor re-

cebe energia como quando perde. Esta característica é importante para que a termopilha responda linearmente após horas de medição como é o caso dos radiômetros solares.

Comparando-se os resultados obtidos com os valores apresentados na literatura, pode-se considerá-los satisfatórios, sendo similares aos dos aparelhos de radiometria solar comerciais. Numericamente os resultados obtidos se enquadram nos limites estabelecidos pela Organização Mundial de Meteorologia ou seja, no máximo de 30 segundos (WMO, 1983).

A Figura (5) mostra três curvas de sensibilidade obtidas com as termopilhas disco concêntrico nos substratos de kapton, mylar e vidro. As curvas de respostas mostram elevado nível de linearidade para grande intervalo de irradiância, independentemente do tipo de substrato, e confirmam a eficiência da extração do calor do absorvedor para o extrator e deste para o ambiente, mantendo a termopilha a uma

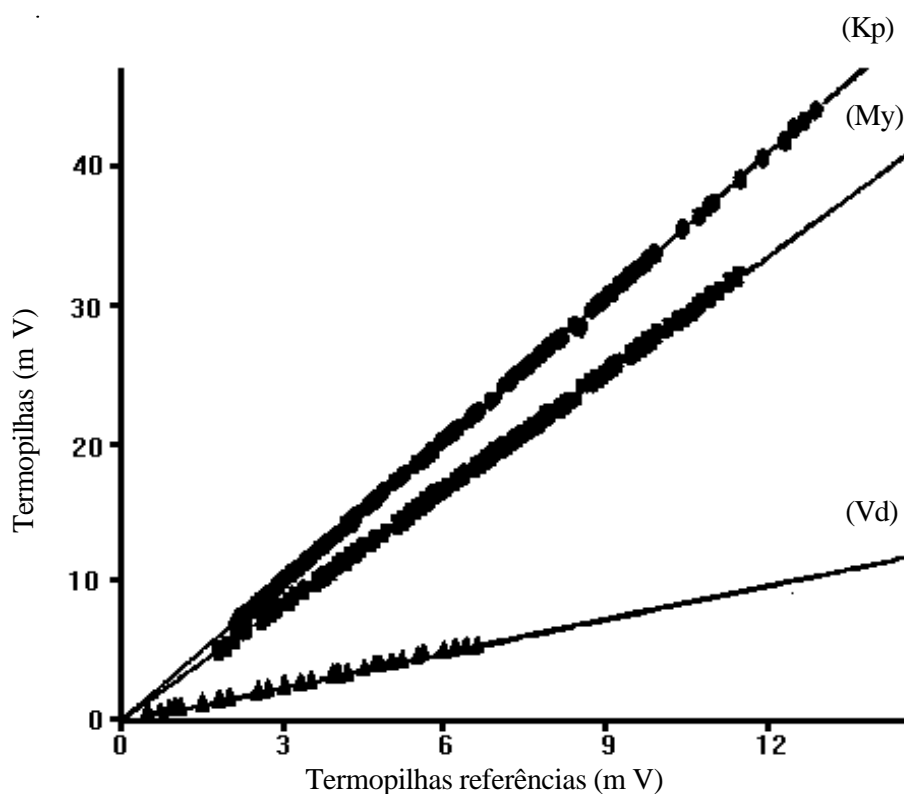


Figura 5. Curvas de respostas das termopilhas disco-concêntrico, estrela e preto.

temperatura constante próxima à temperatura ambiente, mesmo após horas de medição. Os resultados são indicativos de que as termopilhas poderão ter bom desempenho quando instaladas nos radiômetros solares. A Tabela (2) mostra os resultados obtidos nas análises de regressão linear, onde são relatados os números de dados observados (N), coeficientes de determinação (r^2), os valores do teste F a nível de 1% de significância.

A sensibilidade de resposta S_i (Vm^2/W) foi calculada pela expressão: $S_i = (a \pm \delta_a) + (b \pm \delta_b) S_{ref}$ onde S_{ref} é a sensibilidade da termopilha referência, Eppley PSP (preta) ou Kipp-Zonen CM5 (preta). As responsividades R (V/W) foram calculadas a partir das sensibilidade através da equação $R_i = S_i/A$ onde A é a área do absorvedor térmico das termopilhas em metro quadrado.

Analisando os resultados pelo coeficiente de correlação conclui-se que as regressões lineares estimados se ajustam aos dados, como mostram os elevados valores de r^2 próximo a 100%. O valor do teste estatístico F é significativo a nível de 1% de probabilidade, demonstrando alta correlação entre os sinais gerados pelas termopilhas de filmes finos e as de referência. Os resultados obtidos para a sensibilidade foram considerados bons, sendo mais elevados para os substratos de kapton e mylar do que para o de vidro e acrílico, independentemente do tipo de termopilha. Com exceção da termopilha de vidro os demais substratos apresentaram sensibilidade e responsividade superiores às das termopilhas Eppley e Kipp-Zonen. Outra importante característica observada foi a amplitude de variação da sensibilidade obtida para os quatro substratos: $7,7 \mu Vm^2/W$ até aproximadamente $100Vm^2/W$. Este aspecto é interessante porque permite a construção da termopilha em função do nível de irradiância desejado para diferentes aplicações da radiação solar. Atualmente a sensibilidade não é uma característica operacional tão crítica

no desempenho total de um detector solar, devido à disponibilidade de amplificadores estáveis e de baixo custo, entretanto, considerando-se as similaridades dos sensores em questão, as termopilhas de filme fino apresentam vantagens sobre as termopilhas Eppley e Kipp-Zonen visto que sensores com maior resolução tem prioridade quando comparados a outros de menor resolução.

Embora o método proposto permitisse a obtenção de vários tipos de termopilhas com características operacionais similares as das termopilhas já comercializadas e recomendadas pela OMM, existem vários problemas de ordem técnica, que necessitam ser melhoradas ou aprimoradas, no sentido de dar às mesmas melhor segurança de operação e qualidade nas medidas para tempos mais longos de exposição. Até o momento, o desenvolvimento foi realizado de forma acadêmica sem a preocupação de uma produção seriada como observado industrialmente, no entanto, é importante enfatizar algumas dificuldades técnicas encontradas e que necessitam ser solucionadas.

Acoplamento das máscaras na obtenção do circuito termoeletrico. O posicionamento da máscara B no substrato para completar o circuito termoeletrico foi realizado manualmente, usando marcas como guia no acoplamento. Entretanto, dependendo da área da termopilha (pequena) e número de termopares do circuito (grande), surgem dificuldades de precisão no acoplamento e, qualquer desvio nesta operação invariavelmente provoca curto-circuito entre as trilhas metálicas comprometendo a sensibilidade da termopilha. Para uma produção em série, esta etapa necessita uma otimização através da mudança do método de depósito metálico via técnicas mais modernas já existentes atualmente nos laboratórios de filmes finos. Outra alternativa seria a diminuição do número de termopares dos circuitos favorecendo o espaçamento das trilhas metálicas.

Tabela 2. Fator de Calibração ($10^{-6}Vm^2/W$) e responsividade ($10^{-2}V/W$) das termopilhas disco concêntrico em substrato de vidro, kapton e mylar; estrela em substrato acrílico, kapton e mylar; preto em substrato kapton e mylar.

	Disco Concêntrico			A_{cr}	Estrela		Preto	
	Vd	Kp	My		Kp	My	Kp	My
N	40	92	145	118	110	110	79	70
F	27×10^3	13×10^5	23×10^3	60×10^4	14×10^5	23×10^5	$10,2 \times 10^5$	36×10^5
r^2	99,87	99,98	99,99	99,98	99,99	99,99	99,92	99,98
S_i	7,70	43,76	36,08	12,05	42,2	30,95	98,60	93,60
R_i	0,15	7,00	5,08	1,90	6,80	4,90	26,60	47,90

Vd = vidro; Kp = kapton; My = mylar; A_{cr} = Acrílico.

N=número de dados; F= teste F de Snedecor; r^2 = coeficiente de determinação; S_i = sensibilidade da resposta e R_i = responsividade.

Extração do sinal elétrico. Os depósitos de filmes metálicos finos com espessura de 3000Å não suportaram o calor da solda utilizada entre os terminais (+) e (-) do circuito e os fios que conduziam os sinais até o conector elétrico. O efeito da temperatura elevada provocou o desligamento do filme fino do substrato ao invés de sua fixação. A tinta prata utilizada como solução para o problema apresentado não deve ser uma alternativa definitiva, já que frequentemente ocorreram desligamentos das partes devido a qualquer esforço mecânico. Foi comum também o aparecimento de trincas (ao longo do tempo), devido aos efeitos térmicos do absorvedor que provocaram rompimentos parciais nos contatos elétricos elevando a resistência elétrica e inutilizando a termopilha. No caso da produção seriada, a sugestão é o aumento da espessura do filme fino numa ordem de grandeza igual a dez (10) e a mudança para solda pontual semelhante às utilizados atualmente nos circuitos integrados ou semi-condutores.

Pintura do Absorvedor. Os depósitos de tinta preta e branca nas termopilhas foram realizados à base de "spray" com uso de máscaras metálicas complementares - cobria-se a bateria de junções passivas dos circuitos e depositava-se a tinta preta; posteriormente, executava-se a operação inversa - cobria-se as junções ativas já com o depósito preto e executava-se o depósito de tinta branca nas baterias de junções passivas. Além das dificuldades técnicas operacionais, o grande problema desta etapa foi a falta de padrão e controle da espessura dos revestimentos, o que impediu a reprodutibilidade construtiva. Consequentemente, obteve-se termopilhas com o mesmo número de termopares, área de absorção e substrato com características operacionais de sensibilidade e velocidade de resposta diferentes obtidas num mesmo ciclo de evaporação. A sugestão para estudos futuros é ainda o uso de máscaras porém com automação da pintura.

Instalação do substrato no extrator de calor. Com referência às termopilhas de substrato de acrílico e vidro, não ocorreram grandes dificuldades de instalação já que os mesmos foram encaixados na peça metálica e colados sem qualquer esforço mecânico. No entanto, os substratos de kapton e mylar, por se tratarem de películas, quando instalados semelhantemente a um bastidor, fixos à base de pressão, provocavam um aumento considerável na resistência elétrica devido ao esforço mecânico, até mesmo causando o rompimento do circuito de termopares. Esta etapa foi a que apresentou a maior perda de termopilhas e por esta razão, deve ser reavaliada, utilizando-se talvez bastidores com pressão controlada.

Conclusões

O método para obtenção de termopilhas proposto através de técnicas fotolitográficas e evaporação metálica mostra ser simples e ampla versatilidade na construção de termopilha preta/branca e do tipo preto. Outra vantagem do método é a possibilidade de obtenção simultânea de um grande número de termopilhas, resultando numa economia de material, mão de obra e horas/custo da evaporadora. Dos substratos testados - kapton, mylar, acrílico e vidro, a princípio todos podem ser utilizados como suporte do circuito termoeletrico nas termopilhas de filmes finos, pois apresentam sensibilidade e tempo de resposta adequado para detecção da radiação solar. A amplitude nos valores de responsividade de $0,15 \times 10^{-2} \text{ V/W}$ à $47,9 \times 10^{-2} \text{ V/W}$; sensibilidade de resposta de $7,7 \times 10^{-6} \text{ Vm}^2/\text{W}$ à $98,6 \times 10^{-6} \text{ Vm}^2/\text{W}$; constante de tempo de 9,8s à 1,5s e tempo de resposta de 6,0 até 30s, permitem a seleção dos mesmos para um uso específico quanto ao nível de irradiância a ser detectado.

Agradecimento

À FAPESP e CNPq, pelo financiamento do projeto e bolsas de estudo.

Referências bibliográficas

- BACIOCCHI, M., FULANO, X.X., BELTRANO, Y.Y. et alli. Cu/Pd thin film thermopile as a temperature and hydrogen sensor. *Sensors and Actuator*, ?local?, A21-A23, p. 631-635, 1990.
- BOIVIN, L.P., SMITH, T.C. Electrically calibrated radiometer using a thin film termopile. *Appl. Optics.*, v. 17, p. 3067-3075, 1978.
- BUDDE, W. **Physical detectors of optical radiation.** Orlando : Academic Press, 1983. 336 p.
- COULSON, K.L. **Solar and terrestrial radiation: Methods and Measurements.** Academic Press : New York, 1975. 322 p.
- DERENIAK, E.L., CROWE, D.G. **Optical radiation detectors.** New York : John Wiley, 1984. 300 p.
- ESCOBEDO, J.F., MELO, J.M., ZILIO, S.C. Estudo de substrato kapton na performance de termopilhas de filmes finos. *Rev. Bras. de Aplic. de Vácuo*, v. 11, n. 1, p. 158-62, 1992.
- FARIAS, A.J. **Desenvolvimento de um radiômetro diferencial para medida da radiação solar global.** Piracicaba : ESALQ, 1985. 71 p., Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia), Escola Superior de

- Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1985.
- HARRIS, L. Rapid response thermopiles. **Journal of Optical Society of America**, v. 36, n. 10, 1946.
- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Canada : AP, 1983. 390 p.
- KODOTO, S. Simple high-performance power sensor using $\mu\text{-Si: Ge}$ thin films. **Sensores and Actuators**, v. 16, p. 209-214, 1989.
- MARUR, C.J., PINTO, H.S. Eletrodeposição de cobre em fio de constantan para obtenção de sensores de radiação solar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 8, p. 1117-1122, 1992.
- ROBINSON, N. **Solar Radiation**. Amsterdan : Elsevier, 1966. 347 p.
- WMO. **Guide to meteorological instruments and methods of observation**. 5. ed., Geneva (Switzerland) : World Meteorological Organization., 1983. 298 p. (Publication WMO n. 8).
- ZILIO, S.C., ESCOBEDO, J.F. Medidores de potência para lasers. **Rev de Fís. Apl. e Instrument.**, v. 6, n. 4, p. 234-243, 1991.

