

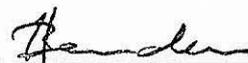
1. Publicação nº <i>INPE-3799-TDL/208</i>	2. Versão	3. Data <i>Fev., 1986</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DRH-DMS</i>	Programa <i>FRH/ECO</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>ESPECTROSCOPIA</i> <i>EFEITO FOTOACÚSTICO</i> <i>CÉLULAS SOLARES</i>			
7. C.D.U.: <i>621.383.5</i>			
8. Título <i>ESPECTROSCOPIA FOTOACÚSTICA PARA CARACTERIZAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES</i>		10. Páginas: <i>54</i>	
		11. Última página: <i>45</i>	
9. Autoria <i>Carmem Lúcia Barbosa</i>		12. Revisada por <i>R. Ranvaud</i> Ronald D.P.K. Ranvaud	
		13. Autorizada por <i>Marco Antonio Ranvaud</i> Marco Antonio Ranvaud Diretor Gerat	
Assinatura responsável <i>Carmem Lúcia Barbosa</i>			
14. Resumo/Notas <p>A geração de um sinal fotoacústico num semiconductor de "gap" E_g envolve transições interbandas dos portadores fotoexcitados por um feixe de energia $h\nu$, os quais entregarão, por termalização, seu excesso de energia $h\nu - E_g$ ao cristal que, por sua vez, perderá esse calor em grande parte para o gás que preenche a célula fotoacústica. Como o feixe de luz incidente é modulado, o gás aquecido e resfriado ciclicamente sofrerá variações de pressão, que são detectadas por um microfone, e proporcionais, no caso de células solares, à energia da luz incidente não utilizada na conversão fotovoltaica. Com isso, pode-se medir várias propriedades das células solares, tais como eficiência de conversão, espectro de absorção, resistência de carga ideal.</p>			
15. Observações <i>Dissertação de Mestrado em Eletrônica e Telecomunicações/Materiais, aprovada em 28 de junho de 1985.</i>			

RESUMO

A geração de um sinal fotoacústico num semiconductor de "gap" E_g envolve transições interbandas dos portadores foto-excitados por um feixe de energia $h\nu$, os quais entregarão, por termalização, seu excesso de energia $h\nu - E_g$ ao cristal que, por sua vez, perderá esse calor em grande parte para o gás que preenche a célula fotoacústica. Como o feixe de luz incidente é modulado, o gás aquecido e resfriado cíclicamente sofrerá variações de pressão que são detectadas por um microfone e proporcionais no caso de células solares, à energia da luz incidente não utilizada na conversão fotovoltaica. Com isso, podem-se medir várias propriedades das células solares, tais como a eficiência de conversão, espectro de absorção, resistência de carga ideal.

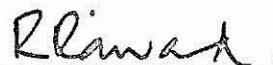
Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Eletrônica e Telecomunicações

Fis. Irajã Newton Bandeira, Mestre



Presidente

Dr. Ronald Ranvaud



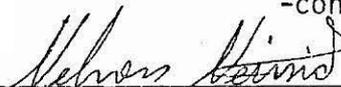
Orientador

Dr. Neelkanth Gurupad Dhere



Membro da Banca
-convidado-

Fis. Nelson Veissid, Mestre



Membro da Banca

Candidata: Carmem Lucia Barbosa

São José dos Campos, 28 de junho de 1985



ABSTRACT

The generation of a photoacoustic signal in a semiconductor of gap E_g involves interband transitions of the photoexcited carriers by a light beam of energy $h\nu$, the excess energy $(h\nu - E_g)$ appearing as heat in the crystal through thermalization processes. Most of the heat thus produced is delivered to the gas that fills the photoacoustic cell. As the incident beam of light is modulated, the cyclically warmed gas will present pressure fluctuations which will be detected by a microphone. These pressure fluctuations in the case of solar cells, are proportional in amplitude, to the incident light beam power not utilized in photovoltaic conversion. With such a technique, one can measure several solar cell properties, such as conversion efficiency, absorption spectrum and ideal load resistance.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	<i>vii</i>
<u>CAPÍTULO 1 - HISTÓRICO DO EFEITO FOTOACÚSTICO</u>	1
1.1 - Introdução	1
<u>CAPÍTULO 2 - O EFEITO FOTOACÚSTICO</u>	3
2.1 - Introdução	3
2.2 - Teoria geral do efeito fotoacústico	4
<u>CAPÍTULO 3 - PRINCÍPIOS E OPERAÇÃO DA CÉLULA SOLAR DE SILÍCIO</u> ...	7
3.1 - Introdução	7
3.2 - O efeito fotovoltaico e as células solares de silício mono cristalino	7
3.3 - Principais perdas de energia numa célula solar de Si	11
3.4 - Comentários	16
<u>CAPÍTULO 4 - O EFEITO FOTOACÚSTICO PARA CARACTERIZAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES</u>	17
4.1 - Eficiência de conversão fotovoltaica através do efeito foto acústico	17
4.2 - Experimento	20
4.2.1 - Medidas de corrente por tensão na célula solar.....	22
<u>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	29
5.1 - Resultados obtidos	29
5.2 - Conclusões	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	45

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 - Diagrama esquemático que mostra a célula fotoacústica de forma cilíndrica, a posição da amostra sólida, a coluna de gás e o suporte da amostra	2
2.1 - Diagrama esquemático que mostra a distribuição de temperatura do gás na célula fotoacústica	4
3.1 - Diagrama de banda de energia de uma junção p-n	8
3.2 - Curva I x V da célula solar e o respectivo circuito de carga	10
3.3 - Estrutura da célula solar de silício monocristalino	12
3.4 - Principais perdas de energia numa célula solar de Si sob iluminação AM ₁ e com carga ótima	13
3.5 - Efeitos da resistência série na característica I x V de uma célula de 4cm ² de área	16
4.1 - Diagrama ilustrativo da perda da energia incidente por transmissão e reflexão	17
4.2 - Esquema da montagem utilizado para a caracterização da célula solar de Si	20
4.3 - Célula fotoacústica	22
4.4 - Célula fotoacústica utilizada no sistema	25
4.5 - Diagrama do sistema utilizado para caracterizar a célula de Si pelo método I x V	26
5.1 - Sinal fotoacústico relativo em função da resistência de carga (célula solar A-1, luz branca)	31
5.2 - Sinal fotoacústico relativo em função da resistência de carga (célula solar A-2, luz branca)	32
5.3 - Sinal fotoacústico relativo em função da resistência de carga (célula solar B-1, luz branca)	33
5.4 - Sinal fotoacústico relativo em função da resistência de carga (célula solar B-2, luz branca)	34
5.5 - Sinal fotoacústico relativo e potência elétrica de saída como função da resistência de carga (método I x V, célula B-1)	36
5.6 - Característica da curva I x V da célula solar de Si (célula solar B-1)	37
5.7 - Sinal fotoacústico relativo e potência elétrica de saída como função da resistência de carga (célula solar B-2)	39
5.8 - Sinal fotoacústico relativo em função da resistência de carga, usando um filtro de luz com um comprimento de onda na faixa de 9.000Å (filtro de luz passa-banda, célula solar A-2)	42

CAPÍTULO 1

HISTÓRICO DO EFEITO FOTOACÚSTICO

1.1 - INTRODUÇÃO

Em 1880, Alexander Graham Bell estudou o efeito fotoacústico pela primeira vez. Descobriu que um feixe de luz solar interrompido periodicamente, ao incidir sobre um sólido colocado numa célula fechada, produzia um sinal acústico que podia ser ouvido através de um tubo acoplado à célula. Entretanto, a descoberta só despertou interesse na época. Mas em 1970 pesquisadores do "Bell Laboratories" iniciaram os estudos de absorção de luz em sólidos usando o efeito redescoberto - agora usualmente chamado de efeito fotoacústico.

A espectroscopia fotoacústica teve um crescimento rápido, tornando-se conhecida como um novo e importante método para obter espectros de absorção óptica nos sólidos, líquidos e gases. Esta é mais uma alternativa para técnicas antigas, como espectrofotometria de transmissão ou medidas de reflectância difusa.

O efeito fotoacústico é um processo de conversão de energia (Rosencwaig and Gersho, 1976). Na espectroscopia fotoacústica de sólidos e líquidos, o material-amostra é colocado numa câmara fechada (célula fotoacústica) junto com um gás, usualmente o ar, e irradiado através de uma janela com luz monocromática pulsada, como mostrado esquematicamente na Figura 1.1. A energia absorvida pela amostra dá origem a uma flutuação na sua temperatura na mesma frequência dos pulsos de luz. A partir de considerações experimentais e teóricas desenvolvidas por Rosencwaig (1975), concluiu-se que o sinal acústico na célula fotoacústica resulta do fluxo periódico de calor do sólido para o gás em contacto, quando o sólido é ciclicamente aquecido por luz pulsada. Somente uma camada relativamente fina de ar (~ 0,1cm para uma frequência de amostragem de luz de 100Hz), adjacente à superfície do sólido, responde termicamente ao fluxo periódico de calor do sólido para o gás.

Esta camada de ar se contrai ou expande e pode então ser considerada como um "pistão vibratório", criando um sinal acústico detectado pelo microfone dentro da célula fotoacústica. Para obter um espectro fotoacústico, o sinal do microfone é registrado em função do comprimento de onda da luz incidente na amostra. Uma vez que a amplitude do sinal acústico é proporcional à quantidade de luz absorvida pela amostra, existe uma correspondência direta entre um espectro fotoacústico e um espectro de absorção óptica convencional. Além disso, a luz espalhada, que constitui um sério problema em espectroscopia convencional, não representa nenhum problema em espectroscopia fotoacústica, uma vez que somente a luz absorvida é convertida em som. A espectroscopia fotoacústica possibilita a obtenção do espectro de absorção óptica de qualquer tipo de material sólido ou semi-sólido, seja ele cristalino, pó, amorfo, gel, etc., bem como de líquidos e gases, além de ser uma valiosa técnica espectroscópica para estudos de superfícies, de decaimentos e de propriedades térmicas dos materiais.

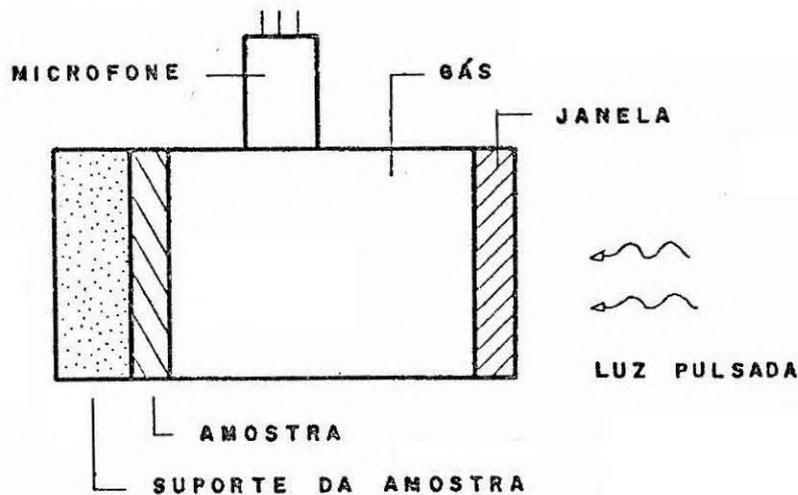


Fig. 1.1 - Diagrama esquemático demonstrativo da célula fotoacústica de forma cilíndrica, a posição da amostra sólida, a coluna de gás e o suporte da amostra.

CAPÍTULO 2

O EFEITO FOTOACÚSTICO

2.1 - INTRODUÇÃO

A espectroscopia fotoacústica tem sido uma ferramenta para muitos estudos das propriedades ópticas dos sólidos, (Rosencwaig and Gersho, 1976). Algumas aplicações do efeito fotoacústico requerem um tratamento teórico quantitativo do efeito; logo esforços consideráveis têm sido feitos recentemente por vários pesquisadores para obter um tratamento teórico mais generalizado. Para muitos casos de interesse experimental, o modelo do pistão térmico de Rosencwaig e Gersho é suficiente. Em pesquisas mais recentes, o modelo do pistão térmico tem sido aplicado para o caso onde o coeficiente de absorção óptica é uma função da distância dentro da amostra. A temperatura no gás dentro da célula fotoacústica pode ser determinada pela temperatura na superfície da amostra. A flutuação periódica da temperatura produzida no gás pela absorção de luz na amostra cai exponencialmente em módulo com a distância dessa superfície (Figura 2.1).

O modelo do pistão térmico não é o mais adequado para alguns estudos demonstrado por McDonald e WetseI (1978). O estudo teórico do efeito fotoacústico no trabalho de McDonald e WetseI inclui a contribuição de vibração mecânica na superfície da amostra, e amplia o estudo do efeito fotoacústico incluindo um tratamento hidrodinâmico mais completo do gás dentro da célula fotoacústica. Considera a vibração mecânica na superfície da amostra e desenvolve o conceito de "pistão composto", no qual o pistão térmico é superposto ao movimento vibracional mecânico na superfície da amostra. O movimento mecânico é especialmente importante para amostras líquidas e sólidas para altas frequências da luz modulada.

Uma importante aproximação feita em todas teorias já desenvolvidas é sobre o fluxo de calor, que é tratado somente em uma dimensão e mostra o acordo entre teoria e experimento, simplificando os cálculos.

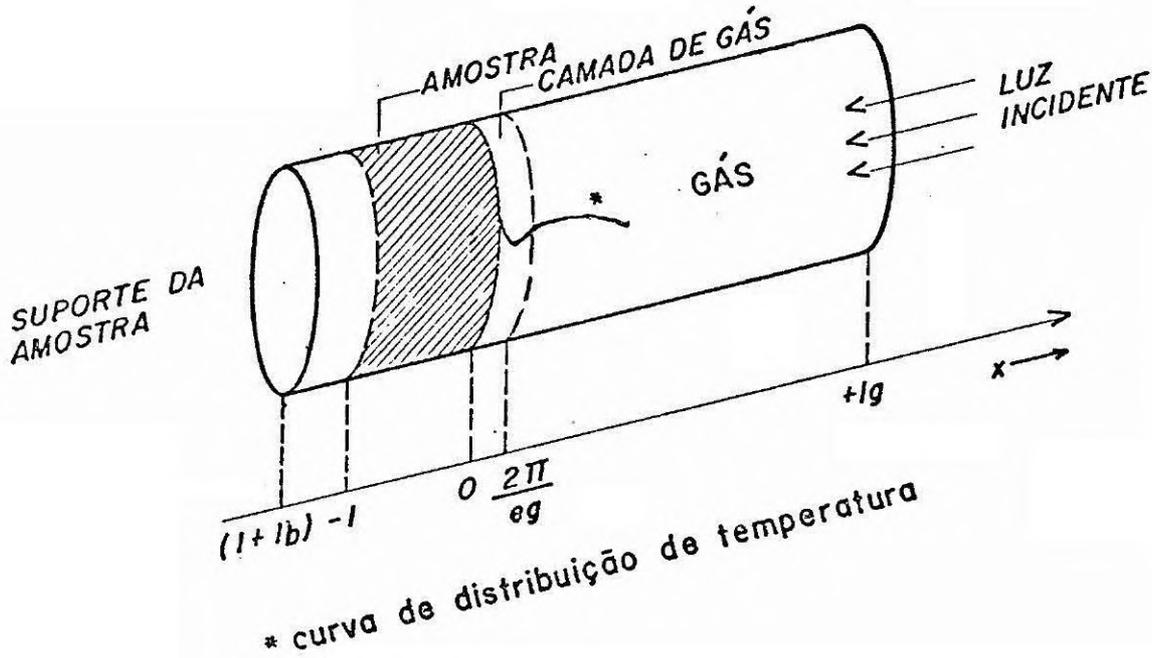


Fig. 2.1 - Diagrama esquemático que mostra a distribuição de temperatura do gás na célula fotoacústica.

Algumas dimensões definidas no texto são indicadas no eixo.

2.2 - TEORIA GERAL DO EFEITO FOTOACÚSTICO

Considera-se um tratamento unidimensional do processo térmico na célula fotoacústica da Figura 2.1 (Rosenwaig and Gersho, 1976).

Para estudar a geração de pressão acústica vinda de um fluxo de calor periódico, considere-se uma célula fotoacústica de forma cilíndrica mostrada na Figura 2.1. A amostra sólida de espessura l é colocada num suporte frontal ao gás (ar) dentro da célula fotoacústica. A amostra é iluminada com luz monocromática modulada em intensidade. A energia absorvida pela amostra dá origem a uma flutuação na sua temperatura na mesma frequência dos pulsos de luz. O aquecimento e resfriamento alternado do gás em contacto com a superfície da amostra provoca uma modulação de sua pressão, que é detectada por um microfone dentro da célula fotoacústica. A temperatura $T(x,t)$ na amostra pode ser calculada através da equação da difusão térmica.

$$\frac{\partial T_S(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_S} \frac{\partial T_S}{\partial t} - A e^{\beta x} (1 + e^{i\omega t}), \quad (2.1)$$

onde α_S é difusividade térmica da amostra ($\alpha_S = \kappa_S / \rho_S C_p$ em que C_p é o calor específico da amostra, ρ_S e κ_S são a densidade e a condutividade de térmica da amostra); $A = \beta I_0 \eta / 2\kappa_S$, em que β é o coeficiente de absorção óptica da amostra (cm^{-1}), I_0 é o fluxo de luz incidente, e η é a eficiência com a qual a energia de luz absorvida é convertida em calor (Eficiência Quântica). A frequência da luz modulada é $\omega / 2\pi$. A amostra é colocada entre $x = -l$ e $x = 0$ (Figura 2.1) e a luz entra da janela de vidro da célula fotoacústica e é atenuada na direção contrária da luz incidente.

A solução geral para a Equação 2.1 é dada por:

$$T(x,t) = a_1 + a_2 x - \frac{1}{\beta^2} e^{\beta x} + T_1(x) e^{i\omega t}, \quad (2.2)$$

com

$$T_1(x) = U e^{-\lambda_S x} + V e^{-\lambda_S x} - \left(\frac{A}{\beta^2 - \lambda_S^2} \right) e^{\beta x}, \quad (2.3)$$

onde $\lambda_S = (1 + i) a_S$ e $1/a_S$, o comprimento de difusão térmica na amostra, é $(2\alpha_S/\omega)^{1/2}$. Os parâmetros a_1 e a_2 , U e V podem ser determinados fazendo uso de condições de contorno da interface gás-amostra ($x=0$) e da interface do suporte ($x=-l$). As condições de contorno usadas são a continuidade da temperatura e do fluxo de calor.

Tendo as equações resolvidas usando as condições de contorno e os valores dos parâmetros a_1 , a_2 , U e V , então a temperatura na amostra $T(x,t)$ pode ser obtida em termos dos parâmetros ópticos, térmicos e geométricos da amostra, o suporte do material e o gás. A temperatura do gás na célula, $T_g(x,t)$, pode ser determinada pela temperatura da superfície da amostra, $T_S(0,t)$, e pela temperatura ambiente das paredes da célula. A flutuação periódica produzida no gás pela variação da temperatura na superfície da amostra cai exponencialmente em mō

dulo com a distância dessa superfície (Figura 2.1). A temperatura de oscilação é limitada por uma fina camada de contorno do gás de $2\pi/a_g$, onde $1/a_g = (2\alpha_g/w)^{1/2}$ é o comprimento de difusão térmica do gás. A camada de gás (ar) próxima à superfície da amostra que gera o sinal fotoacústico tem aproximadamente 1mm de espessura quando $w = 1000$ rad/sec.

Fazem-se aproximações para o efeito da pressão com variação periódica da temperatura dentro da fina camada de gás na superfície, considerando a existência de um pistão térmico. O deslocamento desse pistão térmico é dado por $x(t)$

$$x(t) = \frac{2\pi}{a_g} \frac{T(x,t)}{T_0(0)}, \quad (2.4)$$

onde $T(x,t)$ representa o valor médio da variação periódica da temperatura sobre a camada de gás e $T(0)$, a temperatura em equilíbrio para $x=0$. Supõe-se que o resto do gás que permanece dentro da célula responde adiabaticamente à ação desse pistão acústico. Logo, a pressão dependente do tempo na célula fotoacústica é

$$p(t) = \frac{\gamma P_0}{\ell_g} x(t), \quad (2.5)$$

onde γ é a razão dos calores específicos do gás, P_0 é a pressão ambiente, e ℓ_g é o comprimento da coluna de gás.

A expressão final para a variação da temperatura é razoavelmente complicada, envolvendo não somente parâmetros ópticos da amostra, mas também parâmetros geométricos e térmicos da amostra, e os respectivos parâmetros do suporte da amostra e do gás. Portanto, a teoria fornecerá informações sobre as características de absorção óptica da amostra. Essa teoria está quantitativamente de acordo com dados experimentais de geração do sinal fotoacústico, o que confirma que o fluxo de calor periódico é a fonte primária para a geração de sinal fotoacústico.

CAPÍTULO 3

PRINCÍPIOS E OPERAÇÃO DA CÉLULA SOLAR DE SILÍCIO

3.1 - INTRODUÇÃO

A primeira célula solar de Si monocristalino (eficiência de conversão de 6%) foi fabricada em 1954. Desde então as pesquisas relativas à conversão fotovoltaica têm experimentado um crescimento contínuo em quase todos os países desenvolvidos.

Até recentemente, a principal aplicação dos dispositivos fotovoltaicos foi fornecer eletricidade para satélites artificiais. O alto preço do silício monocristalino e os processos de fabricação impossibilitaram-lhe que fosse considerado uma alternativa viável para outros geradores de eletricidade convencionais em aplicações terrestres. Entretanto, têm sido feitos esforços consideráveis nas últimas décadas para reduzir os custos da eletricidade de origem solar. Os esforços têm sido feitos principalmente em duas direções, a saber:- na pesquisa de novos e mais baratos processos de fabricação e na busca de materiais alternativos ao monocristal de Silício.

3.2 - O EFEITO FOTOVOLTAICO E AS CÉLULAS SOLARES DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

O efeito fotovoltaico é o aparecimento de uma força eletromotriz (f.e.m) entre as superfícies de um semicondutor não-homogêneo quando este é iluminado por uma radiação ionizante. Este efeito somente ocorrerá se forem satisfeitas duas condições necessárias:

- a) A energia luminosa da radiação deve ser maior que ou igual à energia do "gap" (E_g) do semicondutor, isto é, a radiação deve ser absorvida.
- b) Deve existir um campo elétrico interno para separar os pares elétron-buraco gerados pela energia luminosa.

Pode acontecer (como nos dispositivos de Si) que os fótons incidentes sejam absorvidos no interior do semiconductor, fora da região do campo interno. Neste caso, os portadores foto gerados podem viajar para a região do campo de maneira a contribuir para o aparecimento do efeito; do contrário eles podem se recombinar antes da chegada, não fornecendo nenhuma contribuição. Boas propriedades de transporte são então essenciais para obter alta eficiência de coleção. A Figura 3.1 mostra esquematicamente o diagrama de banda de energia de uma junção p-n no equilíbrio termodinâmico.

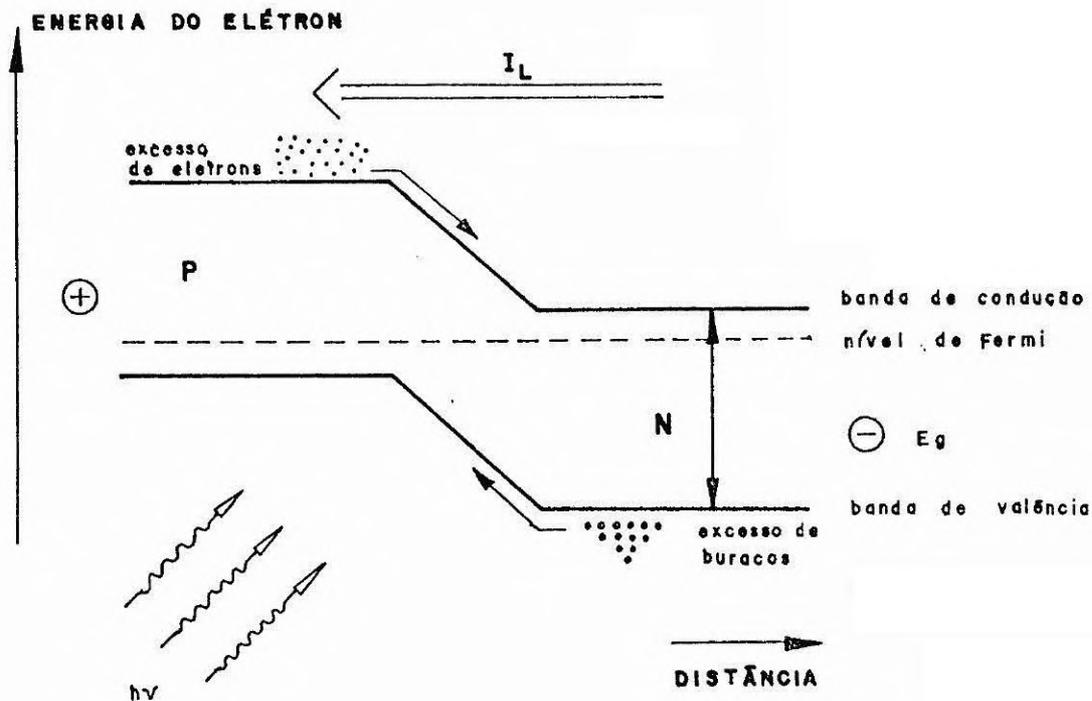


Fig. 3.1 - Diagrama de banda de energia de uma junção p-n.

Ao iluminar a junção com fótons que possuem uma energia $h\nu > E_g$, os fótons absorvidos produzirão pares elétron-buraco. Uma vez que os portadores chegam à zona de alto campo elétrico, eles são separados, sendo os elétrons (portadores minoritários do lado p) arrastados para o lado n e os buracos (portadores minoritários do lado n), para o lado p. A barreira é então transparente para os portadores minoritários e bloqueadora para os portadores majoritários.

Nas condições de circuito aberto, as cargas negativas irão se acumular na região n e as cargas positivas, no pado p. Esta polarização diminui a altura da barreira de potencial, o que permite um aumento na corrente de difusão através da junção. Será alcançado um novo equilíbrio dinâmico quando ambas, corrente fotogerada e corrente de difusão, forem iguais. Esta condição de circuito aberto fornece a máxima voltagem no dispositivo (V_{OC}).

Em caso contrário, nas condições de curto-circuito (ligando um fio metálico entre as regiões n e p), nenhuma tensão pode ser desenvolvida e a fotocorrente (I_L) fluirá livremente na direção inversa.

A Figura 3.2 mostra as características corrente-tensão de uma célula iluminada e no escuro. O ponto de maior liberação de energia será obtido para uma carga R_C , na qual o produto da corrente pela tensão na célula é máximo.

A equação $I \times V$ da célula, extraída da equação de Shockley para diodos ideais, é

$$I = I_S \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right) - I_L, \quad (3.1)$$

onde I_S é a corrente de saturação, "q" é a carga do elétron, V é a tensão que aparece nos eletrodos do dispositivo, k é a constante de Boltzmann, e T é a temperatura absoluta.

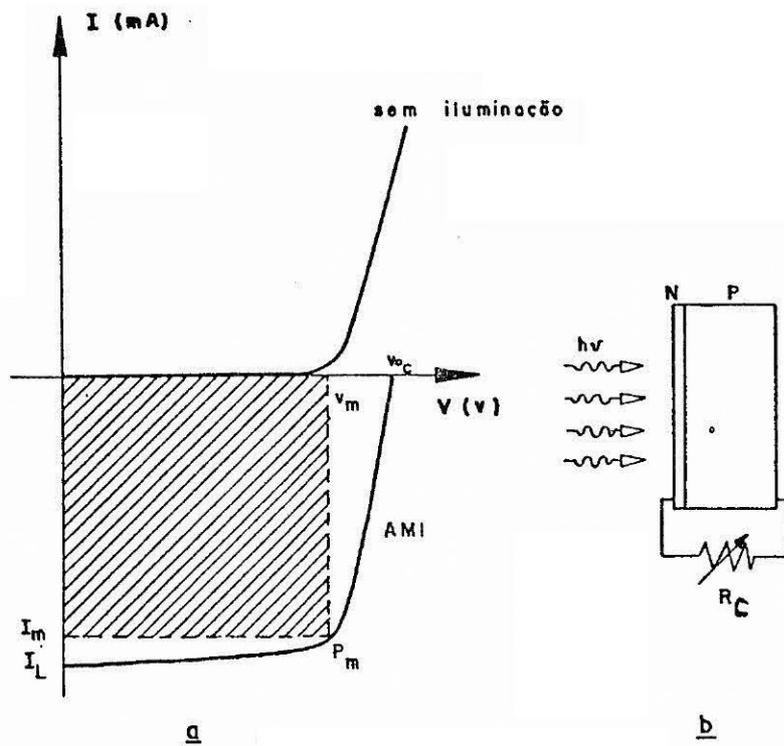


Fig. 3.2 - Curva $I \times V$ da célula solar e o respectivo circuito de carga.

- a) Característica corrente-voltagem de uma célula solar no escuro e iluminada.
- b) Circuito de carga da célula solar correspondente à carga ótima para potência máxima da célula.

Da Equação 3.1 obtêm-se

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_S} + 1 \right) \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{I_L}{I_S} . \quad (3.2)$$

Para obter uma alta tensão de circuito aberto (V_{OC}), uma pequena corrente de saturação e uma alta corrente foto gerada são essenciais.

A eficiência de conversão é definida como

$$\eta = \frac{P_e}{P_i} = F.F \frac{V_{oc} I_L}{P_i},$$

onde P_e é a potência elétrica fornecida pela célula quando incide sobre ela uma radiação de potência P_i e "F.F" é chamado fator preenchimento, que indica o quão "quadrada" é a característica $I \times V$ da célula. Em boas células solares de Si encontram-se $J_L \sim 30-35 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} \sim 560-600 \text{ mV}$ e $F.F \sim 0,75$ a $0,79$, quando iluminadas sob condições $AM_1 \cong 100 \text{ mW/cm}^2$ correspondente à radiação recebida num dia sem nuvens no nível do mar e quando o sol está a pino (no zênite). As eficiências de conversão (η) são da ordem de 15% (Hovel, 1975).

A Figura 3.3 mostra a estrutura de uma célula solar de Si. Ela consiste em uma junção pouco profunda (tipicamente $0,4 \mu\text{m}$ de profundidade) fabricada em base circular de $300 \mu\text{m}$ de espessura. No topo da Figura 3.3 uma grade metálica auxilia a coleta de corrente, diminuindo o percurso médio que cada portador deve fazer para ser coletado, o que faz com que a resistência série seja diminuída.

3.3 - PRINCIPAIS PERDAS DE ENERGIA NUMA CÉLULA SOLAR DE Si

Discutem-se agora as principais limitações para a eficiência de conversão de acordo com o tratamento desenvolvido por Wolf (1971). Há dois tipos de fatores limitantes:

- 1) fatores inalteravelmente determinados pelos processos físicos básicos que envolvem a densidade de energia, a distribuição do espectro solar, o "gap" de energia do material usado, etc;
- 2) fatores de origem tecnológica, os quais podem ser otimizados por processos de fabricação apropriados (profundidade da junção, qualidade da superfície da amostra, resistência série, etc).

A Figura 3.4 mostra as principais perdas de conversão experimentalmente por uma célula solar de Si.

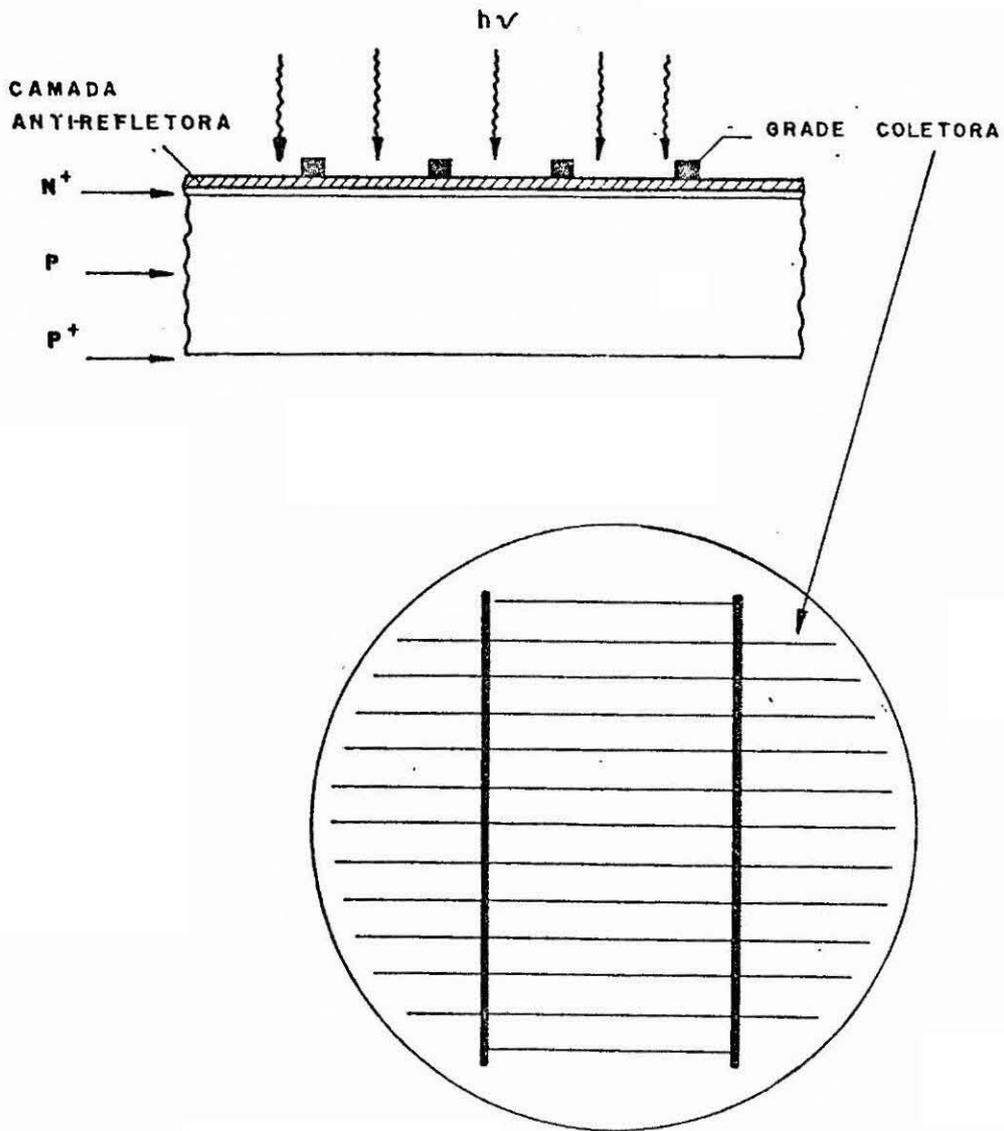


Fig. 3.3 - Estrutura da c elula solar de silício monocristalino.

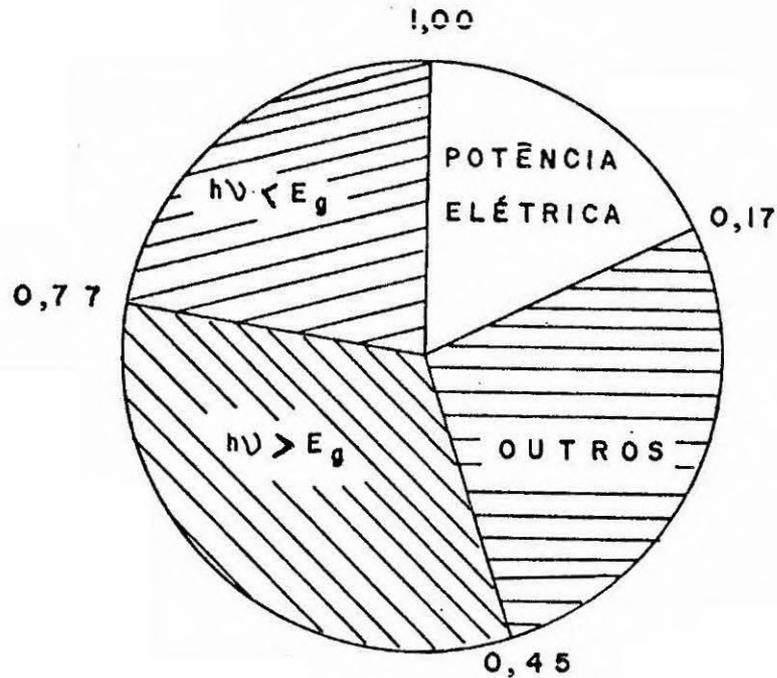


Fig. 3.4 - Principais perdas de energia numa célula solar de Si sob iluminação AM1 e com carga ótima.

Nesta figura a energia total incidente corresponde ao círculo completo. Os diferentes mecanismos de perda aparecem como setores do círculo. Dois importantes fatores de perda dominam a figura. O primeiro setor, $h\nu < E_g$, corresponde à fração de fótons incidentes, cuja energia é insuficiente para provocar uma transição eletrônica no material. O semiconductor é transparente nessa região do espectro. O segundo setor, $h\nu > E_g$, representa as perdas pelo excesso de energia $h\nu - E_g$ que os fótons absorvidos fornecem aos elétrons excitados. Esta energia é perdida sob forma de calor dentro da rede durante o processo de termalização. Estas considerações acerca da eficiência de absorção estão relacionadas à largura de banda proibida e indicam que deve haver um material com melhor "gap" para a conversão solar. Cálculos teóricos da eficiência de conversão em função da largura da banda proibida indicam que existe uma eficiência máxima ($\eta \approx 25\%$) para materiais que possuem $1,2\text{eV} < E_g < 1,7\text{eV}$ (Hovel, 1975).

O terceiro fator de perda mostrado na figura corresponde a uma série de pequenos efeitos que se referem às perdas de natureza óptica e elétrica e às perdas na junção.

Quanto às perdas de natureza óptica têm-se:

a) Absorção incompleta da luz ($h\nu \geq E_g$)

Corresponde à perda importante em células de pequena espessura. Um bom projeto de célula solar estabelece um compromisso entre espessuras e comprimento de difusão. Este último deve ser maior que ou igual à espessura para a coleta eficiente de portadores.

b) Reflexão na superfície frontal

Uma superfície polida de silício reflete aproximadamente 35% dos fótons do espectro solar. Uma solução parcial para este mecanismo de perda é cobrir a superfície frontal com uma camada "anti-refletora" ou produzir uma superfície com textura. No caso anterior o material de camada deve ser transparente (Wolf, 1971).

c) Fator de máscara

Cerca de 5% da radiação incidente não é absorvida no semicondutor devido ao mascaramento da célula pela metalização. Uma diminuição da área de mascaramento produzirá um aumento da resistência série.

Quanto às perdas elétricas, tem-se que as principais perdas se referem à coleta incompleta dos portadores fotogerados. A recombinação dos portadores na superfície ou no interior da célula impede que eles alcancem a região da junção.

As perdas por recombinação no interior da célula ocorrem na base e, em menor extensão, na região de difusão. Na base deve haver um compromisso entre grande comprimento de difusão (baixa recombinação)

e alto V_{oc} . Aumentando a dopagem na base acentua-se a barreira de junção, mas ao mesmo tempo prejudica-se a mobilidade, e o comprimento de difusão diminui. Os melhores resultados são obtidos nas células solares de Si com resistividade da base do material de 0,5-2 ($\Omega \cdot \text{cm}$). A camada de difusão é muito fina. Poucos fótons são absorvidos aqui. Além disto, as velocidades de recombinação são extremamente altas e praticamente não se obtêm nenhuma contribuição. Novamente existe um compromisso entre profundidade de junção e resistência série. Um simples processo de fabricação e um baixo fator de máscara requerem uma profundidade de junção da ordem de 0,3 a 0,4 μm .

Quanto às perdas na junção têm-se que:

- a) Uma junção de silício não é um diodo ideal de Shockley, e existem correntes de geração-recombinação na região espacial de carga. Sob essas circunstâncias a equação da corrente pode ser escrita como

$$I = I_s \exp\left(\frac{qV}{AkT} - 1\right) - I_L,$$

onde A é um fator de curva que varia de 1 (diodo ideal) a 2.

- b) Resistência série.

A Figura 3.5 mostra o efeito da resistência série na curva $I \times V$ da célula solar de Si. As resistências séries provêm de:

- 1) resistência lateral da camada difundida;
- 2) resistência de contacto entre o metal e o semiconductor;
- 3) resistência série dos contactos da grade.

Um bom projeto de grade e uma aplicação cuidadosa do metal de contacto reduzirão consideravelmente o problema.

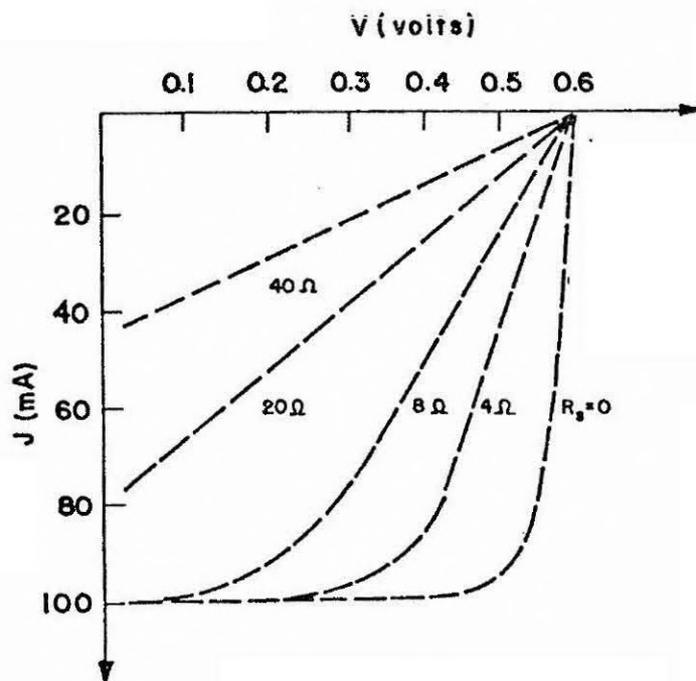


Fig. 3.5 - Efeitos da resistência s̄erie na característica I x V de uma c̄elula de 4cm² de rea.

FONTE: Hovel (1975).

3.4 - COMENTÁRIOS

A geração de um sinal fotoacústico num semiconductor de "gap" E_g envolve transições interbandas dos portadores fotoexcitados por um feixe de energia $h\nu$ (processo de termalização).

A geração deste sinal fotoacústico é determinada por processos não-radiativos (Pankove, 1971). Os portadores entregarão por termalização (fons) o excesso de energia $h\nu - E_g$ ao cristal no caso de pares gerados por fons com energia maior que a do "gap".

Esse excesso de energia perdido pelo cristal sob forma de calor aquecer a camada de gás que está em contato com a amostra.

Como o feixe de luz é modulado, o gás é aquecido e resfriado alternadamente, produzindo oscilações na pressão (ondas acústicas) que serão detetadas pelo microfone contido na célula fotoacústica.

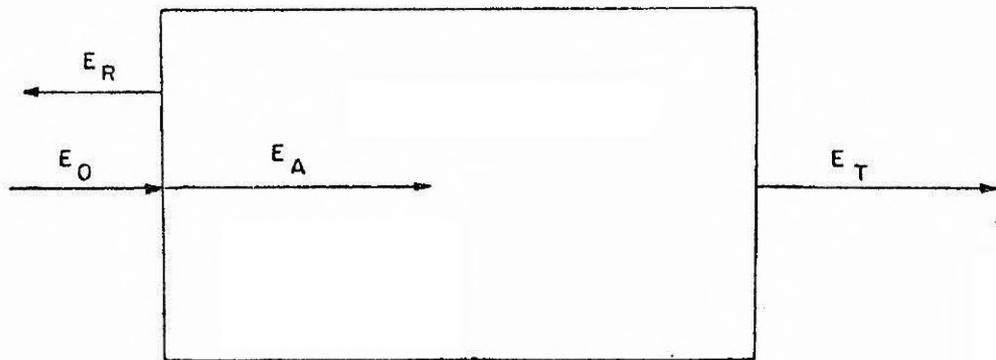
CAPÍTULO 4

O EFEITO FOTOACÚSTICO PARA CARACTERIZAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES

4.1 - EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO FOTOVOLTAICA ATRAVÉS DO EFEITO FOTOACÚSTICO

Medidas fotoacústicas (Cahen, 1978) dos dispositivos fotovoltaicos podem levar diretamente à sua eficiência de conversão de energia, sem necessidade de medir a potência incidente. Valendo-se desse método para estudo dos processos fotovoltaicos, utilizaram-se células solares de Si com uma área de 2cm^2 , as quais foram cortadas em pedaços de $0,2\text{cm}^2$ aproximadamente.

De uma forma mais geral, a Figura 4.1 ilustra a descrição do processo de perdas da energia incidente (E_0) na amostra por transmissão (E_T) e por reflexão (E_R).



E_0 - intensidade da luz incidente na amostra;

E_A - energia luminosa absorvida;

E_R - parte refletida da energia luminosa;

E_T - parte transmitida da energia luminosa.

Fig. 4.1 - Diagrama ilustrativo da perda da energia incidente por transmissão e reflexão.

O sinal fotoacústico será diretamente proporcional à energia luminosa absorvida (que é transformada em calor) pela amostra (Rosencwaig and Gersho, 1976) se fatores geométricos permanecerem inalterados. A energia absorvida (E_A) pela amostra é constituída das seguintes parcelas:

$$E_A = E_{PV} + E_{FA} + E_P ; \quad (4.1)$$

E_{FA} - energia absorvida e convertida em calor, responsável pelo sinal fotoacústico;

E_{PV} - energia de conversão fotovoltaica;

E_P - energia perdida em reações fotoquímicas, luminescência, etc.

Sendo α a fração de luz absorvida, $E_A = \alpha E_0$, o qual, substituído na Equação 4.1, resulta em:

$$E_{FA} = \alpha E_0 - E_{PV} - E_P , \quad (4.2)$$

de forma que a fração da energia total convertida em calor pode ser expressa por:

$$\frac{E_{FA}}{E_0} = \frac{\alpha E_0}{E_0} - \frac{E_{PV}}{E_0} - \frac{E_P}{E_0} . \quad (4.3)$$

Substituindo o valor de $E_0 = \frac{E_A}{\alpha}$ na Equação 4.3, obtêm-se:

$$\frac{E_{FA}}{E_A} \alpha = \alpha - \alpha \frac{E_{PV}}{E_A} - \alpha \frac{E_P}{E_A} , \quad (4.4)$$

$$\frac{E_{FA}}{E_0} = \alpha \left(1 - \frac{E_{PV}}{E_A} - \frac{E_P}{E_A} \right) , \quad (4.5)$$

denominando os três termos da Equação 4.5 como se segue

$$\eta^* = \frac{E_{PV}}{E_A}, \quad \xi = \frac{E_P}{E_A} \quad \text{e} \quad \rho = \frac{E_{FA}}{E_0},$$

tem-se:

$$\rho = \alpha (1 - \eta^* - \xi), \quad (4.6)$$

onde:

ρ é o sinal fotoacústico normalizado pela energia luminosa incidente;

η^* é a eficiência de conversão fotovoltaica normalizada pela energia absorvida, ou seja, eficiência interna;

ξ é a fração de perdas por outros processos.

Se apenas o efeito fotovoltaico é observado, a Equação 4.6 pode ser escrita para uma resistência de carga específica R_c como:

$$\rho(c) = \alpha (1 - \eta^*(c)), \quad (4.7)$$

onde $(1 - \eta^*(c))$ é o termo "perda fotovoltaica" que representa o decréscimo do sinal de absorção devido ao processo fotovoltaico. Obtém-se da Equação 4.7 a eficiência de conversão fotovoltaica $\eta^*(c)$, sendo:

$$\eta^*(c) = \frac{\alpha - \rho(c)}{\alpha}. \quad (4.8)$$

Como o dispositivo fotovoltaico terá eficiência de conversão nula nas condições de circuito aberto ("oc"), o sinal fotoacústico $\rho(oc)$ sob essas condições será igual a α .

$$\eta^*(c) = \frac{\rho(oc) - \rho(c)}{\rho(oc)}. \quad (4.9)$$

Usando este resultado, calcula-se a eficiência de conversão fotovoltaica através dos valores obtidos nos gráficos descritos nos resultados experimentais.

4.2 - EXPERIMENTO

Na Figura 4.2 mostra-se de forma esquemática a montagem do sistema para medida do sinal fotoacústico utilizada para caracterização da célula solar de Si.

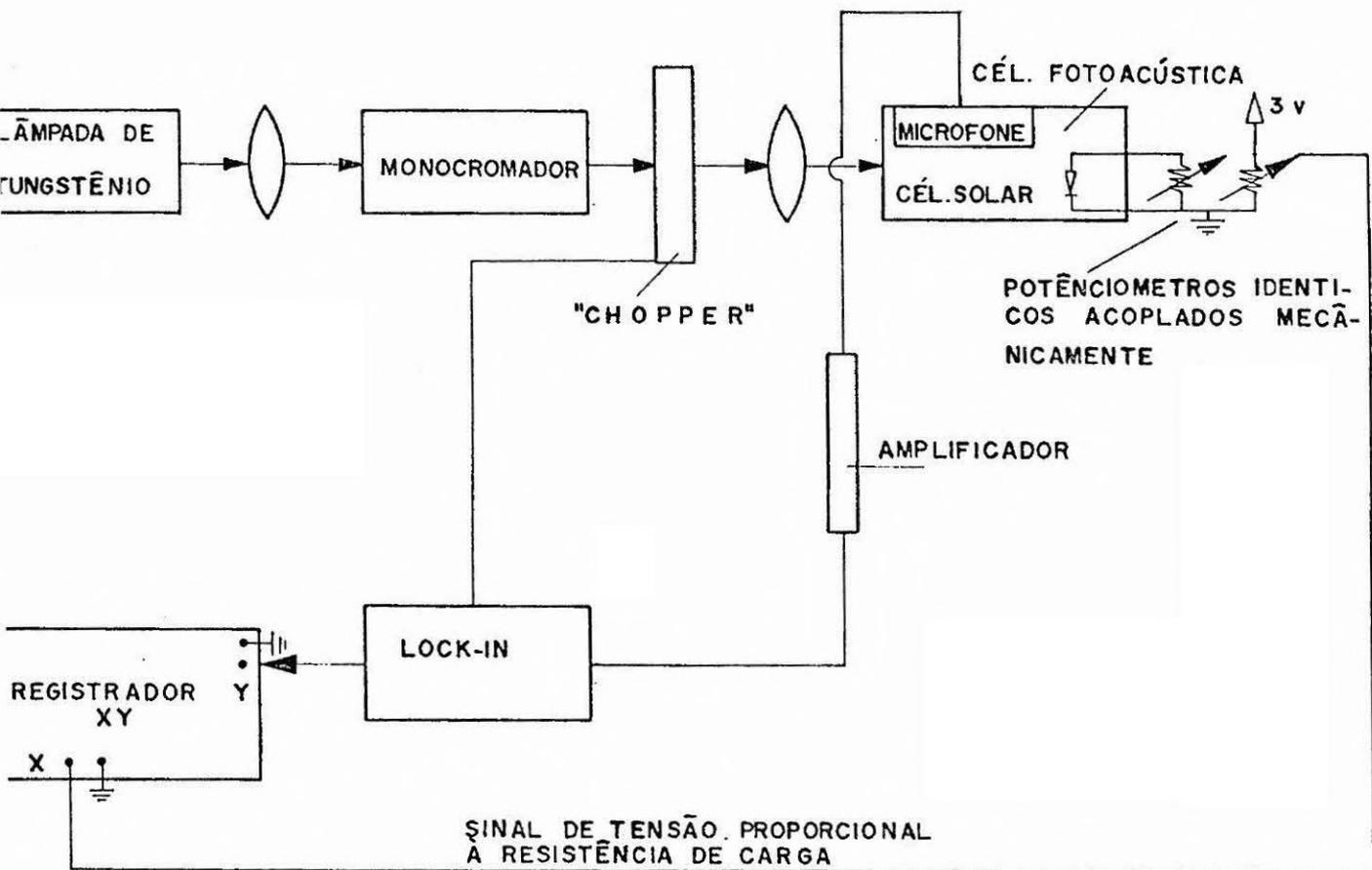


Fig. 4.2 - Esquema da montagem utilizado para a caracterização da célula solar de Si.

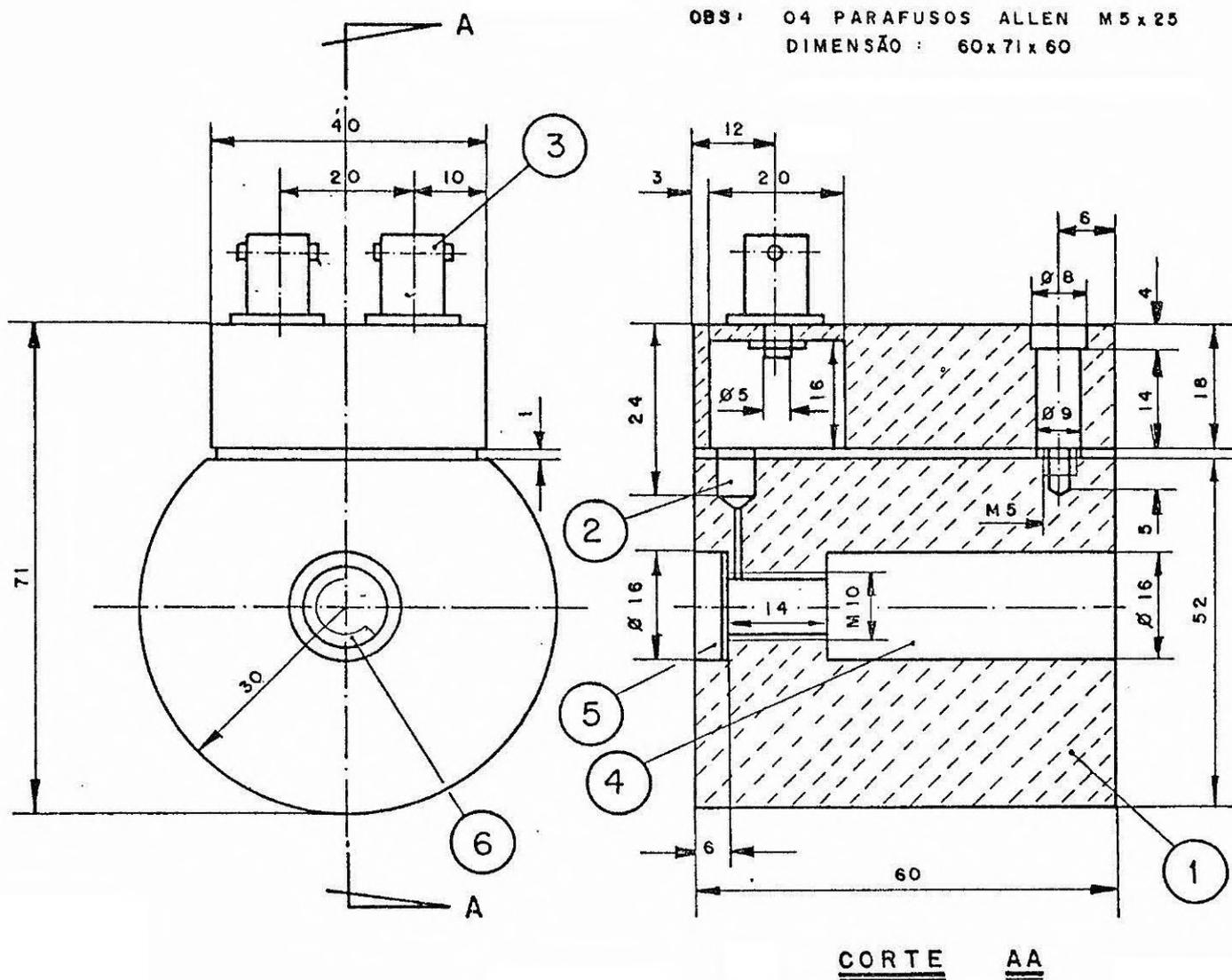
No sistema fotoacústico a potência luminosa (watt) incidente na amostra é convertida em pressão sonora, que é por sua vez convertida em potencial elétrico (volts).

Algumas fontes de ruído observadas no sistema fotoacústico devem-se à instabilidade da fonte de luz, ao movimento do gás na célula (Rosencwaig, 1975), às flutuações de pressão na célula causadas por fugas acústicas ou por condução de vibrações para dentro dela e ao ruído elétrico do amplificador do microfone. Uma outra fonte de ruído síncrono ocorre pelo uso de um amostrador mecânico de luz ("chopper"), que geralmente causa ruídos acústicos e vibrações que são dificilmente isolados do microfone da célula.

O arranjo utilizado no sistema experimental consiste em uma lâmpada de filamento de tungstênio de 500W de potência, 120V, alimentada por uma fonte estabilizada. Como as fontes de luz convencionais operam, em geral, de modo contínuo, utiliza-se um amostrador ("chopper") eletromecânico para a obtenção de um feixe de luz pulsado e com frequência variável quando desejado (Rosencwaig, 1977). Este amostrador foi colocado de preferência antes dos filtros ou do monocrador, de maneira que houvesse uma distância física razoável entre ele e a célula fotoacústica, proporcionando um melhor isolamento acústico da célula.

Construiu-se uma caixa simples onde se colocou a lâmpada. Esta lâmpada possui um refletor esférico traseiro que possibilita um feixe mais homogêneo na célula. Este feixe é focalizado somente na janela de vidro da célula fotoacústica a iluminar apenas a célula solar de Si, de $0,2\text{cm}^2$ de área, ligada a um potenciômetro linear de $200\Omega \pm 5\%$.

A Figura 4.3 mostra o esquema da célula fotoacústica utilizada, com suas respectivas medidas.



- 1 - corpo da célula feito de alumínio;
- 2 - microfone;
- 3 - conector de sinal de saída do microfone;
- 4 - suporte da amostra;
- 5 - janela de vidro;
- 6 - suporte da amostra, feito de lucite e ros_ queado no corpo da célula.

Fig. 4.3 - Célula fotoacústica.

A distância entre a amostra e a janela de vidro da célula deve ser maior que a do comprimento do "pistão vibratório" de gás, já que é esta a camada de gás que gera o sinal acústico na célula. Para o ar, à temperatura e pressão ambientes, este comprimento é de aproximadamente 0,1cm, tendo uma frequência de amostragem de 50Hz.

Para minimizar o ruído de fundo da célula (ruído síncrono, citado anteriormente), usou-se lucite para a fabricação do suporte da amostra dentro da célula fotoacústica. Qualquer luz espalhada, refletida, ou transmitida pela amostra deve, em princípio, passar através das paredes da célula, pelas quais é pouco absorvida.

A célula fotoacústica foi feita de alumínio, com um microfone colocado transversalmente à amostra. Escolheu-se o alumínio por ser um material de alta condutividade térmica e por dissipar o calor gerado por absorção da luz espalhada. O alumínio agirá como dissipador de calor conduzindo para fora da célula fotoacústica qualquer calor gerado por absorção de luz espalhada, o que evita uma elevação muito alta da temperatura durante uma série de medidas.

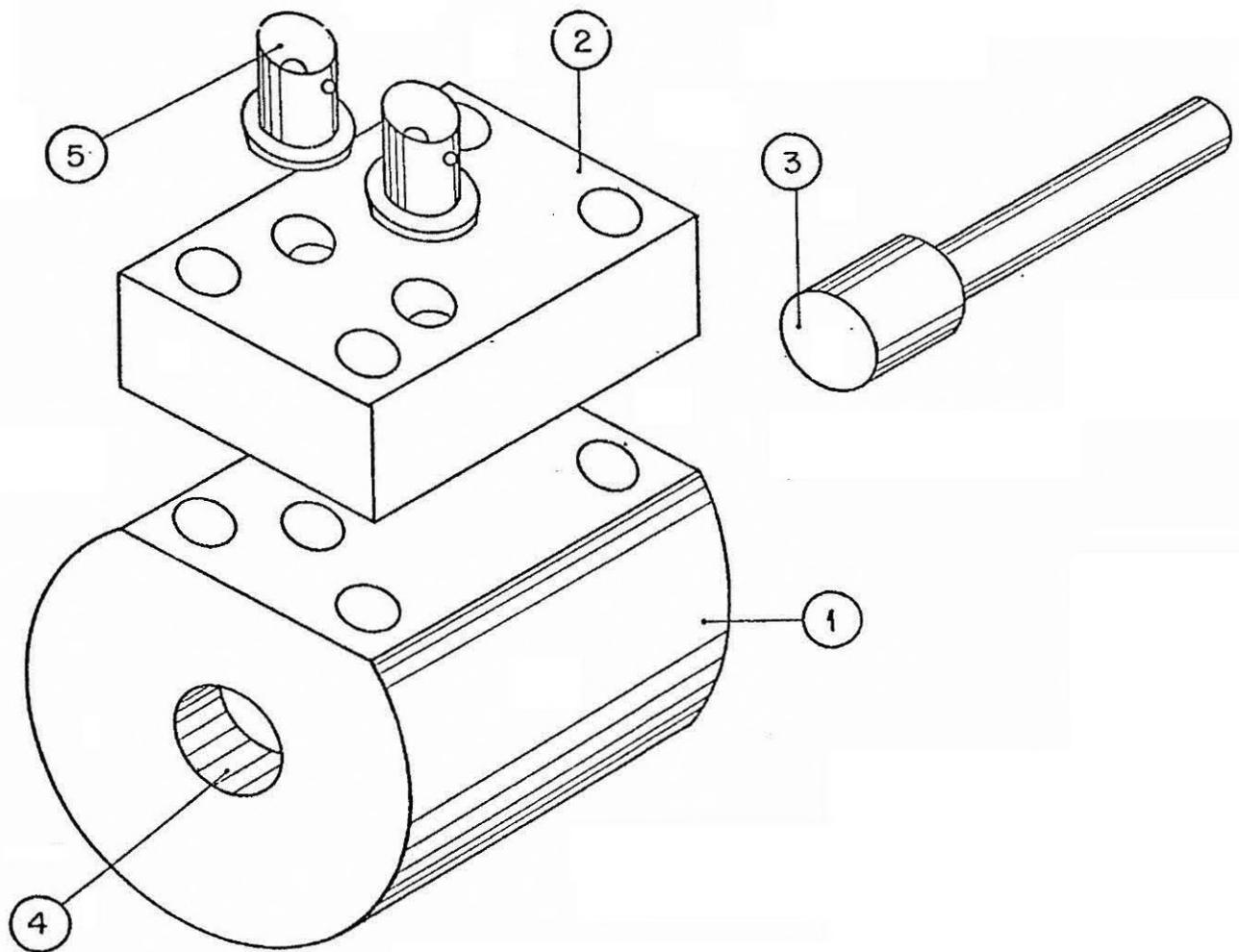
A sensibilidade de um microfone a circuito aberto é expressa em mv/Pascal, onde 1 Pascal = 1 Newton/m² = 10 μbar = 10⁻⁵ atmosferas. A Tabela 4.1 mostra os diversos tipos de microfones existentes comercialmente e seus respectivos valores típicos de sensibilidade. Destes microfones, os mais indicados para espectroscopia fotoacústica são os capacitivos e os de eletreto, por apresentarem uma boa sensibilidade e um tamanho pequeno. Usou-se o microfone de eletreto para a construção da célula fotoacústica usada neste trabalho.

TABELA 4.1

TIPOS DE MICROFONE

TIPO DE MICROFONE	SENSITIVIDADE (mv/Pascal a 1 KHz)
Dinâmico	0,562
Capacitivo	31,6
Cristal (Ba Ti O ₃)	31,6
Eletreto	7,1 (15 a 15 KHz)
Carvão	52,2 (200 - 2 KHz)

A célula fotoacústica (Figura 4.4) tem uma forma cilíndrica, possui uma abertura interna também cilíndrica, onde o suporte da amostra é rosqueado e vedado com fita de "Teflon" para não haver vazamento do gás (ar). Na outra extremidade da abertura interna fica a janela de vidro por onde a luz incidente penetra na amostra. O gás permanece entre a janela de vidro e o suporte da amostra. A célula é fixada no suporte da amostra por meio de um adesivo plástico (Eccobond Solder 56-C), o qual, quando curado, apresenta uma resistência elétrica extremamente baixa. Este adesivo pode ser curado a uma temperatura de aproximadamente 50°C, num período de duas horas. A amostra pode ser substituída facilmente.



- 1 - corpo da célula feito de alumínio;
- 2 - tampa de alumínio com conectores para a polarização e para o sinal de saída do microfone;
- 3 - suporte da amostra feito de lucite;
- 4 - janela de vidro;
- 5 - conector do sinal de saída do microfone.

Fig. 4.4 - Célula fotoacústica utilizada no sistema.

4.2.1 - MEDIDAS DE CORRENTE POR TENSÃO NA CÉLULA SOLAR

A Figura 4.5 apresenta o diagrama da montagem utilizada para as medidas das características da corrente por tensão da célula solar sob iluminação.

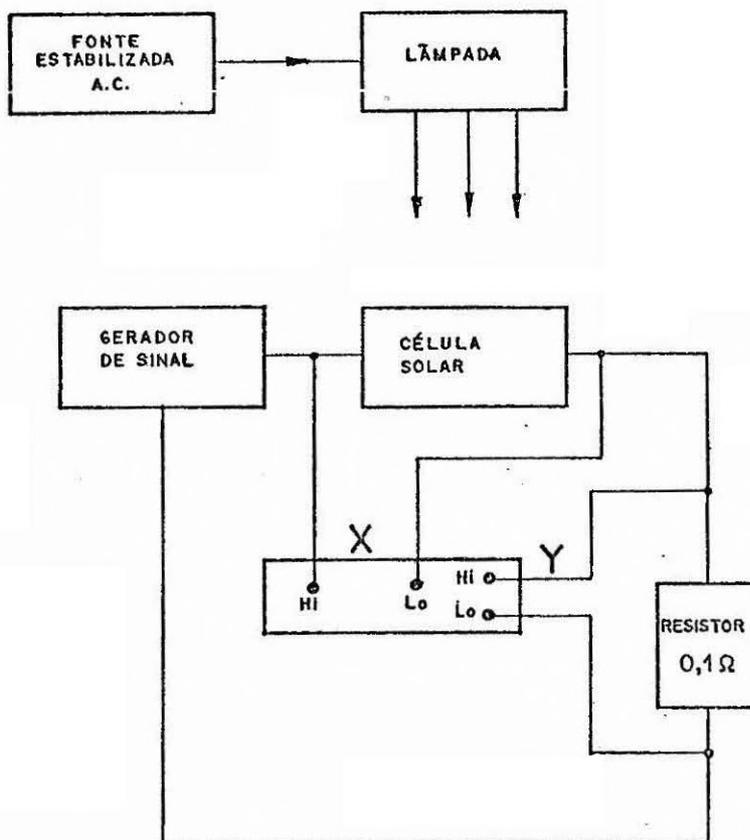


Fig. 4.5 - Diagrama do sistema utilizado para caracterizar a célula de Si pelo método $I \times V$.

Como fonte luminosa utilizou-se uma lâmpada de filamento de tungstênio (120 V e 500 W) alimentada por meio de uma fonte AC estabilizada e ajustável. Como circuito de polarização utilizou-se um gerador de sinal. A corrente na célula é medida sobre um resistor de $0,1\Omega$ que aproxima bem a condição de curto-circuito, uma vez que este é muito menor que a resistência de carga da célula solar.

O objetivo desta medida é compará-la com os resultados obtidos pelo método fotoacústico, nas mesmas condições experimentais dos dois experimentos.

Como consequência, para cada curva de corrente por tensão são traçada, têm-se o ponto de máxima potência, a eficiência da célula solar (conhecendo a potência da luz incidente) e a resistência da carga ótima.

Após obter as curvas de corrente por tensão nas mesmas condições em que foram obtidas as curvas do sinal fotoacústico, determinou-se a resistência de carga da célula solar, a qual foi comparada com aquela determinada por métodos fotoacústicos.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - RESULTADOS OBTIDOS

O sinal fotoacústico passa por um mínimo quando a potência elétrica medida nos terminais da resistência de carga, ligada à célula solar, atinge seu valor máximo.

Cortaram-se duas células solares (área de 2cm²) de qualificação espacial (solarex), denominadas A e B, em doze pedaços de 0,2cm² de área, dimensões estas limitadas pela abertura interna da célula fotoacústica. A frequência foi mantida sempre em 50 Hz. Variou-se apenas a intensidade da luz afastando ou aproximando a fonte luminosa. Como o sinal fotoacústico é proporcional à intensidade de luz; obtiveram-se valores diferentes para o cálculo da eficiência de conversão fotovoltaica.

Para obter o cálculo da eficiência fotovoltaica, usou-se a fórmula desenvolvida no Capítulo 4, Equação 4.9. Os valores de $\rho(\omega)$ e $\rho(c)$ e sua respectiva resistência de carga são lidos diretamente nos gráficos.

A Figura 5.1 mostra o sinal fotoacústico relativo em função da resistência de carga. Para as condições de circuito aberto um sinal fotoacústico de 115 unidades foi obtido, enquanto para uma resistência de carga ótima, R_c de 8,8 Ω , obteve-se um sinal fotoacústico de 107 unidades quando este passava por um mínimo. A frequência usada foi de 50 Hz e a eficiência de conversão para a célula A-1 foi de:

$$\eta^*(c) = \frac{115 - 107}{115} = (6 \pm 0,9) \%$$

Entretanto, observa-se na Figura 5.2 que para as condições de circuito aberto um sinal fotoacústico de 140 unidades foi obtido, enquanto para uma resistência de carga ótima de 4,7 Ω obteve-se um

sinal fotoacústico de 128 unidades quando este sinal passava por um mínimo. A frequência usada foi de 50 Hz e a eficiência de conversão fotovoltaica para a célula A-2 foi de

$$\eta^*(c) = \frac{140 - 128}{140} = (8 \pm 0,2)\% .$$

A Figura 5.3 mostra o sinal fotoacústico relativo em função da resistência de carga. Para as condições de circuito aberto um sinal fotoacústico relativo de 100 unidades foi obtido, enquanto para uma resistência de carga ótima, R_c de 10Ω , obteve-se um sinal fotoacústico de 93 unidades quando este passava por um mínimo. A frequência usada foi de 50 Hz e a eficiência de conversão fotovoltaica para a célula B-1 foi de

$$\eta^*(c) = \frac{100 - 93}{100} = (7 \pm 0,03)\% .$$

Observa-se na Figura 5.4 que para as condições de circuito aberto um sinal fotoacústico de 150 unidades foi obtido, enquanto para uma resistência de carga ótima de $6,5\Omega$ obteve-se um sinal fotoacústico de 141 unidades quando este sinal passava por um mínimo. A frequência usada foi de 50 Hz e a eficiência de conversão fotovoltaica para a célula B-2 foi de

$$\eta^*(c) = \frac{150 - 141}{150} = (6 \pm 0,05)\% .$$

Os pedaços cortados das células A e B foram escolhidos preferencialmente da parte central das amostras e denominados A_1 , A_2 e B_1 , B_2 , respectivamente.

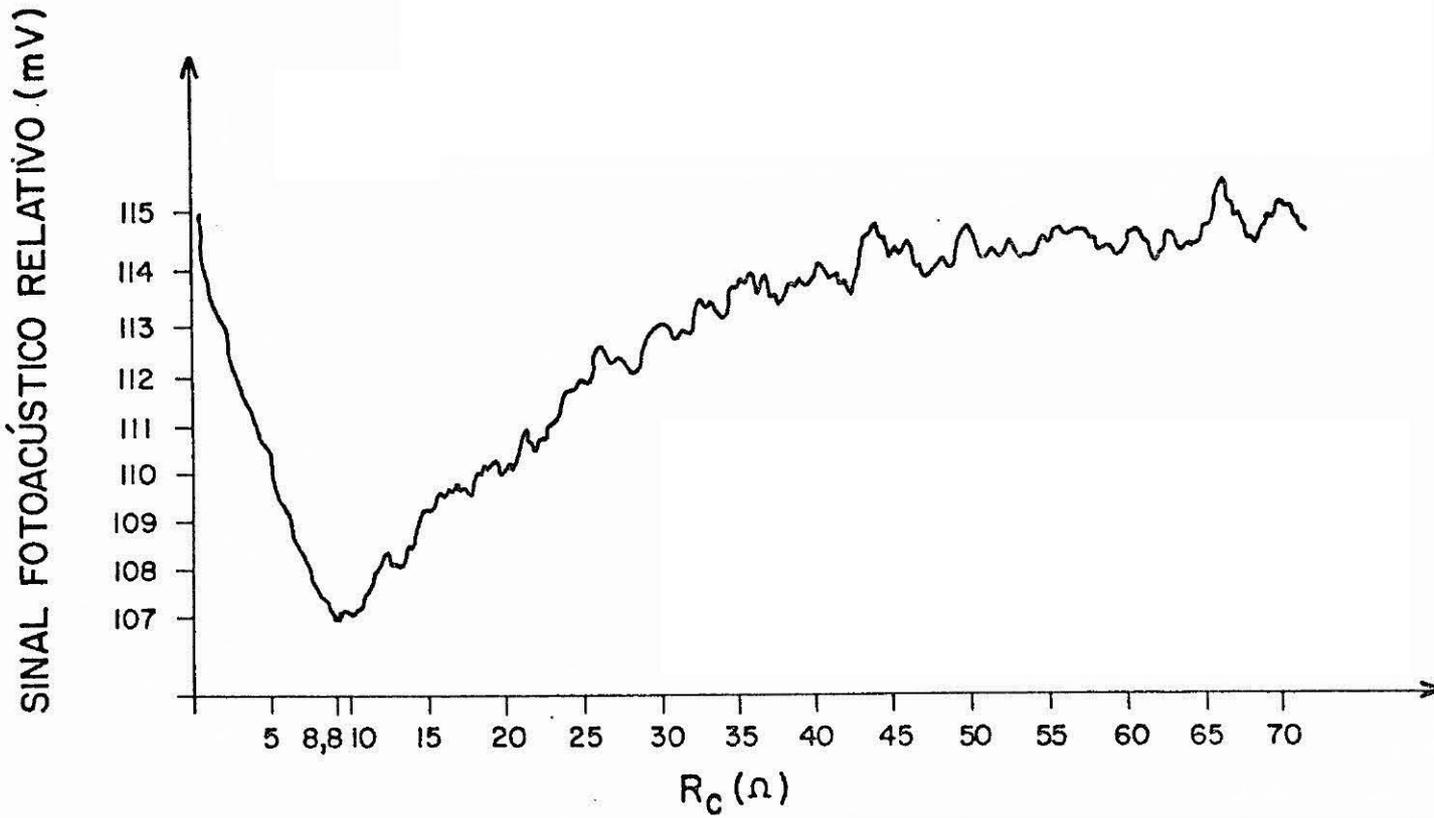


Fig. 5.1 - Sinal fotoacústico relativo em função da resistência de carga (célula solar A-1, luz branca).

Nota-se que para valores de $R_C \gg R_{C \text{ max}}$, o sinal fotoacústico converge para o valor inicial, com $R_C = 0$.

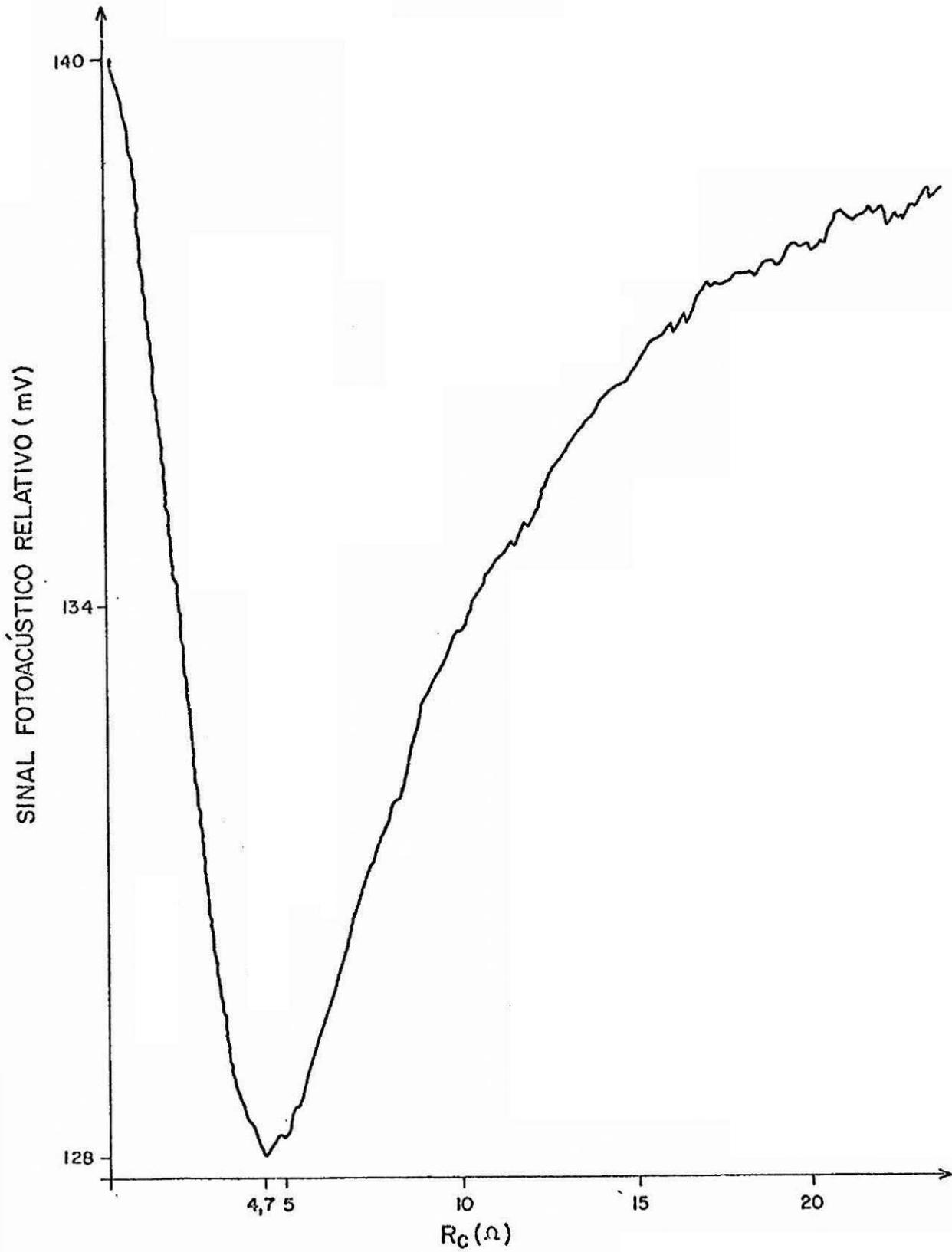


Fig. 5.2 - Sinal fotoacústico relativo em função da resistência de carga (célula solar A-2, luz branca).

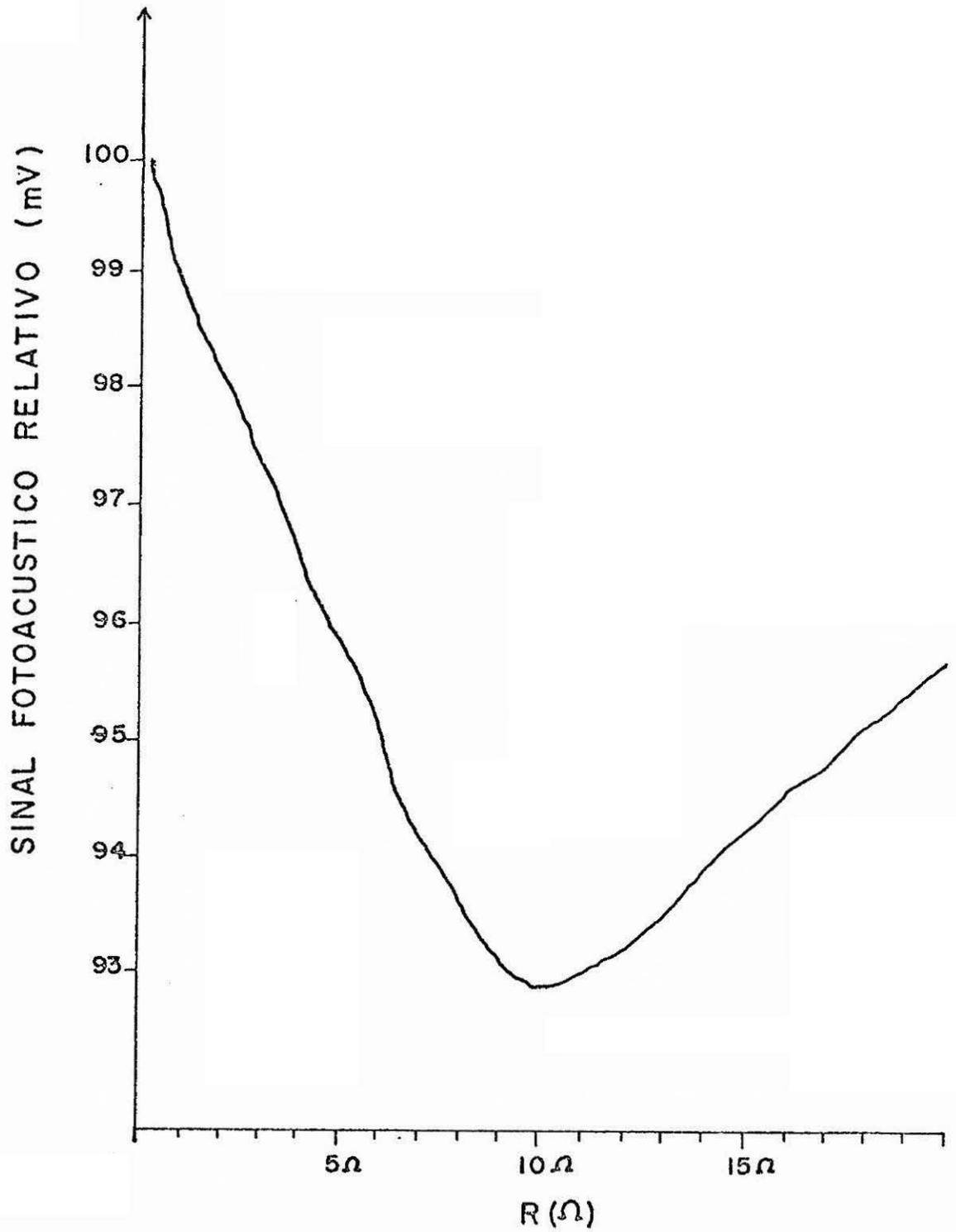


Fig. 5.3 - Sinal fotoacústico relativo em função da resistência de carga (célula solar B-1, luz branca).

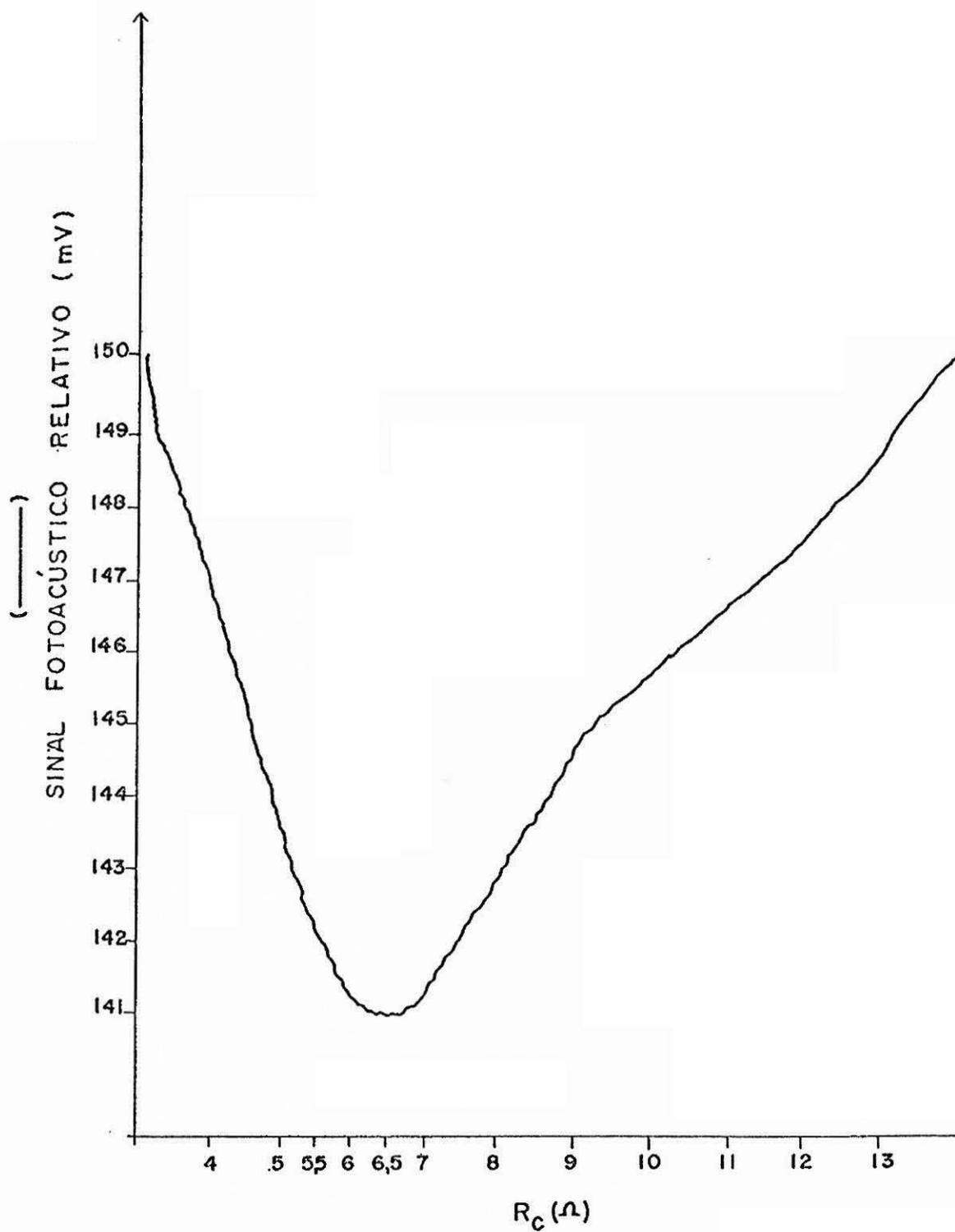


Fig. 5.4 - Sinal fotoacústico relativo em função da resistência de carga (célula solar B-2, luz branca).

Na Figura 5.5, para as condições de circuito aberto o sinal fotoacústico relativo foi de 150 unidades; para uma resistência de carga ótima de $5,5\Omega$ o sinal fotoacústico foi de 141 unidades para a célula B-1. A frequência usada foi de 50 Hz. Obteve-se uma eficiência de conversão fotovoltaica de 6% para a célula B-1. Esta mesma figura (célula B-1) mostra a curva de potência elétrica de saída como função da resistência de carga. Os dados obtidos para a construção da Figura 5.5 para potência elétrica foram calculados através da curva de corrente por tensão em função da resistência de carga. A resistência de carga ótima vista na Figura 5.5 diminuiu de $6,5\Omega$ (sinal fotoacústico) para $5,5\Omega$ (potência elétrica). Essa variação de 1Ω nas resistências de carga para as duas curvas é devida à mudança de temperatura quando o modulador é desligado. Mediu-se a temperatura na célula solar com um termopar de cromel e alumel. A temperatura, que era de 40°C com o modulador ligado, passou para 80°C quando o modulador foi desligado. Para a Figura 5.5 as condições da realização das medidas não foram as mesmas. Na medida do sinal fotoacústico o modulador é conservado; na medida da curva de corrente por tensão o modulador é desligado. Há, portanto, variação da intensidade de luz; conseqüentemente muda a temperatura, o que causa a mudança dos valores da resistência de carga.

A medida da potência luminosa não foi possível, pois não se encontrou um aparelho apropriado para medi-la com bastante precisão nas vizinhanças.

Tentou-se diminuir a potência da lâmpada, mas o sinal fotoacústico era afetado e o ruído era intenso. Uma elevada potência foi necessária para conseguir a detecção do sinal fotoacústico. Assim não se pôde calcular a eficiência de conversão fotovoltaica pela técnica $I \times V$ da célula para ser comparada com a técnica usada no efeito fotoacústico. Seria necessário obter um valor com maior precisão da potência luminosa incidente para efetuar o cálculo da eficiência de conversão fotovoltaica.

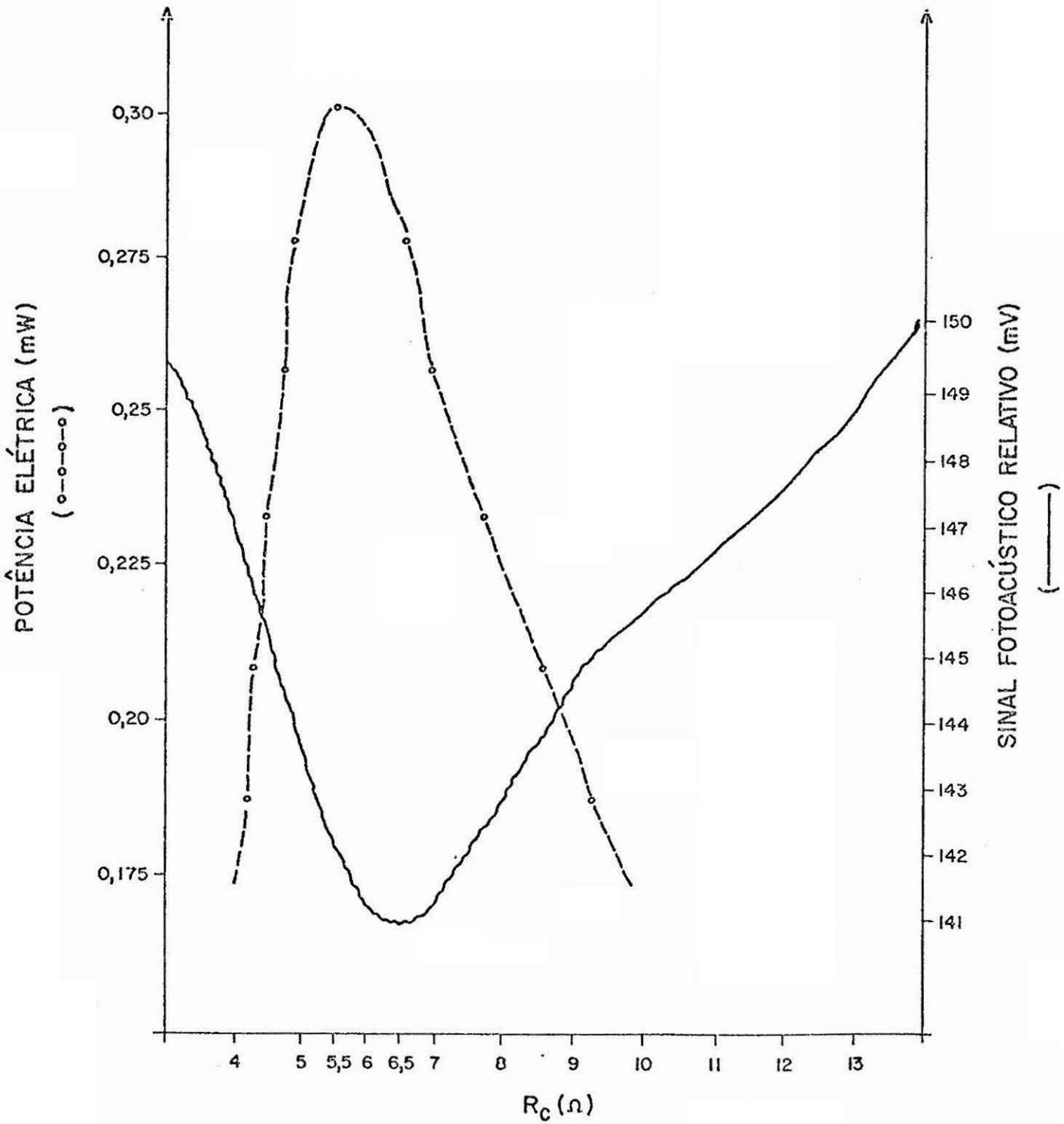


Fig. 5.5 - Sinal fotoacústico relativo e potência elétrica de saída co mo função da resistência de carga (método I x V, célula B-1).

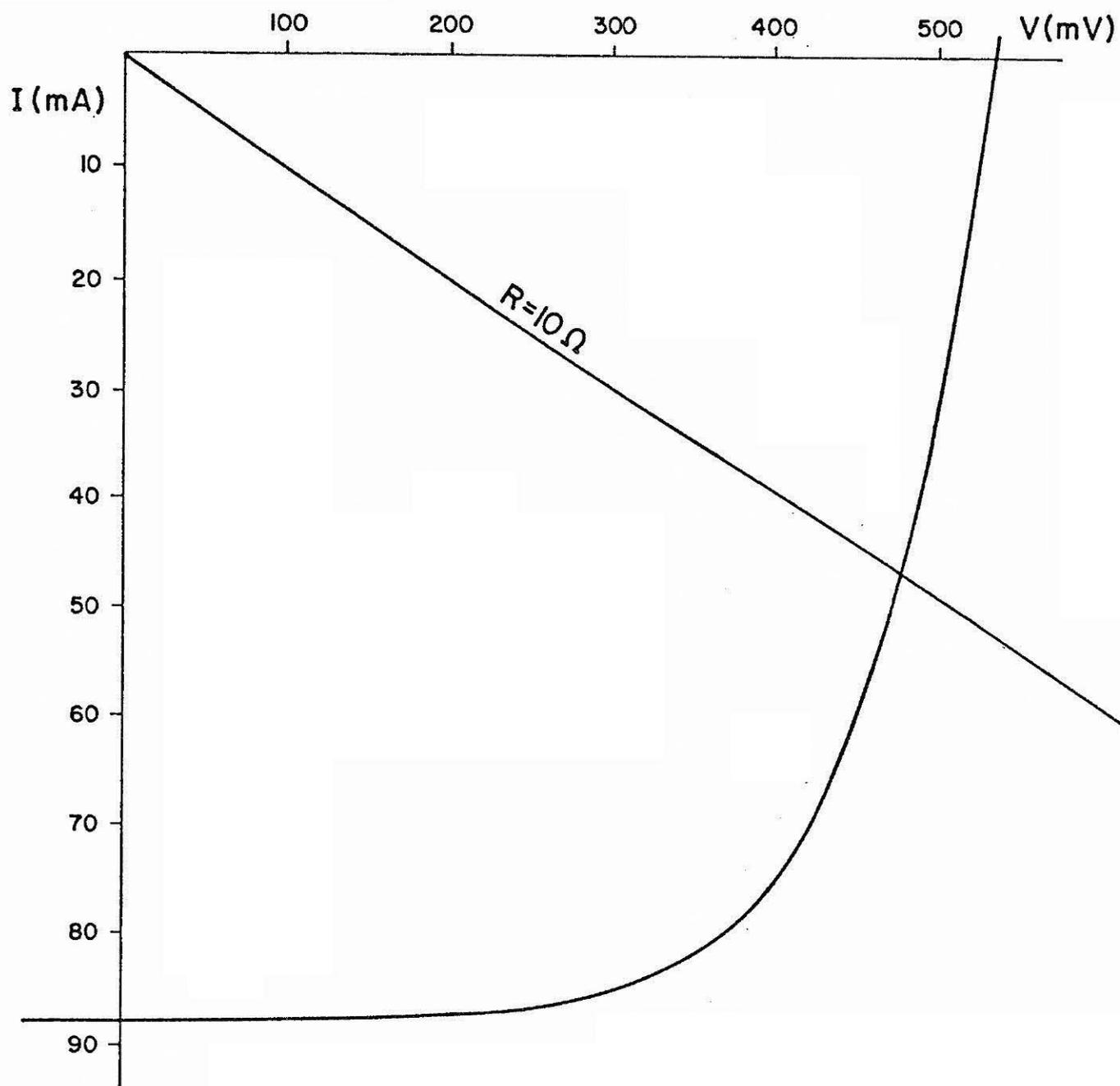


Fig. 5.6 - Característica da curva $I \times V$ da célula solar de Si (célula solar B-1).

Na Figura 5.7 (célula solar B-2) obtiveram-se as curvas de potência elétrica de saída e o sinal fotoacústico relativo como funções da resistência de carga. Para construção dessas curvas foram mantidas as mesmas condições experimentais para as duas medidas. Mediram-se a corrente elétrica e a tensão gerada na célula solar com multímetros digitais. A leitura dessas medidas foi feita ponto a ponto. Neste caso, não houve variação da temperatura na célula solar (conservou-se o "chopper" ligado), obteve-se o mesmo valor da resistência de carga ótima, $10\Omega \pm 5\%$, através do sinal fotoacústico e da curva da potência elétrica. Para as condições de circuito aberto o sinal fotoacústico foi de 100 unidades; para uma resistência de carga de $10\Omega \pm 5\%$, obteve-se um sinal fotoacústico de 93 unidades. A frequência usada foi de 50 Hz para os dois métodos e a eficiência de conversão fotovoltaica foi de

$$\eta^*(c) = \frac{100 - 93}{100} = (7 \pm 0,03) \% .$$

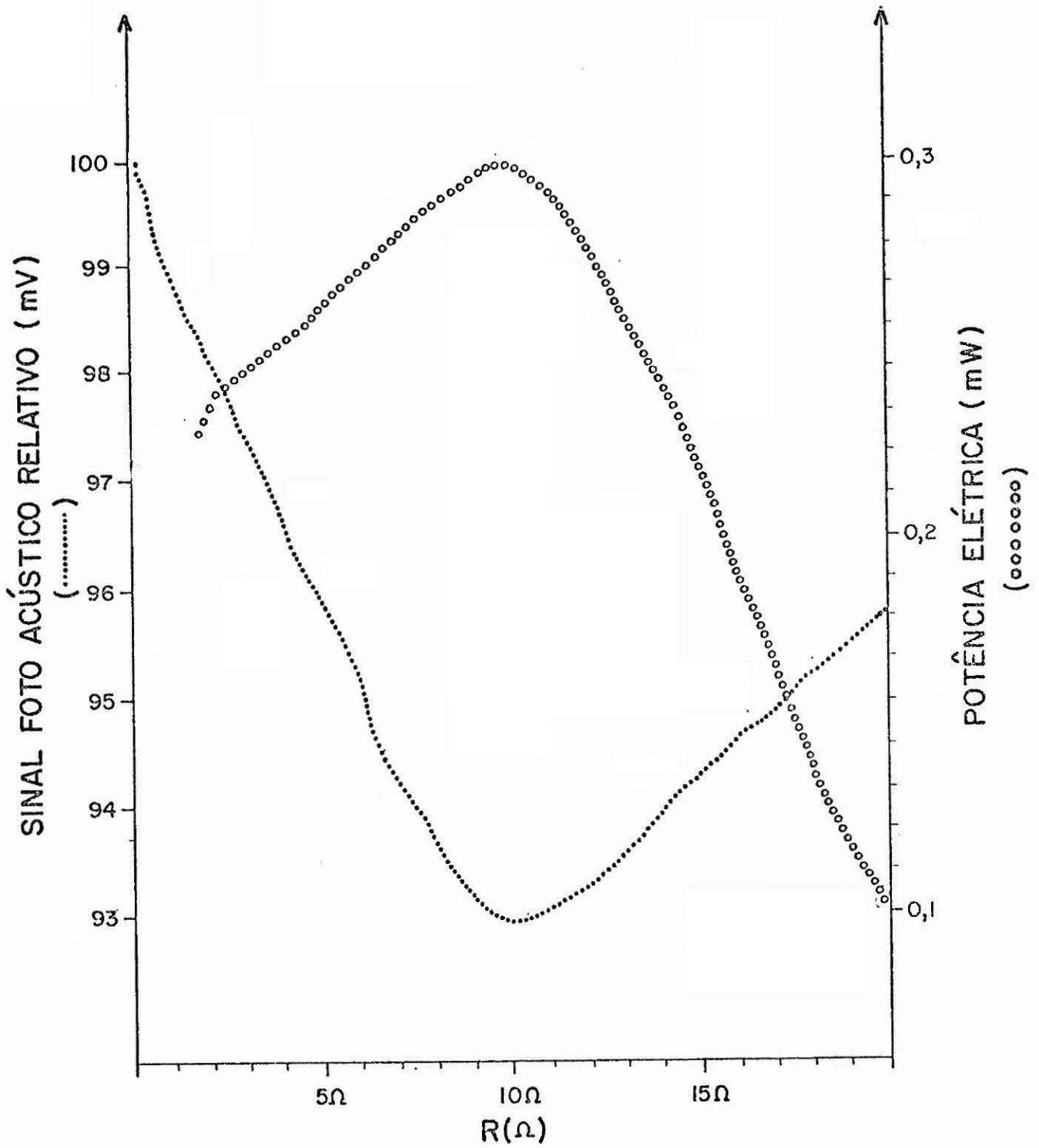


Fig. 5.7 - Sinal fotoacústico relativo e potência elétrica de saída como função da resistência de carga (célula solar B-2).

5.2 - CONCLUSÕES

A técnica de espectroscopia fotoacústica aplicada à caracterização de semicondutores (Bandeira et alii, 1982) é um poderoso instrumento para a investigação de fenômenos de transportes e, neste trabalho, foi utilizada para a avaliação do desempenho de células solares.

A geração de um sinal fotoacústico é determinada pelos processos não-radiativos que dissipam a quase totalidade da energia absorvida pela célula e limitam sua eficiência de conversão fotovoltaica.

Neste sentido, a investigação fotoacústica constitui mais uma técnica empregada para: verificação do desempenho de células solares, medida de característica corrente-tensão, resposta espectral, etc.

Tais processos não-radiativos incluem a termalização (geração de fônons) do excesso de energia $h\nu - E_g$, no caso de pares gerados por fótons com energia maior do que o "gap", e a recombinação não-radiativa de pares termalizados (Pankove, 1971).

A contribuição relativa de cada um dos processos para o sinal fotoacústico depende da carga externa alimentada pela célula solar. Estudou-se a dependência da eficiência de conversão fotoacústica variando a resistência de carga, o que permitiu determinar a resistência de carga que maximiza a eficiência de conversão fotovoltaica da célula solar e medir a sua eficiência interna sem necessidade de conhecer o valor da potência luminosa incidente. Em função da resistência de carga, observou-se um mínimo de sinal fotoacústico que correspondia a um máximo da energia dissipada nessa resistência, ou seja, ao funcionamento da máxima eficiência interna da célula solar.

A curva obtida na Figura 5.8 para a célula A-3 evidencia o aumento da resistência de carga com a baixa intensidade luminosa na amostra. Colocando o filtro passa-banda de $\lambda=9000 \text{ \AA}$, a intensidade da luz diminui, o sinal fotoacústico cai, o ruído aumenta, sendo de difícil obtenção precisa da curva do sinal fotoacústico. O sinal fotoacústico obtido foi de 7,0 unidades; para uma resistência de carga ótima de 70Ω o sinal fotoacústico foi de 6,4 unidades quando este passava por um mínimo. A eficiência de conversão fotovoltaica foi de

$$\eta^*(c) = \frac{7,0 - 6,4}{7,0} = (8 \pm 0,2)\%$$

Verifica-se que a eficiência de conversão não variou com relação à obtida com luz branca na Figura 5.2.

Essa medida foi obtida logo após retirar a curva da Figura 5.2, quando se colocou o filtro passa-banda de $\lambda = 9000 \text{ \AA}$.

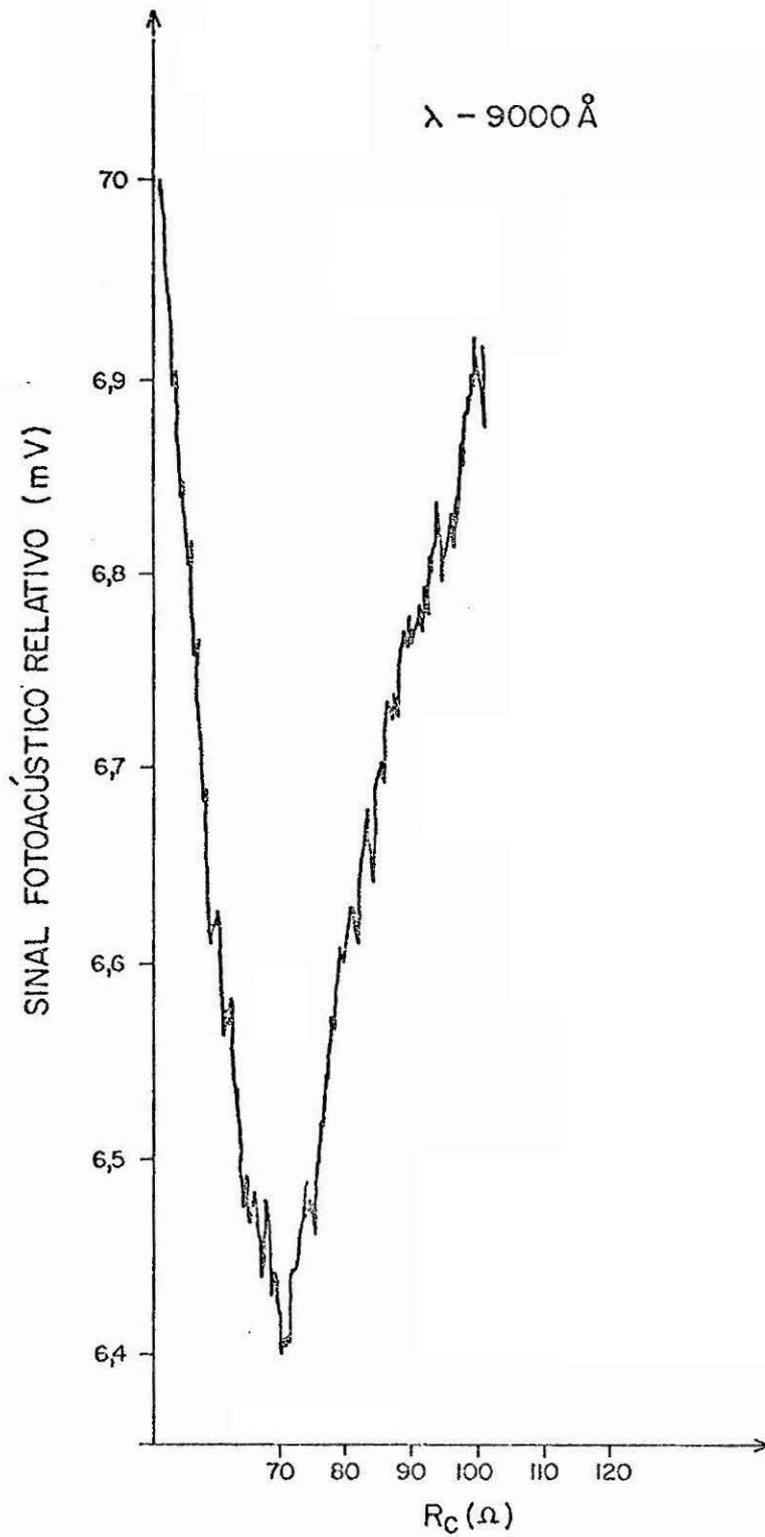


Fig. 5.8 - Sinal fotoacústico relativo em função da resistência de carga, usando um filtro de luz com um comprimento de onda na faixa de 9.000 \AA (filtro de luz passa-banda, célula solar A-2).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANDEIRA, I.N.; CLOSS, H.; GHIZONI, C.C. Study of the photoacoustic effect in semiconductors. Effect of an applied DC-electric field. Accepted for publication in the *Journal of Photoacoustics*, Apr. 1982. Publicado como preprint nº 99, INPE-2084-RPE/316.
- CAHEN, D. Photoacoustic determination of photovoltaic energy conversion efficiency. *Applied Physical Letters*, 33(9):810-811, Nov. 1978.
- HOVEL, H. *Solar cells*. Semiconductors and Semi-metals. New York, Academic Press, 1975. v. 11.
- McDONALD, F.A.; WETSEL, JR. G.C. Generalized theory of the photoacoustic effect. *Journal of Applied Physics*, 49(4):2313-2322, Apr. 1978.
- PANKOVE, J. *Optical Processes in Semiconductors*. Dover Publ. (1971). cap. 7, 161-170.
- ROSENCWAIG, A. Photoacoustic spectroscopy. *Analytical Chemistry*, 47(6):592-604, Sept. 1975.
- ROSENCWAIG, A.; GERSHO, A. Theory of photoacoustic effect with solids. *Journal of Applied Physics*, 47(1):64-69, Jan. 1976.
- WOLF, M. A new look at silicon solar cell performance. In: BACKUS, C.E. *Solar Cells*. New York, IEEE Press - 1971. p. 191-201.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- CAHEN, D. Photoacoustic cell for reflection and transition measurements. *Review of Scientific Instruments*, 52(9):1306-1310, Sept. 1981.
- GHIZONI, C.C.; SIQUEIRA, M.A.A.; VARGAS, H.; MIRANDA, L.C.M. *Effect of grain size on the photoacoustic spectroscopy of powdered samples*. São José dos Campos, INPE, jul. 1977. (INPE-1084-PE/070).
- ROSENCWAIG, A. Photoacoustic spectroscopy of solids. *Review of Scientific Instruments*, 48(9):1133-1137, Sept. 1977.
- THURSTON, R.N. *Physical Acoustic*. New York, Academic, 1964. v. 1.
- TOKUMOTO, H.; TOKUMOTO, M.; ISHIGURO, T. Photoacoustic spectra of semiconductors in the strong absorption region. *Journal of the Physical Society of Japan*, 50(2):602-605, Feb. 1981.

