

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS



WALDIR GARLIPP
CADEIRA DE METALURGIA
Departamento de Mecânica-B

Obtenção de Resposta Linear em Células Fotovoltáicas

Separata do Boletim de Mecânica Aplicada n.º 3



SÃO CARLOS
SERVIÇO DE PUBLICAÇÕES DA
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

1961

SUMMARY

In this work was searched to find to what values of R_s (electric resistance of electrodes and a part of the barrier layer) of the photovoltaic cell, is obtained a linear answer of electric current by mean of luminous excitation.

Was used the statistical programming and modified circuit of Campbell-Freeth designed by D.F. Wyatt.

It resulted that to R_s corresponds 125, 250, 375, 625, 750, 875, and 1000 Ω , giving a linear answer, with exception of R_s corresponding to 500 Ω as shown in figure 5.

OBTENÇÃO DE RESPOSTA LINEAR EM CÉLULAS FOTOVOLTÁICAS

WALDIR GARLIPP - CADEIRA DE METALURGIA

Departamento de Mecânica - B

Diversas pesquisas têm sido feitas para se conseguir o melhor aproveitamento das células fotovoltaicas em medidas, visando eliminar as propriedades indesejáveis de fadiga, resposta não linear à excitação luminosa e influência da temperatura (1, 2, 3, 4).

Descobriu-se experimentalmente que a célula fotovoltaica possui um funcionamento análogo ao circuito da figura 1.

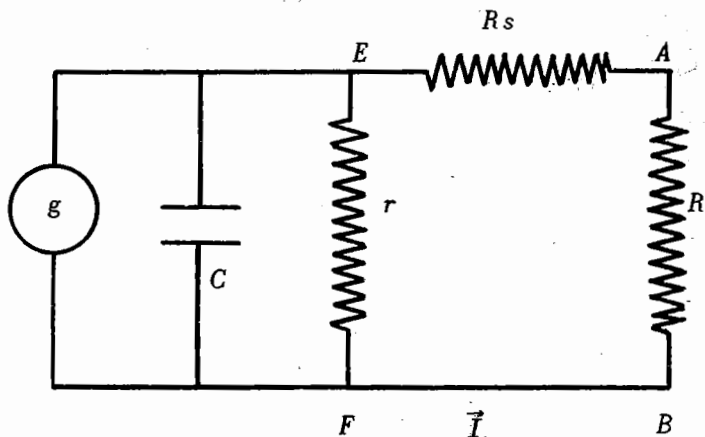


Fig. 1

onde

g é um perfeito gerador fotoelétrico que produz corrente elétrica própria da célula;

r é a resistência elétrica de fuga medida pela rela-

ção entre $(VE - VF)$ e a corrente de fuga no interior da célula pela camada de barreira;

$(VE - VF)$ é a queda de potencial elétrico entre os pontos E e F ;

R_s é a resistência elétrica dos eletrodos da célula e de uma parte da camada de barreira;

R é a resistência elétrica externa;

I é a corrente elétrica medida externamente à célula.

Atribuem-se as propriedades indesejáveis (ver figura 1), em parte à dependência de I às variações de r , e o efeito é menor, quanto menor R , pois diminui a tensão $VE - VF$, ocasionando a diminuição progressiva de r .

CIRCUITO DE CAMPBELL - FREETH

N.R. Campbell e M. K. Freeth (4) imaginaram um circuito (figura 2), que eliminasse a resistência de fuga r pela anulação de qualquer diferença de potencial entre A e B , supondo $R_s = 0$. A medida de I era feita por miliamperímetro de alta resistência interna.

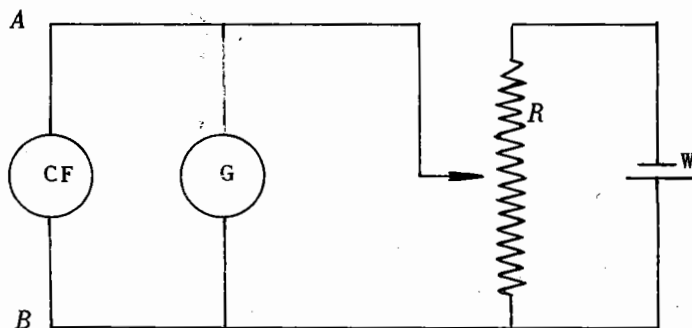


Fig. 2

G - galvanômetro com o zero no meio da escala;

W - gerador de corrente contínua;

R - resistência elétrica;

CF - célula fotovoltaica.

O fato de $R_s \neq 0$ entretanto, não permitia que o circuito adotado conseguisse eliminar a tensão entre E e F .

CIRCUITO DE D. G. WYATT

D. G. Wyatt (3) modificou o circuito anterior para tornar nula a influência de R_s .

Para isso estabeleceu o seguinte, conforme figura 3.

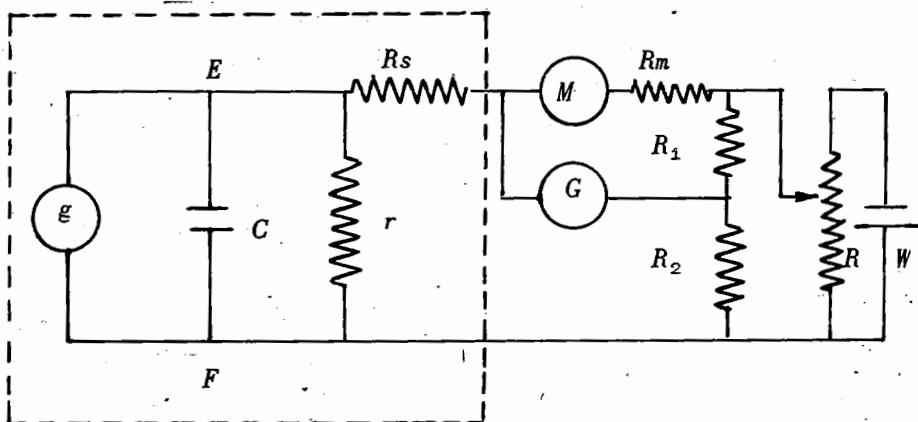


Fig. 3

R_1 e R_2 - resistências elétricas variáveis;

R_m - resistência elétrica interna do miliamperímetro.

W - gerador de corrente contínua;

R - resistência elétrica total de um potenciômetro;

M - miliamperímetro;

G - galvanômetro.

Desde que se faça $R_1 = R_m$, resulta $R_2 = R_s$ para corrente zero em G . E por sua vez r se anula porque deixa de existir diferença de potencial entre os pontos E e F .

Por conseguinte era preciso saber que valor de R_2 devia ser escolhido, porque R_s não era conhecido. Experimentalmente, usando várias lâmpadas iguais, com o circuito modificado de Campbell e Freeth, D. G. Wyatt iluminava a célula, (fabricação da Evans Electroselenium Ltd.) com uma de cada vez e depois com todas juntas. O número n de lâmpadas foi variado para cada medida desde 1 até 5.

O desvio

$$\Delta_n = \frac{jn}{\sum_{i=1}^n I_i} 100\%$$

onde jn é o valor da corrente para tôdas as n lâmpadas ligãs e

$$\sum_{i=1}^n I_i$$

é a soma das correntes para as iluminações com cada uma: deu como resultado $\Delta_n = 0$ para $R_2 = 600 \Omega$.

Neste caso a resistência R_s deu como valor 600Ω .

APLICAÇÃO DO CIRCUITO DE D. G. WYATT COM DELINEAMENTO ESTATÍSTICO E ILUMINAÇÃO INCIDENTE COM VARIAÇÃO EXPO- NENCIAL, NA OBTENÇÃO DO VALOR R_s DE UMA CÉLULA FOTOVOL- TÁICA.

Aqui em nosso Departamento necessitamos construir um densitômetro ótico com uma célula fotovoltaica (G.M. Inc., Patente nº 2.034.334 dos Estados Unidos da América, concedida para Erwin Falkenthal (8) e um miliamperímetro de resistência interna elevada. Recorremos ao circuito D. G. Wyatt a fim de descobrirmos a resistência R_2 (ver figura 3) a se usar.

A variação da intensidade luminosa incidente sobre a célula fotovoltaica foi realizada por um número variável de lâminas de vidro, da mesma qualidade e espessura, (com erro relativo de 0,5%), igualmente cobertas por um verniz transparente ao espectro luminoso incidente. Esse número foi de 1 a 10, sempre mantidas justapostas. Assim realizamos uma variação de intensidade luminosa de acordo com a lei $I_l = I_{l,0} e^{-\mu d}$. A variável era proporcional ao número de lâminas, sendo μ constante de absorção, $I_{l,0}$ intensidade luminosa constante antes da primeira lâmina, I_l , após certo número de lâminas.

$I_{l,0}$ era controlado constantemente pela medida de tensão entre os bornes da lâmpada já previamente enve-

lhecida por funcionamento ulterior e intermitente, totalizando mais de 50 horas. A tensão manteve-se no intervalo de $(5,93 \pm 0,03)$ volt para um voltímetro marca Simpson, modelo n° 269. As medidas de corrente elétrica pelo miliamperímetro (figura 3) obedeceram a um delineamento fatorial em dois blocos de acordo com a estatística moderna, sendo os fatores R_2 , e n° de lâminas.

As medidas constam na tabela I seguinte, em unidades de microampère e foram feitas logo após a ligação da chave de luz e colocação do galvanômetro a zero. Evitou-se assim a fadiga característica das células fotovoltáicas. Cada medida foi separada por um tempo de espera de cinco minutos.

Tabela I

		R_2								
		n° lam	125	250	375	500	625	750	875	1000
1° Bloco	1a.	29,4	31,0	31,4	32,2	33,5	33,9	33,5	35,4	
	2a.	25,3	25,8	27,0	27,3	27,9	24,8	29,0	29,8	
	3a.	22,3	22,7	23,1	23,6	24,4	25,0	25,8	26,4	
	4a.	19,5	19,5	20,3	20,9	21,2	21,6	23,2	22,4	
	5a.	17,1	17,7	18,1	18,2	18,5	18,6	19,2	19,4	
	6a.	15,1	15,6	15,6	16,5	16,5	16,8	17,5	17,6	
	7a.	13,4	14,0	14,1	14,4	15,0	13,7	15,0	15,1	
	8a.	12,0	12,2	12,6	12,9	13,2	13,4	13,7	13,8	
	9a.	11,1	10,8	11,4	11,7	11,7	12,2	12,4	12,3	
	10a.	9,7	9,8	10,3	10,3	10,4	11,0	10,9	11,5	
2° Bloco	1a.	30,8	30,3	30,7	32,0	32,3	32,8	34,8	35,7	
	2a.	26,1	26,7	24,6	28,3	30,8	29,1	28,5	30,4	
	3a.	22,3	22,9	22,6	23,7	23,3	25,2	26,3	26,0	
	4a.	19,9	20,5	21,1	19,9	22,5	21,4	23,0	22,9	
	5a.	17,9	17,8	18,5	17,8	19,7	19,0	20,0	20,0	
	6a.	15,7	15,9	15,9	15,7	17,2	17,5	17,5	17,6	
	7a.	13,3	14,3	14,2	14,5	14,6	15,3	16,1	15,8	
	8a.	11,9	12,6	13,5	12,6	13,3	13,0	14,1	14,1	
	9a.	11,3	11,2	11,2	11,6	11,5	12,2	12,8	11,2	
	10a.	10,1	9,8	10,0	10,8	10,5	11,0	11,6	11,3	

Tivemos nas linhas uma variação de R_2 nos níveis: 125, 250, 375, 500, 625, 750, 875 e 1000 Ω e nas colunas os níveis de número de lâminas de vidro.

A análise de variância nos revelou na tabela II:

Tabela II

Fontes de variação	ϕ	Soma dos quadrados	Variância	F
Entre blocos	1	235,2	235,20	6,28 +
Entre colunas	7	18.973,2	1996,17	52,85 +++
Entre linhas	9	756.862,5	84095,83	2226,52 +++
Interação	63	4.509,1	715,73	18,95 +++
Entre tratamentos	79	775.344,8	9814,49	259,85 +++
Resto	79	2.983,8	37,77	
Dentro dos Blocos	158	778.328,6	4926,13	
Total	159	778.563,8	4896,63	

Como vemos existe muito alta significância entre as colunas, isto é, entre os diversos níveis de R_2 .

Como as médias aritméticas dos valores, de cada canteiro de mesma posição, em cada bloco fizemos $\log_e \frac{I_e}{I_{e,0}}$, sendo $I_{e,0}$ a corrente encontrada no primeiro canteiro e I_e a corrente em outro canteiro de mesma coluna.

Construímos então com estes logaritmos naturais novas colunas com nove canteiros cada.

A análise de regressão realizada para cada coluna, onde a variável independente é o número de laminais interpostas, de 1 a 9, deu como re-

sultado as curvas da figura 5.

Dêsse modo conseguimos traçar as curvas para as oito colunas de $\log_e \frac{I_e}{I_{e,0}}$, cada uma relativa a um valor de R_2 .

Verificou-se então que a linearidade se dá para $R_2 = 125, 250, 375, 625, 750, 850$ e 1.000Ω . Se a variação dos $\log_e \frac{I_l}{I_{l,0}}$ foi acompanhada pela variação dos $\log_e \frac{I_e}{I_{e,0}}$ para aqueles valores de R_2 as medidas de I_e são as mais acertadas no caso.

Na figura 6 vemos o circuito proposto por Wyatt e utilizado por nós, com a introdução de duas tomadas de microfone.

R_1 - resistor variável - 0 - 10.000Ω ;

R_2 - resistor variável - 0 - 1.000Ω ;

R - resistor variável do potenciômetro - 0- 10.000Ω ;

W - pilha sêca de 1,5 volt;

G - galvanômetro Weston modelo 440;

MA - Miliamperímetro Triplet - modelo 625, fundo de escala: 0 - 50μ . A resistência interna $R_m = 5.000 \Omega$.

O dispositivo $\left| \begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \\ \text{ } \end{array} \right| \begin{array}{c} \text{ } \\ \text{ } \\ \text{ } \end{array}$ é uma tomada de microfone. Quando o jack é ligado a um ohmímetro (philiscop da Philips tipo GM 4144/01), desliga A de B, liga A a C, desde que normalmente C está isolado. Isto facilita muito o controle do valor exato de R_1 e R_2 , sem se necessitar de cortar algum fio, porque o jack automaticamente coloca o ohmímetro em série com a parte da resistência em uso no circuito.

Na figura 7 vemos a disposição relativa da célula fotovoltaica, lâmpada, filtro, lâminas de vidro dentro da caixa de madeira inteiramente vedada às influências luminosas externas.

INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A existência de interação entre intensidade luminosa e resistência elétrica R_2 (tabela II) nos assegura que foi de bom alvitre realizar as leituras de corrente elétrica conforme o delineamento estatístico usado. Realizando-as também antes do início da fadiga, asseguramos uma uniformidade de método de medida.

Intensidade luminosa relativa

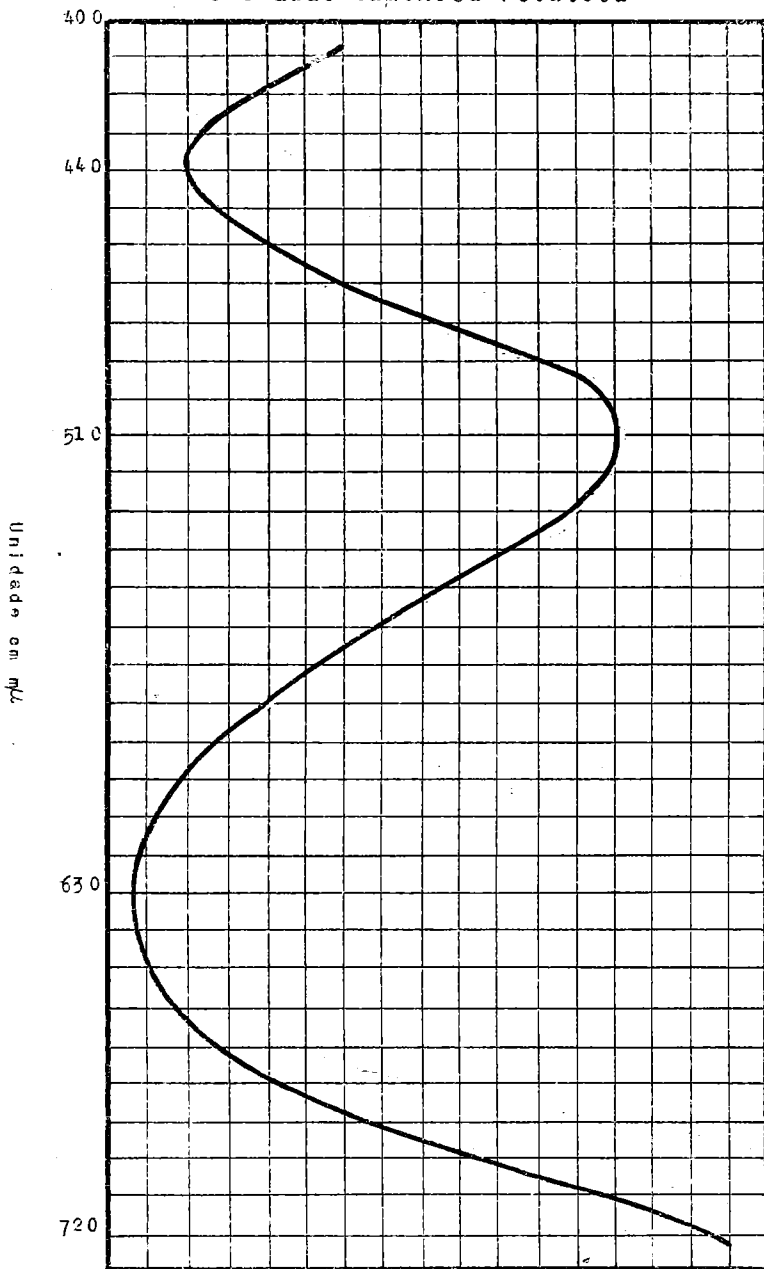
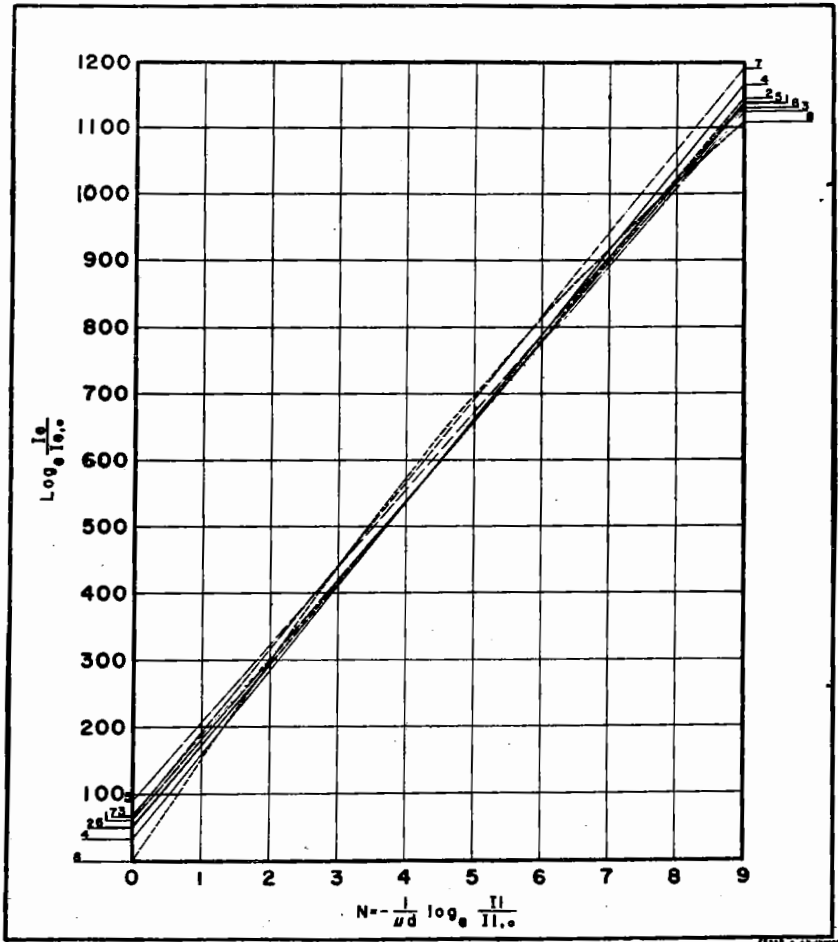


Fig. 4



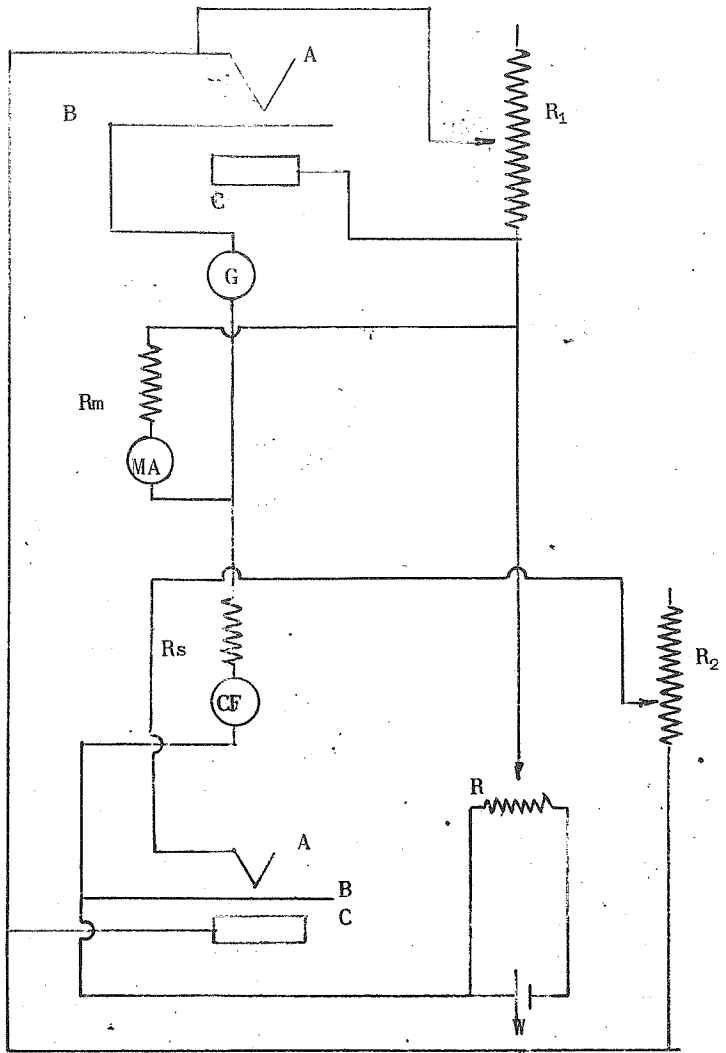


Fig. 6

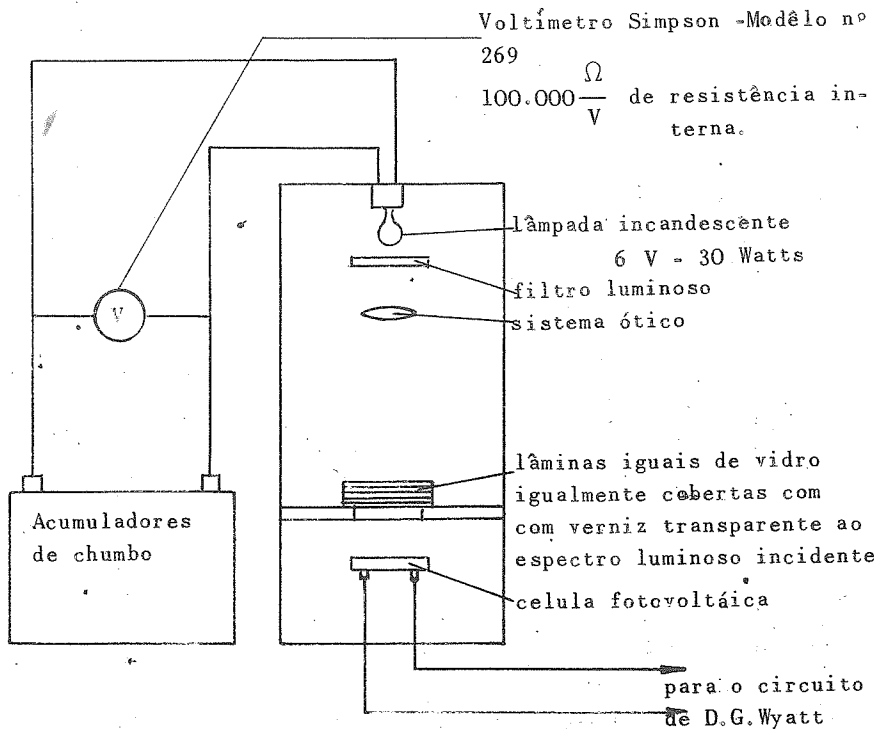


Fig. 7

A linearidade de resposta de nossa célula para todos os valores de R_2 usados, com exceção do valor de 500Ω , significou uma adaptação de R_s às variações de R_2 .

Este acontecimento nos diz que dentro do erro experimental cometido o comportamento de R_s deixou de ser aquele de uma resistência constante no circuito adotado.

Cabe verificar finalmente qual a melhor resistência elétrica R_2 para maior sensibilidade de nossa célula dentro da linearidade.

Segundo a figura 5 notamos que a reta 5 (relativa a $R_2 = 750 \Omega$) apresenta a maior corrente fotovoltaica até aproximadamente três lâminas. Dêste número de lâminas em diante, a corrente é maior para $R_2 = 1.000 \Omega$, (reta 7)

Pode-se notar também que as retas 1, 2, 3, 4 e 6 se reúnem com boa precisão no ponto em que aproximadamente

$N = 4$, 3 lâminas sendo ainda o valor mais baixo de intensidade luminosa para este valor de N .

Verificamos ainda na figura 5 a situação da curva 8 ($R_2 = 500\Omega$), em relação às retas já citadas.

AGRADECIMENTO

Agradecemos ao Sr. Professor Doutor Rubens Lima Pereira, Professor Catedrático da Cadeira de Metalurgia, estímulo demonstrado e sugestões apresentadas; ao senhor Oswaldo Fontoura Costa, pelo valioso auxílio nos cálculos à máquina, e também a todos que contribuíram com o empréstimo dos aparelhos necessários à realização deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- 1 - Preston, J. S. - Proc. Roy.Soc. 202 - página 449 (1950);
- 2 - Blet, G. - Mesures 18, página 595 (1953);
- 3 - Wyatt, D. G. - J. Sc. Instrum. 34, página 106 (1957)
- 4 - Campbell N. R., Freeth, M. K., - J. Sc. Instrum. 11 página 135 (1934);
- 5 - Curso de Estatística ; - Cadeira de Economia, Política, Estatística Aplicada, Organizações Administrativas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Prof. Dr. Ruy Aguiar da Silva Leme;
- 6 - Tablas Estadísticas para investigadores Científicos Editora Aguilar - tradução do inglês do Statistical Tables for biological agricultural and medical research - R. A. Fisher e F. Yates;
- 7 - Statistical Methods in Research and production - Davies 3a. edição - Editora Oliver and Royal,
- 8 - Patente nº 2.034.334 dos E.U. da América concedida para Erwin Falkenthal.