

Montagem de um Sistema para Caracterização Espectral de Sensores de Radiação

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)

Tábata Aira Ferreira (Unicamp, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: t105695@dac.unicamp.br

Luiz Ângelo Berni (LAS/CTE/INPE, Orientador)
E-mail: berni@las.inpe.br

Julho de 2012

Resumo

Este trabalho teve como objetivo montar um sistema para obter a resposta espectral de sensores de radiação, como células solares, fotodiodos e radiômetros desenvolvidos no laboratório. Também medir a fotoluminescência de amostras de silício poroso desenvolvidas no LAS visando futuramente à utilização em dispositivos sensores de radiação. Foram montados dois sistemas ópticos para a caracterização dos sensores, sendo o primeiro utilizando um monocromador de distância focal de 250mm com uma fonte de luz de filamento de 250W e o segundo composto por vinte filtros de interferência cobrindo a faixa de 350 a 1100nm com largura espectral média de 8nm e uma lâmpada halógena de 1000W como fonte de luz. Ambos os sistemas requisitaram de fotodiodos calibrados para as medidas de irradiância espectral e sistema de aquisição de dados composto por multímetro de precisão. A validação dos sistemas foi feita utilizando um simulador solar que opera com uma lâmpada de descarga em gás de alta pressão de Xenônio de 1000W e reproduz os espectros AM0 e AM1,5. Foram medidas nesses sistemas duas células solares, sendo uma nacional (*LME/USP*) de uso terrestre de área 2,1cm² e outra norte-americana (*Spectrolab*) de uso espacial com 7,88cm² de área. Também foram obtidas as curvas de resposta espectral de dois radiômetros da Kipp&Zonen e de um radiômetro protótipo desenvolvido no laboratório, sendo um do tipo PAR, ou seja, responde entre 400 e 700nm e os outros dois, inclusive o do laboratório, do tipo GLOBAL (resposta espectral entre 400 e 1100nm). As correntes de curto-circuito estimadas através da integração das curvas de resposta espectral foram comparadas com os valores medidos diretamente no simulador, obtendo grande concordância.

Foi feita a montagem de um sistema para caracterização de Silício Poroso. Este que tem como importante característica a emissão fotoluminescente na região do visível. O sistema foi montado utilizando uma lâmpada de alta intensidade na região do ultravioleta, filtros para seleção do comprimento de onda, uma lente convergente e um espectrômetro compacto da GetSpec. Também, foram feitas imagens de dois Silícios do laboratório para diferenciá-los microscopicamente.

Abstract

This study had intention to build a system to measure the spectral response of radiation sensors like solar cells, photodiodes, and radiometers developed in the laboratory. Also measuring the photoluminescence of porous silicon samples developed in the LAS in order to study the possible use in the future as a device radiation sensor. Two optical systems are mounted, the first using a monochromator of 250 mm focal length with a filament light source of 250W and the second comprising twenty interference filters covering the range of 350 to 1100nm with spectral width of 8nm and a halogen lamp of 1000W as light source. Both systems requested calibrated photodiodes for the measurement of spectral irradiance and data acquisition system comprising a precision voltmeter. The validation of the systems was performed using a solar simulator which operates with a gas discharge lamp of high pressure Xenon 1000W and reproduces the spectra AM0 and AM1.5. With this system were measured two solar cells, the first, a national terrestrial solar cell (LME / USP) with an area of 2.1 cm² and the second, an American space solar cell (Spectrolab) with an area of 7.88 cm². Also, spectral response curves were obtained for two radiometer of Kipp & Zonen and a prototype radiometer of the laboratory, one type PAR, that responds between 400 and 700nm and the other two including the lab, type GLOBAL (spectral response between 400 and 1100nm). The short-circuit currents estimated by integrating the spectral response curves were compared with values measured directly in the simulator, obtaining good agreement.

A setup was made for characterization of Porous Silicon. One important feature of Porous Silicon is the photoluminescence in the visible region. The system was fitted with a high intensity light in the ultraviolet region, filters for selecting the wavelength, a convergent lens and a compact spectrometer of GetSpec. Also, images were made of two silicones from the laboratory to distinguish them microscopically.

LISTA DE FIGURAS

		<u>Pág.</u>
2.1	Estrutura típica de uma célula solar de silício.....	3
2.2	Célula Solar Brasileira.....	4
2.3	Célula Solar Americana.....	4
2.4	Representação de uma onda eletromagnética.....	5
2.5	Espectro Eletromagnético.....	5
2.6	Radiômetro protótipo CELSOL.....	7
2.7	Radiômetro PAR.....	7
2.8	Foto do SP I.....	8
2.9	SP II antes (à esquerda) e depois da incidência de ultravioleta (à direita).....	8
2.10	Imagem microscópica do SP I com ampliação de 3500 vezes.....	9
2.11	Imagem microscópica do SP I com ampliação de 500 vezes.....	9
2.12	Imagem microscópica do SP I com ampliação de 1500 vezes.....	10
2.13	Imagem microscópica do SP II com ampliação de 1500 vezes.....	10
2.14	Imagem microscópica do SP II com ampliação de 5000 vezes.....	11
2.15	Imagem microscópica do SP II com ampliação de 10000 vezes.....	11
3.1	Diagrama do sistema de caracterização de curva IxV do CELSOL.....	12
3.2	Exemplo de uma corrente de curto-circuito calculada pelo sistema de medida de corrente por tensão.....	13
3.3	Espectro da lâmpada de 1000W.....	14
4.1	Esquema da montagem do sistema de medição com monocromador.....	15
4.2	Foto do sistema de medida de resposta espectral do CELSOL.....	16
4.3	Espectro da lâmpada do monocromador.....	16
4.4	Curva de potência de radiação na saída do monocromador.....	17
4.5	Espectro da fonte de luz usando a lâmpada de 1000W.....	18
4.6	Exemplo de gráfico de transmitância.....	19
5.1	Sistema para caracterização do Silício Poroso.....	20
5.2	Espectro da lâmpada sem e com diferentes filtros na região do ultravioleta.....	21
6.1	Curva de resposta espectral da célula solar LME/USP.....	22
6.2	Gráfico de $A/W \times \text{nm}$, resposta espectral da célula LME/USP com filtros de interferência.....	23
6.3	Resposta espectral para a célula Spectrolab medida na saída do monocromador..	23
6.4	Resposta espectral para a célula Spectrolab medida com filtros de interferência..	24
6.5	Resposta espectral do radiômetro Kipp&Zonen-PAR.....	25
6.6	Resposta espectral relativa do radiômetro Kipp&Zonen-Global.....	25
6.7	Resposta espectral relativa de um radiômetro protótipo.....	26
6.8	Gráfico de intensidade relativa do SP I.....	27
6.9	Gráfico de intensidade relativa do SP II.....	27

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Diferenças básicas entre as células solares utilizadas.....	3
2.2 Diferenças básicas entre os radiômetros utilizados.....	6
4.1 Características básicas dos filtros.....	18
6.1 Resumo dos resultados obtidos.....	24

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 Introdução	1
2 Dispositivos	2
2.1 Célula Solar de Silício.....	2
2.1.1 Características das Células Solares utilizadas.....	3
2.2 Radiômetros.....	4
2.2.1 Características dos radiômetros utilizados.....	6
2.3 Silício Poroso.....	7
2.3.1 Características do SP utilizados.....	8
3 Sistema de medida de corrente por tensão (IxV)	12
4 Sistemas para caracterização espectral	14
4.1 Utilizando um monocromador	15
4.2 Utilizando filtros de interferência	17
5 Sistema de caracterização do Silício Poroso	20
6 Resultados e análise de dados	21
6.1 Sistemas para caracterização de Células Solares e Radiômetros.....	21
6.2 Sistemas para caracterização de Silício Poroso.....	26
7 Conclusões	28
8 Referências	28

1 INTRODUÇÃO

O grupo de Pesquisas em Células Solares (CELSOL) do LAS/CTE tem como objetivo o estudo e caracterização de células solares para uso em satélite, bem como o desenvolvimento de processos e técnicas de microeletrônica utilizadas para a obtenção destes dispositivos. Este trabalho tem por motivação montar um sistema para medir a resposta espectral de sensores e dispositivos. A resposta espectral de um dispositivo fotovoltaico descreve a sua capacidade em converter a radiação incidente em corrente elétrica em função do comprimento de onda. Podemos definir a resposta espectral absoluta de um dispositivo (célula solar, fotodiodo ou radiômetro) como sendo a razão entre a densidade de corrente gerada pelo dispositivo na condição de curto circuito (A/cm^2) e a irradiância incidente (W/cm^2) em função do comprimento de onda. Através da medida da resposta espectral, no caso de células solares, é possível analisar vários aspectos de sua estrutura, como por exemplo, o material de fabricação da célula, a profundidade e as características da junção e do filme anti-refletor aplicado. Também é possível calcular a corrente de curto-circuito de um dispositivo fotovoltaico ou célula solar para diferentes espectros de iluminação (AM0, AM1, etc.).

No geral, são utilizados filtros de interferência ou um monocromador para a obtenção da radiação monocromática. Dependendo da sensibilidade do dispositivo, a radiação monocromática que incide sobre o sensor é pulsada em uma dada frequência, através de um modulador (“chopper”) que obstrui a luz por espaços regulares de tempo. O sinal do sensor é então amplificado e medido em um lock-in na frequência determinada pelo “chopper”.

Este trabalho teve como objetivo montar um sistema para obter a curva de resposta espectral de dispositivos fotovoltaicos e, no caso de células solares, estimar a corrente de curto-circuito utilizando espectros AM1,5G e comparar com os resultados medidos no simulador solar disponível no laboratório. As curvas de alguns radiômetros também foram medidas.

Por fim, foi feita a montagem de um sistema para caracterização do Silício Poroso. Este que por ter a importante característica de emitir radiação na região do visível ao incidirmos ultravioleta, é utilizado em várias áreas. Como por exemplo, na eletrônica aplica-se como circuitos para micro-ondas e na química analítica como sensor. Para dois Silícios Porosos foram feitas as curvas de intensidade relativa de cada comprimento de onda da região emitida por eles.

2 DISPOSITIVOS

A seguir, são detalhadas as principais características dos dispositivos que foram utilizados neste trabalho.

2.1 Célula Solar de Silício

Célula solar ou célula fotovoltaica é um dispositivo capaz de converter a radiação solar em energia elétrica, através do efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico pode ser entendido como a geração de um potencial quando a radiação eletromagnética ioniza a região dentro ou próxima da barreira de potencial de um semicondutor. O material mais comum na fabricação de célula solar é o silício (Si), que pode ter três tipos de estruturas: monocristalino, policristalino e amorfo. Células de silício monocristalino obtêm-se a partir de barras cilíndricas de silício monocristalino produzidas em fornos especiais. As células são obtidas por corte das barras em forma de pastilhas finas. As células de silício policristalino são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por fusão de silício puro em moldes especiais. Uma vez nos moldes, o silício esfria lentamente e solidifica-se. Nesse processo, os átomos não se organizam num único cristal. Forma-se uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. Por fim, as células de silício amorfo são obtidas por meio da deposição de camadas finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal.

O cristal de silício puro não possui elétrons livres, conseqüentemente é mau condutor elétrico. Para alterar isso, acrescentam-se frações de outros elementos, processo que é denominado dopagem. Ao doparmos o silício com fósforo, obtemos um material com portadores de carga negativa (Silício tipo N). Da mesma maneira, se doparmos o silício com o boro, obtemos um material com falta de elétrons (Silício tipo P).

A estrutura típica de uma célula solar de silício está ilustrada na figura 2.1. A parte superior da célula solar é formada pelos contatos elétricos superiores e pela camada anti-refletora, que garante maior transmissão de luz para o semicondutor. A junção p-n é formada em um semicondutor do tipo-n ou tipo-p. Estes semicondutores, tipo-n ou tipo-p, são obtidos através das técnicas de crescimento de cristal Czochralski ou Fusão Zonal e a junção p-n, como citado acima, através da dopagem de impurezas ou dopantes por meio das técnicas de difusão em forno de tubo aberto ou implantação iônica. Por fim, outro contato elétrico é localizado na parte de trás da célula solar.

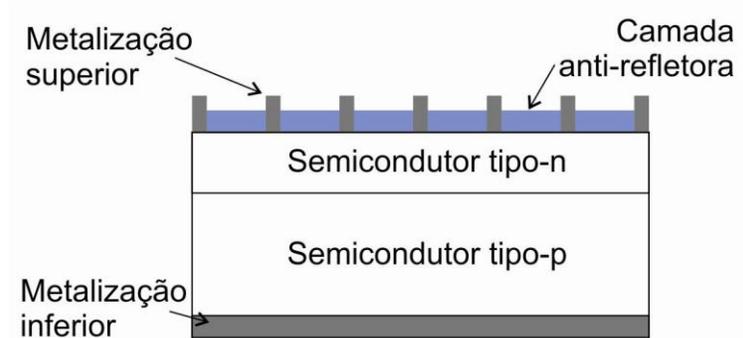


Figura 2.1 – Estrutura típica de uma célula solar de silício.

Quando unimos os dois tipos de silício, há a formação de um campo elétrico. Assim, quando incidimos luz na célula fotovoltaica, os fótons chocam-se com os elétrons fornecendo energia, transformando-os em condutores. Enquanto a luz incidir na célula, haverá um fluxo de elétrons (corrente) e a intensidade da corrente é diretamente proporcional a intensidade da luz incidida. Uma célula fotovoltaica não armazena energia, apenas mantém o fluxo de elétrons citado acima.

2.1.1 Características das Células Solares utilizadas

Estudamos duas células solares monocristalinas. A tabela 2.1 mostra as diferenças básicas entre elas.

	Nacionalidade	Tipo de uso	Área
Célula 01 LME/USP	Brasileira	Terrestre	2,10 cm ²
Célula 02 Spectrolab	Americana	Espacial	7,88 cm ²

Tabela 2.1 – Diferenças básicas entre as células solares utilizadas

A figura 2.2 mostra uma foto da célula brasileira e a figura 2.3 da americana.

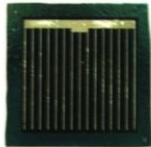


Figura 2.2 - Célula Solar Brasileira.

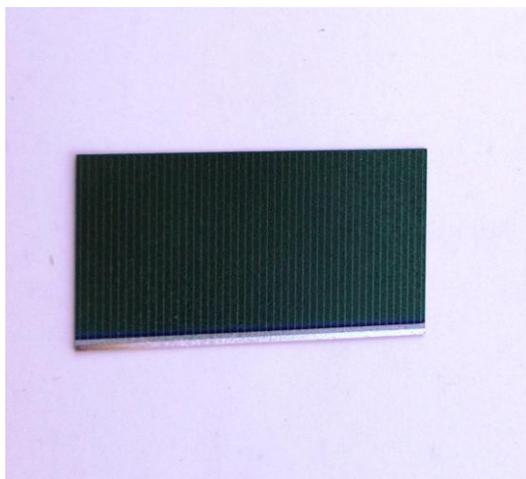


Figura 2.3 – Célula Solar Americana.

2.2 Radiômetros

Quando nos referimos a sensores de radiação o termo comum usado é radiômetro. O radiômetro é um dispositivo que mede o fluxo da radiação de ondas eletromagnéticas.

Radiação eletromagnética são ondas que se propagam pelo espaço e têm como importante característica a propagação perpendicular entre os campos magnético e elétrico. Podem ser entendidas como propagação de ondas transversais que têm a direção de vibração

perpendicular à direção de propagação da onda. A figura a 2.4 ilustra essa afirmação e a figura 2.5 mostra o espectro eletromagnético.

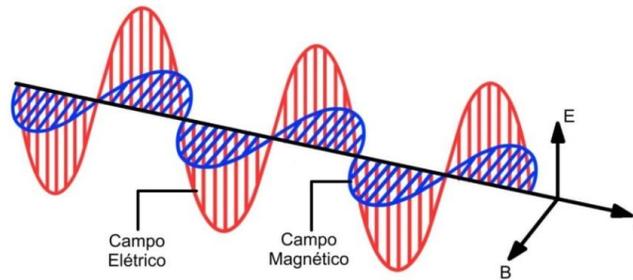


Figura 2.4 – Representação de uma onda eletromagnética

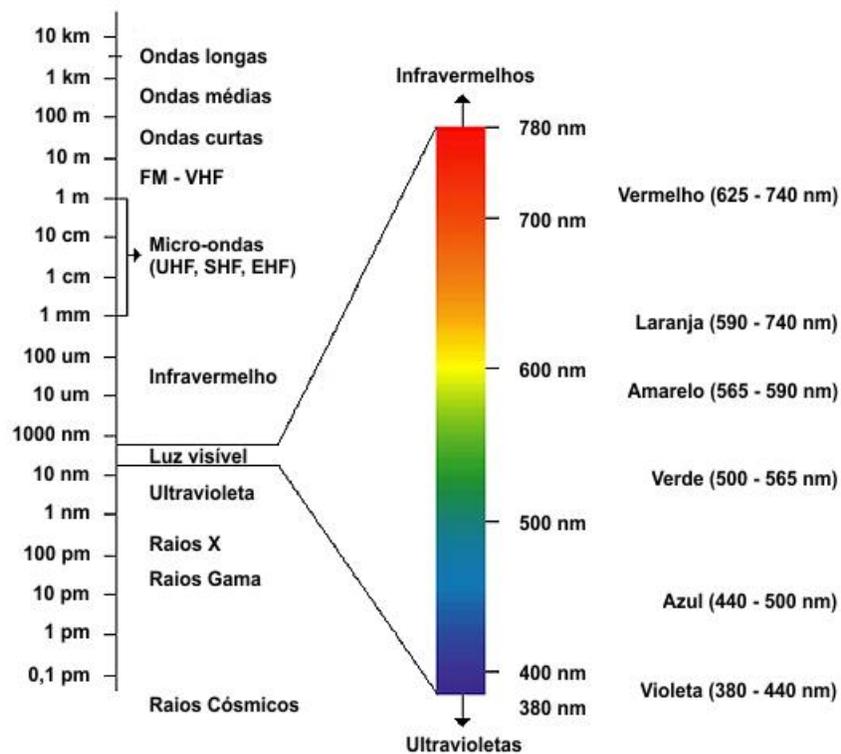


Figura 2.5 – Espectro Eletromagnético

Como a tecnologia está evoluindo, os próprios radiômetros estão sendo adaptados de acordo com a necessidade. Hoje temos sensores de radiação solar apropriados para a agricultura. Um sensor desse tipo recebe o nome de radiômetro PAR (Photosynthetically-Active Radiation) e mede apenas a radiação de 400nm a 700nm que, no caso, é a região útil para a fotossíntese das plantas.

Do mesmo modo temos um tipo de radiômetro que responde na região de 400nm a 1100nm que é chamado de GLOBAL.

2.2.1 Características dos radiômetros utilizados

A tabela 2.2 resume as diferenças básicas dos três radiômetros utilizados.

Radiômetro	Sensibilidade	Tipo de detector	Faixa espectral	Medição
Kipp&Zonen Tipo: PAR n° de série: 060773	4,57 μ V/ μ mol/s.m ²	Fotodiodo de silício e filtros	(400 – 700) nm	Radiação fotossinteticamente ativa
Kipp&Zonen Tipo: GLOBAL n° de série: 064170	74,1 μ V/W.m ⁻²	Fotodiodo de silício	(400 – 1100) nm	Radiação Solar Global
Protótipo CELSOL	18,5 μ V/W.m ⁻²	Célula solar	(400 – 1100) nm	Radiação Solar Global

Tabela 2.2 – Diferenças básicas entre os radiômetros utilizados.

A seguir, as imagens 2.6 e 2.7 mostram dois dos radiômetros utilizados para a verificação dos sistemas: o protótipo do CELSOL (GLOBAL) e o radiômetro da Kipp&Zonen (PAR), respectivamente.



Figura 2.6 – Radiômetro protótipo CELSOL.



Figura 2.7 - Radiômetro PAR.

2.3 Silício Poroso

O Silício Poroso (SP) tem como importante característica a emissão fotoluminescente na região do visível. Ele é um material promissor para muitas aplicações. Por exemplo, na optoeletrônica pode ser utilizado como “displays”. Na eletrônica, podem ser utilizados em circuitos para micro-ondas e na química analítica com sensores.

O SP é obtido a partir do silício (Si) monocristalino. O processo mais comum para sua obtenção é através da anodização eletroquímica em solução de ácido fluorídrico. A camada de SP formada é uma estrutura esponjosa. Os cristalitos de Si nessa estrutura podem ser interconectados por Si ou por pontes de SiO_2 . Por isso o SP é considerado um material particular, ou seja, não se encaixa como silício monocristalino convencional, nem como um material amorfo.

A luminescência no silício é um assunto controverso, porém é comum a aceitação que a composição do silício e a estrutura da superfície nanoscópica são os importantes mecanismos influenciadores nas propriedades fotoluminescentes.

Como o SP é de estrutura nanoscópica, e portanto muito frágil, conseqüentemente pode facilmente se degradar com o tempo, principalmente se passar por processos com altas temperaturas, solventes reativos, entre outros.

2.3.1 Características dos SP utilizados

Como foram analisados dois SP, serão diferenciados no relatório pelos nomes SP I de 1,91x1,89cm com área útil de 2,27cm² e SP II de 1,94x1,92cm com área útil de 2,01cm². A figura 2.8 mostra o SP I à luz ambiente e a figura 2.9 o SP II também à luz ambiente e ao lado quando incidimos ultravioleta com comprimento de onda de 370 nm.



Figura 2.8 – Foto do SP I.

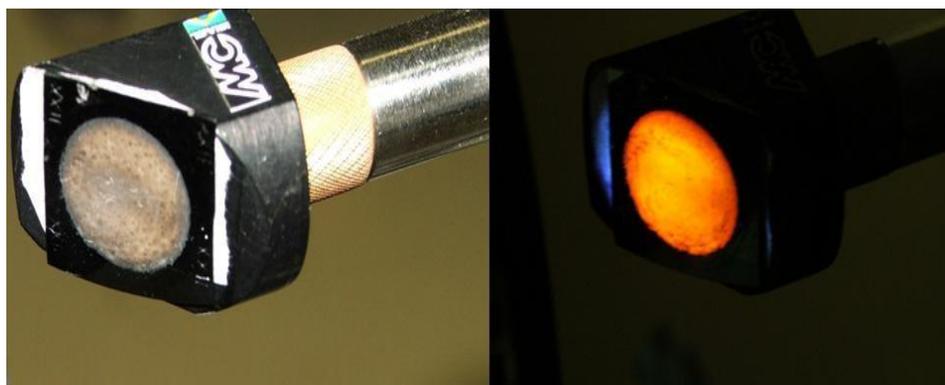


Figura 2.9 –SP II antes (à esquerda) e depois da incidência de ultravioleta (à direita).

As figuras 2.10, 2.11, 2.12, 2.13, 2.14 e 2.15 mostram as diferenças microscópicas dos Silícios Porosos obtidas por Microscopia eletrônica de varredura disponível no laboratório.

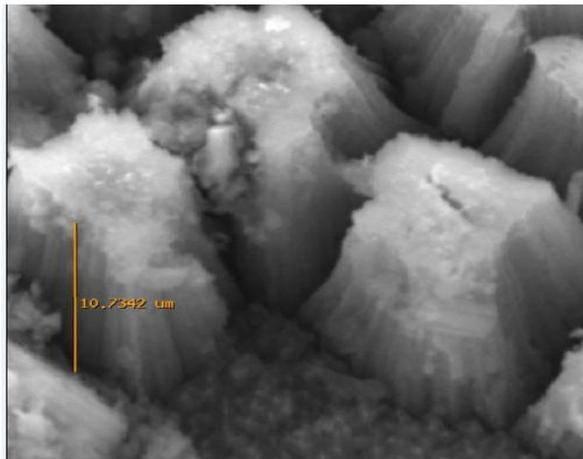


Figura 2.10– Imagem microscópica do SP I com ampliação de 3500 vezes.

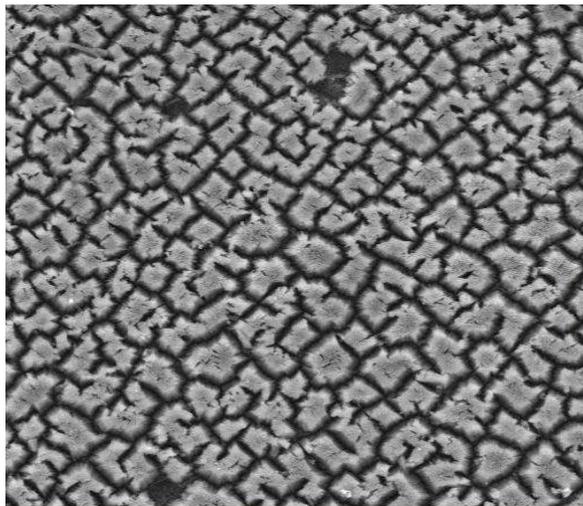


Figura 2.11 – Imagem microscópica do SP I com ampliação de 500 vezes.

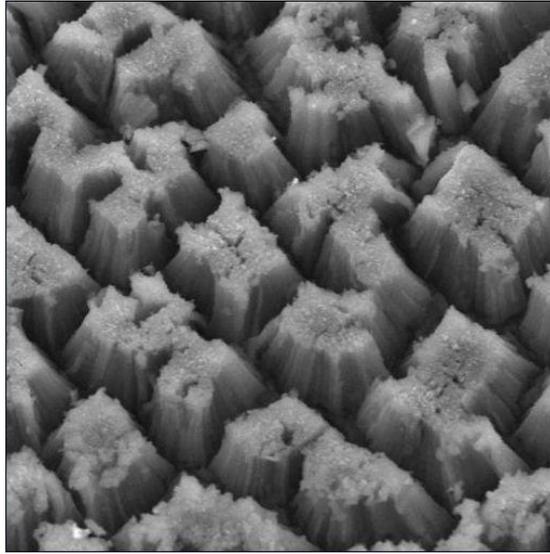


Figura 2.12 – Imagem microscópica do SP I com ampliação de 1500 vezes.

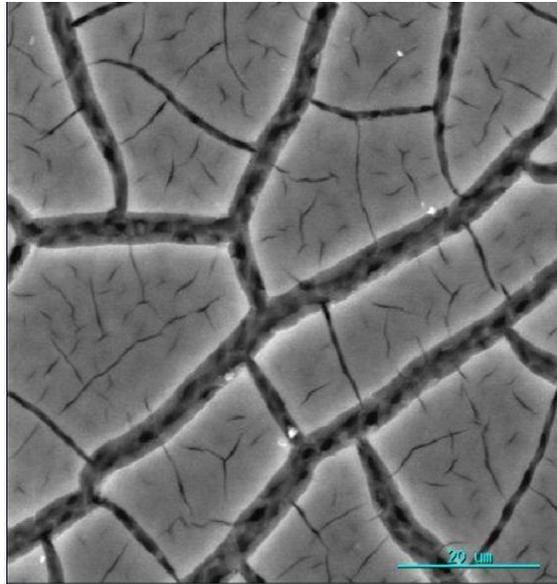


Figura 2.13 – Imagem microscópica do SP II com ampliação de 1500 vezes.

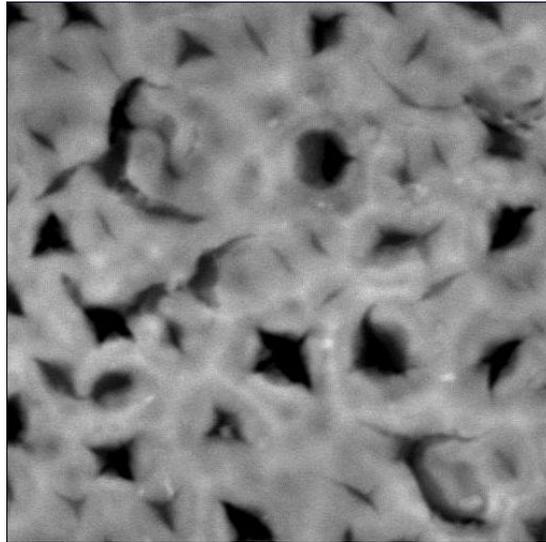


Figura 2.14 - Imagem microscópica do SP II com ampliação de 5000 vezes.

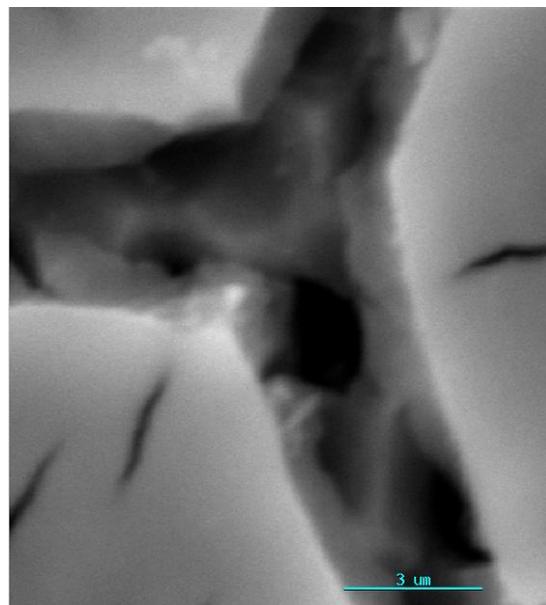


Figura 2.15 - Imagem microscópica do SP II com ampliação de 10000 vezes.

3 SISTEMA DE MEDIDA DE CORRENTE POR TENSÃO (IxV)

O laboratório CELSOL possui um sistema de medidas de curva IxV de células solares de silício. O diagrama desse sistema é mostrado na Figura 3.1

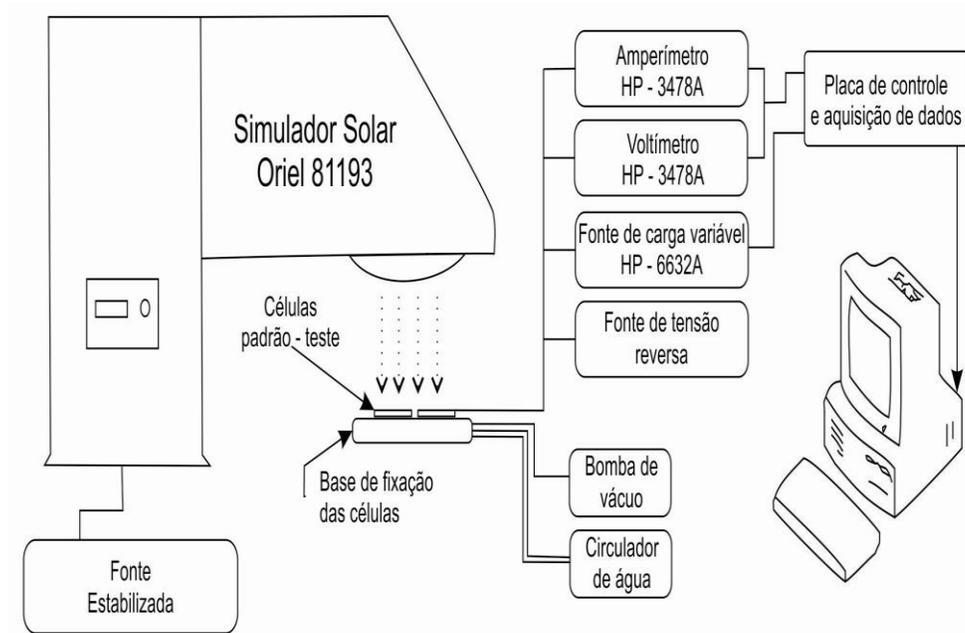


Figura 3.1 – Diagrama do sistema de caracterização de curva IxV de células solares de silício do CELSOL.

Esse sistema permite a determinação dos parâmetros de saída de uma célula solar ou de um radiômetro, como por exemplo, os valores da corrente de curto-circuito, da tensão de circuito aberto, da potência máxima, do fator de preenchimento e da eficiência.

A figura 3.2 nos mostra em destaque o exemplo da corrente de curto-circuito calculada pelo programa computacional acoplado ao sistema acima.

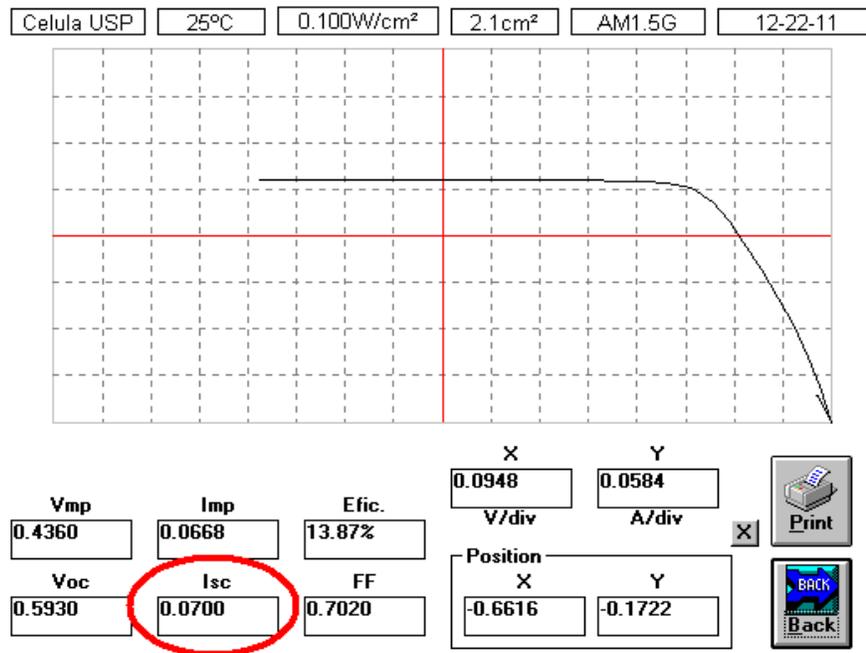


Figura 3.2 – Exemplo de uma corrente de curto-circuito calculada pelo sistema de medida de corrente por tensão.

O principal componente desse sistema é o Simulador Solar. Uma característica importante de um simulador solar é ter seu espectro semelhante ao espectro do Sol, seja ele AM0, AM1 ou AM1.5G. O espectro fora da atmosfera é denominado de AM0 e para as diferentes posições do Sol, em relação ao ângulo zênite, os espectros solares terrestres variam entre AM1, AM1.5 e AM2.

O simulador solar do laboratório é da *Oriel* de 1000 Watts modelo 81193 que é alimentado por uma fonte estabilizada e opera com uma lâmpada de descarga em gás de alta pressão de Xenônio de 1000W (Ver espectro da lâmpada na Figura 3.3).

O Simulador é composto por um refletor elipsoidal, dois espelhos à 45°, um integrador ótico, um obturador (*shutter*), um suporte para filtros e uma lente colimadora.

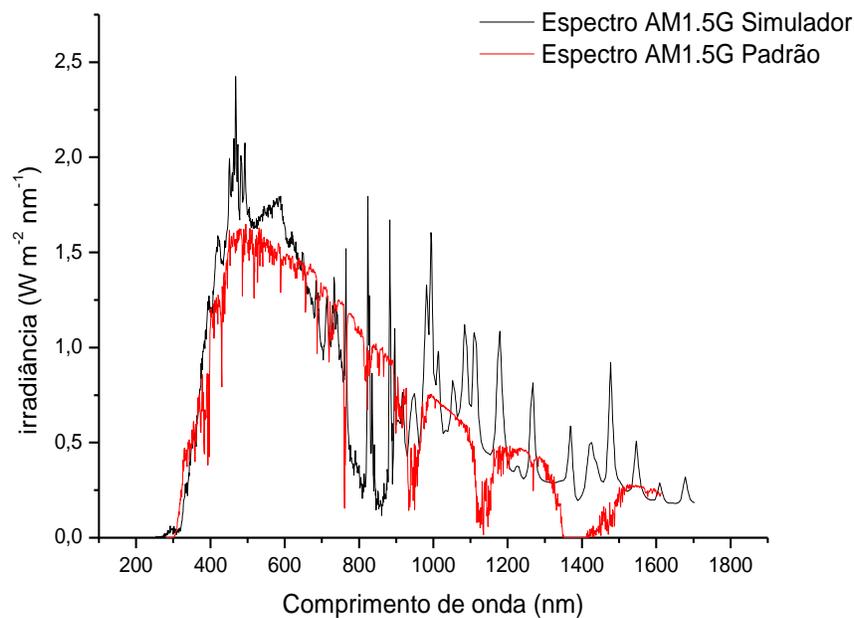


Figura 3.3 – Espectro da lâmpada de 1000W

A irradiância do simulador solar foi calibrada utilizando uma célula solar espacial padrão de referência. De acordo com a norma IEC 60904-9 e com os resultados das medidas realizadas no laboratório, o simulador solar do CELSOL está classificado como CBA para uma área de trabalho de 152 x 152 mm² e CAA para uma área de 76 x 76 mm².

4 SISTEMAS PARA CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL

A seguir, são apresentados os dois sistemas de caracterização espectral que foram montados e comparados para obter as curvas de resposta dos dispositivos apresentados no capítulo 2 deste trabalho.

4.1 Utilizando um monocromador

Basicamente é formado por uma fonte de luz, um sistema óptico composto por lentes e espelhos, um monocromador, um detector e um sistema de aquisição de dados que, no nosso caso, foi um multímetro da Agilent, modelo 34401A com resolução de 6½ dígitos e uma precisão de $\pm 0,0035\%$ DC e $\pm 0,06\%$ AC. A figura 4.1 esquematiza o sistema:

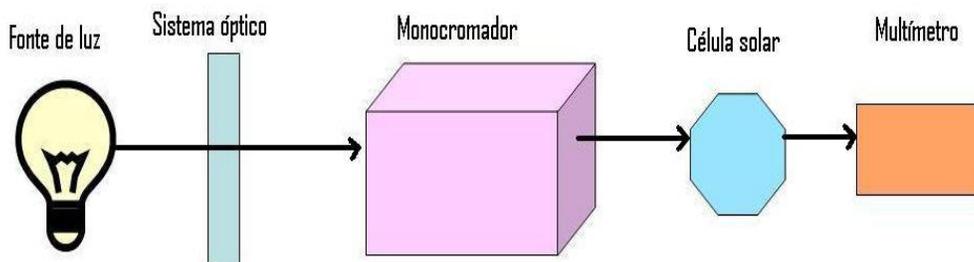


Figura 4.1 – Esquema da montagem do sistema de medição com monocromador.

O monocromador é um dispositivo que utiliza a difração para transmitir uma faixa estreita de comprimentos de ondas da luz incidente, mecanicamente selecionadas. E essa difração pode ocorrer através de prismas ou grades de difração.

A partir de um fotodiodo calibrado da Newport 70260, conseguimos medir os valores das potências de vários comprimentos de ondas, selecionados pelo monocromador, na mesma posição da célula solar. O monocromador utilizado no trabalho foi o modelo *Oriel 77200*. Possui uma distância focal de 250mm, uma grade de difração de 1200linhas/mm e reproduz comprimentos de onda de 200 a 1200nm. A fonte de radiação foi uma lâmpada halógena de tungstênio e quartzo de 250W de potência da *Newport*, modelo 6334NS. A lâmpada está instalada num *housing* da *Oriel*, modelo 6144-1 que possui um sistema próprio de ventilação para inibir um superaquecimento da lâmpada.

A seguir segue uma foto (Figura 4.2) do sistema com monocromador:

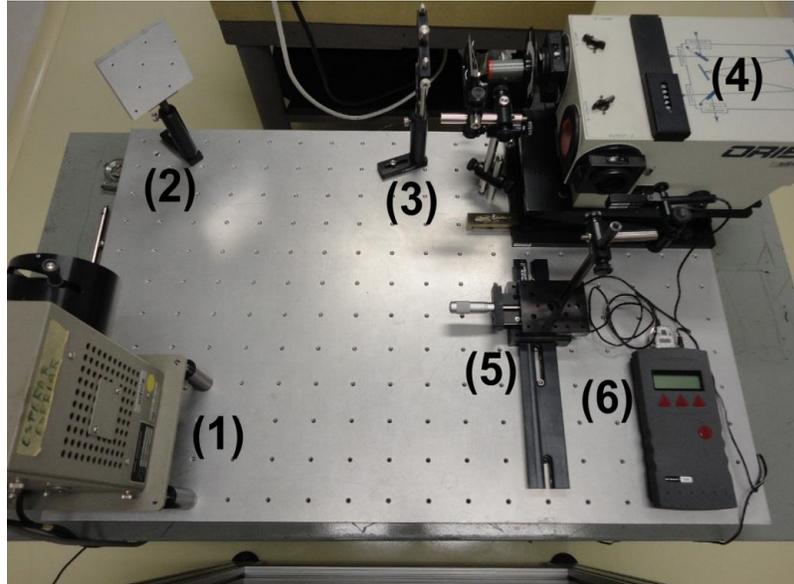


Figura 4.2 - Foto do sistema de medida de resposta espectral do CELSOL. (1) fonte de radiação; (2) espelho plano; (3) lente convergente; (4) monocromador; (5) suporte dos detectores; (6) espectrorradiômetro *Newport*.

A figura 4.3 mostra o espectro da lâmpada medido utilizando Espectrômetro modelo *GetSpec* USB-2048 que responde numa faixa espectral de 200 a 1100nm, possui resolução de 0,04 a 20nm e sensibilidade de 5000counts/ μ W por tempo de integração [ms] e um espectrômetro modelo *GetSpec* NIR128L-1.7TE, que responde numa faixa espectral de 900 a 1700nm e possui resolução nominal de 12,5nm;

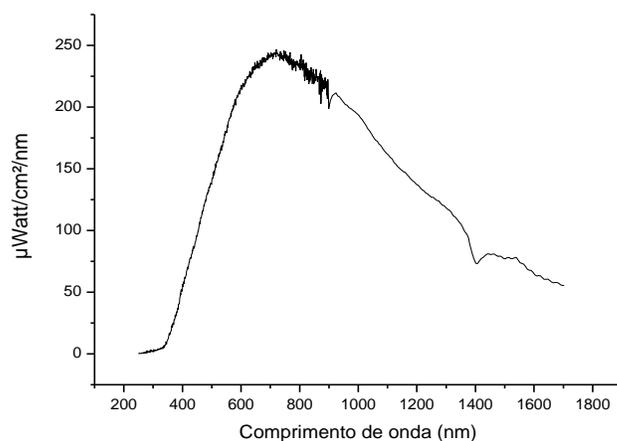


Figura 4.3 - Espectro da lâmpada do monocromador.

A figura 4.4 representa uma curva típica de potência de radiação na saída do monocromador.

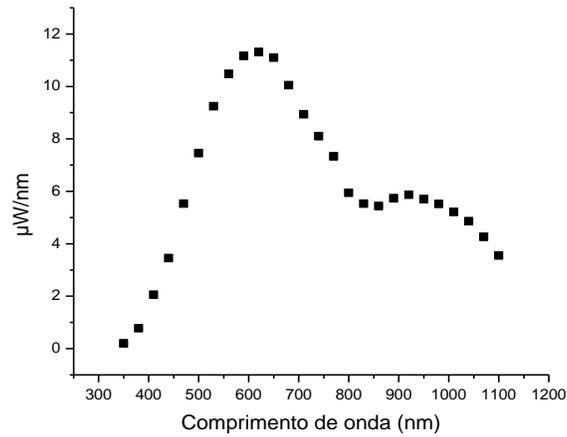


Figura 4.4 - Curva de potência de radiação na saída do monocromador.

4.2 Utilizando Filtros de Interferência

Composto por uma fonte de luz e filtros de interferência. Nesse sistema também alternamos entre a célula solar (para a medida da voltagem) e o fotodiodo (para a medida da potência).

A fonte de luz utilizada foi uma lâmpada halógena da Newport, modelo 6315 de 1000W/120V. Utilizando os GetSpec já citados, temos a seguir o espectro dessa lâmpada (Figura 4.5).

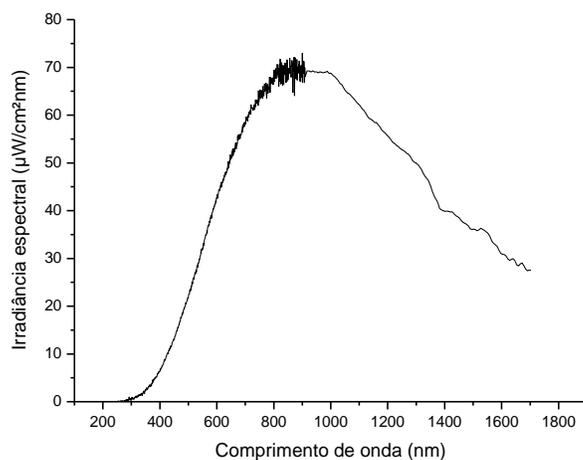


Figura 4.5 - Espectro da fonte de luz usando a lâmpada de 1000W.

Foram utilizados 20 filtros de 350 a 1100nm. A tabela 4.1 mostra as características mais comuns de cada.

Filtro	Valor teórico para o Filtro (nm)	Valor medido para o filtro (nm)	Largura a meia altura
Andover Corporation 350FS10-50	350,0	350,7	7,45
ORIEL 59280 #5	400,5	399,8	6,56
ORIEL 59280 #2	401,0	400,7	6,91
ORIEL 54311 #2	449,5	449,5	6,83
ORIEL 54311 #3	450,0	450,4	7,44
ORIEL 54341 #2	500,5	500,2	6,28
ORIEL 54341 #1	501,0	500,8	7,43
ORIEL 54371 #5	549,5	549,7	6,87
ORIEL 54371 #2	550,5	549,1	7,37
ORIEL 54401 #2	601,5	600,4	8,73
ORIEL 59430 #3	649,5	649,2	9,38

ORIEL 59430 #4	650,5	650,5	8,76
ORIEL 58460 #2	699,5	699,3	9,35
ORIEL 54471 D208-02	750,0	749,5	7,90
Andover Corporation 800FS10-50	800,0	802,5	8,20
Andover Corporation 850FS10-50	850,0	851,7	8,13
Andover Corporation 900FS10-50	900,0	900,4	8,08
Andover Corporation 950FS10-50	950,0	950,0	11,54
Andover Corporation 050FS10-50	1000,0	1000,1	11,85
Andover Corporation 110FS10-50	1100,0	1102,1	12,29

Tabela 4.1 - Características básicas dos filtros

O valor teórico simboliza o valor no qual o filtro é comercializado. O valor medido veio de gráficos de transmitância, onde foi traçada uma gaussiana (em vermelho na figura 4.6). Assim, conseguimos comparar os valores reais de pico com os teóricos. Veja o exemplo abaixo para o filtro de 550,5nm:

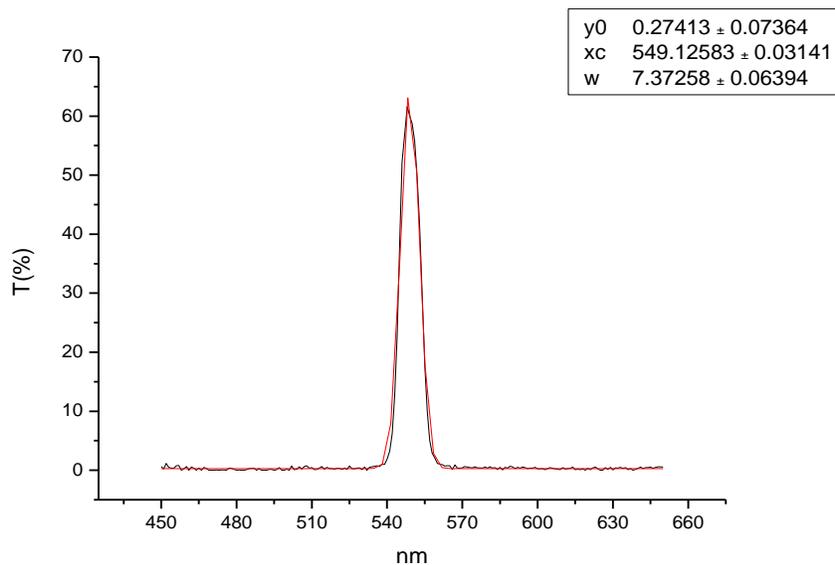


Figura 4.6 - Exemplo de gráfico de transmitância.

5 SISTEMA DE CARACTERIZAÇÃO DO SILÍCIO POROSO

Para a medida da luminescência do Silício Poroso foi necessário montar um outro sistema (figura 5.1). Este sistema consiste de uma fonte de luz com alta intensidade na região do ultravioleta (Figura 5.2 mostra seu espectro), ótica de entrada composta por íris, suporte para filtros de UV, uma lente convergente com $f=7\text{cm}$, suporte para o Silício Poroso, ótica de saída composta por lente convergente e filtro para o visível. A curva de fotoluminescência foi obtida com o espectrômetro GetSpec. Também utilizamos um pequeno ventilador para evitar o aquecimento dos filtros e consequentemente, danos causados pela forte intensidade da lâmpada.

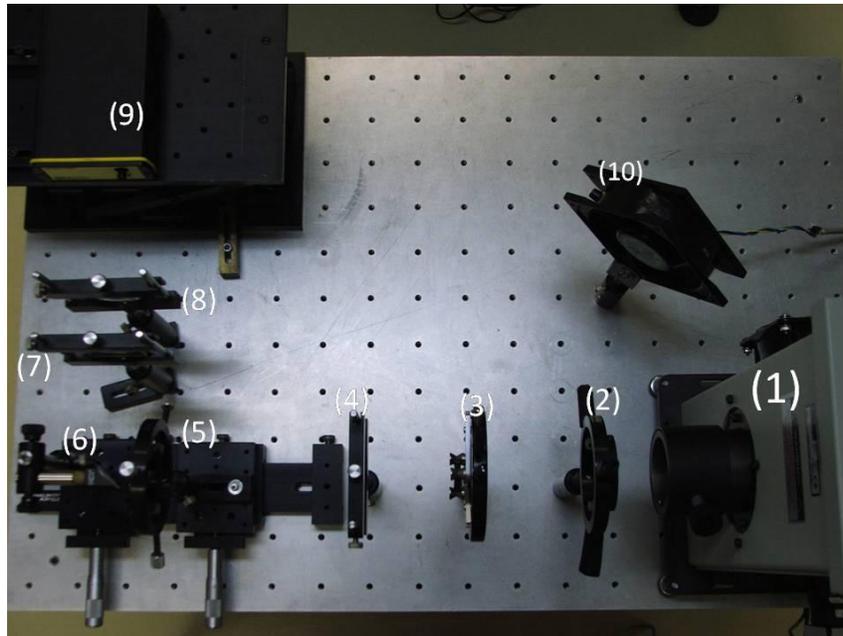


Figura 5.1 – Sistema para caracterização do Silício Poroso. (1) Fonte de luz, (2) Íris, (3) Suporte para filtros, (4) Lente convergente, (5) Íris, (6) Suporte para o SP, (7) Suporte para filtros, (8) Lente convergente, (9) GetSpec e (10) Ventilador.

A figura 5.2 mostra o espectro da lâmpada utilizada e o comprimento de onda que passa ao inserirmos os filtros de 370nm, 350nm, 330nm, 300nm e 280 nm.

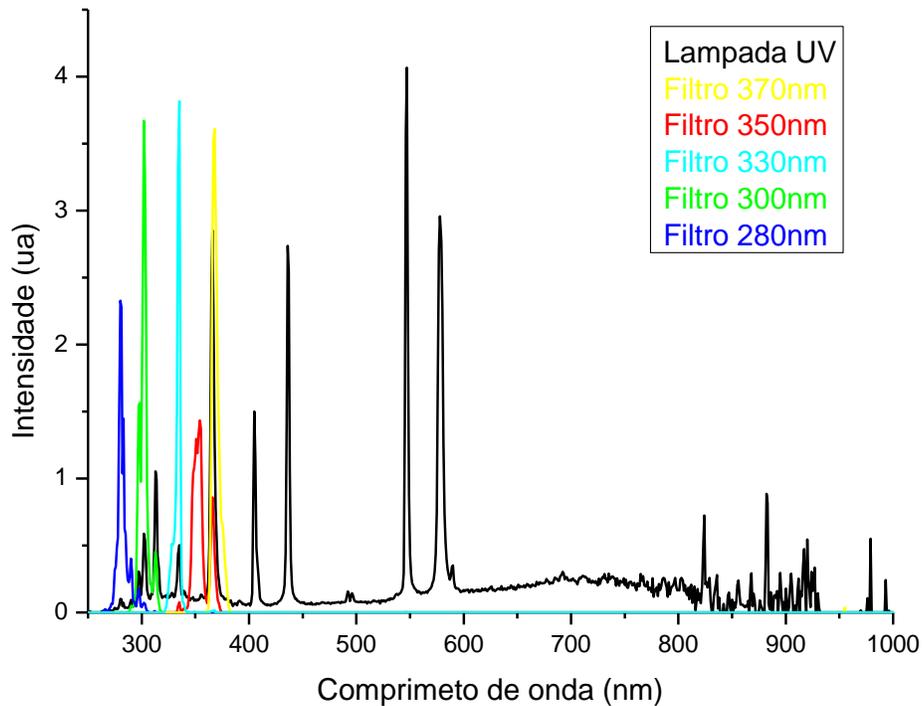


Figura 5.2 – Espectro da lâmpada sem e com diferentes filtros na região do ultravioleta.

6 RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS

Como já citado, a partir do espectro da lâmpada do Simulador Solar e das respostas espectrais em A/W dos sistemas a serem validados, conseguimos as correntes totais que o dispositivo (célula solar) deveria ter caso estivesse no Simulador. Isso é feito para cada um dos sistemas. Assim, quanto mais se aproxima a corrente total calculada de um sistema com a corrente de curto-circuito medida pelo Simulador, melhor a montagem. O tópico 6.1 apresenta os resultados para os sistemas com monocromador e filtros de interferência. O tópico 6.2, o resultado da luminescência de dois silícios porosos do laboratório.

6.1 Sistemas para caracterização de Células Solares e Radiômetros

Para a célula solar do LME/USP foram feitas cinco medidas usando o simulador solar e, obtivemos para a média da corrente de curto-circuito o valor de $(0,070 \pm 0,002)A$.

Com o sistema de caracterização espectral usando o monocromador, medimos os valores de voltagem na célula com um multímetro e a irradiância na saída do monocromador com um detector calibrado. Da primeira Lei de Ohm ($U = Ri$, onde U é voltagem em volts, R é a resistência em ohms e i a corrente em ampères) e conhecendo o valor da resistência de medida ($99,372\Omega$), conseguimos encontrar os valores das correntes. O próximo gráfico (figura 6.1) mostra uma curva típica da resposta espectral da célula solar medida com eixo y em A/W e o eixo x em nm:

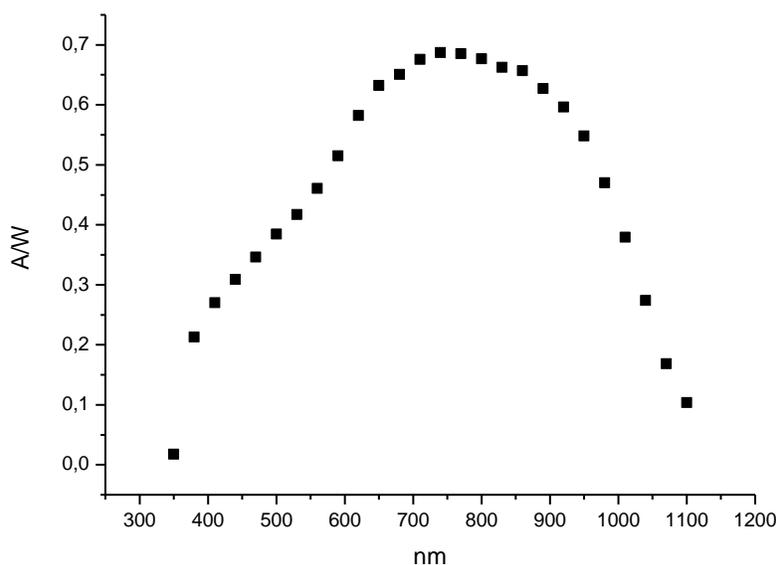


Figura 6.1 - Curva de resposta espectral da célula solar LME/USP.

Com os dados da resposta espectral da célula usando o monocromador e conhecendo o espectro do simulador solar, pudemos encontrar, a partir de uma integral, o valor de uma corrente total que foi de $(0,0788 \pm 0,0001)A$.

A mesma célula foi medida no sistema com filtros de interferência e, usando a mesma metodologia, obtivemos um valor de $(0,08 \pm 0,01)A$. A figura 6.2 mostra o gráfico da resposta espectral com filtros de interferência para esta célula.

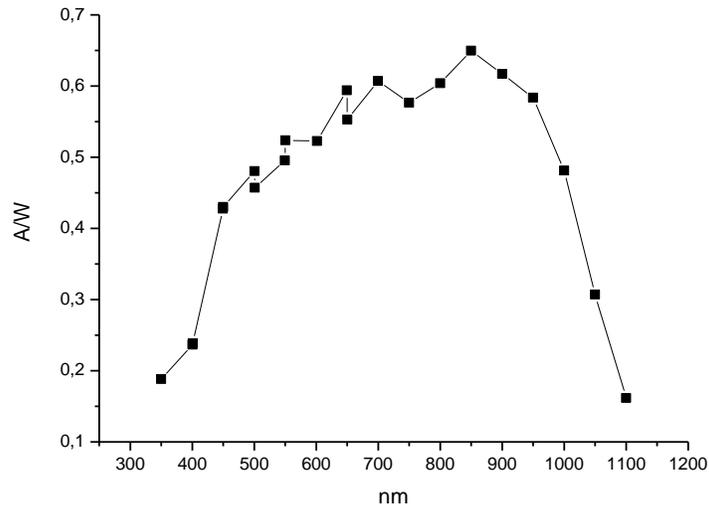


Figura 6.2 - Gráfico de A/W x nm, resposta espectral da célula LME/USP com filtros de interferência.

Do mesmo modo, medimos a célula solar Spectrolab no simulador. Obtivemos **(0,2756 ± 0,002)A** de corrente de curto-circuito.

O gráfico da figura 6.3 mostra a resposta espectral para essa célula medida na saída do monocromador.

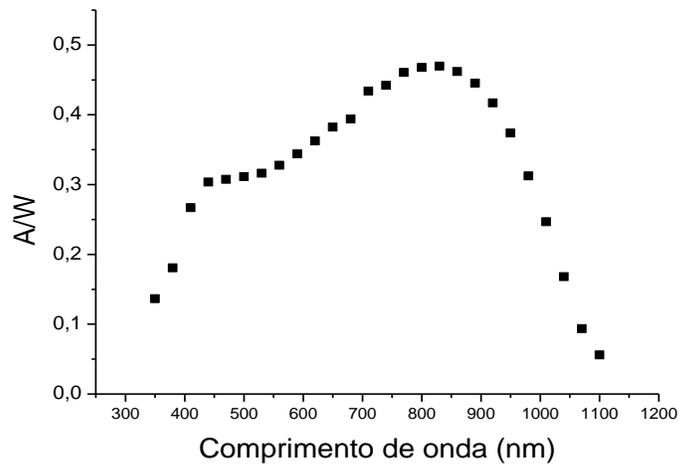


Figura 6.3 - Resposta espectral para a célula Spectrolab medida na saída do monocromador.

O valor da corrente máxima encontrado pelo monocromador foi de $(0,2098 \pm 0,0001)A$.

Do sistema com filtros de interferência obtivemos $(0,22 \pm 0,04)A$ para a corrente de curto-circuito. O gráfico abaixo (figura 6.4) se refere à resposta espectral para esta célula obtida com filtros de interferência.

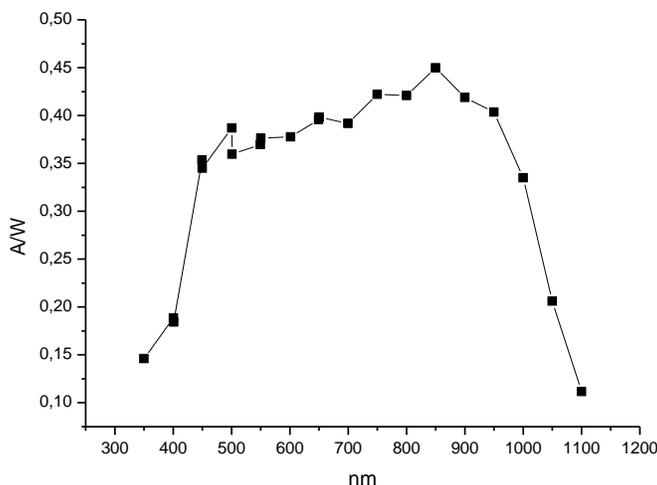


Figura 6.4 - Resposta espectral para a célula Spectrolab medida com filtros de interferência.

A tabela 6.1 abaixo resume os valores medidos para as duas células solares nos dois sistemas espectrais.

	Valor da corrente com Sistema de referência (Simulador Solar)	Valor da corrente com 1º Sistema (Monocromador)	Valor da corrente com 2º Sistema (Filtros)
Célula LME/USP	0,0700A	$(0,0788 \pm 0,0001)A$	$(0,08 \pm 0,01)A$
Célula Spectrolab	0,2756A	$(0,2098 \pm 0,0001)A$	$(0,22 \pm 0,04)A$

Tabela 6.1 – Resumo dos resultados obtidos.

As Fig. 6.5 e 6.6 mostram as curvas obtidas para dois radiômetros da Kipp&Zonen. Como não temos as curvas do fabricante para estes radiômetros, apenas podemos verificar que os

valores medidos são compatíveis com curvas típicas relativas esperadas para estes radiômetros.

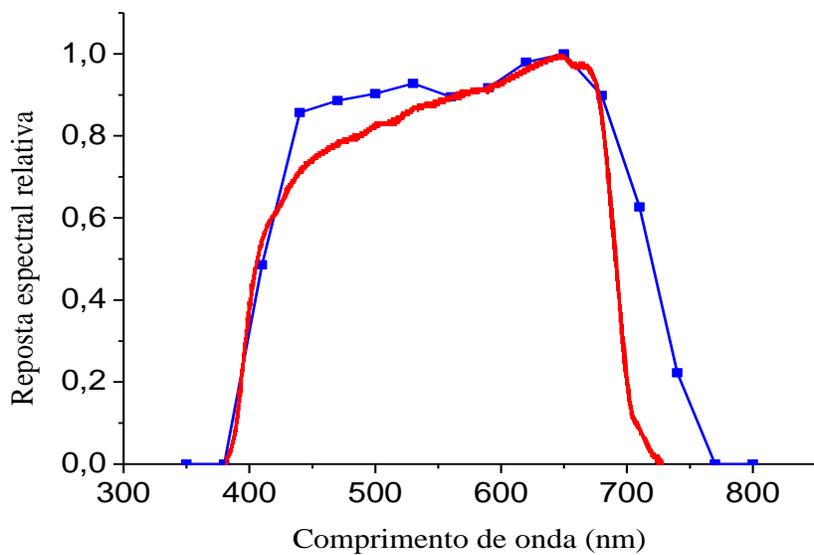


Figura 6.5 - Resposta espectral relativa do radiômetro Kipp&Zonen-PAR (vermelha) e resposta espectral medida (azul).

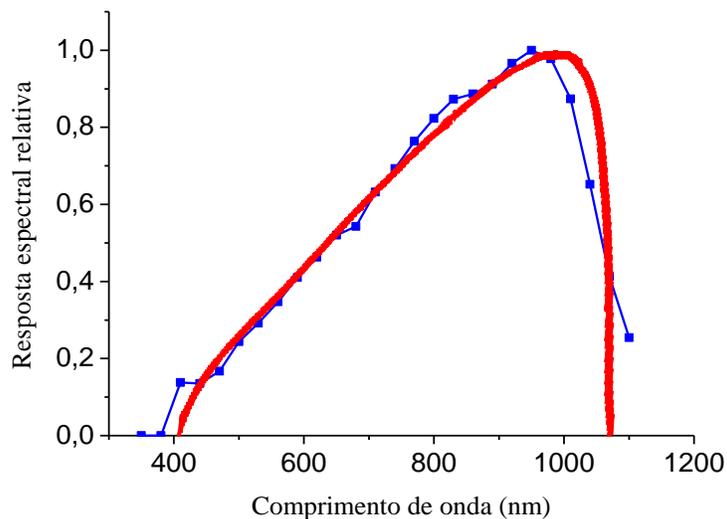


Figura 6.6- Resposta espectral relativa do radiômetro Kipp&Zonen-Global (vermelha) e resposta espectral medida (azul).

Na Fig. 6.7, temos a resposta espectral medida de um protótipo de radiômetro global desenvolvido no laboratório (curva preta) onde verificamos uma queda acentuada em relação à curva do sensor utilizado (curva vermelha) que provavelmente se deve à transmitância do difusor usado neste radiômetro (curva azul).

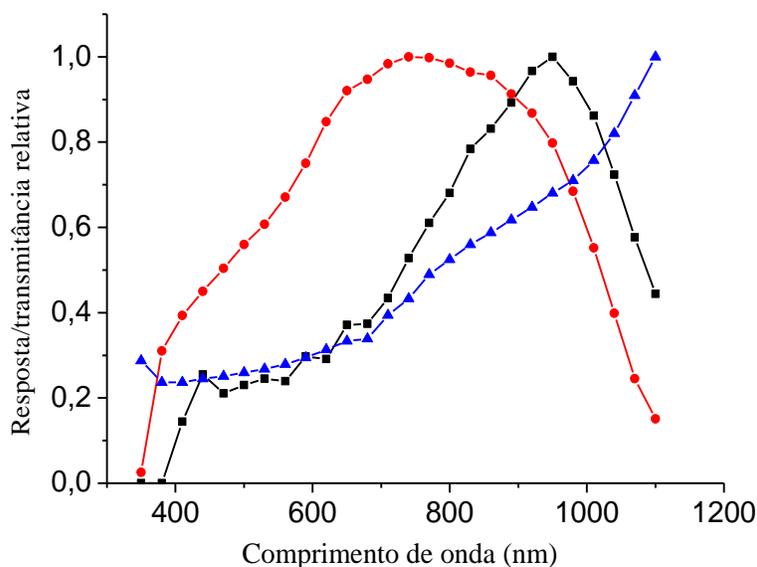


Figura 6.7- Resposta espectral relativa de um radiômetro protótipo (preta) em conjunto com resposta do sensor (vermelha) e transmitância do difusor de teflon (curva azul).

Quando comparados com a corrente determinada através das curvas corrente-tensão e das especificações fornecidas pelos fabricantes, os resultados obtidos mostram que o sistema de caracterização espectral permite uma avaliação precisa da resposta das células solares e radiômetros. Isso permite que o sistema de medidas possa ser utilizado em processos de fabricação de células solares e sensores de silício, indicando se alterações nesses processos provocam modificações nos valores de resposta espectral e desempenho dos dispositivos.

6.2 Sistemas para caracterização de Silício Poroso

O gráfico da figura 6.8 mostra as curvas de fotoluminescência para o SP I em função do comprimento de onda no UV incidente.

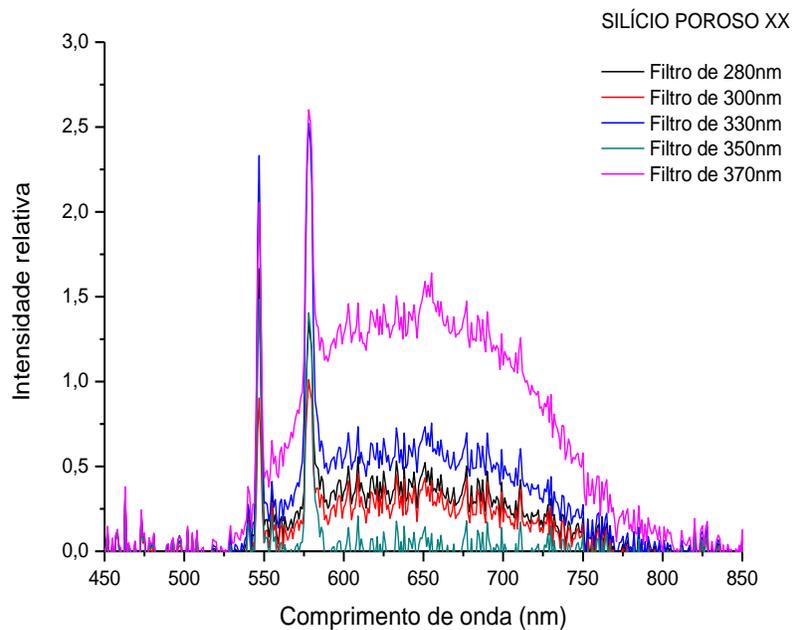


Figura 6.8 – Gráfico de intensidade relativa do SP I.

O gráfico da figura 6.9 também apresenta a luminescência para o SP II em função dos filtros.

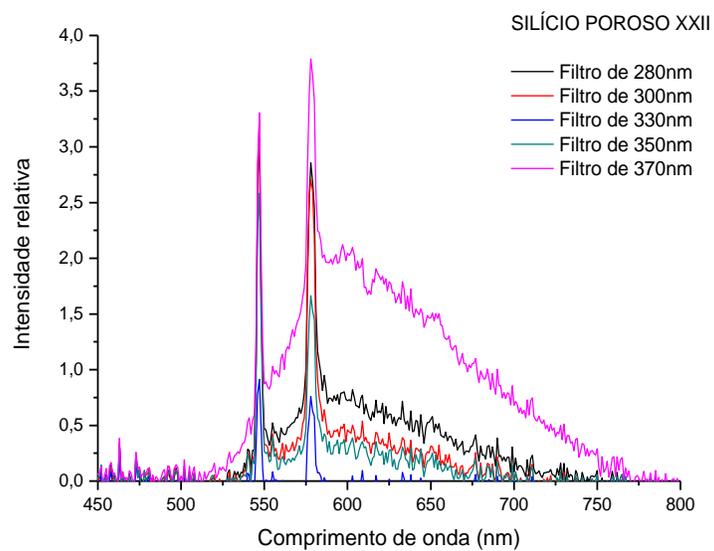


Figura 6.9 – Gráfico de intensidade relativa do SP II.

7 CONCLUSÕES

Com equipamentos disponíveis no laboratório foi possível implementar um sistema manual de caracterização espectral de dispositivos fotovoltaicos que permite caracterizar sensores e dispositivos na faixa espectral entre 300 nm e 1100 nm. Através das curvas de resposta espectral de algumas células solares e radiômetros foram calculadas as correntes de curto-circuito e comparadas com os valores medidos utilizando o simulador solar, obtendo resultados compatíveis. Também houve concordância dos resultados quando comparados com as respostas relativas fornecidas pelos fabricantes. Como proposta de aprimoramento do sistema, poderiam ser utilizadas duas fontes de radiação para cobrir por completo o intervalo de interesse na caracterização dos dispositivos: uma lâmpada de deutério que apresenta emissão na região UV e uma segunda fonte de filamento com emissão na região do visível e do infravermelho. Além disso, o monocromador deverá comportar até quatro redes de difração cobrindo o espectro desde o UV até o IR. O sistema poderá ser controlado por um microcomputador com um programa dedicado para aquisição e análise dos dados. Para a caracterização de células de tripla junção, o sistema deverá permitir a introdução de uma fonte de radiação de polarização.

Sobre o sistema de caracterização de Silício Poroso, talvez seja melhor investir em novos filtros de interferência que deixem passar comprimentos de onda de acordo com os picos da lâmpada utilizada. Também seria interessante calibrar o Getspec para obter valores absolutos e utilizar uma esfera integradora para medir a luminescência total.

8 REFERÊNCIAS

H. Field; UV-VIS-IR Spectral Responsivity Measurement System for Solar Cells; National Renewable Energy Laboratory, NREL/CP-520-25654, 1998.

L. Philippe Boivin, Wolfgang Budde, C. X. Dodd and S. R. Das; Spectral response measurement apparatus for large area solar cells; Applied Optics, vol. 25, No 16, 1986.

S. Silvestre, L. Sentís and L. Castaner; A Fast Low-Cost Solar Cell Spectral Response Measurement System with Accuracy Indicator; IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 48, No 5, October 1999.

T. F. Paes; Sistemas de Caracterização de Elementos Sensores para Radiômetros Fotovoltaicos; dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/LAS, Fevereiro/2012.

Cássio Araújo do Nascimento ; Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica; Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Pós-Graduação *Lato-Sensu* em Fontes alternativas de energia, para a obtenção do título de especialização.

Waldeir Amaral Vilela; Estudo, Desenvolvimento e Caracterização de Radiômetros para medidas da Radiação Solar; tese de doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/LAS, 2010.

Antonio Fernando Beloto; Estudos das características de células solares de silício monocristalino; dissertação de mestrado, Instituto de Física e Química de São Carlos - USP, 1983.

Gerson dos Santos; Aplicações de Silício Poroso em sensores de gás; dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo – USP, 2003.

<http://sim.lme.usp.br/linhas/materiais/poroso/sp.html>