



PUCRS

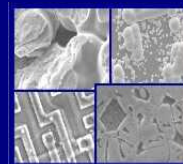
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia

Faculdade de Física

Faculdade de Química



PGETEMA

DESENVOLVIMENTO E CLASSIFICAÇÃO DE UM RADIÔMETRO SOLAR MULTIFUNCIONAL

JOÃO ANTÔNIO VARGAS DE SOUZA

MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAS

**TESE PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Porto Alegre

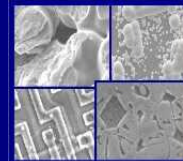
Novembro, 2010



PUCRS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia
Faculdade de Física
Faculdade de Química



PGETEMA

DESENVOLVIMENTO E CLASSIFICAÇÃO DE UM RADIÔMETRO SOLAR MULTIFUNCIONAL

JOÃO ANTÔNIO VARGAS DE SOUZA

MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

ORIENTADORA (principal): PROF. DRA. MARA REGINA RIZZATTI

(março de 2007 – maio de 2009)

ORIENTADORA SUBSTITUTA: PROF. DRA. ELEANI MARIA DA COSTA

(junho de 2009 – novembro de 2010)

Trabalho realizado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

Trabalho vinculado ao projeto "Dispositivo Orgânico Optoeletrônico", convênio 1442/05 ASBRATER/PUCRS/LC/FINEP.

**Porto Alegre
Novembro, 2010**

A luz... é a sombra de Deus...
(*Albert Einstein*)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais João Orestes Lino de Souza e Eliana Hildegardes Vargas de Souza pelos exemplos que têm me dado de dignidade e perseverança.

A minha orientadora Dra Mara Regina Rizzatti, a minha co-orientadora Eleani Maria da Costa e às pessoas que sempre acreditaram em mim.

A minha família e aos meus amigos, pela compreensão, paciência e apoio em todos os momentos desta longa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho, em especial:

- à Prof^a Dr. Mara R. Rizzatti, pela orientação, dedicação e ensinamentos;
- aos integrantes do Grupo de Física das Radiações;
- aos colegas e professores do PGETEMA;
- aos colegas do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Física;
- ao Laboratório de Análise de Materiais da Faculdade de Engenharia da PUCRS;
- ao apoio financeiro da CAPES, FINEP, ASBRATER e LC;
- e à minha família e aos meus amigos, pela compreensão, paciência e apoio em todos os momentos.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	4
AGRADECIMENTOS	5
SUMÁRIO	6
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE SÍMBOLOS	11
RESUMO.....	13
ABSTRACT	14
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Justificativa.....	18
2. OBJETIVOS.....	21
2.1. Objetivos Específicos	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1. Sensores de Radiação.....	22
3.2. Padrão Internacional para Radiômetros	24
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1. Projeto do Radiômetro Multifuncional Proposto.....	28
4.1.1. Sensor	29
4.1.2. Janela de Ótica.....	29
4.1.3. Porta Sensor	29
4.2. Automação do Sistema de Medição	30
4.3. Classificação do Radiômetro	32
4.3.1. Não-Linearidade	33
4.3.2. Resposta à Inclinação ou Cosseno	34
4.3.3. Resposta à Temperatura	35
4.3.4. Seletividade Espectral dos Sensores do Protótipo e do LI-COR.....	36
4.4. Eficiência do protótipo proposto	36
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1. Arquitetura do Radiômetro Multifuncional.....	37

5.1.1. Sensores	37
5.1.2. Janela Ótica	38
5.1.3. Porta Sensor	38
5.2. Automação do Sistema de Medição	40
5.2.1. Aquisição de Dados	40
5.2.2. Calibração	42
5.3. Classificação	46
5.3.1. Não-Linearidade	46
5.3.2. Resposta à Inclinação ou Cosseno	47
5.3.3. Resposta à Temperatura	49
5.3.4. Seletividade Espectral dos Sensores do Protótipo e do LI-COR.....	51
5.4. Eficiência do Protótipo Proposto.....	52
6. DISCUSSÃO	55
7. CONCLUSÃO.....	57
8. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	60
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Espectro Solar Externo a Atmosfera e na Superfície Terrestre. (Diffey, 1982).....	18
Figura 3.1- Resposta Característica dos Sensores de Silício (Newport, 2009).....	24
Figura 4.1 – Secção de Corte da Proposta Radiômetro Multifuncional.....	28
Figura 4.2 – Radiômetro Comercial (LI-COR 2009).....	33
Figura 4.3 – Exemplo de como determinar a não-linearidade do radiômetro (Freire, 2008).....	34
Figura 4.4 – Posição do radiômetro para determinação da resposta à inclinação (Freire, 2008).....	35
Figura 5.1 – Espectro de Absorbância da Janela Ótica - Barreira de proteção e Espectro Solar.....	38
Figura 5.2 – Vista Lateral do Porta Amostra	39
Figura 5.3 – Vista Superior do Porta Amostra.....	39
Figura 5.4 – Vista Inferior do Porta Amostra	39
Figura 5.5 – Vista Inferior com Tampa de Inspeção do Porta Amostra	39
Figura 5.6 – Perfil Externo do Radiômetro.	40
Figura 5.7 – Esquema dos componentes eletrônicos do radiômetro	40
Figura 5.8 – Esquema Eletrônico do Sistema de Aquisição de Dados	41
Figura 5.9 – Diagrama da Informação do Sistema Automatizado de Medição.	41
Figura 5.10 – Fotografia do Radiômetro, Placa de Aquisição de Dados e Acessórios.....	42
Figura 5.11 – Irradiância Solar Global versus Tensão	43
Figura 5.12 – Irradiância Solar Ultravioleta versus Tensão.....	43

Figura 5.13 – Irradiância Solar Visível versus Tensão	43
Figura 5.14 – Irradiância Solar Infravermelha versus Tensão.....	43
Figura 5.15 – Irradiância Solar Ultravioleta – A versus Tensão	44
Figura 5.16 – Irradiância Solar Ultravioleta – B versus Tensão	44
Figura 5.17 – Índice Ultravioleta versus Tensão	44
Figura 5.18 – Irradiância Ultravioleta versus Tensão	45
Figura 5.19 – Irradiância Visível versus Tensão	45
Figura 5.20 – Irradiância Infravermelha versus Tensão	45
Figura 5.21 – Índice Ultravioleta versus Tensão	45
Figura 5.22 – Diagrama mostrando a verificação da resposta cosseno do radiômetro espectral.....	47
Figura 5.23 – Gráfico da Resposta Cosseno versus ângulo em graus.	49
Figura 5.24 – Gráfico da Tensão normalizada do sensor versus temperatura do sensor fora da estrutura do radiômetro.....	50
Figura 5.25 – Curvas dos Sensores Protótipo e LI-COR	51
Figura 5.26 – Irradiância global medida pelo Protótipo e pelo Padrão.....	52
Figura 5.27 – Irradiância da componente ultravioleta medida pelo Protótipo.	52
Figura 5.28 – Irradiância da componente visível medida pelo Protótipo e pelo Padrão.....	53
Figura 5.29 – Irradiância da componente infravermelha medida pelo Protótipo e pelo Padrão.....	53
Figura 5.30 – Irradiância da componente UV-B medida pelo Protótipo e pelo Padrão.....	53
Figura 5.31 – Irradiância da componente UV-A medida pelo Protótipo e pelo Padrão.....	53
Figura 5.32 – Índice UV medido pelo Protótipo e pelo Padrão.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Sensores <i>versus</i> Características técnicas.....	37
Tabela 5.2 – Resposta Cosseno do Radiômetro Proposto.....	48
Tabela 5.3 – Resposta Cosseno do Radiômetro LI-COR.....	48
Tabela 5.4 – Análise das variações da Resposta do Detector com a Temperatura.....	50
Tabela 5.5 – Análise do desvio relativo e intervalo de confiabilidade do Radiômetro proposto.....	54
Tabela 6.1 – Classificação por especificação da norma ISO 9060:1990.....	58

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área	m^2
ADC	Conversor Analógico Digital	---
CFC	Clorofluorcarbono	---
$\text{Cos } \theta$	Cosseno θ	---
D	Distância	M
DNA	Ácido Desoxirribonucléico	---
E	Irradiância Espectral	$Wm^{-2}nm^{-1}$
GFR	Grupo de Física das Radiações	---
I	Corrente	A
I	Irradiância	Wm^{-2}
I_0	Intensidade Inicial	Contagens
I_f	Intensidade Final	Contagens
ICNIRP	Comissão Internacional de Proteção contra as Radiações Não-Ionizantes.	---
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional	---
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial	---
IR	Infravermelho	---
ISO	Organização Internacional para Padronização	---
I-UV	Índice Ultravioleta	$hJ*m^{-2}$
K_{er}	Constante do I-UV	hs
NBR	Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas	---
NIST	Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia	---
OIML	Organização Internacional de Metrologia Legal	---
P	Potência	W
REBLAS	Rede Brasileira de Laboratórios Analíticos em Saúde	---
S_{er}	Espectro de Ação Eritemático	---
S_1	Desvio absoluto para esquerda	mV
S_2	Desvio absoluto para direita	mV
S_m	Desvio médio do valor absoluto	mV
T	Tempo	h

T	Temperatura	°C
UNEP	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente	---
UV	Ultravioleta	---
UV-A	Ultravioleta – A	---
UV-B	Ultravioleta – B	---
V	Tensão	V
V ₁	Tensão mínima	V
V ₂	Tensão máxima	V
VIM	Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia	---
Vis	Visível	---
WHO	Organização Mundial da Saúde	---
WMO	Organização Mundial de Meteorologia	---
λ	Comprimento de Onda	nm

RESUMO

SOUZA, JOÃO ANTÔNIO VARGAS DE. ***Desenvolvimento e classificação de um radiômetro solar multifuncional.*** Porto Alegre. 2010. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Esse trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo portátil de um instrumento de medição da irradiância solar com parâmetros comparáveis aos radiômetros solares e instrumentos similares. Para tanto a metodologia empregada seguiu a NBR ISO/IEC 17025:2005. O radiômetro proposto tem como inovação tecnológica a determinação não só da radiação global e difusa, medidas nos equipamentos comerciais, mas também determinar os níveis de radiação Ultravioleta, Visível, Infravermelha e Índice UV solar. Portanto, o radiômetro proposto poderá substituir um conjunto completo de radiômetros. Os ensaios de classificação do radiômetro proposto, segundo a ISO 9060:1990, apresentaram o tempo de resposta do sensor à variação da intensidade de radiação inferior a 15 segundos, a não necessidade de compensação do zero e o desvio percentual de 1,1% na Não-linearidade para uma irradiância de 500Wm^{-2} . Adicionalmente, quanto a resposta à temperatura, foram registradas variações do desvio padrão percentual na irradiância inferior a 1% para variações de 50°K na temperatura. A resposta à inclinação do protótipo foi adequada de -80° à 80° , com erro inferior a 2,5% e a resposta direcional do radiômetro apresentou um erro máximo da resposta superior menor que 10%. O radiômetro desenvolvido apresenta seletividade espectral na região do Ultravioleta, Visível e no Infravermelho próximo. Esses ensaios classificam o radiômetro multifuncional proposto como de 1ª Classe para as regiões do Ultravioleta e Visível, sendo de 2ª Classe para a região do Infravermelho.

Palavras-Chaves: Radiação, Solar, Irradiância, Radiômetro, Calibração.

ABSTRACT

SOUZA, JOÃO ANTÔNIO VARGAS DE. ***Development and classification of multi-functional solar radiometer*** . Porto Alegre. 2010. Doctor thesis. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

This study aims to develop a prototype of a portable instrument for measuring the solar irradiance with parameters comparable to solar radiometers and similar instruments. The methodology applied in this work uses the NBR ISO/IEC 17025:2005 and ISO 9060:1990. The proposed radiometer has technological innovation, it does not only measure the global and diffuse radiation as measured in commercial equipment, but it measures the levels of Ultraviolet, Visible, Infrared radiation and UV Index. Therefore, the proposed radiometer will substitute a complete set of radiometers. The result obtained is described as follows: the step response time is below 15 seconds; the system doesn't need adjustment of the zero; in relation to the influence of temperature, variation (percent of standard deviation) in irradiance measured by the prototype is below 1% for variations of 50°K; the incidence angle response of the prototype is adequate for -80° to 80° (deviations lower than 2,5 %); the incidence directional response of the radiometer has an error in the order of 10 % and the radiometer developed has an adequate spectral response in Ultraviolet, Visible, Infrared. These tests classify the multi-functional radiometer as 1st Class for regions of Ultraviolet and Visible and of 2nd Class for Infrared region.

Key-words: Radiation, Solar, Irradiance, Radiometer, Calibration.

1. INTRODUÇÃO

A determinação da distribuição espacial e temporal da radiação solar incidente na superfície terrestre, com comprimentos de onda de 280 nm a 3000 nm, têm sido objeto de pesquisa desde o trabalho pioneiro de Anders Jonas Angström (1956). Nas últimas décadas, surgiram modelos físicos de cálculo da transmitância atmosférica, bem como, teorias para explicar o papel da modulação da cobertura de nuvens sobre a distribuição da radiação solar, baseados em informações digitais de imagens da Reflexão da Radiação Solar na Terra (Arai e Moraes, 1990). Estas informações são obtidas na região visível por meio de instrumento destinado à medição da energia radiante solar, ou de outra fonte qualquer, instalados em satélites geoestacionários, denominados radiômetros. O conhecimento desse recurso tem grande importância para viabilizar projetos de sistemas de monitoramento ambiental e de geração energética (células solares) entre outros, como também para o acompanhamento e avaliação do funcionamento desses sistemas (Blonquist 2009; Michalsky, 2009; Mukaro, 1998).

Os instrumentos recomendados pelo comitê científico da Organização Mundial de Meteorologia (WMO- *World Meteorology Organization*), para validação de modelos físicos de cálculo da radiação solar incidente na superfície, são os radiômetros com classificação mínima de segunda classe para medição da radiação global e difusa, e o pireliômetro para medição da radiação direta (Kratzenberg, 2003).

Os radiômetros utilizados para estas medições são classificados em dois tipos quanto à sua construção: radiômetros térmicos (a base de termopares) e radiômetros fotovoltaicos (a base de semicondutores), e apresentam segundo a ISO

9060: 1990 a seguinte classificação quanto à exatidão: padrão secundário, 1^a classe e 2^a classe.

Os radiômetros térmicos são mais exatos, apresentando variação na não-linearidade entre 0,5% e 3%. Estes possuem um espectro amplo para detecção, na região de 300 nm a 4000 nm aproximadamente. Entretanto, possuem alta inércia quanto à resposta do equipamento e seu custo é maior que o radiômetro fotovoltaico (Durak, 2005).

Os radiômetros fotovoltaicos apresentam erro máximo absoluto na não-linearidade de 5%, aproximadamente, além de operarem em um espectro mais limitado. Contudo, tais instrumentos são capazes de fornecer tensão de saída elétrica elevada (uma ordem de grandeza superior aos sensores térmicos). Sua resposta quase instantânea faz com que esses instrumentos sejam particularmente úteis para aplicações de monitoramento ambiental, por exemplo, para detecções de rápidas flutuações na radiação solar e no desenvolvimento de redes de monitoramento dos níveis da irradiância solar, ou do índice ultravioleta (Grossi, 2002). Esses instrumentos são também bastante úteis para a avaliação da eficiência de sistemas de geração fotovoltaica.

Em decorrência da desativação, em 1978, das poucas estações Solarimétricas instaladas pelo governo federal no país (Kratzenberg, 2003), as medidas de irradiância solar são atualmente obtidas principalmente, em estações meteorológicas de laboratórios de pesquisa, como o Laboratório de Irradiância e Radiometria do Grupo de Física das Radiações – GFR da PUCRS. Neste laboratório encontra-se em desenvolvimento um projeto denominado Medição Automatizada da Irradiância Solar, **M.A.I.S.**. Cabe ao presente trabalho desenvolver a segunda etapa deste projeto e validar um radiômetro de pequeno porte para medição concomitante das componentes Ultravioleta, Visível e Infravermelha da radiação solar e do Índice UV.

O desenvolvimento de um radiômetro multifuncional compacto, de baixo custo, utilizando um sensor à base de semicondutor disponível no mercado nacional é o objeto desta pesquisa. Esse radiômetro apresenta como inovação tecnológica, a determinação não só da radiação global e difusa, mensuradas nos equipamentos

comerciais convencionais, mas também, dos níveis de radiação Ultravioleta, Visível, Infravermelha e Índice UV solar. Além disso, o radiômetro proposto pode substituir um conjunto completo de radiômetros, composto pelos radiômetros de irradiância Global, Infravermelha, Visível, Ultravioleta e suas componentes A e B e ,ainda, um Biômetro Solar para a medida do Índice UV.

As técnicas e métodos para calibração desse dispositivo são descritos neste trabalho, as quais estão baseadas em normas internacionais, gerando conhecimento científico na área de solarimetria para o país. Neste contexto, o presente trabalho poderá desempenhar um importante papel para restabelecer no país a credibilidade em relação ao monitoramento da radiação solar, sobretudo nas últimas décadas (Kratzenberg, 2003). O desenvolvimento de instrumentos, produzidos nacionalmente, com rastreabilidade de referência radiométrica internacional é indispensável para assegurar um bom padrão de qualidade para os sistemas de solarimetria para as estações de superfície, tendo como objetivo principal o fornecimento de dados de radiação solar para a comunidade científica de ciências atmosféricas, ambientais e da engenharia de energia solar.

7. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um radiômetro multifuncional de pequeno porte, portátil, para medição da irradiância solar global e difusa, como também, as radiações Ultravioleta, Visível, Infravermelha e Índice UV solar, sendo estas as inovações tecnológicas iniciais deste trabalho.

Os ensaios de classificação do radiômetro desenvolvido, segundo a norma ISO 9060:1990, apresentaram os seguintes resultados:

1. **Tempo de Resposta:** o sensor tem a capacidade de medir variação da intensidade de radiação em intervalos de cerca de 30 μ s. Logo, para esse requisito o equipamento desenvolvido se **classifica como radiômetro Padrão Secundário**.
2. **Compensação do ponto zero:** o sistema atende este critério, pois o sinal produzido exige a incidência de luz, não apresentando variações noturnas devido às trocas de calor radiante entre a superfície receptora (sensor) e a abóbada celeste mais fria, sendo **classificado como radiômetro Padrão Secundário** para esse item.
3. **Não-Linearidade:** o radiômetro descreve um desvio percentual de 1,1% para uma Irradiância de 500 Wm^{-2} , sendo assim, **classificado como 1ª Classe** nesse requisito.
4. **Resposta à Temperatura:** A variação da foto-corrente gerada pelo dispositivo no interior da estrutura do radiômetro, praticamente, não varia em função da temperatura, apresentando uma acurácia no sinal inferior a 2%, sendo assim, **classificado como radiômetro Padrão Secundário** neste requisito.

5. **Resposta ao Cosseno:** O radiômetro desenvolvido neste trabalho apresentou uma acurácia de 2,5%, sendo assim, **classificado como radiômetro de 1ª Classe.**
6. **Resposta Direcional:** apresentou uma acurácia inferior 10 %, sendo assim, o radiômetro desenvolvido **classificado como Padrão Secundário** para este item.
7. **Seletividade Espectral:** O sensor do radiômetro multifuncional não fornece uma resposta espectral que contemple todo o espectro solar como requerida para a classificação ISO 9060. Entretanto, de acordo com Grossi (2002), os radiômetros com esta característica na resposta espectral **podem ser classificados como 2ª classe.** Também, o radiômetro proposto pode ser classificado pela região espectral de emprego, sendo assim, classificado como de **Padrão Secundário para a região do UV-B, UV-A e Visível e de 2ª classe para a região do Infravermelho segundo a ISO 9060.**

A Tabela 7.1 apresenta, de forma resumida, a classificação do radiômetro multifuncional desenvolvido pelas especificações da norma ISO 9060:1990.

Tabela 7.1 – Classificação por especificação da norma ISO 9060:1990

Ensaio	Padrão Secundário	1ª Classe	2ª Classe
Tempo de Resposta	X		
Compensação do ponto zero	X		
Não-Linearidade		X	
Resposta à Temperatura	X		
Resposta ao Cosseno		X	
Resposta Direcional	X		
Seletividade Espectral	X*		X**

* Para o UV e Vis ** Para o IR

Para a completa caracterização do protótipo desenvolvido seria ainda necessário realizar ensaio de não-estabilidade, sendo que este encontra-se em andamento. A análise dos dados obtidos neste ensaio, apenas avaliaria a periodicidade de calibração do equipamento desenvolvido, assim não alterando a

classificação do mesmo. Porém, se considerado apenas os resultados dos ensaios já executados pode-se classificar o radiômetro desenvolvido como de **1ª Classe** para as regiões do **Ultravioleta e Visível** e de **2ª Classe** para a região do **Infravermelho** de acordo com a norma **ISO 9060:1990**.

O radiômetro desenvolvido apresenta eficiência e parâmetros comparáveis aos radiômetros solares e instrumentos similares. Isso se deve à arquitetura desenvolvida e a metodologia baseada na norma internacional ISO 9060:1990 que estabelece critérios para radiômetros e na NBR ISO/IEC 17025:2005 que assegura comparabilidade metrológica das medições do equipamento desenvolvido.

Em conclusão, desenvolveu-se e calibrou-se um radiômetro multifuncional para medição da radiação Ultravioleta, Visível e Infravermelha da radiação solar e o Índice UV, com a redução da dimensão desta estação móvel.

Logo, o objetivo deste trabalho definido na segunda etapa do projeto integrado Medição Automatizada da Irradiância Solar, **M.A.I.S.**, foi alcançado.

Pretende-se que o radiômetro multifuncional desenvolvido, integrado a uma rede de estações solarimétrica, venha a contribuir, em futuro próximo, para oferecer uma base confiável de dados qualificados, beneficiando as ciências atmosféricas, ambientais e das energias renováveis no Brasil.