

## Dispositivo calibrador de fotosensores automatizado

*Automatized Photosensor Calibrator Device*

Ivana Mara Gomes Andersen Cavalcanti\*

*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF - Rua Dr. Xavier Sigaud,  
150 - Urca, Rio de Janeiro - RJ - Brasil, CEP - 22290-180*

Thierry Jacques Lemaire†

*Universidade Federal da Bahia - UFBA - Instituto de Física,  
Campus Universitário de Ondina - Salvador - BA - Brasil, CEP: 40210-340*

Juan Alberto Leyva Cruz‡

*Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFs - Avenida Transnordestina s/n - Novo Horizonte,  
Feira de Santana - BA - Brasil, CEP - 44036-900*

*Submetido em 15/11/2014*

**Resumo:** Estamos propondo neste trabalho um método alternativo para calibração de sensores de luz. Este método faz uso de uma fonte térmica de luz (lâmpada a filamento) que trabalha a diferentes temperaturas em função da potência elétrica. O modelo de corpo negro é utilizado como uma primeira aproximação para descrever a radiação espectral. A sensibilidade espectral, característica a ser determinada, depende indiretamente da corrente aplicada à lâmpada. Para testar experimentalmente a ideia, um equipamento foi desenvolvido. Para o controle da estabilidade do espectro nas diversas utilizações do equipamento, um sensor de luz bem conhecido (sensor de referência) é utilizado: para uma dada temperatura do filamento da lâmpada, que corresponde a um dado espectro, este sensor deve apresentar a mesma tensão de saída. As principais características do equipamento e os resultados experimentais preliminares do estudo da calibração de alguns sensores de luz tipo LED são apresentados.

**Palavras chave:** corpo negro, fotosensor, ótica, sensibilidade espectral, automação.

**Abstract:** We propose in this paper an alternative method for calibrating light sensors. This method makes use of a thermal light source (lamp filament) working at different temperatures as a function of electrical power. The Blackbody model is used as a first approximation to describe the spectral radiance. The spectral sensitivity, characteristic to be determined, depends indirectly of the current applied to the lamp. To test experimentally the idea, a device was developed. To control the spectral stability in the different uses of the equipment, a well-known light sensor (reference sensor) is used: For a given lamp filament temperature, which correspond to a given spectrum, the sensor must have the same voltage output. The main features of the equipment and the preliminary experimental results of the calibration study of some types LED light sensors are presented.

**Keywords:** blackbody, photosensor, optical, spectral sensitivity, automation.

---

\*Electronic address: ivana@cbpf.br

†Electronic address: thierry.lemaire@ufba.br

---

‡Electronic address: juan@uefs.br

## 1. INTRODUÇÃO

Os fenômenos físicos como consequência da interação da radiação com a matéria ainda nos impressionam e suas aplicações para melhorar a vida do homem crescem a cada dia. O estudo da propagação do espectro eletromagnético é um dos tópicos mais estudados na área acadêmica, principalmente nos cursos de Física, Biologia e Engenharias, como por exemplo, nas técnicas espectroscópicas para estudar as propriedades da matéria [1, 2], incluindo a matéria viva [3], e o estudo da viabilidade e otimização do uso da energia solar para produzir energia elétrica [4].

As aplicações da luz passaram a ser mais do que um meio de iluminação do interior das casas e das ruas. Na metade do século passado com a invenção dos transistores e a teoria e construção de materiais semicondutores, principalmente através dos diodos e LED's, as aplicações da luz chegaram a outros domínios, na indústria [5, 6], na medicina [7, 8], nas pesquisas [9], entre outros; no qual o processo de medição da intensidade da luz desempenha um papel crucial. O controle das medidas de grandezas físicas tais como intensidade e fluxo luminosos são de extrema importância. Por isso estamos fazendo um estudo sobre tais conceitos para que possamos caracterizar fotossensores de forma simplificada.

A ideia principal deste trabalho de pesquisa é o desenvolvimento de um dispositivo que permite determinar a resposta espectral de sensores de luz, em particular daqueles cujo princípio de funcionamento é baseado no fenômeno fotoelétrico. Estes sensores são partes de instrumentos utilizados em diversas atividades envolvendo medidas de fotometria. Para a realização de tais medidas são utilizados fotossensores cujas características devem ser conhecidas e, em particular, é importante saber em que faixa do espectro o sensor de luz responde. Por este motivo houve a ideia de desenvolver um equipamento de caracterização que permite a obtenção deste tipo de informação. Normalmente, para a realização de tais medidas é utilizado um monocromador ótico, sendo este equipamento relativamente caro. A vantagem do equipamento proposto neste trabalho é que o mesmo foi desenvolvido com materiais de baixo-custo.

Na literatura podemos encontrar alguns métodos de calibração aplicados a sensores óticos envolvendo a detecção e processamento de imagens [10] e outros que fazem análises de regressão por meio da interpolação linear e assim, obterem os melhores coeficientes envolvidos usando ajustes de dados experimentais [11, 12]. A diferença destes métodos, é que neste trabalho é apresentada uma proposta inovadora para a calibração de fotossensores, que utiliza os dados medidos da tensão elétrica resposta dos sensores óticos, aos quais é aplicado o método da inversão de dados através do algoritmo de otimização estocástico Simulated Annealing, e assim obtermos a sensibilidade espectral do fotossensor que está sendo calibrado.

Durante este trabalho foram realizadas as seguintes tarefas: Como primeira fase do trabalho, realizamos o desenho eletro-ótico-mecânico do fotocalibrador, e em seguida realizamos a montagem do mesmo. O sistema experimental foi automatizado e os experimentos foram executados com um conversor A/D de 8 bits e posteriormente um de 14 bits. A

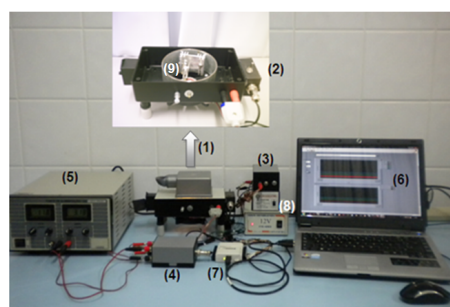
partir dos dados obtidos foi possível realizar um tipo de inversão para encontrar a resposta de um fotossensor capaz de determinar a sensibilidade espectral relativa do sensor utilizado.

## 2. METODOLOGIA

Durante este projeto foram realizados estudos das principais características dos fotossensores, permitindo a consolidação dos conhecimentos sobre os mesmos. Um modelo do instrumento e, em particular, de lâmpada a filamento (corpo negro) que constitui o emissor de luz, foi desenvolvido. Uma vez caracterizado o instrumento, medidas experimentais foram utilizadas para poder extrair a sensibilidade espectral relativa dos fotossensores calibrados. Uma iniciação à programação científica permitiu o desenvolvimento de pequenos programas de cálculos científicos para a caracterização dos sensores.

### 2.1. Descrição do Equipamento

O instrumento é designado para calibração espectral de sensores de luz no visível e próximo infravermelho. Na figura 1, podemos ver a imagem da configuração experimental, composta pela parte principal (fotocalibrador desenvolvido experimentalmente), onde está alojada uma lâmpada térmica a filamento de Tungstênio. Dois feixes colimados de luz são utilizados para iluminar o sensor a ser calibrado e um sensor de referência (ambos contidos na parte principal); temos ainda um conjunto de resistores, duas fontes de tensão e três estágios de condicionamento de sinal, e por fim, o estágio de automação.



(1) Parte principal do fotocálculo  
 (2) Sensor de referência  
 (3) Sensor a ser calibrado  
 (4) Sistema de resistores  
 (5) Fonte de tensão da lâmpada  
 (6) Computador para aquisição de dados  
 (7) DAQ NI-USB 6009  
 (8) Fontes do sensor a ser calibrado e da ventoinha  
 (9) Lâmpada

Figura 1: Sistema experimental completo.

Os dados experimentais, as tensões fornecidas pelos sensores associados a circuitos amplificadores eletrônicos, são digitalizados com uma placa de aquisição de 14 bits, modelo NI-USB 6009, ligada a um computador via porta USB. A Figura 2 mostra o esquema funcional para o fotocálculo.

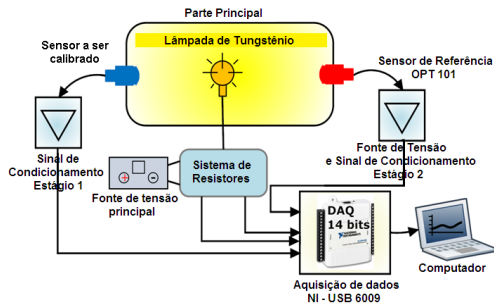


Figura 2: Esquema sinóptico funcional para o fotocalibrador.

### 2.1.1. Princípio de Funcionamento do Equipamento

O princípio de funcionamento do aparelho é baseado na lei de emissão do Corpo Negro de Planck: a fonte de luz é uma lâmpada térmica com filamento de tungstênio (lâmpada dicróica de 12V/50W nominal). Esta lâmpada é ligada mecanicamente a um dissipador de calor fixado à parte interna do colimador, ambos resfriados por um ventilador. A potência elétrica é fornecida à lâmpada por uma fonte de tensão ajustável. As medidas da corrente e da tensão aplicadas à fonte de luz permitem obter a potência térmica dissipada pela lâmpada e determinar a resistência elétrica do filamento, possibilitando o cálculo da sua temperatura. O sensor de referência, o modelo *OPT 101* da Texas Instruments, é um fotodiodo conectado a um amplificador de transimpedância, o conjunto sendo encapsulado num único chip. A resposta é proporcional à intensidade luminosa recebida. O papel deste sensor é verificar que o espectro emitido pela fonte de luz apresenta estabilidade durante todo seu tempo de funcionamento e função somente da sua temperatura. Também permitirá num primeiro momento verificar empiricamente a hipótese de que o espectro de emissão da lâmpada é do corpo negro. A resposta do sensor a ser calibrado será extraída dos dados experimentais após tratamento matemático por método de inversão de dados.

## 3. MODELOS ASSOCIADOS AO EQUIPAMENTO

### 3.1. Modelo de Corpo Negro de Planck

Um corpo negro é um sistema ideal em equilíbrio térmico que absorve toda a radiação que nele incide e re-emite radiações eletromagnéticas, cujo espectro é função da temperatura. Na prática ele pode ser materializado por uma cavidade com uma abertura muito pequena, como por exemplo, os fornos de uma indústria siderúrgica. As características da radiação desta cavidade dependem somente da temperatura das paredes do radiador. Nas temperaturas ordinárias (abaixo de  $600^{\circ}\text{C}$ ), a radiação térmica emitida por um corpo negro não é visível, pois a emissão está concentrada na região do infravermelho do espectro eletromagnético. Quando o corpo negro é aquecido, a quantidade de energia irradiada aumenta com a quarta potência da temperatura e a concentração de

energia se desloca para os comprimentos de ondas menores - Lei de Stefan-Boltzmann.

A fonte de luz utilizada no sistema de detecção proposto é uma lâmpada dicróica simples de filamento de Tungstênio alimentada em corrente por uma fonte de alimentação elétrica DC, que emite luz como resultado de sua temperatura. O modelo aqui apresentado surge do fato do conhecimento de que cada objeto com uma temperatura absoluta ( $T$ ) emite um espectro contínuo, que é descrito pela densidade de potência espectral de acordo com a lei de Planck [13] de radiação do corpo negro, definida como:

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \quad (1)$$

### 3.2. Parte Elétrica do Condicionamento de Sinais

A seguir, descrevemos o modelo do sistema elétrico de resistores para medidas das tensões aplicadas ao filamento da lâmpada, dado pela figura 3.

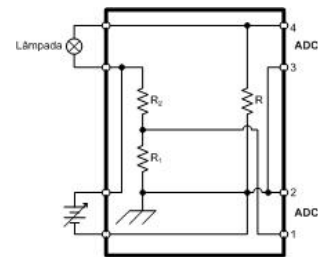


Figura 3: Esquema elétrico da lâmpada.

Temos um conjunto de 2 resistores ( $R_1 = 2,76k\Omega$  e  $R_2 = 6,67k\Omega$ ) conectados em série, e que permite medir uma tensão  $V_{ADC1}$  proporcional à tensão fornecida pelo gerador [14]

$$V_{ADC1} - V_{ADC2} = V_{R_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{fonteDC} \quad (2)$$

O papel do resistor  $R$  é fornecer uma tensão proporcional à corrente que circula dentro do filamento:

$$V_{ADC4} - V_{ADC3} = V_R = RI_{filamento} \quad (3)$$

Este resistor  $R$  é obtido da associação de 4 resistores cujas resistências estão em torno de  $0,75\Omega$  (com uma potência máxima dissipada de  $5W$ ) e o valor exato deste foi determinado a partir de um conjunto de medidas tensão-corrente, linearizadas conforme figura 4. O valor encontrado foi  $R = 0,77\Omega$ .

Destas medidas, pode-se calcular em primeiro lugar a tensão aplicada ao filamento:

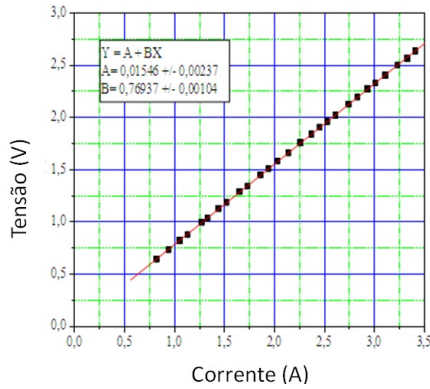


Figura 4: Medidas tensão-corrente para o resistor  $R$  com o ajuste linear.

$$V_{\text{filamento}} = V_{\text{fonteDC}} - V_R = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{R_1} - V_R \quad (4)$$

E em segundo a corrente que o percorre:

$$I_{\text{filamento}} = \frac{V_R}{R} \quad (5)$$

A resistência do filamento da lâmpada é então deduzida das duas determinações anteriores:

$$R_{\text{filamento}} = \frac{V_{\text{filamento}}}{I_{\text{filamento}}} \quad (6)$$

E então pode-se calcular sua temperatura que será, nos tratamentos de dados experimentais deste trabalho, a temperatura do corpo negro:

$$R_{\text{filamento}}(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

Sendo  $\alpha = 4,5 \times 10^{-3} K^{-1}$  o coeficiente de Temperatura a  $20^\circ C$  para o Tungstênio constituinte do filamento.

Teremos que

$$T = T_0 + \frac{1}{\alpha} \left( \frac{R_{\text{filamento}}(T)}{R_0} - 1 \right) \quad (7)$$

#### 4. AUTOMAÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL

O controle automático do sistema experimental, foi realizado utilizando a linguagem de programação LabVIEW v8.6, da National Instruments. Foi escrito o programa Focalibradorv1.0.vi com o objetivo de digitalizar os sinais de interesse via porta USB por meio da placa de aquisição

modelo NI-USB 6009 proveniente da National Instruments. Constituem sinais de interesse, o sinal elétrico medido pelo sensor óptico de referência (OPT101), do fotosensor a ser calibrado (diferentes tipos de LED's, dentre outros), além da tensão e da corrente da alimentação da lâmpada. Estes últimos dados, posteriormente, serão utilizados para calcular a temperatura da lâmpada.

Na figura 5, é ilustrada a imagem da placa de aquisição NI-USB 6009 utilizada neste trabalho, sendo que a mesma possui 14 bits de resolução, e dentre as suas características mais importantes destacam-se, as 08 entradas analógicas simples referenciadas, os 4 canais de entrada diferencial, as 2 saídas analógicas e 12 entrada/saída digitais.



Figura 5: Placa de Aquisição NI-USB 6009.

Na figura 6, é ilustrada a interface gráfica da rotina Focalibradorv1.0.vi situada no Painel Frontal do LabVIEW; nela pode-se observar as janelas gráficas, onde serão visualizados a forma de todos os sinais medidos e contaminados com ruído. É através desta interface que são introduzidos alguns dados ou parâmetros de entrada, tais como, a taxa de aquisição, diretório onde serão armazenados os dados adquiridos para análises. Em todos os experimentos realizados foram adquiridos 1000 amostras a uma taxa de aquisição de  $200 Hz$ .

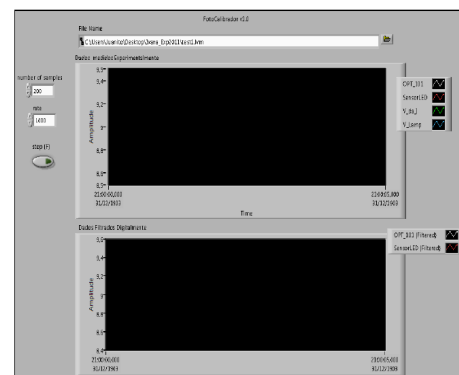


Figura 6: Interface gráfica da rotina de aquisição e dados do focalibrador em LabVIEW.

A plataforma LabVIEW foi escolhida pela sua grande versatilidade e elevado desempenho nos processos de automação e processamento de sinais em tempo real. Neste software a programação é do tipo gráfico (conhecido como linguagem-G) e é baseado no conceito de Virtual Instrument (VI), estruturas as quais imitam instrumentos físicos,

componentes eletrônicos, métodos, entre outros, e com funcionalidades bem definidas que são conectadas por meio de cabos digitais que indicam o sentido do fluxo de dados. O LabVIEW funciona sempre com duas interfaces de programação ativas, 1- O painel frontal e 2- O diagrama de blocos. Nesta última é o local onde é escrito o código fonte e no painel frontal são visualizados, indicados ou controlados, os resultados da execução deste código fonte.

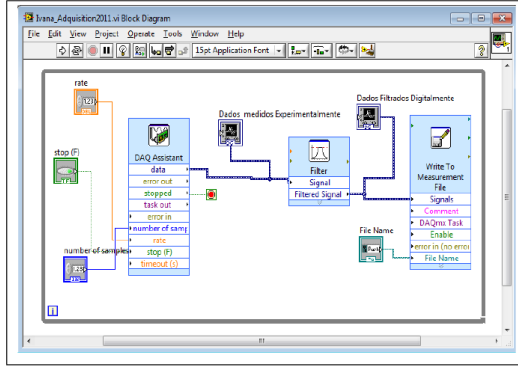


Figura 7: Código fonte escrito em LabVIEW.

Na figura 7, mostra-se uma imagem do diagrama em blocos ou código fonte da rotina principal que foi utilizada em todos os experimentos realizados.

## 5. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA RESPOSTA DO SENSOR A SER CALIBRADO

Algumas das principais características físicas que descrevem os sensores óticos são responsividade e sensibilidade espectral, linearidade e faixa dinâmica. A resposta do sensor ótico mede a razão ou ganho da saída do sensor em relação à entrada, isto é, o sinal elétrico (tensão elétrica) na saída do fotosensor por unidade de uma propriedade ótica da radiação na entrada. A responsividade depende da eficiência quântica, que é o número de fotoelétrons gerados por quantum de energia incidente. Além disso, a responsividade depende também do comprimento de onda ou frequência da radiação luminosa, sendo que essa dependência é definida como sensibilidade espectral, responsividade espectral ou responsividade espectral do detector ótico. Em algumas aplicações lineares, a sensibilidade espectral pode ser expressa em Ampères ou Volts por Watts [ $A(V)/Watt$ ] [15, 16] e, a depender das unidades de medida na qual se expresse o sinal de saída que está sendo medido no detector. O material do fotocátodo dos sensores fotocondutores (como o caso dos LED's) determina a sensibilidade espectral. Isto significa que cada sensor ótico tem sua melhor resposta espectral para determinadas faixas limitadas de comprimento de onda ou frequência da radiação. Os materiais mais usados nos fotosensores são o Silício e o Germânio; o primeiro absorve a luz desde a faixa do ultravioleta até o infravermelho, ou seja, 300–1100 nm, com pico máximo de sua sensibilidade espectral em torno de 950 nm fora da faixa do visível. Os sensores com fotocátodo de Germânio apresentam sua sensibilidade espectral máxima perto de 1450 nm e cai a 0 perto de 1800 nm [17].

Por outro lado, a Sensibilidade Espectral Relativa (SER) define o quão sensível é o sensor em função da frequência ou do comprimento de onda do sinal.

Para ilustrar o princípio do calibrador, foram realizadas algumas simulações que mostram a viabilidade da ideia implementada. Foram calculadas respostas para 4 fotosensores diferentes SER's expressas por funções do tipo Gaussiana ou Lorentziana. Para o primeiro tipo de sensor simulado, a SER é um único pico Gaussiano caracterizado por 3 parâmetros: a amplitude do pico, sua posição e sua largura. A expressão é:

$$S(\lambda) = S_0 e^{-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda}\right)^2} \quad (8)$$

O segundo tipo de sensor envolve uma SER expressa por uma Lorentziana, que é também um único pico caracterizado pelos mesmos 3 parâmetros citados anteriormente.

$$S(\lambda) = \frac{S_0}{1 + \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda}\right)^2} \quad (9)$$

Por fim, o terceiro tipo de sensor é uma superposição de dois picos do tipo Lorentziana e, portanto, sua SER é caracterizada por 6 parâmetros:

$$S(\lambda) = \frac{S_1}{1 + \left(\frac{\lambda - \lambda_1}{\Delta\lambda_1}\right)^2} + \frac{S_2}{1 + \left(\frac{\lambda - \lambda_2}{\Delta\lambda_2}\right)^2} \quad (10)$$

Os parâmetros das 4 SER's simuladas são dadas na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros das SER's simuladas

Fotosensor	Tipo de SER	$S_0(u.a.)$	$\lambda_0(nm)$	$\Delta\lambda(nm)$
Fotosensor 1	Tipo 1	1.0	600	40
Fotosensor 2	Tipo 1	1.0	600	40
Fotosensor 3	Tipo 2	1.0	600	30
Fotosensor 4	Tipo 3	1.0/0.4	800/350	100/70

As SER's são apresentadas na figura 8. As 3 primeiras SER's podem representar sensores do tipo LED utilizadas como receptores em vez de emissores de luz, enquanto a quarta poderia simular a resposta de um sensor respondendo no infravermelho, com um tratamento permitindo enxergar um pouco de ultravioleta.

A simulação das respostas dos fotosensores, em função da temperatura do filamento considerado como um corpo negro é obtida implementando a equação [1]

$$u(T) = \gamma \int_0^{\infty} E(\lambda, T) S(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

onde  $u(T)$  é a tensão de resposta dos sensores em função da temperatura,  $\gamma$  é um coeficiente que depende da geometria

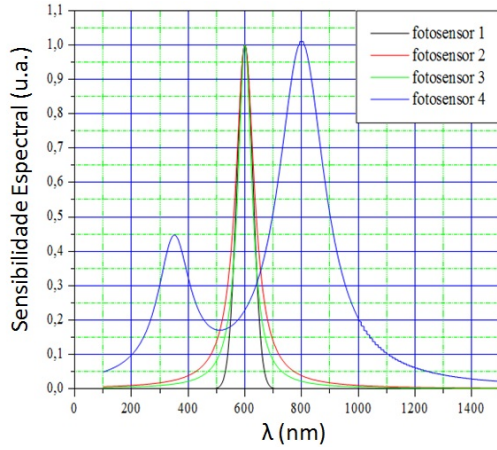


Figura 8: Sensibilidades espectrais dos 4 fotossensores simulados.

do calibrador e do fator de amplificação do circuito condicionador de sinal e  $S(\lambda)$  é a sensibilidade espectral do fotossensor considerado, sendo esta função a ser determinada para o sensor a calibrar.

Aplicando a relação 11, obtemos as curvas da figura 9.

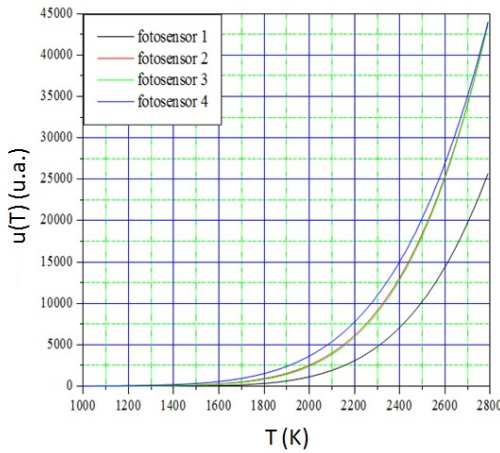


Figura 9: Sinais associados aos 4 fotossensores em função da temperatura do filamento.

Com esses exemplos, podemos observar que a resposta medida depende significativamente do tipo da SER e de suas características (posição do(s) seu(s) máximo(s), de sua largura e sua amplitude). Isto ilustra o fato deste tipo de medidas permitir distinguir e, portanto, caracterizar fotossensores com sensibilidades espectrais diferentes. O ponto importante é que a caracterização dos fotossensores não envolve um monocromador, componente caro, mas simplesmente uma fonte de luz térmica para a qual é realizada uma varredura da temperatura, proporcionando uma variação do seu espectro.

## 6. INVERSÃO DOS DADOS SIMULADOS

A tensão fornecida por cada fotossensor é a soma das contribuições de cada componente do espectro emitido pela

fonte de luz. Podemos então escrever a função tensão da temperatura do filamento fornecida pelo sensor da SER da equação 11.

Obviamente, o fotossensor enxerga uma gama limitada do espectro  $[\lambda_1, \lambda_2]$ , por exemplo, podemos reescrever a equação 11 de uma forma mais prática:

$$u(T) = \gamma \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda, T) S(\lambda) d\lambda \quad (12)$$

Esta equação integral é chamada de equação de Fredholm de primeira espécie [18]. Existe uma grande diversidade de algoritmos para determinar  $S(\lambda)$ . Neste trabalho, iremos tratar o problema de inversão de dados como um problema de otimização. Escolhemos o algoritmo de recozimento térmico chamado Simulated Annealing (SA) ou critério de Metropolis [19] para determinar os parâmetros que caracterizam a resposta da SER, modelada com uma função simples do tipo 1 ou 2 da seção anterior. Este algoritmo faz parte dos métodos de otimização estocásticos e envolve, neste trabalho, a busca (pseudo-) aleatória dos três parâmetros que definem a SER: a amplitude ( $S_0$ ), posição ( $\lambda_0$ ) e largura ( $\Delta\lambda$ ) do pico da resposta. Por isso, a seguir iremos denominar a SER pela função  $S(T; S_0, \lambda_0, \Delta\lambda)$ . Inicialmente explicitaremos o princípio do método de forma resumida.

Os problemas inversos ou problemas de otimização, em geral, envolvem a minimização de uma função chamada Função Custo do Problema que é uma função quadrática da diferença entre os valores experimentais a serem ajustados e os valores teóricos previstos pelo modelo (onde a tensão  $u(T)$  é re-escalada para variar de 0 até 1 na faixa de temperatura medida):

$$\Phi(S_0, \lambda_0, \Delta\lambda) = \frac{1}{\Phi_0} \sum_{i=1}^m \left[ u(T_i) - \gamma \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda, T_i) S(T, S_0, \lambda_0, \Delta\lambda) d\lambda \right]^2 \quad (13)$$

Onde

$$\Phi_0 = \sum_{i=1}^m u^2(T_i) \quad (14)$$

A minimização desta função pode ser realizada fixando aleatoriamente os 3 parâmetros, até obter um valor da função custo abaixo de um certo limiar. Entretanto, este processo não é otimizado porque a maioria dos valores encontrados dos parâmetros não será adequada. Introduzimos então uma busca aleatória “controlada”, o SA, que pode ser resumido pelos passos a seguir. O processo é iterativo e envolve um chute inicial dos 3 parâmetros (que são representados por um vetor  $(\vec{\alpha})$  que em seguida vão ser alterados acrescentando ao valor anterior um passo gerado de forma aleatória ( $\delta\vec{\alpha}$ ). A função custo é avaliada e se ela apresenta um valor inferior ao passo anterior, os 3 parâmetros são conservados. Se a

função custo aumenta, então estes 3 parâmetros serão aceitos com uma certa probabilidade ou se não, serão excluídos (SA). É introduzida uma "temperatura" (não Termodinâmica) que permite fixar a probabilidade de aceitação ou não dos parâmetros que "pioram" a função custo, em analogia com o que ocorre nos processos de recozimentos térmicos que permitem obter aços com diversas propriedades mecânicas (dureza, flexibilidade,...). Este último procedimento permite ao algoritmo não ficar preso em uma região de mínimo local da função custo como ocorre com métodos do tipo gradiente. A princípio, é possível então, assintoticamente, determinar o mínimo global da função. O procedimento é repetido até atingir o limiar considerado razoável para a função custo. As grandezas calculadas são dadas pelas expressões a seguir:

$$\vec{\alpha}_{\kappa+1} = \vec{\alpha}_{\kappa} + \delta\vec{\alpha}_{\kappa}$$

$$\delta\vec{\alpha}_{\kappa} \in [0, \delta\alpha_{max}]^n$$

$$\Delta E_{\kappa+1} = \Phi(\vec{\alpha}_{\kappa+1}) - \Phi(\vec{\alpha}_{\kappa})$$

$$P(\Delta E_{\kappa+1}) = e^{-\frac{\Delta E_{\kappa+1}}{kT}}$$

probabilidade de aceitação =  $\min[1, P(\Delta E_{\kappa+1})]$

O algoritmo é resumido pelo fluxograma da figura 10.

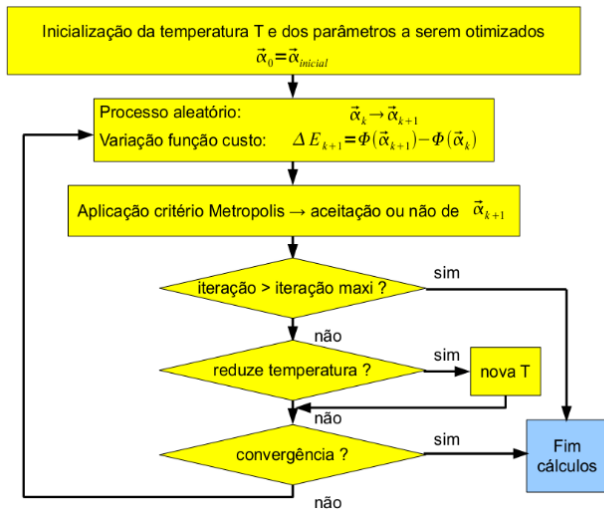


Figura 10: Fluxograma do método de otimização baseado no AS.

Em seguida, apresentamos 3 exemplos de inversão de dados sintéticos para ilustrar o método de extração da SER. As SER's consideradas são as 3 primeiras descritas na tabela 1.

Para o primeiro pico (SER função Gaussiana), as figuras 11 e 12 ilustram a qualidade da inversão que neste caso per-

mite encontrar os valores dos 3 **Parâmetros Exatos (PE)** e o **Resultado da Inversão (RI)**, conforme dado na Tabela 2. A função custo tem o valor  $378 \times 10^{-9}$  no final do processo.

Tabela 2: PE das SER's e RI

Fotosensor 1	Tipo de SER	$S_0(u.a.)$	$\lambda_0(nm)$	$\Delta\lambda(nm)$
PE	Tipo 1	1.0	600	40
RI	Tipo 1	1.0	599.9	40.1

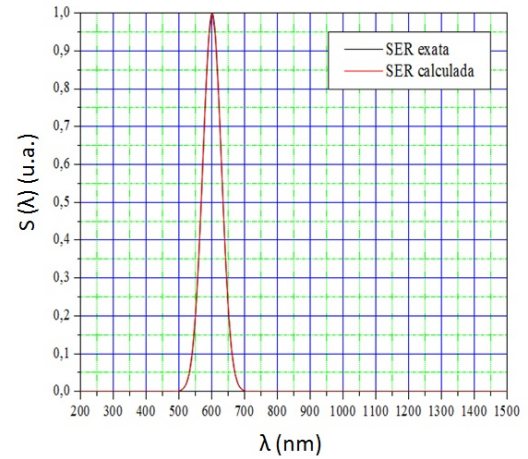


Figura 11: Sensibilidades espectrais exatas e calculadas.

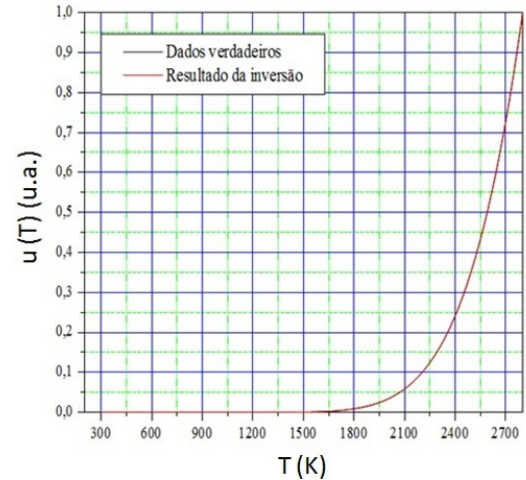


Figura 12: Respostas exata e calculada do fotosensor em função da temperatura do filamento.

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Resultados Preliminares

As primeiras medidas realizadas foram da corrente e tensão aplicadas à lâmpada, assim como da tensão de saída do sensor de referência (OPT101), utilizando uma placa de aquisição de 8 bits via porta paralela. O código fonte foi programado em linguagem QBasic, foram obtidas 500 amostras.

Foi possível obter uma estimativa da temperatura do filamento com o emprego da equação 7. Medidas da resposta do sensor de referência em função da temperatura são apresentadas na figura 13.

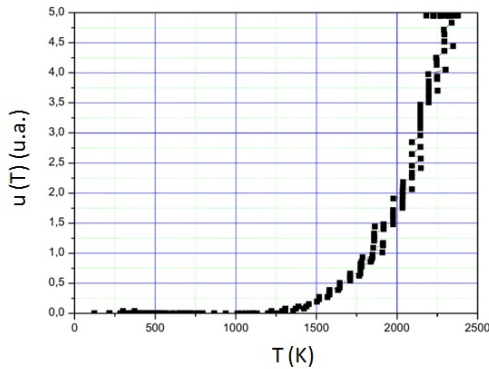


Figura 13: Tensão fornecida pelo OPT 101 em função da temperatura do filamento obtida através de uma placa de aquisição de 8 bits.

## 7.2. Resultados Finais

O modelo do corpo negro foi então aplicado para descrever a emissão da lâmpada. As medidas foram realizadas com uma placa de aquisição de 14 bits via porta USB, modelo NI 6009 em modo de amostragem contínua. Foram realizadas 250 amostras numa taxa de aquisição de  $200\text{Hz}$  em configuração diferencial; o ganho do OPT 101 foi fixado em 100.

A seguir, estão 5 respostas de  $u(T)$  para o OPT 101 e para LEDs infravermelho, verde, vermelho e azul, respectivamente, sendo a função  $u(T)$  re-escalada para cada sensor, de forma que ela varia de 0 até 1 u. a. Além disso, a temperatura para as medidas das figuras 14 a 19 foram para temperaturas "baixas", abaixo de  $1000\text{K}$ . Podemos observar um alto nível de ruído, mas isso não impossibilita a análise do comportamento dos sensores.

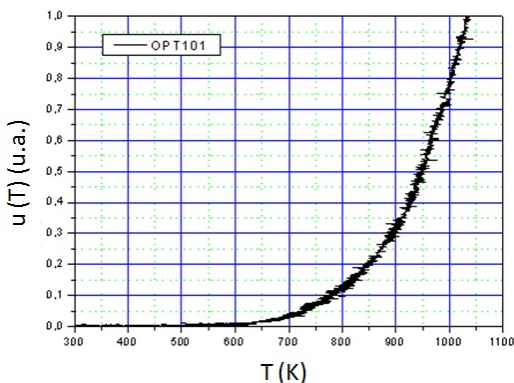


Figura 14: Tensão fornecida pelo OPT 101 em função da temperatura do filamento com resultados obtidos utilizando uma placa de aquisição de 14 bits.

Na figura 14 é possível perceber que o comportamento da tensão em função da temperatura aplicada à lâmpada é similar à lei de Stefan para o corpo negro. A curva deste sensor, devido ao ganho, tem uma saturação muito rápida em relação aos outros sensores do estudo (ver figuras 16, 17, 18, 19), fazendo com que a temperatura do filamento fique bem abaixo de  $3000\text{K}$ . As curvas  $u(T)$  obtidas para cada LED são comparadas com a do OPT101, mas não porque deveriam ser próximas. Ao contrário, espera-se que elas sejam diferentes porque isso ilustra o fato que cada sensor responde de forma diferente, como esperado. Na figura 15 observa-se que o OPT101 apresenta maior resposta espectral nas regiões próximas ao infravermelho e vai ficando menos sensível conforme vai se aproximando do espectro ultravioleta.

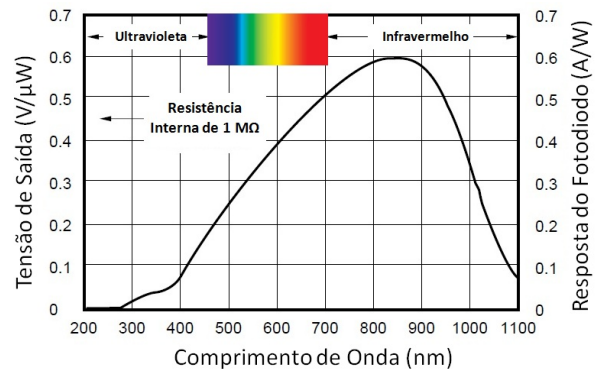


Figura 15: Resposta Espectral do OPT101 [20].

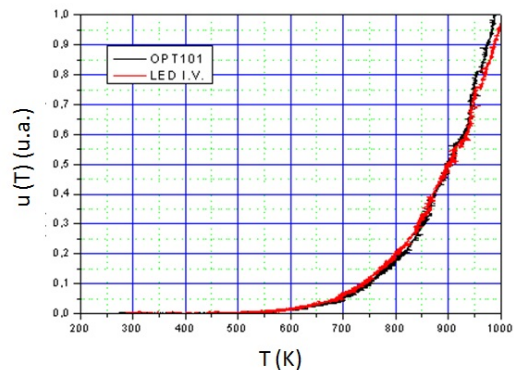


Figura 16: Tensão fornecida pelo LED infravermelho em função da temperatura do filamento.

As figuras 20 e 21 foram obtidas através do processo de inversão de dados descrito na sessão 6 para o LED infravermelho.

A figura 20 permite comparar o sinal medido,  $u(T)$  (re-escalado), para o LED infravermelho com a função  $u(T)$  obtida com os valores da inversão. Observa-se uma boa concordância, o que sugere uma inversão bem sucedida. Já na figura 21 podemos ver a curva de sensibilidade espectral (grandeza de interesse), deduzida da inversão, em função do comprimento de onda com os três parâmetros estudados (amplitude do pico, largura e posição).



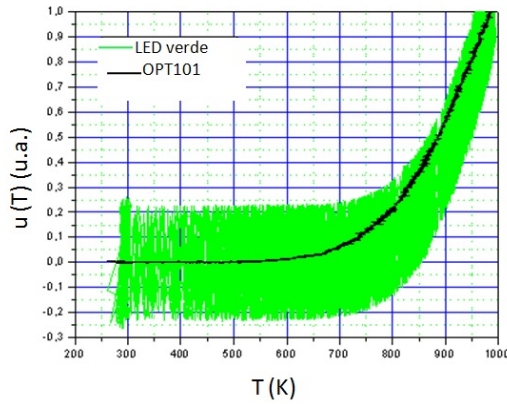


Figura 17: Tensão fornecida pelo LED verde em função da temperatura do filamento.

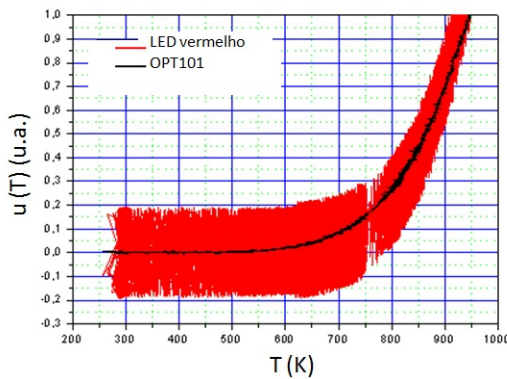


Figura 18: Tensão fornecida pelo LED vermelho em função da temperatura do filamento.

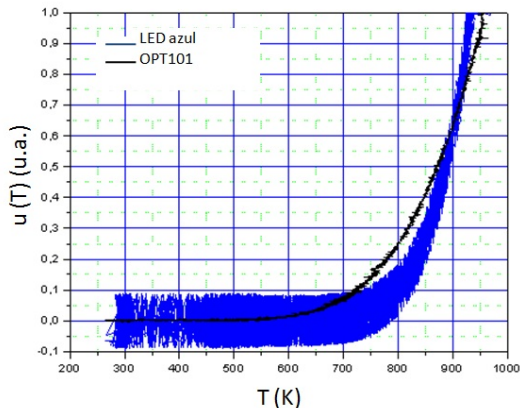


Figura 19: Tensão fornecida pelo LED azul em função da temperatura do filamento.

## 8. CONCLUSÕES

Um protótipo para a calibração de fotosensores chamado de fotocaliador foi desenhado e construído no Laboratório de Instrumentação Científica (LINFIS) da Universidade Estadual de Feira de Santana. O mesmo foi basicamente fabricado com materiais de fácil acesso e baratos, empregando

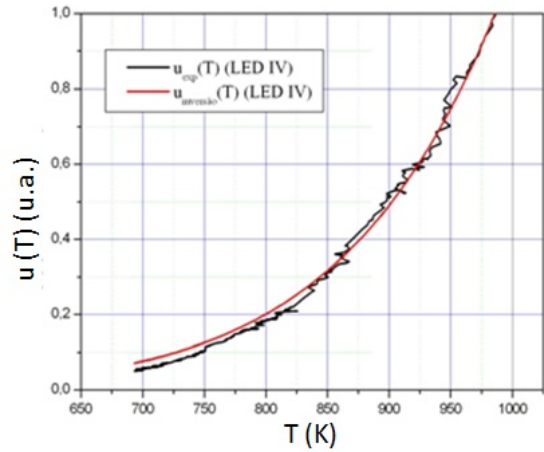


Figura 20: Curva do LED infravermelho  $[u(T) \times T]$  comparada com a aplicação da expressão 11 empregando os parâmetros obtidos da inversão.

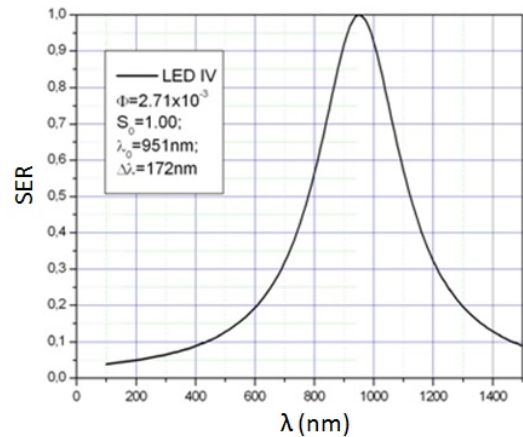


Figura 21: SER obtida através da inversão para o LED infravermelho.

equipamentos (ADC, computador, fontes de energia) de uso comum em laboratórios, tanto de pesquisa quanto didáticos.

Pelas simulações realizadas, foi verificada a viabilidade da ideia de calibração de fotosensores que finalmente foi comprovada experimentalmente através das diversas respostas obtidas  $u(T)$  dos diferentes sensores. O instrumento requer um tratamento matemático sofisticado dos dados experimentais, que inclui a resolução de uma equação integral do tipo Fredholm de primeira espécie. A partir dos resultados experimentais obtidos na etapa inicial, observou-se a necessidade de utilização de amplificadores com controle de ganho automático, para amplificar o suficiente os sinais fracos obtidos quando o filamento está a “baixas temperaturas” ( $T < 500K$ ), e para evitar a saturação destes amplificadores a altas temperaturas. Obtivemos com o método de inversão a sensibilidade espectral para o LED infravermelho e esta curva se mostrou condizente com o que se espera de um sensor infravermelho.

Um estudo sistemático do processo de inversão de dados deve ser realizado para verificar a qualidade deste tratamento assim como sua estabilidade em função da presença de ruído

nos dados experimentais. Será preciso também estudar a estabilidade do espectro de luz gerado pela lâmpada e a forma do seu espectro que hoje é tomado em primeira aproximação como sendo do Corpo Negro. O fotocalibrador encontra-se em funcionamento e serve de base para futuras aplicações

na área da ótica aplicada e em pesquisas da física médica, onde se necessitam fazer medidas da intensidade luminosa por arranjo de LED's ou outros tipos de sensores óticos que precisam ser caracterizados.

- 
- [1] M. Born and E. Wolf, Principle of Optics, Cambridge University Press (7th. Ed. Cambridge-England, 2002).
- [2] J.R. Reitz, F.J. Milford, R.W. Christy, Fundamentos da teoria eletromagnética. Editora Campus (Rio de Janeiro, 1982).
- [3] Morgan, M. G. Nair, I. Eletromagnetics Fields-Part 1; Biological Effects. DOI: 10.1109/6.58428. IEEE Spectrum[0018-9235]. Vol.: 27, iss:9, 1990.
- [4] Palz, W. Energia solar e fontes alternativas. Hemus-Livraria Editora Ltda (1981).
- [5] Inaudi D., Casanova N., Glisic B., Vurpillot S., Kronenberg P., Lloret S.. Lessons learned in the use of fiber optic sensor for civil structural monitoring. International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, Issue 3-4, Pages 301-320, August 2001.
- [6] Maaskant R., Alavie V. T., Measures R. M., Tadros G., Rizkalla S. H. and Guha-Thakurta A. Fiber-optic Bragg Grating Sensors for Bridge Monitoring. Cement and Concrete Composites 19 (1997) 21 – 33.
- [7] Chin L. C. L., Whelan W. M., Vitkin I. A. Optical Fiber Sensors for Biomedical Applications. Book Section: Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated Tissue. Springer Netherlands. Online ISBN 978-90-481-8831-4, (2011), pp 661-712.
- [8] Baldini F., Giannetti A., Mencaglia A.A., and Trono C. "Fiber Optic sensors for Biomedical Applications."Curr. Anal. Chem., 4, 378-390 (2008).
- [9] Guenter G. Direct optical sensors: principles and selected applications. Anal Bioanal Chem (2005) 381: 141–155 (DOI 10.1007/s00216-004-2895-4).
- [10] Fusiello A., Murino V. Calibration of an Optical-Acoustic Sensor. Machine GRAPHICS and VISION vol. 9, no. 1/2, 2000, pp. 207-214.
- [11] Guillén J., Palanques A., Puig P., Durrieu de Madron X. and F. Nyffeler. Field calibration of optical sensors for measuring suspended sediment concentration in the western Mediterranean. SCI. MAR. 64 (4): 427-435. (2000).
- [12] Rosenthal R. D. Method for providing custom calibration for near infrared instruments for measurement of blood glucose. United States Patent. Patent number: 5,068,536, Nov. 26, 1991.
- [13] Francisco Caruso e Vitor Oguri. Física Moderna. Origens Clássicas e fundamentos Quânticos. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.
- [14] P. Horowitz, W. Hill, The art of electronics, Cambridge University Press (New York, 2ª Ed., 1989).
- [15] Stephen A. Dyer (2001). Survey of Instrumentation and Measurement. Wiley-IEEE. ISBN 0-471-39484-X.
- [16] Robert B. Northrop (2004). Analysis and Application of Analog Electronic Circuits to Biomedical Instrumentation. CRC Press. ISBN 0-8493-2143-3.
- [17] Jörg Haus. Optical Sensors Basics and Applications. ©2010 WILEY-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, Weinheim.
- [18] Kress, R. Linear Integral Equations. Springer, 1999.
- [19] MRINAL SEN, PAUL L. STOFFA, "GLOBAL OPTIMIZATION METHODS IN GEOPHYSICAL INVERSION", Elsevier Science B.V (Amsterdam, 1995).
- [20] Data Sheet: Monolithic Photodiode and Single-Supply Transimpedance Amplifier. OPT101. Texas Instruments. SBBS002A – January 1994 – Revised October 2003.
- [21] G. Asch et Collaborateurs, Les capteurs en instrumentation industrielle, Dunod(Paris, 4ª Ed., 1991).
- [22] EISBERG, R.; RESNICK, R. Física Quântica, Editora Campus (3a. ed., Rio de Janeiro, 1985).
- [23] Skoog, Holler e Nieman. Princípios de Análise Instrumental. Ed. Bookman, 5ª Edição, Porto Alegre, 2002.
- [24] H.C. van de Hulst, Light scattering by small particles, Dover Publications, Inc.,(NewYork, 1981).