

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM PIRANÔMETRO  
BASEADO EM COMPONENTES  
SEMICONDUCTORES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Maiquel Bacin Bolzan**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2014**

# **DESENVOLVIMENTO DE UM PIRANÔMETRO BASEADO EM COMPONENTES SEMICONDUTORES**

**MAIQUEL BACIN BOLZAN**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Linha de Pesquisa em Micrometeorologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,RS) como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Meteorologia**

**Orientador: Prof. Hans Rogério Zimmermann**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2014**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Naturais e Exatas  
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia**

**A comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado**

**DESENVOLVIMENTO DE UM PIRANÔMETRO BASEADO EM  
COMPONENTES SEMICONDUTORES**

Elaborada por  
**Maiquel Bacin Bolzan**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Meteorologia**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Hans Rogério Zimmermann, Dr. (UFSM)**

---

**Virnei Silva Moreira, Dr. (Unipampa)**

---

**Claudio Alberto Teichrieb, Dr. (UFSM)**

**Santa Maria, 27 de fevereiro de 2014.**

*Dedico a minha companheira  
Cristina Limana.  
Aos meus professores.  
Aos meus colegas.  
Aos meus alunos.*



## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria - UFSM pela possibilidade da realização do Mestrado em Meteorologia de qualidade e gratuito.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pelas instalações gentilmente cedidas para o desenvolvimento do projeto.

*Ao professor e orientador* Dr. Hans Rogério Zimmermann pelo contínuo auxílio no desenvolvimento do projeto e pela amizade.

À professora Dr. Débora Regina Roberti, pelas inúmeras vezes que prontamente mostrou novos caminhos.

Aos colegas de laboratório, Pablo, Daniel, Cláudio, Janaína e Josué pela amizade, companheirismo e pronto auxílio durante as dificuldades.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Meteorologia da UFSM, assim como os professores do Departamento de Física da UFSM, pelos valiosos ensinamentos.

Aos colegas da pós Graduação em Meteorologia pelos momentos de estudo, pela companhia, pela descontração, bem como os almoços no “RU”.

À minha companheira, Cristina Limana que auxiliou-me em todos os momentos.

**A mente que se abre a uma nova ideia jamais  
voltará ao seu tamanho original.**

Albert Einstein

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós- Graduação em Meteorologia  
Universidade Federal de Santa Maria

### DESENVOLVIMENTO DE UM PIRANÔMETRO BASEADO EM COMPONENTES SEMICONDUTORES

AUTOR: Maiquel Bacin Bolzan  
ORIENTADOR: Hans Rogério Zimmermann, Dr.  
Local e Data: Santa Maria, 27 de fevereiro de 2014.

A presente dissertação foi elaborada a partir da ideia de pesquisar e divulgar a produção de um piranômetro de fácil construção e baixo custo. Esta apresenta a pesquisa para o desenvolvimento de um sensor com a finalidade de quantificar intensidade da radiação solar global incidente na superfície terrestre. O principal componente utilizado é um fotodiodo, que é construído por duas pastilhas de diferentes sólidos cristalinos semicondutores, encapsuladas por um material eletricamente isolante e transparente ao comprimento de onda da radiação de operação.

A metodologia empregada foi a comparação entre as medidas do protótipo desenvolvido e um piranômetro considerado padrão. Essa comparação foi obtida mediante a estimativa dos parâmetros estatísticos das leituras da corrente fotoelétrica, gerada pelo protótipo que utiliza um dispositivo semicondutor, espectralmente seletivo, que opera na faixa de onda em torno de  $940\text{ nm}$  e um piranômetro modelo CMP3.

O protótipo mostrou-se estável em sua fase final de desenvolvimento, provando ser viável sua produção como instrumento de baixo custo para a obtenção de dados experimentais da intensidade da radiação solar global.

**Palavras-chave:** Piranômetro, Fotodiodo, Semicondutor.

# **ABSTRACT**

Master of Science Thesis  
Meteorology Post Graduation Programme  
Federal University of Santa Maria

## **DEVELOPMENT OF A PYRANOMETER BASED ON SEMICONDUCTOR COMPONENTS**

AUTHOR: Maiquel Bacin Bolzan  
ADVISOR: Hans Rogério Zimmermann, Dr.  
Local and Data: Santa Maria, 27 february 2014.

This master of science thesis was developed from the idea of research and the production of a pyranometer of easy construction and low cost. This work presents research to develop a sensor in order to quantify the intensity of solar radiation incident on the earth's surface. The main component used is a photodiode which is constructed by two pellets of different semiconductor crystalline solids, encapsulated by an electrically insulating and transparent to the wavelength of the operating radiation material.

The methodology used was to compare the measures of the developed prototype and considered standard pyranometer. This comparison was obtained by estimating the statistical parameters of the readings of photoelectric current generated by using a prototype, spectrally selective semiconductor device, which operates in the wavelength range around CMP3 considered pyranometer model.

The prototype was stable in its final stage of development, proving to be of viable production as a tool for low cost to obtain experimental data on the intensity of solar radiation.

**Key-words:** Pyranometer, Photodiode, Semiconductor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Níveis de energia.....	23
Figura 2 –	Estrutura atômica (a) do germânio; (b) do silício.....	24
Figura 3 –	Impureza de antimônio formando um semiconductor tipo $n$ .....	25
Figura 4 –	Impureza de boro formando um semiconductor tipo $p$ .....	26
Figura 5 –	Junção $p-n$ em uma polarização inversa, comportando-se como um isolante.....	27
Figura 6 –	Junção $p-n$ em uma polarização direta, comportando-se como um condutor.....	28
Figura 7 –	Fotografia do piranômetro CMP3 utilizado nesta dissertação como padrão.....	31
Figura 8 –	Gráfico da Irradiância solar, medida em Watts por metro quadrado, em função do comprimento de onda em micrômetros. ....	32
Figura 9 –	Possíveis processos impostos a radiação proveniente do Sol ao atravessar a atmosfera. ....	33
Figura 10 –	Gráfico da atenuação porcentual por parte de diferentes componentes atmosféricos da radiação solar ao atravessar a atmosfera, em função dos comprimentos de onda .....	34
Figura 11 –	Radiação em $KW/m^2$ em função do comprimento de onda em micrômetros que alcança perpendicularmente o topo da atmosfera terrestre, apresentado juntamente com a radiação que atinge a superfície.....	35
Figura 12 –	Fotografia do primeiro protótipo mostrando o fotodiodo encapsulado por um difusor de náilon, formado um simples chassis.....	39
Figura 13 –	Fotografia de um pistão inteiro (à esquerda da imagem) juntamente com outro semelhante já cortado em duas parcelas, uma que foi descartada e à direita a parte superior do pistão em processo de usinagem final.....	39
Figura 14 –	Vista externa do corpo do protótipo, aberto em duas partes, à esquerda está a base, com três parafusos de fixação semi-apertados, e à direita a parte superior, já com o difusor (parcela circular branca no centro) selado no local definitivo.....	40
Figura 15 –	Corpo do protótipo pintado e já instalado no local de testes.....	41

Figura 16 –	Fotografia de um fotodiodo modelo TIL38, mostrando a parcela semi-esférica superior, em oposição aos dois terminais metálicos.....	42
Figura 17 –	Esquema de um fotodiodo modelo TIL38, conectado em paralelo com um resistor <i>shunt</i> ( $R_s$ ), o <i>datalogger</i> representa o armazenador automático de dados e atua em conjunto com o resistor <i>shunt</i> de forma a estimar a corrente fotoelétrica que gerada pelo fotodiodo.....	44
Figura 18 –	Fotografia de um armazenador automático de dados modelo CR1000, produzido pela <i>Campbell Sci</i> .....	45
Figura 19 –	(a) Radiação coletada via sensor CMP3, em 05 de maio de 2012; (b) Tensão entre os terminais do TIL38 exposto diretamente a radiação solar, em 05 de maio de 2012.....	51
Figura 20 –	Gráfico tipo espalhamento, que compara as tensões obtidas pelo TIL38 em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 05 de maio de 2012.....	52
Figura 21 –	(a) Radiação coletada via sensor CMP3, em 06 de maio de 2012; (b) Tensão entre os terminais do TIL38 exposto diretamente a radiação solar, em 06 de maio de 2012.....	53
Figura 22 –	Gráfico tipo espalhamento, que compara as tensões obtidas pelo TIL38 em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 06 de maio de 2012.....	54
Figura 23 –	(a) Radiação coletada via sensor CMP3, em 30 de junho de 2012; (b) Tensão entre os terminais do TIL38 exposto diretamente a radiação solar, conectado em paralelo com um resistor <i>shunt</i> , em 30 de junho de 2012.....	55
Figura 24 –	(a) Radiação coletada via sensor CMP3 em $KW/m^2$ , em 30 de junho de 2012; (b) Intensidade da radiação global medida em $KW/m^2$ pelo TIL38, sem o difusor e conectado em paralelo com o resistor <i>shunt</i> , em 30 de junho de 2012.....	56
Figura 25 –	Gráfico tipo espalhamento que compara intensidade da radiação global obtidas pelo protótipo em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 30 de junho de 2012, e uma reta que lineariza os pontos do gráfico.....	57
Figura 26 –	(a) Radiação coletada via sensor CMP3 em $KW/m^2$ , em 01 de julho de 2012; (b) Intensidade da radiação global medida em $KW/m^2$ pelo TIL38, sem o difusor e conectado em paralelo com o resistor <i>shunt</i> , em 01 de julho de 2012.....	59

Figura 27 –	Gráfico tipo espalhamento, que compara intensidade da radiação global obtidas pelo protótipo em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 01 de julho de 2012, e uma reta que lineariza os pontos do gráfico.....	60
Figura 28 –	Fotografia do sensor CMP3, à esquerda (cabo amarelo), e o protótipo com difusor acoplado ao TIL38, à direita, coletando dados no dia 07 de agosto de 2012, nas dependências do INPE – CRS, em Santa Maria – RS, na Universidade Federal de Santa Maria.....	62
Figura 29 –	(a) Radiação coletada via sensor CMP3 em KW/m <sup>2</sup> , em 28 de julho de 2012; (b) Intensidade da radiação global medida em KW/m <sup>2</sup> pelo TIL38, com o difusor e conectado em paralelo com o resistor shunt, em 28 de julho de 2012.....	63
Figura 30 –	Gráfico tipo espalhamento que compara intensidade da radiação global obtida pelo protótipo em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 28 de julho de 2012 e uma reta que lineariza os pontos do gráfico.....	64
Figura 31 –	Diferença entre os valores da intensidade da radiação global medida pelo CMP3 menos os valores obtidos pelo protótipo, em 28 de julho de 2012.....	66
Figura 32 –	(a) Radiação coletada via sensor CMP3 em KW/m <sup>2</sup> , em 29 de julho de 2012; (b) Intensidade da radiação global medida em KW/m <sup>2</sup> pelo TIL38, com o difusor e conectado em paralelo com o resistor shunt, em 29 de julho de 2012.....	68
Figura 33 –	Gráfico tipo espalhamento que compara intensidade da radiação global obtidas pelo protótipo em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 29 de julho de 2012, e uma reta que lineariza os pontos do gráfico.....	69
Figura 34 –	Diferença entre os valores da intensidade da radiação global medida pelo CMP3 menos os valores obtidos pelo protótipo, em 29 de julho de 2012.....	71
Figura 35 –	(a) Radiação coletada via sensor CMP3 em KW/m <sup>2</sup> , em 30 de julho de 2012; (b) Intensidade da radiação global medida em KW/m <sup>2</sup> pelo TIL38, com o difusor e conectado em paralelo com o resistor shunt, em 30 de julho de 2012.....	72
Figura 36 –	Gráfico tipo espalhamento que compara intensidade da radiação global obtidas pelo protótipo em comparação a	

	radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 30 de julho de 2012, e uma reta que lineariza os pontos do gráfico.....	73
Figura 37 –	Gráfico tipo espalhamento que compara intensidade da radiação global obtida pelo protótipo em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 30 de julho de 2012 pela manhã.....	74
Figura 38 –	Gráfico tipo espalhamento que compara intensidade da radiação global obtida pelo protótipo em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 30 de julho de 2012 pela tarde.....	75
Figura 39 –	Diferença entre os valores da intensidade da radiação global medida pelo CMP3 menos os valores obtidos pelo protótipo, em 30 de julho de 2012.....	76
Figura 40 –	(a) Radiação coletada via sensor CMP3 em KW/m <sup>2</sup> , em 30 de julho de 2012; (b) Intensidade da radiação global medida em KW/m <sup>2</sup> pelo TIL38, com o difusor e conectado em paralelo com o resistor shunt, em 30 de julho de 2012; (c) Diferença entre os valores da intensidade da radiação global medida pelo CMP3 menos os valores obtidos pelo protótipo, em 30 de julho de 2012.....	77



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Exemplo de duas linhas (escolhidas aleatoriamente) da tabela de dados coletados pelo armazenador automático de dados.....	49
Tabela 2 -	Parâmetros calculados a partir da comparação dos dados coletados com o sensor CMP3 e os dados, já convertidos, coletados pelo fotodiodo exposto diretamente a radiação solar com o <i>shunt</i> em 30 de junho de 2012.....	58
Tabela 3 -	Parâmetros calculados a partir da comparação dos dados coletados com o sensor CMP3 e os dados, já convertidos, coletados pelo fotodiodo exposto diretamente a radiação solar com o <i>shunt</i> em 01 de julho de 2012.....	61
Tabela 4 -	Parâmetros calculados a partir da comparação dos dados coletados com o sensor CMP3 e os dados, já convertidos, coletados pelo TIL38 abrigado com o difusor e ligado em paralelo com o <i>shunt</i> em 28 de julho de 2012.....	65
Tabela 5 -	Parâmetros calculados a partir da comparação dos dados coletados com o sensor CMP3 e os dados, já convertidos, coletados pelo TIL38 abrigado com o difusor e ligado em paralelo com o <i>shunt</i> em 29 de julho de 2012.....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS

MB – Viés médio

CNTP – Condições normais de temperatura e pressão

Si – Átomo de silício

Ge – Átomo de germânio

$E_g$  – Diferença energética entre a banda de valência e de condução de um átomo

Sb – Átomo de antimônio

B – Átomo de boro

$V_d$  – Diferença de potencial elétrico entre os terminais de uma fonte de tensão

LED – Diodo emissor de luz

LDR – Resistor variável com a intensidade luminosa

MAGE – Erro do viés médio normalizado

RMSE – Raiz do erro quadrático médio

$R_s$  – Resistor *shunt*

$E_\lambda$  – Irradiância monocromática

## LISTA DE SIMBOLOS

K – Kelvin (unidade de temperatura)

kW – Kilowatts (unidade de potência)

CMP3 – Modelo de piranômetro

TIL38 – Modelo de fotodiodo

m<sup>2</sup> – Metro quadrado (unidade de área)

CR1000 – Modelo de armazenador automático de dados

$\eta m$  – Nanômetro (unidade de comprimento)

°C – Grau Celsius (unidade de temperatura)

eV – Elétron-volt (unidade de energia)

$\mu V W^{-1} m^2$  – Microvolt metro quadrado por watt (unidade de sensibilidade luminosa de um piranômetro)

km – Quilometro (unidade de comprimento)

$\mu m$  – Micrômetro (unidade de comprimento)

$W m^2 \mu m^{-1}$  – Watt metro quadrado por micrômetro (unidade de irradiância monocromática)

kW/m<sup>2</sup> – Kilowatt por metro quadrado (unidade de potência por área)

Hz – Hertz (unidade de frequência)

mV – Milivolt (unidade de tensão elétrica)

$kW m^{-2} mV^{-1}$  – Kilowatt por metro quadrado por milivolt (unidade do *offset*)

TSFF5410 – Modelo de fotodiodo

## LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A – Código de comandos computacionais compatível com GNU octave.....	84
----------------------------------------------------------------------------------	----

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A - <i>Datasheet</i> do fotodiodo modelo TIL38.....	90
Anexo B - <i>Datasheet</i> do fotodiodo modelo TSFF5410.....	91

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>22</b>
2.1 Sólido semicondutores.....	22
2.2 Fotodiodos.....	29
2.3 Piranômetros.....	30
2.4 Radiação solar e a atmosfera terrestre.....	31
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>36</b>
3.1 O corpo do protótipo.....	37
3.2 O difusor.....	41
3.3 A montagem.....	43
3.4 Coleta e armazenamento dos dados.....	44
3.5 Diagrama elétrico.....	46
3.6 TIL38.....	47
3.7 Análise dos dados.....	48
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>50</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>80</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>89</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nesta dissertação apresenta-se a pesquisa e o desenvolvimento de um sensor, com a finalidade de quantificar a intensidade da radiação global incidente na superfície terrestre, através da corrente foto-elétrica gerada por um dispositivo semi-condutor espectralmente seletivo que opera na faixa de comprimento de onda em torno de 940nm.

É de interesse científico quantificar a intensidade da radiação solar que incide na superfície terrestre em determinado local, pois a quantidade dela disponível influencia diretamente a taxa de aquecimento de massas de ar mais rasas e também determina a intensidade de determinada cultura agrícola, assim como a possibilidade da sua implantação e posterior sucesso de colheita.

A substituição de uma estação meteorológica convencional por uma automática propicia alguns benefícios, entre eles a vantagem de dispensar que um indivíduo colete diariamente e manualmente os valores medidos pelos instrumentos, armazenando-os em planilhas, assim, o banco de dados formado por uma estação automática é de mais fácil manuseio e, portanto interpretação.

A precisão dos valores provenientes de uma estação automática também é uma vantagem frente ao método convencional, visto que é possível medir e armazenar uma grande quantidade de variáveis a uma alta frequência e com boa qualidade, o que não acontece no processo convencional de coleta de dados, pois os dados coletados dependem da incerteza associada ao método de leitura, porque estão ligados ao julgamento de um humano.

Também, segundo SUGAWARA (2003), uma estação meteorológica automática apresenta vários benefícios em relação à uma estação convencional, porém é alto o investimento de sua implementação, inviabilizando certas aplicações, como a agrícola. O autor ainda destaca o custo de reposição dos componentes e dos recursos humanos para a manutenção de uma estação meteorológica, o que muitas vezes inviabiliza o uso destas no Brasil.

A partir de ideias semelhantes as de SUGAWARA (2003), surge uma inspiração para a pesquisa, a utilização de materiais e métodos alternativos para a aquisição de dados confiáveis, de forma automatizada e de baixo custo comercial, ou seja, pesquisar o princípio de funcionamento e de produção de

sensores cujo conjunto de componentes seja de baixo custo, boa qualidade, fácil aquisição e de simples e baixa manutenção.

Conforme Thomazini e Albuquerque (2011) dentre os equipamentos utilizados em uma estação meteorológica automática estão os sensores, que são dispositivos sensíveis a alguma forma de energia do ambiente, que pode ser luminosa, térmica ou cinética, e a relacionam com uma grandeza física como: temperatura, pressão, velocidade, corrente elétrica, aceleração, posição, etc.

Para a construção de um piranômetro é necessário um dispositivo sensível à variação da intensidade luminosa, e que converta linearmente essa intensidade luminosa em alguma outra grandeza que seja mais fácil de ser medida, como corrente elétrica ou tensão elétrica. Para tal tarefa propõem-se o emprego de um dispositivo semicondutor, que é sensível a luz, convertendo linearmente intensidade luminosa em corrente elétrica.

Os dispositivos semicondutores são muito atuais e são compatíveis com praticamente todos equipamentos eletrônicos, podendo ser utilizado como indicador luminoso, receptor de sinais luminosos, como diodo retificador de tensão ou até mesmo como um circuito eletrônico complexo constituído em um único encapsulamento<sup>1</sup>, em forma de um *chip*. Um processador de qualquer computador moderno, por exemplo, é constituído de um significativo número de transistores, que é um dos mais básicos componentes fabricados com material semicondutor. Os semicondutores também são encontrados em um grande número de equipamentos que emitem luz, por exemplo, desde qualquer modelo de telefone celular, lanternas, iluminação de circuitos de vigilância e até na iluminação pública.

A grande utilização de semicondutores, em geral, é devido à eficiência dos componentes que utilizam esta tecnologia, por exemplo, um semicondutor emite luz consumindo uma pequena quantidade de energia elétrica, pois o seu rendimento é alto, se comparado à uma lâmpada incandescente, visto que um semicondutor dissipa muito pouca energia na forma de calor. O mesmo ocorre ao comparar as antigas válvulas termoiônicas com os transistores e os modernos circuitos integrados, uma válvula termoiônica dissipa muito mais energia na forma calor que um transistor operando na mesma potência, pois a válvula termoiônica necessita de uma filamento incandescente para gerar elétrons livres vitais ao seu funcionamento.

<sup>1</sup> Encapsulamento: Corpo formado pela união dos materiais que constituem um circuito complexo.



Outra grande vantagem dos semicondutores é a sua vasta gama de modelos, que são relativamente fáceis de encontrar no mercado, o que possibilita a avaliação da intensidade da radiação em várias estreitas faixas de comprimentos de onda, que são próprias de diferentes modelos de componentes semicondutores.

Portanto, a produção de sensores, que possam ser adicionados ou que possam substituir os já utilizados nas estações meteorológicas automáticas, e que possuem as características de baixo custo comercial, devido a utilização de semicondutores e o baixo consumo de energia pode ser considerada uma ideia adequada a fim de fomentar a pesquisa sobre tais componentes.

Ao reunir as informações supracitadas foi desenvolvida esta dissertação, que está organizada como segue: No capítulo 1 a introdução recentemente abordada; No capítulo 2 a revisão bibliográfica, que reúne uma série de textos teóricos sobre os princípios básicos de operação de um fotodiodo, bem como informações sobre o modo de operação de uma estação meteorológica automática e sobre a radiação atmosférica; No capítulo 3 o protótipo, que descreve detalhadamente o processo de fabricação do mesmo expondo importantes informações sobre a obtenção dos materiais básicos e os processos que a deverão ser submetidos a fim de formar o conjunto proposto; No capítulo 4 a análise dos dados, que apresenta as formas de avaliação, ou formas que foram utilizadas, para validar o comportamento do protótipo, bem como uma breve apresentação de alguns parâmetros estatísticos relevantes; No capítulo 5 os resultados que foram obtidos com o protótipo, em comparação ao sensor padrão, onde são aplicados os conceitos dos capítulos 2, 3 e 4; No capítulo 6 as considerações finais que finaliza a presente dissertação expondo uma série de conclusões e itens relevantes sobre os resultados obtidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Sólido semicondutores

Pode ser considerado um sólido, em condições normais de temperatura e pressão (CNT), uma substância em que os átomos não mudam suas posições relativas com o passar do tempo e as moléculas não são consideradas isoladas. Considera-se que a separação das moléculas que constitui um sólido é comparável ao tamanho molecular e a intensidade das forças que as mantêm juntas é da mesma ordem de grandeza das forças que ligam os átomos numa molécula (Eisberg e Resnick, 1988), ou ainda um sólido resiste às tensões de cisalhamento, e sua viscosidade tende ao infinito, em condições normais de temperatura sua forma física não muda.

Os principais componentes utilizados neste estudo são fotodiodos, que são construídos basicamente por duas pastilhas de diferentes sólidos cristalinos semicondutores, encapsuladas por um material eletricamente isolante e transparente ao comprimento de onda da radiação de operação. Portanto, é de fundamental importância o conhecimento sobre os sólidos cristalinos, que em alguns casos, como no dos cristais formados pelos elementos químicos Silício (Si) e Germânio (Ge), a temperatura da ordem das temperaturas encontradas na superfície terrestre (temperaturas entre aproximadamente  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $40^{\circ}\text{C}$ ) são semicondutores intrínsecos.

Boylestad e Nashelsky (1998) definem um condutor, um isolante e um semicondutor em um segmento de texto, da seguinte forma:

“O termo condutor é aplicado a qualquer material que sustenta um fluxo de uso de carga, quando uma fonte de tensão de amplitude limitada é aplicada através de seus terminais.

Um isolante é o material que oferece um nível muito baixo de condutividade sob pressão de uma fonte de tensão aplicada.

Um semicondutor é, portanto, o material que possui um nível de condutividade entre os extremos de um isolante e um condutor.” Boylestad e Nashelsky (1998, p. 2)

Ainda, segundo Boylestad e Nashelsky (1998), um sólido semicondutor age como um isolante e como um condutor, este comportamento dual do semicondutor apresenta características únicas, tornando-o essencial nessa

dissertação pois um semicondutor irá conduzir eletricidade ou não, dependendo das condições em que ele se encontra, como temperatura, exposição a radiação eletromagnética e natureza química da superfície em que esta em contato.

Na temperatura de zero absoluto (0 K) a camada de condução dos átomos que constituem o sólido semicondutor está completamente vazia, diferentemente da camada de valência dos mesmos, que está completamente preenchida, definindo-o como um isolante. Porém o intervalo de energia que separa a camada de condução da camada de valência tem valor, geralmente, menor que 2 elétrons volt (eV), o que possibilita aumentar o número de estados disponíveis na camada de condução, ao passo que a temperatura aumenta, processo este chamado de excitação térmica.

Em um semicondutor o valor máximo, da energia associada a banda de valência é aproximadamente 2 eV menor do que o mínimo valor da banda de energia associada a banda de condução. Essa diferença de energia entre as duas bandas é chamada de “*gap*”, e é representada na Figura 1 em (a) e em (b) como  $E_g$  para um material isolante, um semicondutor e um condutor respectivamente.

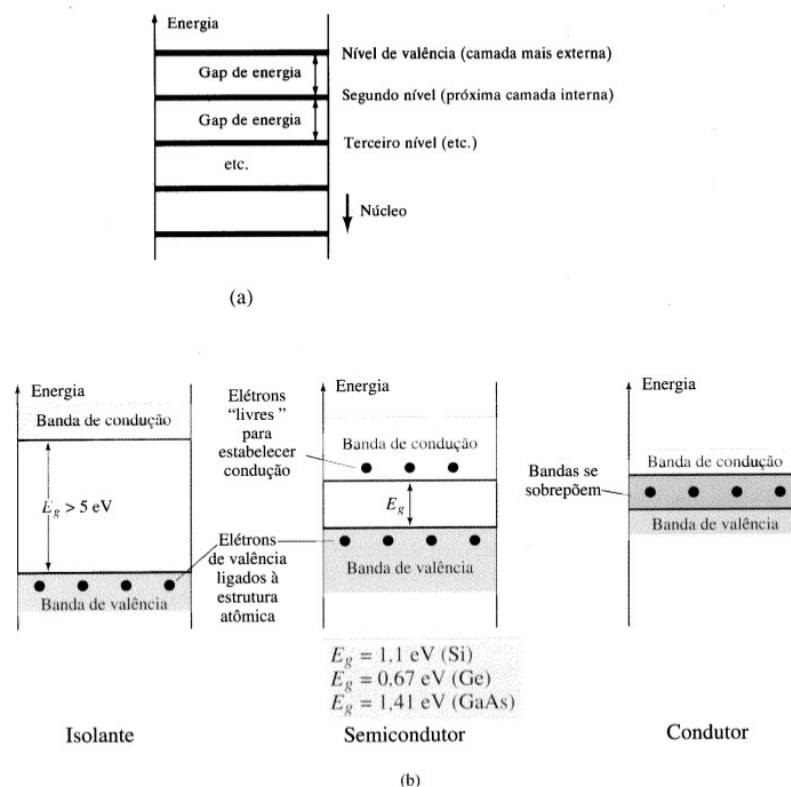


Figura 1 – Níveis de energia. Adaptada de Boylestad e Nashelsky (1999, p. 5).

Um arranjo, em que vários átomos estão unidos em uma rede cristalina, apresenta bandas, essas representam a faixa que compreende os possíveis valores de energia que um elétron, de determinada camada eletrônica de um átomo, pode assumir. Segundo o modelo atômico de Bohr os elétrons de um átomo localizam-se em camadas concêntricas, sendo as duas camadas mais externas são denominadas camada de valência (mais interna) e a camada de condução (mais externa), como representado na figura 2.

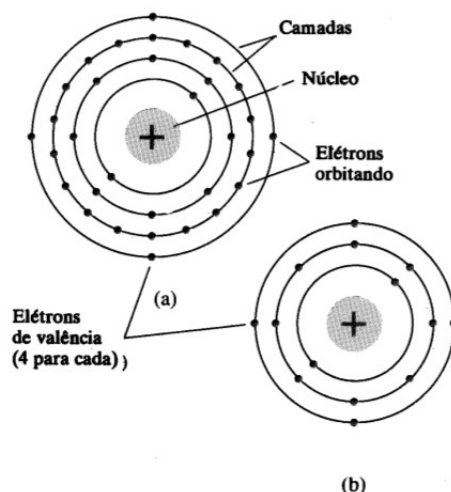


Figura 2 – Estrutura atômica (a) do germânio; (b) do silício. Adaptada de Boylestad e Nashelsky (1999, p. 3).

Um elétron ao passar da camada mais externa (camada de condução) para a mais interna (camada de valência) tem de emitir um fóton, com energia associada de valor igual à do *gap*, e para que este elétron volte para a camada mais externa, deve ser sendo excitado por um fóton com energia associada igual ao valor do *gap*.

Para que um semicondutor conduza eletricidade, de forma menos dependente da temperatura, deve de passar pelo processo de dopagem, em que funde-se pequenas quantidades de algum outro material, constituído especialmente por átomos com tamanho comparável aos átomos que constituem o semicondutor, em uma pastilha de Silício (Si) ou Germânio (Ge). Esse processo produz o chamado *semicondutor extrínseco*, que conduz eletricidade sem necessariamente existir excitação térmica ou luminosa.

Por exemplo, o procedimento de dopagem pode ser executado em um cristal de Si, fundido juntamente uma pequena quantidade de antimônio (Sb). O

átomo de Sb possui cinco elétrons na camada de valência enquanto o Si possui quatro elétrons na camada de valência logo, quatro dos elétrons da camada de valência do Sb serão utilizados para realizar uma ligação covalente com os quatro elétrons da camada de valência do Si, e o quinto elétron da camada de valência do Sb ficará fracamente ligado ao seu núcleo atômico, ou seja, comportando-se similarmente a um elétron pertencente a uma camada de condução, isto pode ser representado como apresentado na Figura 3.

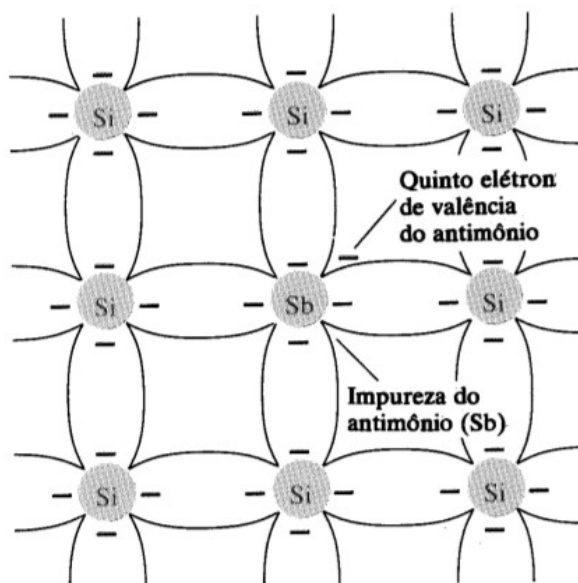


Figura 3 – Impureza de antimônio formando um semicondutor tipo *n*. Adaptada de Boylestad e Nashelsky (1999, p. 6).

Nesse procedimento é criado o semicondutor denominado do tipo *n* (negativo) pelo motivo de apresentar sobra de elétrons (portadores de carga negativa) no processo da ligação covalente.

De forma análoga, ao dopar um cristal de Si com uma pequena quantidade de boro (B), três elétrons da camada de valência do B serão utilizados na ligação covalente com os átomos de Si, logo, como o B apresenta apenas três elétrons na camada de valência, faltará um elétron para completar a ligação covalente.

Portanto ao invés de elétrons sobrando, existirão vacâncias para elétrons, que podem ser consideradas para fins de entendimento, como cargas positivas que podem deslocar-se por toda a extensão do cristal, analogamente aos elétrons do caso do semicondutor do tipo *n*.

Neste procedimento de dopagem é formado o semicondutor do tipo *p*

(positivo), que apresenta um déficit de cargas negativas, uma representação deste tipo de dopagem é apresentado na Figura 4.

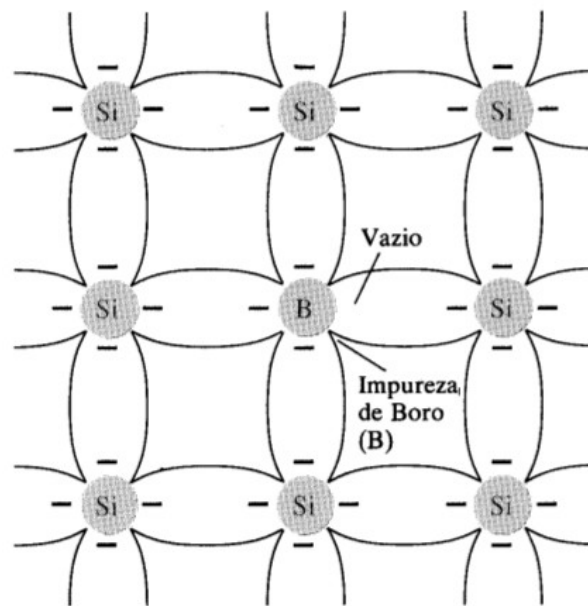


Figura 4 – Impureza de boro formando um semiconductor tipo  $p$ . Adaptada de Boylestad e Nashelsky (1999, p. 6).

Ao colocar em contato duas placas semicondutoras, uma do tipo  $n$  e outra do tipo  $p$ , forma-se uma junção  $p-n$ , onde um número significativo de elétrons fluem da região  $n$  para a região  $p$ , e o mesmo número de vacâncias fluem em sentido contrário ao dos elétrons, de forma a junção atingir o equilíbrio.

Após estabelecido o equilíbrio, entre elétrons e vacâncias, a junção  $p-n$  irá assemelhar-se a um capacitor de placas paralelas, onde a região  $n$  concentrará vacâncias (positivas), muito próximas a região de contato com a região  $p$ , e a região  $p$  concentrará elétrons (negativos), muito próximos a região de contato com a região  $n$ .

Porém existirá um fluxo interno de elétrons e vacâncias, que é mantido pela excitação térmica. Onde eventualmente elétrons da região  $p$  adquirem energia suficiente para fluir para a região  $n$ , que nesse caso gera a denominada *corrente térmica*.

Ao mesmo tempo, elétrons da banda de condução da região  $n$  também podem adquirir certa quantidade de energia, de forma aleatória, que possibilita fluírem para a região  $p$ , contrabalanceando com a corrente térmica, esse fluxo de elétrons é chamado de *corrente de recombinação*.

As propriedades da corrente térmica e da corrente de recombinação

explicam como que a corrente elétrica pode percorrer a junção apenas com um sentido definido. Isso caracteriza a junção  $p-n$  como um diodo, que tem a propriedade de somente conduzir eletricidade com a corrente elétrica de determinada sentido.

Segundo Boylestad e Nashelsky, para o entendimento do funcionamento de uma junção  $p-n$ , deve ser assumido que todas as vacâncias que encontram-se na região  $n$ , vão passar devido a seus movimento randômicos diretamente para a região  $p$ . O mesmo deve ser assumido para os elétrons da região  $p$ , eles irão passar para a região  $n$  pelo mesmo motivo apresentado anteriormente.

O funcionamento da junção  $p-n$  como um diodo pode ser explicado, primeiramente com o auxilio da Figura 5, nela é possível ver uma ilustração dos elétrons na junção  $p-n$  em uma *polarização reversa*, que é defina como a forma que que aplicado um potencial elétrico, de  $V_D$  volts, de forma que há somente uma pequena corrente percorrendo o circuito.

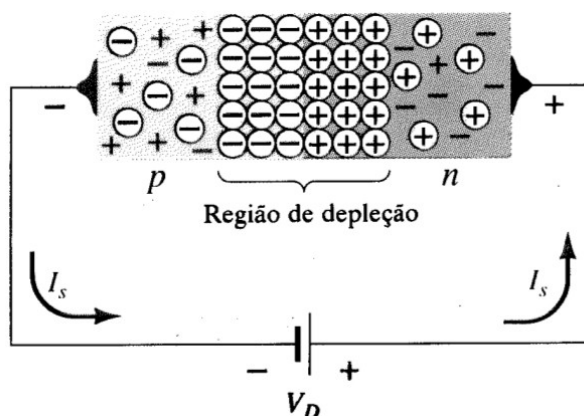


Figura 5 – Junção  $p-n$  em uma polarização inversa, comportando-se como um isolante. Adaptada de Boylestad e Nashelsky (1999, p.8).

Na Figura 5 o terminal positivo de uma fonte de tensão contínua é ligado a região  $n$ , e o terminal negativo é ligado na região  $p$ , e isso faz com que os íons doadores (representado como círculo com sinal positivo no interior), que são os átomos que apresentam sobra de um elétron no processo de dopagem, se acumulem na região de depleção devido ao movimento dos elétrons, assim como os íons aceitadores, que são os átomos que precisariam de um elétron para completar a ligação covalente ocorrida no processo de dopagem.

O acúmulo íons na região de depleção faz com que aumente a *barreira de potencial*, que é responsável por dificultar a passagem de elétrons da região  $p$  para a região  $n$ , pois os elétrons são repelidos pela força eletrostática gerada

pelos íons de carga negativa. Isso faz com que a junção  $p-n$  comporte-se como um isolante na configuração de polarização reversa.

Já a *polarização direta*, representada na Figura 6, é a configuração em que o terminal positivo de uma fonte de tensão contínua é ligado a região  $p$ , e o terminal negativo é ligado na região  $n$  da junção  $p-n$ , aplicando uma diferença de potencial de  $V_D$  volts entre os extremos da junção.

Isso faz com que sejam injetados elétrons na região  $n$  (ou vacâncias na região  $p$ ), os elétrons irão recombinar-se com os íons doadores e as vacâncias irão recombinar-se com os íons aceitadores.

Assim é diminuída a barreira de potencial existente na região de depleção (Figura 6), o que possibilita a passagem de elétrons na direção e sentido imposta pela diferença de potencial aplicada.

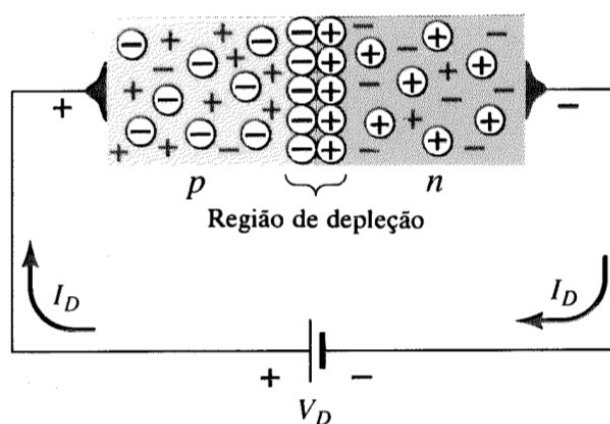


Figura 6 – Junção  $p-n$  em uma polarização direta, comportando-se como um condutor. Adaptada de Boylestad e Nashelsky (1999, p.9).

Portanto, na polarização direta a junção  $p-n$  comporta-se como um condutor. Assim o comportamento da junção  $p-n$ , com relação ao sentido da corrente elétrica que pode percorrê-la, é fundamental para este estudo, pois com o auxílio da mesma obtém-se corrente elétrica com apenas um sentido.

Quando uma junção  $p-n$  é exposta à luz os elétrons presentes na camada de valência da região  $n$  absorvem uma quantidade de energia bem definida proveniente dos fótons de luz, e isto faz com que fiquem praticamente livres, comportando-se como os elétrons injetados na polarização direta descrita anteriormente, ou seja, fluindo para a região  $p$ , devido à característica do semicondutora do diodo apresentada anteriormente.

Isso fará com que exista uma diferença de potencial elétrico, entre as extremidades da junção  $p-n$ , associada a incidência de fótons na região  $n$ .



## 2.2 Fotodiodos

Um diodo emissor de luz é chamado de fotodiodo ou de LED (*Light Emitting Diode*). Eles são dispositivos que contêm uma junção *p-n* visualmente exposta, pois o encapsulamento é feito de material transparente ao comprimento de onda em que o respectivo fotodiodo opera. O encapsulamento geralmente é produzido com algum material acrílico que é altamente resistente a choques físicos, garantindo grande proteção contra acúmulo de umidade no seu interior, mantendo suas propriedades ópticas por grandes períodos, não oxida, é leve e garante um bom acabamento.

Para esta dissertação foi escolhido o fotodiodo emissor de infravermelho modelos TIL38 (*datasheet* no anexo A), fabricado pela Fairchild Semiconductor que, segundo o fabricante, opera com radiação eletromagnética de comprimento de onda entre  $915\text{ nm}$  e  $975\text{ nm}$ , com valor típico de funcionamento em  $940\text{ nm}$  e a temperatura de operação de  $-55^{\circ}\text{C}$  até  $100^{\circ}\text{C}$ .

Durante este estudo, foi considerado o valor típico do comprimento de onda de operação dos fotodiodos, pois ele representa o comprimento de onda que é emitido, ou absorvido, em maior intensidade pelo fotodiodo, podendo ser observado este comportamento no *datasheet* anexado neste estudo.

A radiação eletromagnética com comprimento de onda em torno de  $940\text{ nm}$  (valor típico de funcionamento do fotodiodo modelo TIL38) proveniente do Sol, chega até a superfície terrestre diminuída de uma certa quantidade, que foi atenuada devido a existência de uma quantidade de vapor d'água e de aerossóis na atmosfera.

Porém, durante este estudo foi realizada uma tentativa de estimar o teor de água precipitável presente na atmosfera através do fotodiodo modelo TIL38 operando em conjunto com o fotodiodo modelo TSFF5410 (anexo B), conforme os trabalhos de Mims [2002] e Haag [2007]. Esperava-se que o funcionamento deste conjunto operasse semelhantemente ao sensor MODIS que equipa os satélites aqua e terra. O sensor MODIS estima o teor de água precipitável através da atenuação da radiação eletromagnética com comprimento de onda em torno de  $940\text{ nm}$ , semelhantemente deveria de ser o funcionamento do TIL38 em conjunto com o TSFF5410. Porém não foi encontrada nenhuma correlação entre

os dados obtidos pois o TIL38 não é tão seletivo quanto o sensor presente no MODIS, ou seja a largura da banda de comprimentos de onda que sensibilizam o TIL38 é maior que a do MODIS.

### 2.3 Piranômetros

Os piranômetros tem por característica apresentar uma superfície sensível a luz exposta ao Sol. Esta superfície sensível deve alterar suas características linearmente com a variação da intensidade da radiação, como exemplos a resistência elétrica, temperatura, variação da tensão ou da corrente elétrica gerada pela incidência de luz solar.

Segundo Naziazeno (2009, p.27) “Os primeiros piranômetros que indicam as referências datam da década de 20 do século passado.” e, como o modelo produzido por Kimball-Hobbs, operava a partir das diferentes temperaturas geradas por duas diferentes superfícies expostas ao Sol. Uma das superfícies era recoberta por uma camada de óxido de magnésio e tinha por característica ser um bom refletor e a outra superfície era recoberta por uma camada que não refletia a radiação solar. Devido as diferenças de reflexão as superfícies aqueciam de forma diferente possibilitando correlaciona-las com a intensidade da radiação solar total.

Atualmente os modelos de piranômetros são muitos, vários modelos de diferentes fabricantes e baseados em diferentes técnicas. Alguns operando de forma semelhante ao modelo de Kimball-Hobbs e outros utilizando novas tecnologias, como os produzidos com semicondutores e com LDR (*Light Dependent Resistor*) que são resistores dependentes da intensidade da radiação luminosa.

O piranômetro utilizado como referencia nesta dissertação é um CMP3 produzido pela Kipp&Zonen (Figura 7), ele foi responsável por medir a intensidade da radiação global para a validação do protótipo proposto nesta dissertação. Segundo o fabricante o piranômetro CMP3 possui uma sensibilidade de  $5\mu V W^{-1} m^2$  à  $20\mu V W^{-1} m^2$  e um tempo de resposta à 95% menor que 18 segundos.



Figura 7 – Fotografia do piranômetro CMP3 utilizado nesta dissertação como padrão.

Esse piranômetro possui uma baixa dependência com o ângulo de incidência dos raios solares, o que é fundamental para medir a radiação global, pois a radiação difusa que incide de todas as direções também deve ser medida. Esta independência com o ângulo de incidência é um procedimento que deve ser levado em consideração na produção de um sensor de radiação global, pois alguns sensores possuem uma geometria semelhante a de uma lente, que faz com que a radiação direta influencie fortemente a medida ao passo que mude o ângulo de incidência.

## 2.4 Radiação solar e a atmosfera terrestre

O Sol detém grande parte da massa do sistema solar, basicamente é composto do gás hidrogênio (cerca de 74% da sua massa) que em um constante processo de fusão nuclear forma átomos do gás hélio e libera energia. A energia liberada no processo de fusão nuclear é responsável por aquecer a fotosfera em torno de  $5,8 \times 10^3 K$ , já o núcleo possui uma temperatura cerca de  $10 \times 10^6 K$  que é a região onde ocorre o processo de fusão.

Devido a fotosfera, que é a camada visível do Sol, ter uma temperatura cerca de  $5,8 \times 10^3 K$  ela comportar-se aproximadamente a um corpo negro que emite radiação eletromagnética a mesma temperatura, pode-se explicar o comportamento dela de acordo com o gráfico apresentado na Figura 8.

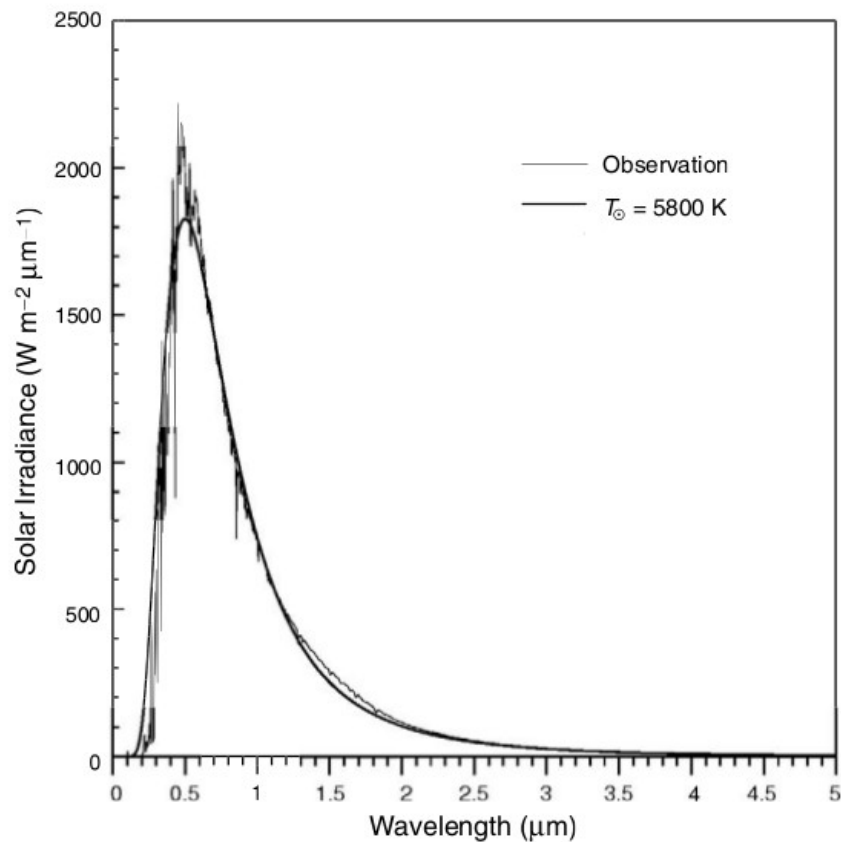


Figura 8 – Gráfico da Irradiância solar, medida em Watts por metro quadrado, em função do comprimento de onda em micrômetros. Adaptada de Liou (2002, p.55)

De acordo com Naziazeno (2009), é possível comparar a irradiância em função do comprimento de onda de um corpo negro emitindo radiação a uma temperatura de  $5,8 \times 10^3 K$  e a irradiância em função do comprimento de onda emitido pela fotosfera, nota-se que a representação da irradiância do corpo negro é representada por uma curva tal a representação de Plank para um corpo negro com temperatura de  $5,8 \times 10^3 K$ , porém a representação da irradiância produzida pela fotosfera apresenta-se rugosa frente a uma distribuição de Plank, revelando emissões maiores e menores que as esperadas para determinados comprimentos de onda.

Já na atmosfera terrestre onde, após a radiação proveniente da Sol percorrer cerca de  $1,499 \times 10^8 Km$  pelo vácuo entre o Sol e a Terra, a radiação eletromagnética é absorvida reemitida e/ou espalhada, dependendo das

condições atmosféricas e do comprimento de onda da radiação. Estes fenômenos ocorrem devido à presença de determinados componentes atmosféricos como o ozônio, o vapor d'água, gás carbônico, metano e aerossóis.

Algumas exemplificações são feitas através das Figuras 8, 9 e 10. A Figura 9 mostra os possíveis processos que a atmosfera pode impor à radiação solar que a percorre, a Figura 10 mostra a porcentagem de atenuação atmosférica que ocorre com alguns dos principais gases presentes na atmosfera, bem como a Figura 8 e a Figura 11 mostra a intensidade da radiação solar no topo da atmosfera, em comparação com a que incide na superfície terrestre. A Figura 11 ainda divide a atenuação em duas parcelas, uma mostra a atenuação devido ao retroespalhamento causado pelos aerossóis, nuvens e moléculas de ar, e é representado pela área não hachurada, já as parcelas hachuradas representam a parcela absorvida pelos principais gases atmosféricos.

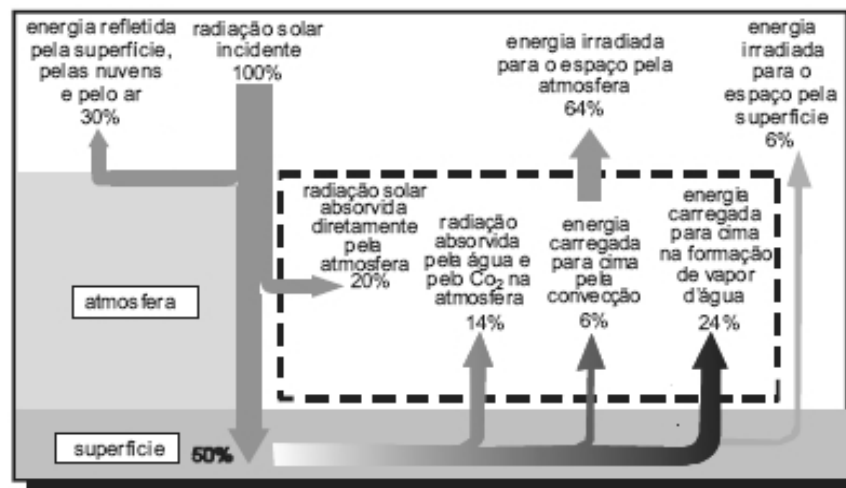


Figura 9 – Possíveis processos impostos a radiação proveniente do Sol ao atravessar a atmosfera. Adaptado de Raymong A. Serway e John W. Jewett, (2004, p.18)

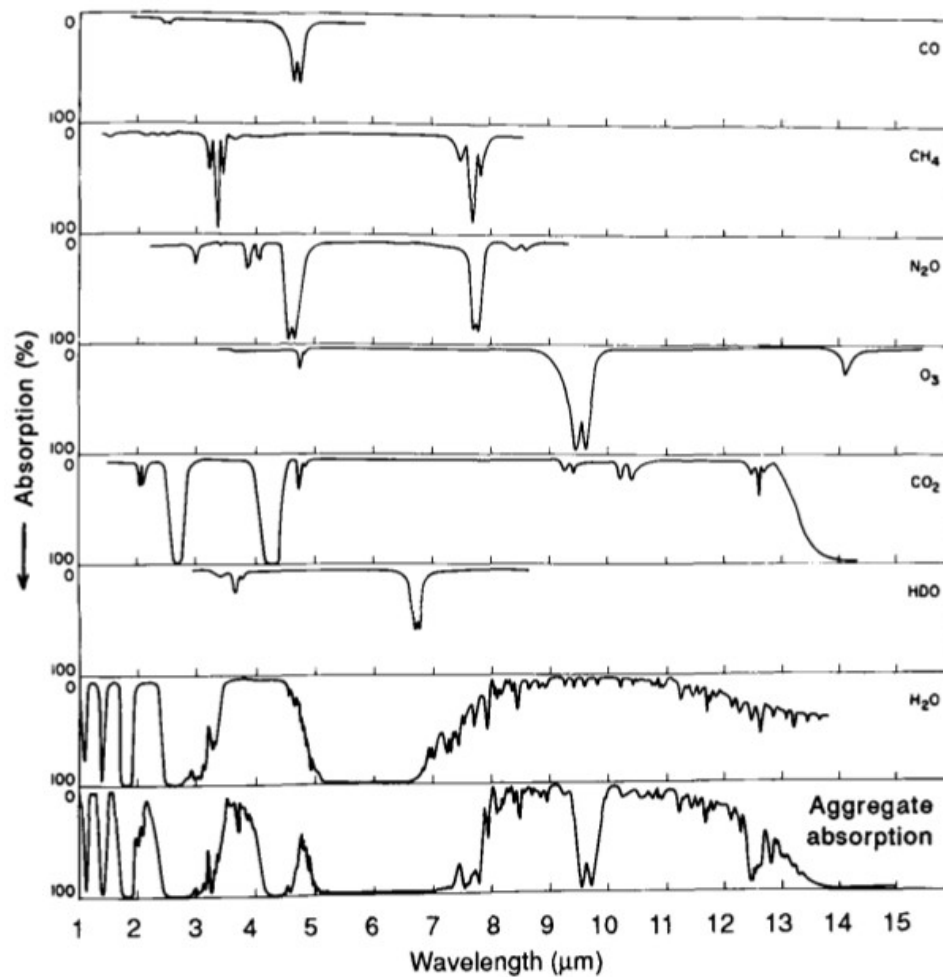


Figura 10 – Gráfico da atenuação percentual por parte de diferentes componentes atmosféricos da radiação solar ao atravessar a atmosfera, em função dos comprimentos de onda . Adaptada de Hartmann (1994, p.48)

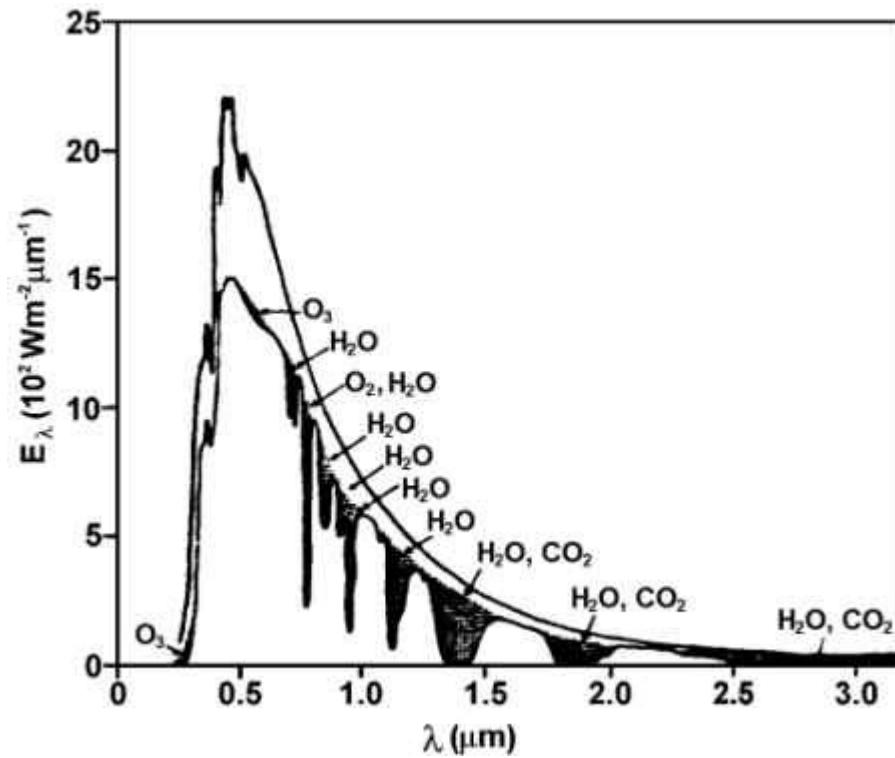


Figura 11 – Radiação em  $\text{KW}/\text{m}^2$  em função do comprimento de onda em micrômetros que alcança perpendicularmente o topo da atmosfera terrestre, apresentado juntamente com a radiação que atinge a superfície.

Fonte: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-7.html>, acesso em 01 fev. 2014

### 3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para guiar essa pesquisa, em busca de bons resultados (fisicamente aceitáveis), utiliza técnica de comparação de desempenho entre o protótipo proposto e um piranômetro padrão.

Para conhecer o comportamento do protótipo frente um sensor renomado por uma boa qualidade de obtenção de dados utilizou-se um piranômetro CMP3 fabricado pela Kipp & Zonen dentro do prazo de validade da calibração, cuja confiabilidade, sobre o correto funcionamento, é renomada no meio científico.

Contudo, deve-se atentar para a forma de como comparar o desempenho do protótipo, através dos dados por ele mensurados, com os dados mensurados pelo sensor CMP3. A técnica utilizada para realizar essa comparação foi via estimativa dos parâmetros estatísticos, a saber, viés médio, erro do viés médio normalizado e raiz do erro quadrático médio.

A metodologia de análise dos dados experimentais adotada consiste em estimar os parâmetros estatísticos MAGE, RMSE e MB obtidos através do processamento dos dados feito com o *software GNU octave* que rege o procedimento de operações matemáticas que o computador deve seguir ao operar um grande conjunto de informações, fornecendo como resultado, os valores dos parâmetros acima citados. Este processo agiliza o trabalho, pois é inviável processar manualmente a quantidade de valores gerada por dois sensores fornecendo uma leitura por segundo, considerando que é exigido um conjunto de representações gráficas que possibilite a avaliação do sistema destes valores e os parâmetros estatísticos acima informados.

O viés médio, abreviado por MB (*Mean Bias*), representa o quanto as medidas coletadas com o protótipo de sensor são subestimadas ou superestimadas, fornecendo um indicativo do comportamento para longos períodos de coletas contínuas de dados. O erro do viés médio normalizado, abreviado por MAGE (*Mean Absolute Gross Error*) indica a incerteza associada a cada medida única. Já a raiz do erro quadrático médio abreviada por RMSE (*Root Mean Square Error*) indica como os valores medidos se aproximam individualmente dos valores considerados como padrão.

Será realizada uma avaliação visual dos dados, aplicando o método da regressão linear (NETER et. al., 1985), expondo em um gráfico de espalhamento



(*scatterplot*) os dados obtidos pelo protótipo em função dos obtidos pelo sensor padrão.

Para um correto funcionamento do protótipo o gráfico tipo espalhamento deverá mostrar pontos próximos de uma reta e o coeficiente angular da reta deve ter valor igual ou muito próximo de 1, indicando que os valores coletados simultaneamente pelo sensor CMP3 e pelo protótipo são iguais. Pontos que distanciam-se da reta, de coeficiente angular igual a um, indicam que os valores simultâneos obtidos através de sensor padrão e do protótipo são desiguais, e quanto maior a distância entre o ponto e a reta maior a discrepância entre os dados, isto indicaria um despropósito na validação para a utilização do protótipo.

### **3.1 O corpo do protótipo**

O fotodiodo e demais componentes internos e ativos do sistema proposto são tolerantes à intempéries, como exemplo se expostos a umidade e pequenos choques mecânicos ainda assim apresentam uma pequena vida útil, portanto situações como a exposição por longos períodos a condições extremas de umidade podem causar a oxidação dos terminais do fotodiodo e das conexões metálicas utilizadas como condutores de eletricidade. Sucessivos choques mecânicos ou de grande intensidade podem danificar os contatos elétricos rompendo-os. O sensor também deve ser rígido para não deformar-se ou mudar sua posição em relação ao solo, ele também deve garantir a fixação do sistema como um todo, garantindo que o fotodiodo, o resistor e o difusor não se desalinhem ou desconectem-se.

O corpo do protótipo deve garantir uma condição de fixa-lo firmemente a torre ou ao pedestal que irá o suportar por longos períodos, o corpo do protótipo também deve possuir um sistema que possa ser facilmente utilizado para deixá-lo com a perfeitamente nivelado com o plano horizontal, a fim de realizar medidas independentes do ângulo de incidência. O corpo do protótipo, por estar exposto diretamente ao sol, deve ser um bom condutor de calor para evitar um superaquecimento bem como deve resistir a temperaturas da ordem das já medidas na superfície terrestre. O ideal é que o corpo do protótipo tenha uma superfície refletora, que atue de forma que a incidência de radiação solar produza uma pequena variação na temperatura do sistema como um todo.

Segundo Camacho et. al (2004) ao passo que a temperatura aumenta, o *gap* do material semiconductor diminui, o que é um efeito conhecido dos semicondutores, assim o comprimento de onda de operação muda, tendendo a aumentar de acordo com o aumento da temperatura. O autor supracitado também apresenta dados mostrando que com o aumento da temperatura a fotocorrente também aumenta, para um acréscimo de 50 °C a fotocorrente, do LED por ele avaliado aumenta em  $1.5 \mu A$ . Ainda de acordo com Camacho et. al (2004) seria interessante implementar uma correção numérica dependente da temperatura ambiente ou ainda projetar um controlador da temperatura interna do conjunto para prevenir temperaturas acima de 50 °C.

Foram realizados alguns testes, dentre eles um período com o fotodiodo diretamente exposto, outro período conectado com um resistor *shunt* em paralelo e por fim com um simples cilindro de náilon, servindo como difusor e de corpo do protótipo do conjunto (Figura 12). Na última atualização realizada neste período de testes foi produzido um corpo do protótipo de alumínio fundido, proveniente de dois pistões da sucata de um motor diesel de combustão interna, que foi cortado e torneado em um torno mecânico, conforme mostram as fotografias das Figuras 13 e 14. Este corpo do protótipo foi dividido em três partes, uma base que contém três parafusos que servem para fixar o sensor na torre e para nivelar o sensor, um invólucro mediano que fixa o fotodiodo e o difusor, e o difusor que além da sua função primária em um sensor de radiação global serve também como uma tampa que impede a entrada de água para dentro do corpo do protótipo do sensor.



Figura 12 – Fotografia do primeiro protótipo mostrando o fotodiodo encapsulado por um difusor de náilon, formando um simples chassis.

O alumínio foi escolhido por ser um bom condutor de calor, perfazendo um dos requisitos anteriormente descritos ao manter o fotodiodo dentro dos limites prescritos pelo fabricante, posteriormente o corpo de alumínio foi pintado com uma tinta que conferia um aspecto espelhado, refletindo grande parte da radiação que incide no sensor conforme exibido na Figura 15, assim fica diminuída a variação de temperatura do conjunto devido ao aquecimento natural pela inevitável exposição à luz solar.



Figura 13 – Fotografia de um pistão inteiro (à esquerda da imagem) juntamente com outro semelhante já cortado em duas parcelas, uma que foi descartada e à direita a parte superior do pistão em processo de usinagem final.



Figura 14 – Vista externa do corpo do protótipo, aberto em duas partes, à esquerda está a base, com três parafusos de fixação semi-apertados, e à direita a parte superior, já com o difusor (parcela circular branca no centro) selado no local definitivo.

O material utilizado também apresenta uma boa resistência mecânica, é de fácil moldagem através de simples processos de serralheria, além de ser pouco denso, o que confere ao conjunto uma massa relativamente pequena que facilita o manuseio, estas características já são amplamente conhecidas, tanto que o mesmo material é amplamente utilizado na indústria automobilística e principalmente na aeronáutica, onde a maior parte das fuselagens são produzidas utilizando tubos de alumínio.





Figura 15 – Corpo do protótipo pintado e já instalado no local de testes.

### 3.2 O difusor

O objetivo de construir um sensor de radiação global é a produção de um aparelho sensível à radiação direta e difusa. A radiação direta é a que percorre a atmosfera em um caminho reto entre o sensor e o Sol, o que caracteriza medidas da radiação direta é a exclusão da parcela difusa, que é a parcela da radiação solar que foi refletida, espalhada ou reemitida em diversas direções. A radiação difusa é a responsável por iluminar regiões que não recebem luz diretamente do Sol, como exemplo abaixo do dossel de uma densa floresta, ou no interior de uma residência coberta.

Para medir a radiação direta e difusa é necessário um aparato entre o fotodiodo e a atmosfera, pois a forma do fotodiodo tem uma simetria semi-esférica que atua como uma lente, como exibido na Figura 16. Esta lente, ao passo que o Sol muda sua posição em relação ao plano onde está instalado o sensor, faz com que os raios solares convirjam ou não sobre a placa semicondutora dependendo da hora e da data em que os dados são coletados. Numa condição como a descrita, o fotodiodo hora irá medir apenas a radiação

difusa e hora irá medir a radiação direta com grande intensidade, e esta condição de operação deve ser evitada.

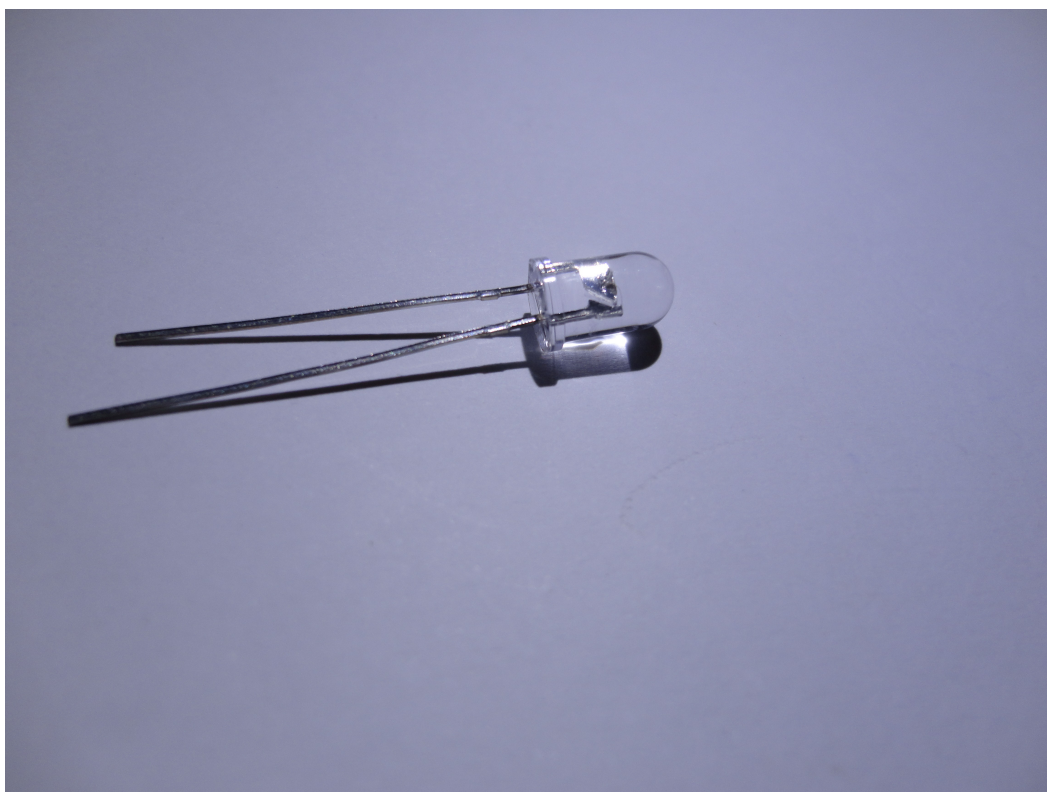


Figura 16 – Fotografia de um fotodiodo modelo TIL38, mostrando a parcela semi-esférica superior, em oposição aos dois terminais metálicos.

A solução adotada para tal problema é a implementação de uma superfície plana entre o fotodiodo e a atmosfera, isolando as laterais do fotodiodo de entrada de radiação difusa. A superfície em questão foi denominada difusor, composto de um disco de náilon, com 1 cm de espessura e de diâmetro suficientemente maior que o diâmetro do fotodiodo. Visto por fora do corpo do protótipo, o difusor é uma superfície menor esbranquiçada, por dentro da câmara que aloja o fotodiodo, devido ao difusor, a luz solar é vista sem um ponto extremamente brilhante que se move constantemente como ocorre ao olhar diretamente para o Sol no céu, ou seja, no interior do corpo do protótipo que aloja o fotodiodo existe somente uma fonte de luz, o difusor.

Em suma o difusor fornece luz ao fotodiodo com uma intensidade independente da posição solar e de forma que um único sensor (o fotodiodo) pode medir a radiação global e difusa.

### 3.3 A montagem

Inicialmente o projeto visava o menor custo possível e o menor número de componentes, primando pela simplicidade, praticidade e baixo custo, porém ao avaliar o comportamento de um fotodiodo diretamente exposto ficou claro que seria uma opção inválida, visto a sua resposta frente a radiação direta. Nesse ponto fez-se necessário a utilização do difusor para atenuar as bruscas variações causadas pela geometria do fotodiodo e a sua resposta a radiação direta. Ao avaliar o comportamento do novo conjunto, fotodiodo mais difusor, houve um novo problema. Como o projeto inicial visava o menor número possível de componentes, o armazenador automático de dados atuava como um voltímetro, e media apenas a tensão elétrica entre os terminais do fotodiodo modelo TIL38. Acreditava-se que a tensão gerada seria pequena, e que o fotodiodo operasse com uma grande margem de sobra.

Um fotodiodo é um emissor de radiação eletromagnética com comprimento de onda de  $940\text{ nm}$  e não há informações fornecidas pelo fabricante de seu comportamento como sensor absorvedor de radiação eletromagnética. O fotodiodo operando como sensor, ao ser iluminado com uma baixa intensidade de radiação eletromagnética, o faz atingir uma diferença de potencial entre seus terminais que permanece constante até que a radiação novamente baixe sua intensidade a níveis extremamente baixos. Para Haag (2007) esse comportamento é análogo ao de uma célula fotovoltaica de silício, e para obter uma resposta da tensão linearmente dependente da intensidade da radiação deve-se fazer com que o fotodiodo opere em uma faixa próxima do curto circuito. Ao expor o fotodiodo a radiação solar e medir sua tensão notou-se que, ao amanhecer com baixa intensidade de radiação, em poucos instantes ele atingiu determinada tensão e estabilizou nela até o entardecer, onde a tensão voltou a decrescer até o anoitecer.

O comportamento do TIL38, discutido no paragrafo anterior, foi exatamente como previsto por Haag (2007) e a solução para o problema é a ligação de uma resistência *shunt* conforme apresentado na Figura 17.

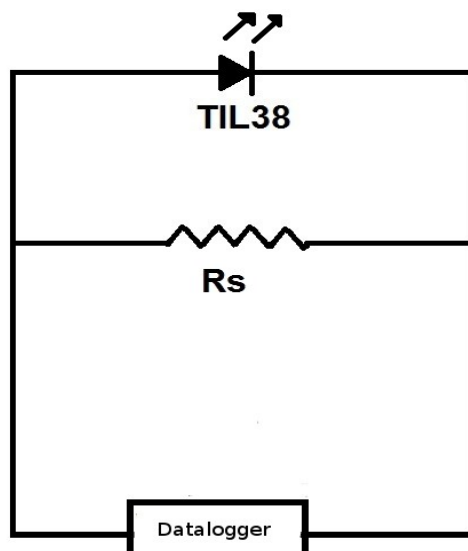


Figura 17 – Esquema de um fotodiodo modelo TIL38, conectado em paralelo com um resistor *shunt* ( $R_s$ ), o *datalogger* representa o armazenador automático de dados e atua em conjunto com o resistor *shunt* de forma a estimar a corrente fotoelétrica que gerada pelo fotodiodo.

Adotado o esquema tal como na Figura 17, o armazenador automático de dados (*datalogger*) irá atuar como um amperímetro, que conceitualmente mede a taxa de portadores de carga que percorrem o fotodiodo TIL38. Medir a corrente elétrica que percorre o TIL38 é equivalente a medir a corrente fotoelétrica que segundo a teoria do efeito fotoelétrico é proporcional aos fótons capazes de arrancar elétrons de determinada superfície, no caso a do semiconductor. Também de acordo com a teoria fotoelétrica, a intensidade da corrente fotoelétrica depende unicamente da taxa de fótons que incidem na superfície em estudo, assim, se é considerado que a taxa de incidência dos fótons é diretamente proporcional à intensidade da radiação, resulta que a corrente elétrica que percorre o resistor *shunt* é linearmente proporcional à intensidade da radiação que incide no fotodiodo.

### 3.4 Coleta e armazenamento dos dados

Como mencionado anteriormente, o grande diferencial em uma estação meteorológica automatizada é a forma com que os dados são medidos e armazenados. Na pesquisa aqui descrita, utilizou-se um armazenador automático de dados, apresentado na Figura 18, que é um registrador automático de dados, sendo este um aparelho eletrônico que pode monitorar vários instrumentos ao



mesmo tempo, medindo, convertendo e armazenado as grandezas indicadas pelos sensores. O modelo do armazenador automático de dados utilizado é um CR1000 (fabricado pela *Campbell Sci.*).



Figura 18 – Fotografia de um armazenador automático de dados modelo CR1000, produzido pela *Campbell Sci.*

A vantagem do uso de um armazenador automático de dados é a frequência com que os dados são coletados. Neste estudo, utiliza-se frequência de 1Hz, ou seja, uma medida armazenada referente a cada sensor por segundo.

O intervalo de tempo entre uma medida e outra influencia a qualidade do processo de validação de qualquer estudo empírico pois, quanto mais medidas tem-se de determinado evento, melhores serão as condições de compreendê-lo.

A utilização de um armazenador automático de dados é necessária, pois ao adotar uma frequência de coleta de 1Hz, ao longo de 24 horas a quantidade de dados coletados é relativamente alta, tornando-se inviável a medição e armazenagem dos mesmos por métodos convencionais.

Para a validação dos dados obtidos pelo TIL38 foram posteriormente escolhidos períodos de grande variabilidade da intensidade da radiação incidente, ou seja, dias que apresentaram nuvens esparsas, apresentando uma situação em que ocorreriam períodos de intensa radiação e períodos parcialmente nublados.

Assim, além de verificar a linearidade dos dados coletados, também seria possível verificar o tempo de resposta apresentado pelo fotodiodo.

### 3.5 Diagrama elétrico

Na seção anterior foi brevemente relatado o resistor *shunt*, figura 17, porém a única informação obtida sobre seu funcionamento foi encontrada no texto de Haag (2007), que afirma sobre a necessidade do fotodiodo operar próximo a um curto circuito, por isso entende-se que a resistência do resistor *shunt* deve ser pequena, porém surge a questão: Quão pequeno é o valor da resistência do resistor *shunt* que deve ser conectado ao fotodiodo TIL38 para este trabalhar próximo a região de curto circuito?

Esta pergunta foi respondida por exaustivas tentativas realizadas para determinar o valor da resistência, que melhor se adaptaria ao conjunto. O valor desta resistência não poderia ser muito grande, pois o fotodiodo atingiria facilmente a tensão de estabilização, nem muito pequena, pois o fotodiodo não geraria uma fotocorrente associada a um sinal de tensão que estivesse dentro dos parâmetros mínimos de tensão elétrica legíveis pelo armazenador automático de dados. Para este processo foram realizados testes com duração de um dia, em que era instalado um resistor ao amanhecer e ao fim do dia o comportamento da tensão era avaliado a fim de verificar se o conjunto não havia alcançado a tensão de estabilização.

No final deste processo foi encontrado um valor para a resistência elétrica que adaptou-se ao propósito, porém o cabeamento utilizado mostrou-se ineficaz, e suscetível à falhas pois ao utilizar cabos sem uma blindagem eletrostática, que é uma malha metálica ligada ao aterramento que envolve os condutores principais, existe a possibilidade de surgirem ruídos no sinal elétrico que percorre o cabeamento entre o sensor e o armazenador de dados. Para sanar este ponto de possível interferência, foi utilizado um cabo coaxial em que a malha era conectada ao terminal negativo do armazenador automático de dados e ao aterramento do sistema ao mesmo tempo, a ligação interna do armazenador automático de dados também segue a mesma configuração em que o negativo do sistema é conectado ao aterramento, bem como o corpo do protótipo metálico. Assim são reduzidas as chances de ruídos eletrostáticos gerados por sistemas que operam radiofrequências ou à altas tensões nas proximidades do protótipo.

### 3.6 TIL38

O fotodiodo modelo TIL38 utilizado é fabricado pela Fairchild Semiconductor, segundo o fabricante este opera emitindo radiação eletromagnética com a máxima intensidade em  $940\text{nm}$  e os mínimos são em  $915\text{nm}$  e  $975\text{nm}$  assim, o TIL38 emite radiação eletromagnética na faixa dos comprimentos de onda entre  $915\text{nm}$  e  $975\text{nm}$  e a maior intensidade é nos  $940\text{nm}$ . Nos  $940\text{nm}$  existe uma forte atenuação da radiação ao percorrer uma atmosfera úmida, pois este comprimento de onda é um dos absorvidos pelo vapor d'água, como pôde ser visto na Figura 11, se a leitura fosse feita no comprimento de onda de  $940\text{nm}$  o piranômetro projetado mediria a radiação global dependente do vapor d'água atmosférico, e assim, para seu correto funcionamento, necessitaria de uma correção por meio de algum algoritmo matemático que envolveria medidas de outros sensores.

Envolver a medida de outros sensores inviabilizaria a produção deste protótipo pois a necessidade de outro sensor encarece o conjunto final, assim não oferecendo vantagens a implementação do sensor aqui proposto. Porém segundo autores como Miyazaki et. al (1998) e Camacho et. al (2004) o comprimento de onda típico de absorção de diferentes fotodiodos é menor do que o comprimento de onda de emissão. Camacho et. al (2004) mostra que um fotodiodo que emite radiação eletromagnética com comprimento de onda de  $940\text{nm}$  responde com uma maior fotocorrente se iluminado com radiação eletromagnética difusa de comprimento de onda próximo de  $915\text{nm}$ , já Miyazaki et. al (1998) mostrou em seu estudo que um LED azul que emite radiação eletromagnética com comprimento de onda de  $440\text{nm}$  possui uma maior resposta, como receptor, para radiação com  $350\text{nm}$  de comprimento de onda.

O fotodiodo modelo TIL38 também apresenta a característica anteriormente descrita, pois ela é própria dos semicondutores. Segundo Camacho et. al (2004) quando um semicondutor aumenta sua temperatura de operação o comprimento de onda emitido também aumenta, pois o *gap* do semicondutor diminui. Ao analisar o funcionamento de um LED pode-se perceber que a placa semicondutora deve aquecer durante a emissão de luz, pois há uma passagem de corrente elétrica e mesmo apresentando uma alta eficiência sempre haverá uma perda por efeito joule, em um LED pequeno o aumento de temperatura talvez não seja facilmente notado, mas em um LED de maior

dimensão os dissipadores de energia na forma de calor nele existentes evidenciam as altas temperaturas que são submetidos. Portanto, os fotodiodos operam emitindo com uma temperatura relativamente maior do que quando operam absorvendo radiação eletromagnética, convertendo-a em corrente fotoelétrica.

O TIL38 não foge a aplicação deste raciocínio, o que certamente lhe confere um comprimento de onda de operação menor quando operando como sensor, ao invés de emissor de radiação eletromagnética portanto, o comprimento de onda de operação, como sensor de radiação eletromagnética do TIL38, não está fora da faixa de comprimentos de onda interferidos pelo vapor d'água.

Além da discussão anterior, na qual era abordado o deslocamento da faixa de comprimentos de onda de operação do TIL38, também levantam-se as ideias de Vilela e Beloto (2009, p. 1), que avaliaram o comportamento de uma célula de silício como um radiômetro, "Pode-se notar o pico da resposta entre 900 e 950nm, onde a resposta da célula solar de silício é máxima. ". Os autores relatam um comportamento similar ao avaliar a célula de silício com um radiômetro fabricado pela Kipp & Zonen. Entende-se por radiômetro um sensor que mede a intensidade de radiação, e segundo Teichrieb (2008) os radiômetros recebem nomes específicos, de acordo com a radiação medida, e no caso o piranômetro é um radiômetro que mede a radiação global, que é o protótipo descrito através deste estudo.

### **3.7 Análise dos dados**

Os dados utilizados neste estudo foram coletados através de um armazenador automático de dados a uma taxa de uma linha de dados por segundo, essa linha de dados faz parte de uma tabela de oito colunas, cada uma com diferentes parâmetros medidos simultaneamente. As linhas possuem a mesma organização, ou seja, cada coluna expressa o conjuntos de dados de um único sensor, ou o comportamento de uma única variável do conjunto. Por exemplo as colunas da tabela estão dispostas como mostra a tabela 1.

Tabela 1 – Exemplo de duas linhas (escolhidas aleatoriamente) da tabela de dados coletados pelo armazenador automático de dados.

<b>Código da estação</b>	<b>Ano</b>	<b>Data do Ano</b>	<b>Hora</b>	<b>Segundos</b>	<b>Tensão da fonte</b>	<b>Intensidade Via CMP3</b>	<b>Tensão elétrica TIL38</b>
101	2012	213	1226	14	12.74	0.093	30.51
101	2012	213	1226	15	12.74	0.094	30.51

O código da estação, apresentado na primeira coluna, serve para a identificação da tabela evitando possíveis confusões entre várias tabelas de dados, o conjunto formado pela 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> coluna indicam a data e a hora local em que os dados foram medidos nos sensores, possibilitando a posterior análise dos mesmos. A sexta coluna indica a tensão de alimentação do sistema, este parâmetro é de fundamental avaliação pois a fonte de alimentação apresenta defeitos frequentemente devido a descargas elétricas, superaquecimento ou falhas no fornecimento de energia elétrica pela empresa local, assim como defeitos associados ao conjunto do painel solar ou bateria de alimentação. A sétima coluna indica a leitura feita pelo sensor CMP3, e contém os valores, medidos em kW/m<sup>2</sup>, considerados como padrão para a posterior validação do protótipo aqui descrito, e a oitava e última coluna contém os valores fornecidos em mV pelo protótipo, que serão cuidadosamente avaliados através de algoritmos matemáticos escritos em linguagem compatível com os programas *GNU octave*.

Os gráficos apresentados nessa dissertação foram obtidos a partir dos dados experimentais armazenados pelo armazenador automático de dados. É inviável produzir gráficos manualmente com a quantidade de dados gerados neste procedimento, portanto, foi escrito um código computacional para ser rodado com o *software GNU octave*, através da interface gráfica *QtOctave* para produzir os resultados gráficos. O código computacional desenvolvido nessa dissertação (Apêndice A) é responsável pelas operações computacionais de leitura do arquivo que contém os dados e a posterior confecção visual dos gráficos, bem como a estimativa dos parâmetros estatísticos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente o fotodiodo foi exposto diretamente, sem o difusor, e sem o resistor *shunt*, ao lado do piranômetro CMP3, ambos nas mesmas condições de exposição ao Sol e fornecendo um valor por segundo ao armazenador automático de dados. O resultado deste primeiro processo é graficamente exposto na Figura 19, que mostra, em “a”, o gráfico do comportamento das médias, de um minuto de dados, do sensor CMP3 medindo a intensidade da radiação global em kilowatt por metro quadrado ( $\text{KW/m}^2$ ) função do tempo na data 5 de maio de 2012 ou dia 126 do ano (escolhido arbitrariamente) e as medias de um minuto de dados da tensão elétrica fornecida pelos terminais do fotodiodo TIL38 em função do tempo para a mesma data. O gráfico “b” da Figura 19 mostra exclusivamente o comportamento da tensão gerada pelo TIL38, nota-se que no instante que a radiação disponível atingiu algo em torno de  $0.2 \text{ KW/m}^2$  (gráfico “a”, Figura 19), o fotodiodo forneceu uma tensão de aproximadamente 800 mV, permanecendo estacionário nesta situação até que a intensidade da radiação incidente voltasse a valores bem menores. Isto era previsto por Haag (2008), que havia mencionado que o fotodiodo deveria operar quase que em curto circuito para ser utilizado como um radiômetro, evitando que operasse como uma célula fotovoltaica de silício.

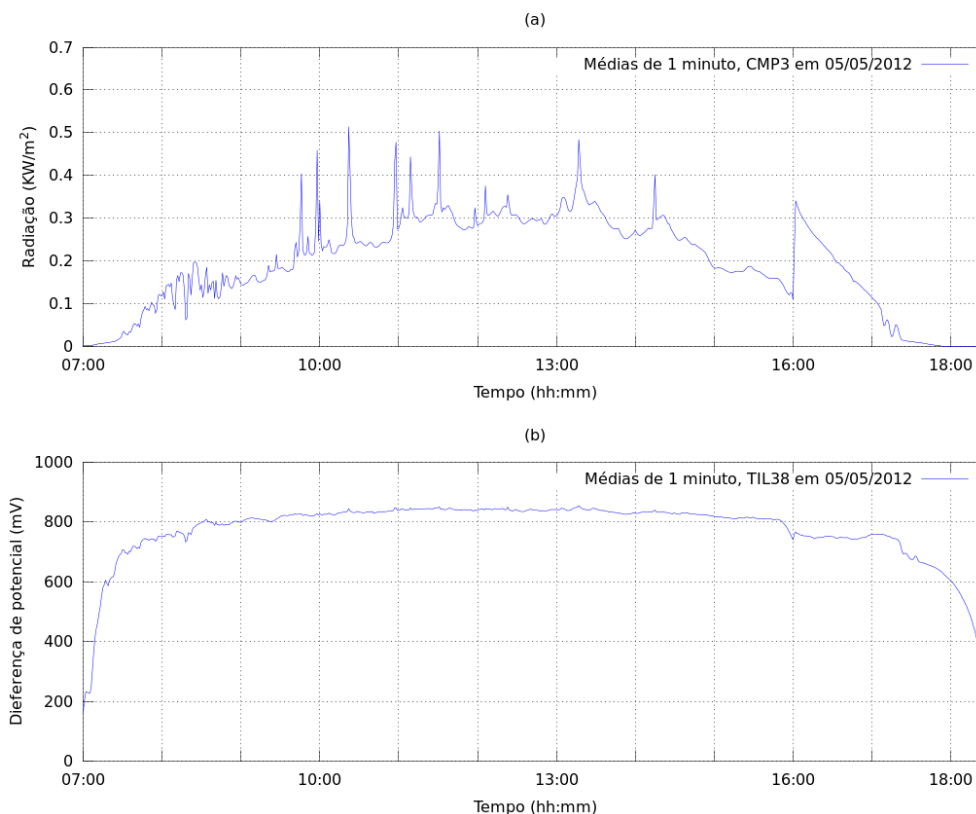


Figura 19 – (a) Radiação coletada via sensor CMP3, em 05 de maio de 2012; (b) Tensão entre os terminais do TIL38 exposto diretamente a radiação solar, em 05 de maio de 2012.

Nas condições citadas, é visível a inoperância do TIL38 como um piranômetro, e mudanças no sistema são imprescindíveis para atender ao propósito inicial. A partir do gráfico da Figura 20, fica ainda mais claro o fraco desempenho do TIL38 nas condições descritas.

No gráfico da Figura 20 é apresentado um gráfico tipo espalhamento, que indica como valores simultâneos se relacionam, expondo os diferentes valores medidos pelo TIL38, diretamente exposto e sem o *shunt*, em comparação aos dados obtidos pelo sensor padrão CMP3.

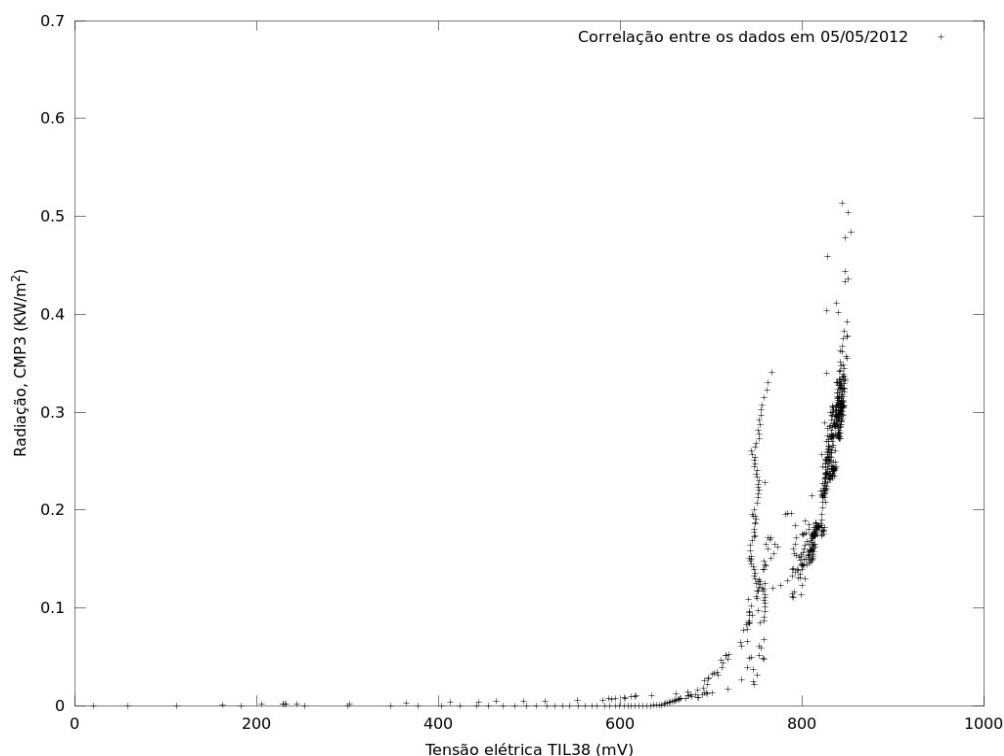


Figura 20 – Gráfico tipo espalhamento, que compara as tensões obtidas pelo TIL38 em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 05 de maio da 2012.

No gráfico da Figura 20 visualizamos pouca correlação entre os dados, ainda, observamos que para diferentes valores medidos pelo piranômetro CMP3, os valores medidos pelo TIL38 permanecem em aproximadamente 800 mV.

Visualiza-se, ainda, a grande quantidade de pontos aglomerados em uma formação vertical esguia acima do 800 mV, indicando que para valores da radiação global de 0.1 KW/m<sup>2</sup> até 0.5 KW/m<sup>2</sup>, a tensão do fotodiodo ficou estável em um único valor. Este comportamento não é linear, o que inviabiliza a utilização do protótipo como um piranômetro. A questão é prevista na literatura Haag (2008), que apresenta a solução o emprego de um resistor *shunt*.

Observa-se que a resposta do TIL38 à radiação se repete, da mesma forma que a Figura 21 em comparação com a Figura 19, para Figura 20 em comparação à Figura 22 em 06 de maio de 2012.



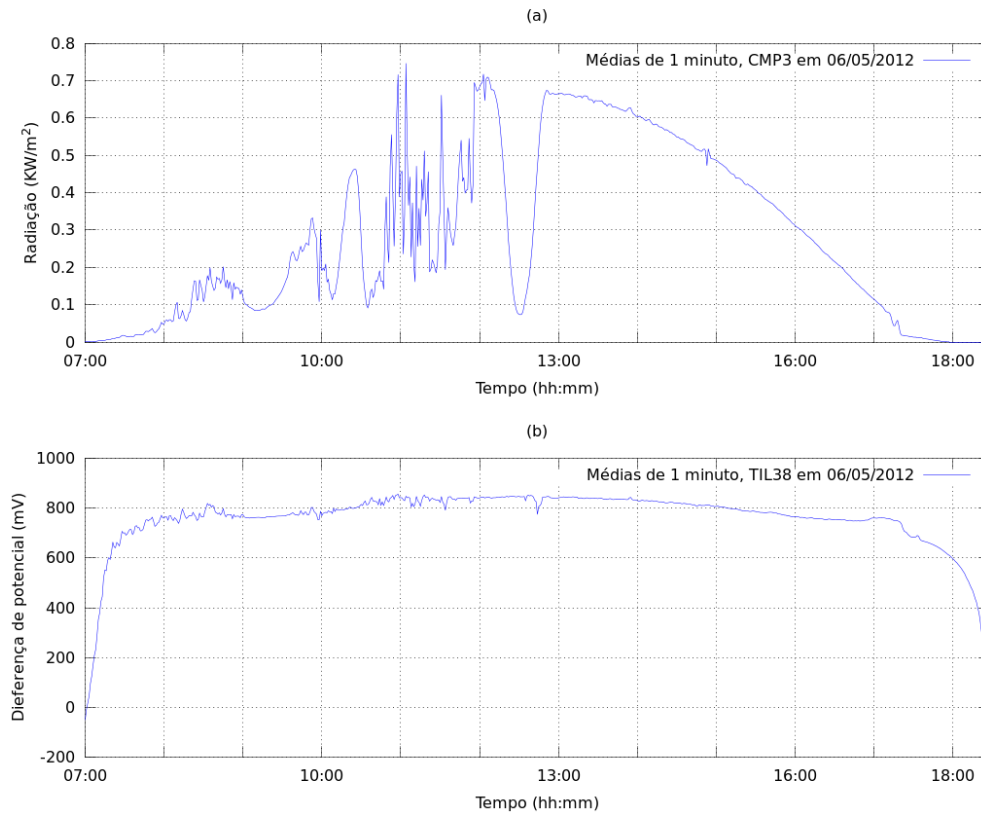


Figura 21 – (a) Radiação coletada via sensor CMP3, em 06 de maio de 2012; (b) Tensão entre os terminais do TIL38 exposto diretamente a radiação solar, em 06 de maio de 2012.

Novamente, apresentado na Figura 21, é possível ver a tensão elétrica entre os terminais do fotodiodo modelo TIL38 estagnar-se em torno dos 800 mV, repetindo o recente comportamento descrito. O resultado também não é diferente quando avalia-se o gráfico da Figura 22, em comparação ao gráfico da Figura 20 o comportamento do TIL38 permanece o mesmo, porém em datas diferentes.

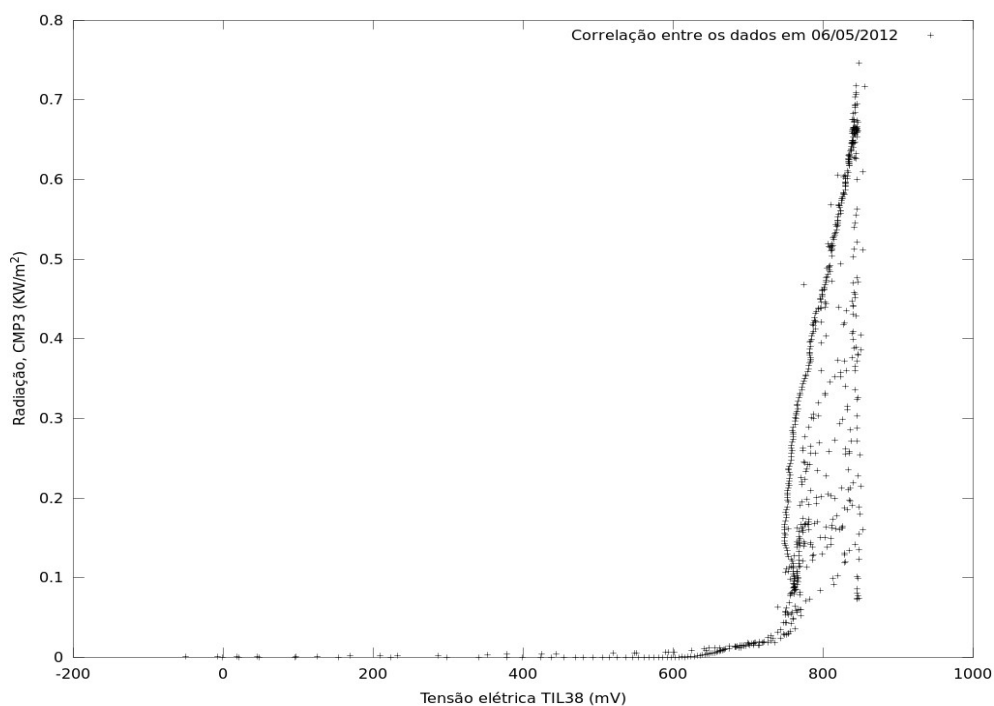


Figura 22 – Gráfico tipo espalhamento, que compara as tensões obtidas pelo TIL38 em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 06 de maio de 2012.

Ao adicionar o resistor *shunt*, a resposta à radiação solar observada pelo conjunto TIL38 mais resistor assemelhou-se ao comportamento do piranômetro CMP3, conforme apresentado no gráfico da Figura 23, que representam as mesmas grandezas físicas apresentadas nos gráficos da Figuras 19 e 21, para os dados mensurados na data 30 de junho de 2012.

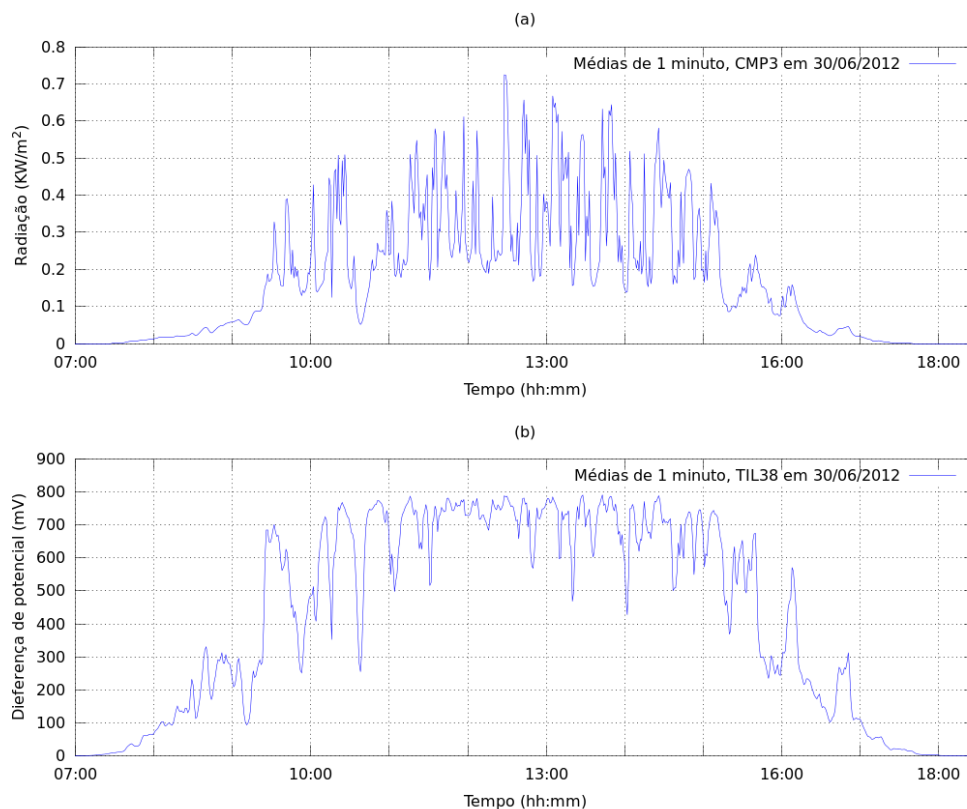


Figura 23 – (a) Radiação coletada via sensor CMP3, em 30 de junho de 2012; (b) Tensão entre os terminais do TIL38 exposto diretamente a radiação solar, conectado em paralelo com um resistor *shunt*, em 30 de junho de 2012.

Neste ponto do procedimento estimou-se um *offset*, que é um multiplicador utilizado para converter os valores, medidos pelo conjunto formado pelo TIL38 e o *shunt*, de unidade de tensão elétrica para a unidade de intensidade de radiação global incidente. A metodologia adotada para obter o valor deste *offset* foi pela estimativa da média aritmética dos valores referentes ao sensor padrão e dividindo-a pela média aritmética do valor de tensão mensurada no protótipo.

Ao multiplicar o *offset* pelos valores individuais de tensão elétrica, mensurado no protótipo, obtém-se valores da intensidade da radiação solar global incidente, em unidade de potência por uma unidade de área, relativos ao sensor desenvolvido nesta dissertação.

Com as medidas do dia 30 de junho de 2012 foi estimado um *offset* cujo valor é  $4.1308 \times 10^{-04} \text{ KWm}^{-2} \text{ mV}^{-1}$ . A Figura 24 mostra dois gráficos, um expondo as medidas referentes ao sensor CMP3, o outro expondo os valores mensurados pelo protótipo, já convertidos para a unidade de potência por unidade de área

(KW/m<sup>2</sup>) pela metodologia citada anteriormente.

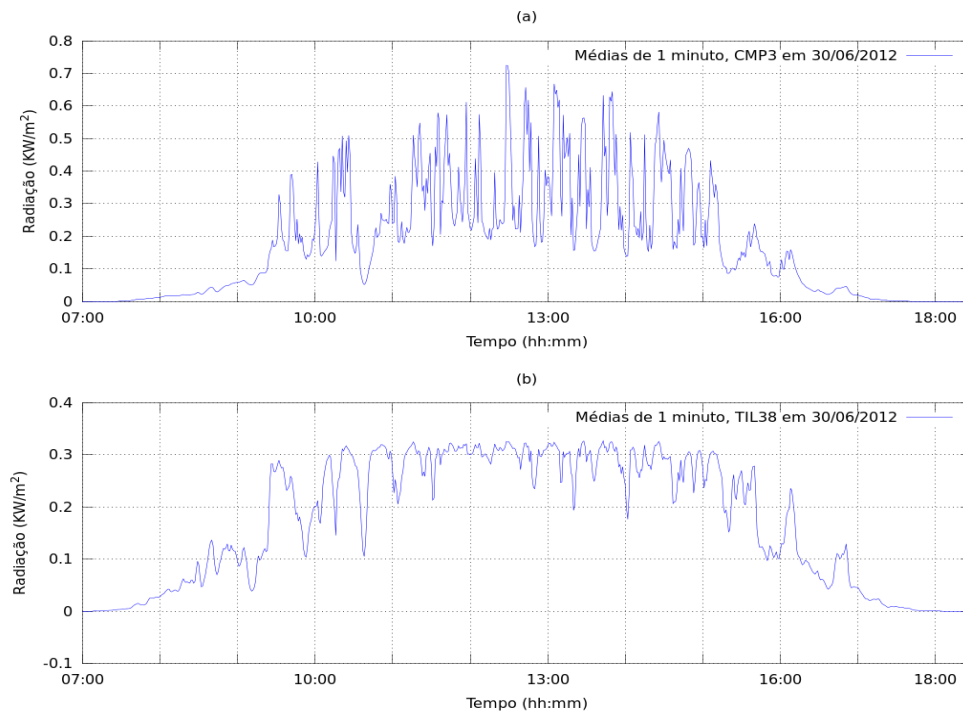


Figura 24 – (a) Radiação coletada via sensor CMP3 em KW/m<sup>2</sup>, em 30 de junho de 2012; (b) Intensidade da radiação global medida em KW/m<sup>2</sup> pelo TIL38, sem o difusor e conectado em paralelo com o resistor *shunt*, em 30 de junho de 2012.

O gráfico tipo espalhamento, gerado a partir dos mesmos dados utilizados para produzir os gráficos da Figura 24, é apresentado na Figura 25.

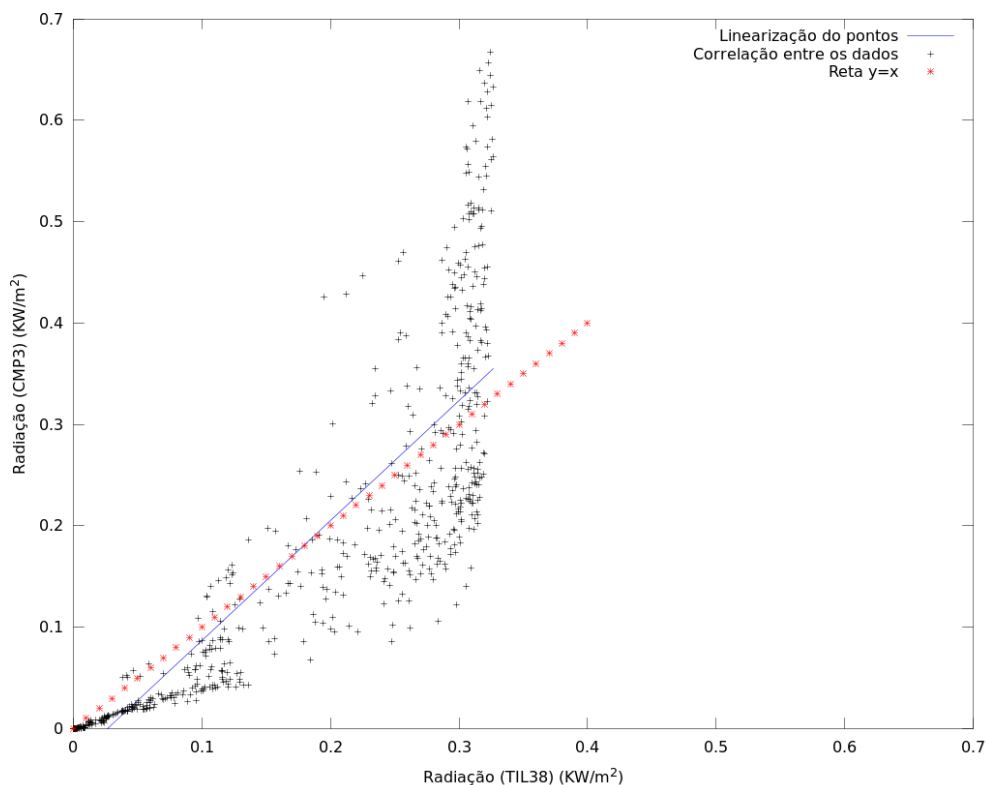


Figura 25 – Gráfico tipo espalhamento que compara intensidade da radiação global obtidas pelo protótipo em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 30 de junho de 2012, e uma reta que lineariza os pontos do gráfico.

Ao observar o comportamento do conjunto formado com o TIL38 e o *shunt* na ausência do difusor, percebe-se que o comportamento é mais adequado, se comparado ao comportamento sem o *shunt*, porém ainda mostra-se instável quando a intensidade da radiação global medida pelo sensor CMP3 atinge valores acima de  $0.4 \text{ KW/m}^2$ , e este comportamento pede ser verificado com o auxílio do gráfico da Figura 25, nele é possível verificar que quando a leitura obtida pelo sensor CMP3 varia entre  $0.1 \text{ KW/m}^2$  e  $0.7 \text{ KW/m}^2$  as medidas obtidas através do protótipo estagnaram-se em torno de  $0.3 \text{ KW/m}^2$ , novamente formando uma faixa vertical de pontos acima de um determinado valor obtido pelo protótipo. Este comportamento é devido à falta do difusor, e a falta do mesmo acarreta em uma ausência de sensibilidade do protótipo em determinados momentos do dia, em que, devido a forma do encapsulamento do TIL38, a radiação direta converge em grande intensidade para o semiconductor interno, fazendo-o atingir sua capacidade máxima e conseqüentemente o estabiliza em

um valor máximo de corrente elétrica produzida.

Os parâmetros estatísticos MB, MAGE, RMSE (apresentados na metodologia), a correlação, a covariância, o coeficiente angular e linear da linearização apresentada no gráfico a Figura 25, referentes aos dados obtidos em 30/06/2012 são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros calculados a partir da comparação dos dados coletados com o sensor CMP3 e os dados, já convertidos, coletados pelo fotodiodo exposto diretamente a radiação solar com o *shunt* em 30 de junho de 2012.

<b>Parâmetro Estatístico</b>	<b>Valor</b>
MB	$9.383 \times 10^{-2}$
MAGE	$1.065 \times 10^{-1}$
RMSE	$1.381 \times 10^{-1}$
Coeficiente Angular	$7.672 \times 10^{-1}$
Coeficiente Linear	$-3.133 \times 10^{-2}$
Desvio Padrão	$1.883 \times 10^{-1}$
Covariância	$2.720 \times 10^{-2}$
Correlação	$8.451 \times 10^{-1}$

O comportamento do conjunto repetiu-se similarmente na data seguinte 01 de julho de 2012, como apresentado nos gráficos das Figuras 26 e 27, que seguem respectivamente o mesmo padrão dos gráficos 24 e 25, porém em outra data.

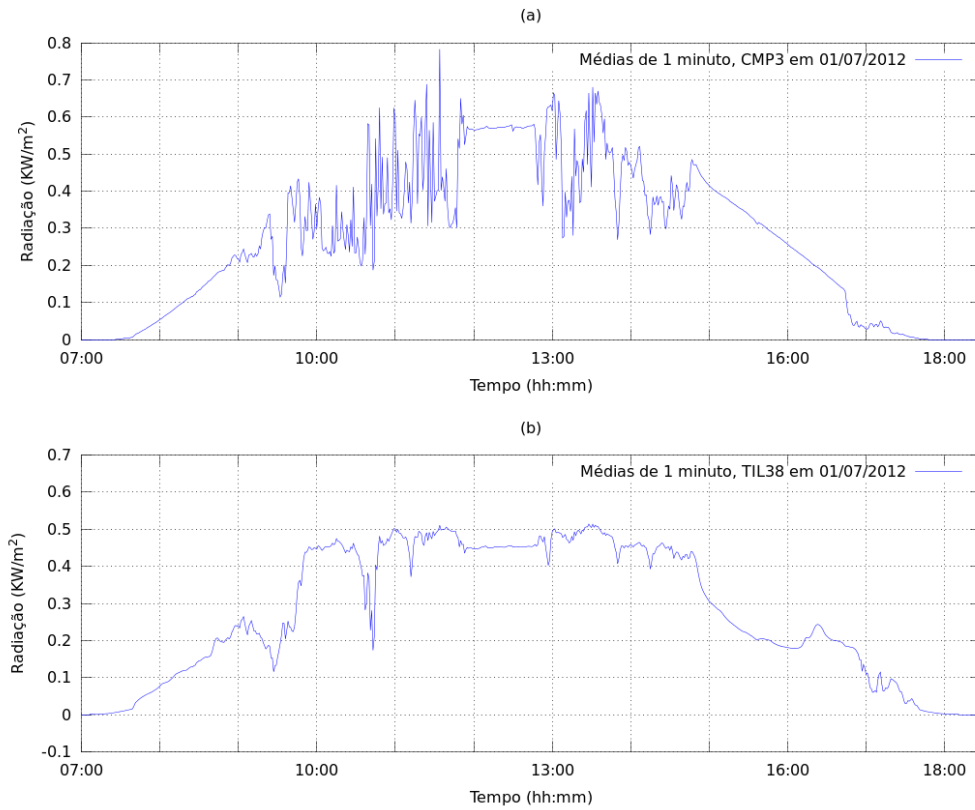


Figura 26 – (a) Radiação coletada via sensor CMP3 em KW/m<sup>2</sup>, em 01 de julho de 2012; (b) Intensidade da radiação global medida em KW/m<sup>2</sup> pelo TIL38, sem o difusor e conectado em paralelo com o resistor *shunt*, em 01 de julho de 2012.

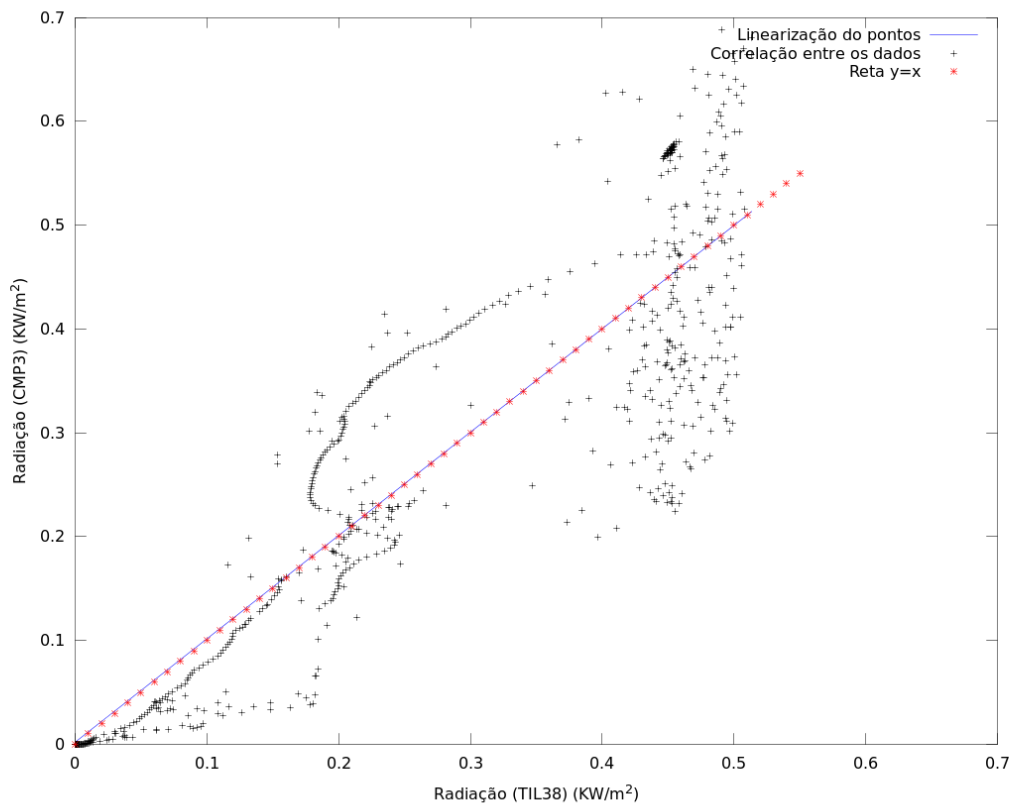


Figura 27 – Gráfico tipo espalhamento, que compara intensidade da radiação global obtidas pelo protótipo em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 01 de julho de 2012, e uma reta que lineariza os pontos do gráfico.

Os parâmetros estatísticos MB, MAGE, RMSE, a correlação, a covariância, o coeficiente angular e linear da linearização apresentada no gráfico a Figura 27, referentes aos dados obtidos em 01 de julho de 2012 são apresentados na tabela 3.



Tabela 3 – Parâmetros calculados a partir da comparação dos dados coletados com o sensor CMP3 e os dados, já convertidos, coletados pelo fotodiodo exposto diretamente a radiação solar com o *shunt* em 01 de julho de 2012.

<b>Parâmetro Estatístico</b>	<b>Valor</b>
MB	$8.023 \times 10^{-4}$
MAGE	$7.080 \times 10^{-2}$
RMSE	$9.173 \times 10^{-2}$
Coeficiente Angular	$9.6950 \times 10^{-1}$
Coeficiente Linear	$2.185 \times 10^{-3}$
Desvio Padrão	$1.774 \times 10^{-1}$
Covariância	$3.133 \times 10^{-2}$
Correlação	$8.873 \times 10^{-1}$

Nota-se que nas datas 30 de junho de 2012 e 01 de julho de 2012 o comportamento do protótipo seguiu o mesmo padrão, em que nos momentos de maior disponibilidade de radiação global o piranômetro CMP3 ainda era capaz de detectar pequenas variações na intensidade da radiação, enquanto o protótipo seguia estacionário em um valor máximo.

O comportamento do conjunto, devido ao formato semi-esférico da parcela superior do encapsulamento do fotodiodo, é claramente exposto no gráfico da figura 26 em que, no período compreendido aproximadamente entre as 10 horas e as 15 horas, o fotodiodo estabilizou-se gerando uma fotocorrente aproximadamente contínua, devido a convergência em maior intensidade da radiação direta sobre a junção *p-n*.

Este comportamento indesejável somente foi sanado ao acoplar um difusor de náilon, como apresentado na fotografia da Figura 28, que é capaz de tornar a intensidade da radiação direta independente do ângulo de incidência. A independência com o ângulo de incidência é prevista, entre outros, por Vilela e Beloto (2009) que descrevem nos relatos de seu estudo que um protótipo de piranômetro, também acoplado a um difusor especial, deve responder a lei dos co-senos de forma semelhante a um sensor padrão.



Figura 28 – Fotografia do sensor CMP3, à esquerda (cabo amarelo), e o protótipo com difusor acoplado ao TIL38, à direita, coletando dados no dia 07 de agosto de 2012, nas dependências do INPE – CRS, em Santa Maria – RS, na Universidade Federal de Santa Maria.

O gráfico apresentado na Figura 29 exibe o comportamento do protótipo acoplado ao difusor com o resistor *shunt*, em comparação com o piranômetro CMP3, com os dados obtidos no dia 28 de julho de 2012. Já o gráfico da Figura 30 mostra um gráfico tipo espalhamento, ambos exibem uma grande semelhança entre os dados obtidos pelo protótipo e pelo piranômetro CMP3.

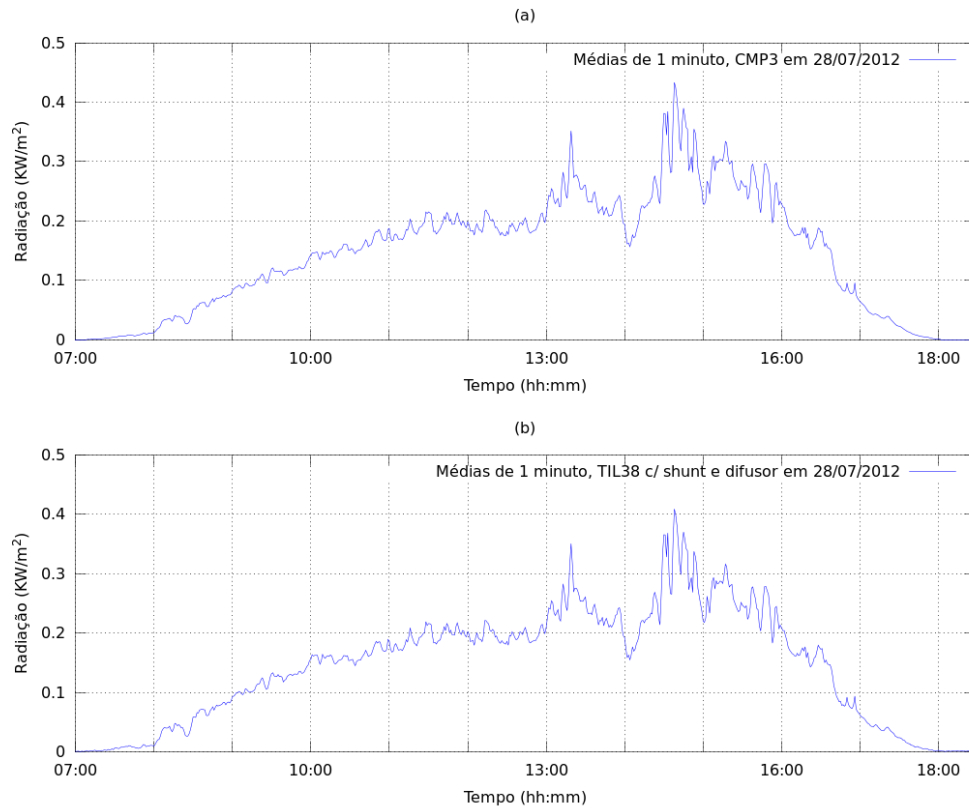


Figura 29 – (a) Radiação coletada via sensor CMP3 em KW/m<sup>2</sup>, em 28 de julho de 2012; (b) Intensidade da radiação global medida em KW/m<sup>2</sup> pelo TIL38, com o difusor e conectado em paralelo com o resistor *shunt*, em 28 de julho de 2012.

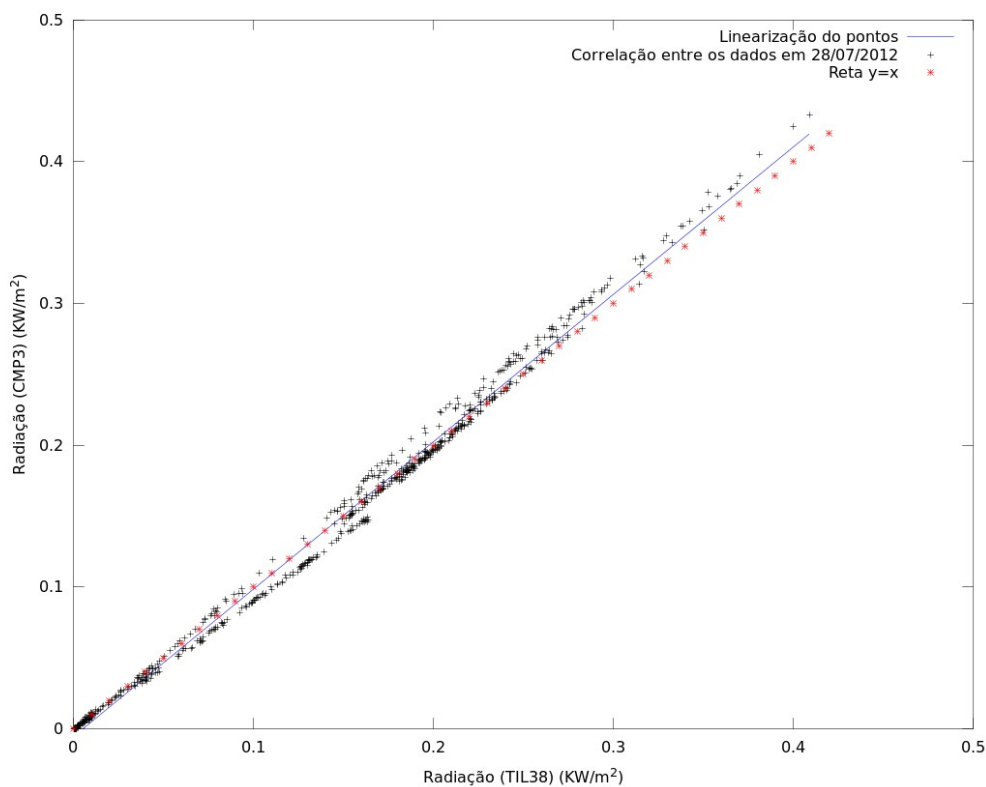


Figura 30 – Gráfico tipo espalhamento que compara intensidade da radiação global obtida pelo protótipo em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 28 de julho de 2012 e uma reta que lineariza os pontos do gráfico.

Os parâmetros estatísticos MB, MAGE, RMSE, a correlação, a covariância, o coeficiente angular e linear da linearização apresentada no gráfico a Figura 30, referentes aos dados obtidos em 28 de julho de 2012 são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros calculados a partir da comparação dos dados coletados com o sensor CMP3 e os dados, já convertidos, coletados pelo TIL38 abrigado com o difusor e ligado em paralelo com o *shunt* em 28 de julho de 2012.

<b>Parâmetro Estatístico</b>	<b>Valor</b>
MB	$1.343 \times 10^{-4}$
MAGE	$6.111 \times 10^{-3}$
RMSE	$8.341 \times 10^{-3}$
Coeficiente Angular	1.039
Coeficiente Linear	$-5.514 \times 10^{-3}$
Desvio Padrão	$9.521 \times 10^{-2}$
Covariância	$9.421 \times 10^{-3}$
Correlação	$9.972 \times 10^{-1}$

Nota-se que houve uma expressiva melhora no comportamento do TIL38 equipado com o difusor. O melhor desempenho é exposto pela comparação entre os gráficos “a” e “b” da Figura 29, em que é possível acompanhar o comportamento do protótipo ao mesmo tempo e nas mesmas condições que o piranômetro CMP3. Já o *scatterplot*, apresentado na Figura 30, reforça a mensagem transmitida pelos gráficos da Figura 29 exaltando a linearidade do comportamento do protótipo em comparação ao desempenho do piranômetro CMP3.

Os parâmetros estatísticos apresentados na tabela 4 também reforçam tal desempenho, entre eles vale ressaltar a correlação obtida com valor de  $9.972 \times 10^{-1}$ , onde dos possíveis valores para a correlação, zero indica nenhuma linearidade entre os dados comparados e o valor 1 indica a total linearidade entre os dados comparados.

Outro parâmetro que vale ressaltar é o MAGE responsável por indicar a incerteza associada a cada única medida e para os dados obtidos em 28 de julho de 2012, e aqui avaliados tem valor de  $6.111 \times 10^{-3}$ . Por tratar-se de um sensor de baixo custo de produção, um valor como o mencionado para as incertezas iminentes a tal sistema já é capaz de viabilizar sua implementação em pesquisas.

Nesta fase do desenvolvimento do projeto, foi adotada a implementação

de uma nova forma gráfica, que expressa a diferença entre os dados medidos pelo piranômetro CMP3 e pelo protótipo. Este gráfico facilita a visualização dos instantes de tempo em que ocorrem as diferenças entre as medidas, bem como a intensidade delas. O gráfico que representa tais diferenças foi produzido após realizar a subtração, valor por valor, da intensidade da radiação global medida pelo piranômetro CMP3 menos a intensidade da radiação global medida pelo protótipo, gerando um novo conjunto de dados que são organizados em um gráfico. Para os valores coletados no dia 28 de julho de 2012 o gráfico gerado pela diferença de valores de radiação global é apresentado na Figura 31.

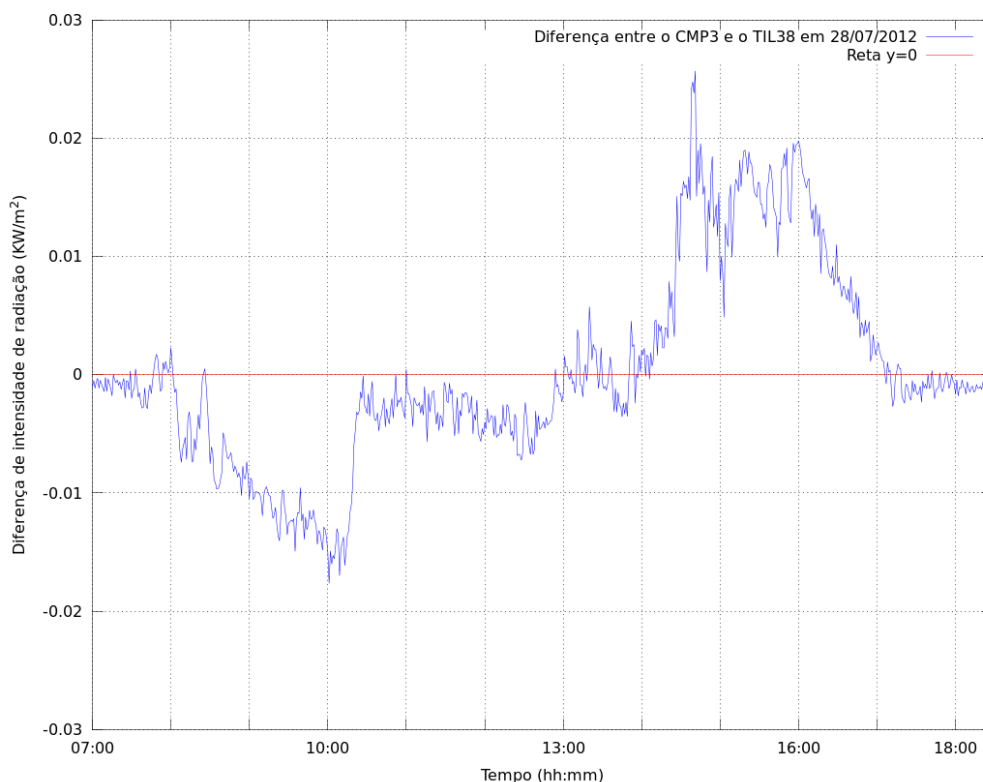


Figura 31 – Diferença entre os valores da intensidade da radiação global medida pelo CMP3 menos os valores obtidos pelo protótipo, em 28 de julho de 2012.

Em uma primeira avaliação percebe-se que o protótipo está superestimando suas medidas na parte da manhã, pois o gráfico indica os valores referentes ao CMP3 menos os do protótipo e apresenta-se negativo neste período. Próximo ao meio dia as medias se equivalem, pois o gráfico apresenta um período em que os resultados estão próximos do zero, e a tarde, seguindo a

mesma lógica, o protótipo está subestimando em relação ao piranômetro padrão.

Este comportamento pode estar relacionado ao nivelamento do protótipo, possivelmente ele está apontando para leste, pois assim o protótipo mede valores maiores durante a manhã por estar apontando diretamente para o Sol, e menores durante a tarde por estar apontando para o lado oposto à posição solar. A hipótese levantada anteriormente não foi imediatamente posta a prova, ou seja, não foi realizado o processo de nivelamento do protótipo, pois ela foi descartada devido ao comportamento dos apresentados nos dias seguintes.

Os dados até aqui apresentados, mostram um bom comportamento do protótipo, porém deve-se avaliar a repetitividade do comportamento, para isso esta dissertação apresenta os resultados referentes aos dois dias que seguem a primeira avaliação, ou seja, a seguir serão apresentados gráficos semelhantes aos até aqui apresentados, seguindo o mesmo procedimento de análise dos dados, porém com os dados relativos às datas 29 de julho de 2012 e 30 de julho de 2012.

A Figura 32 apresenta a intensidade da radiação medida com o piranômetro CMP3, em “a” e em “b” a radiação medida, para os mesmos instantes de tempo, pelo protótipo.

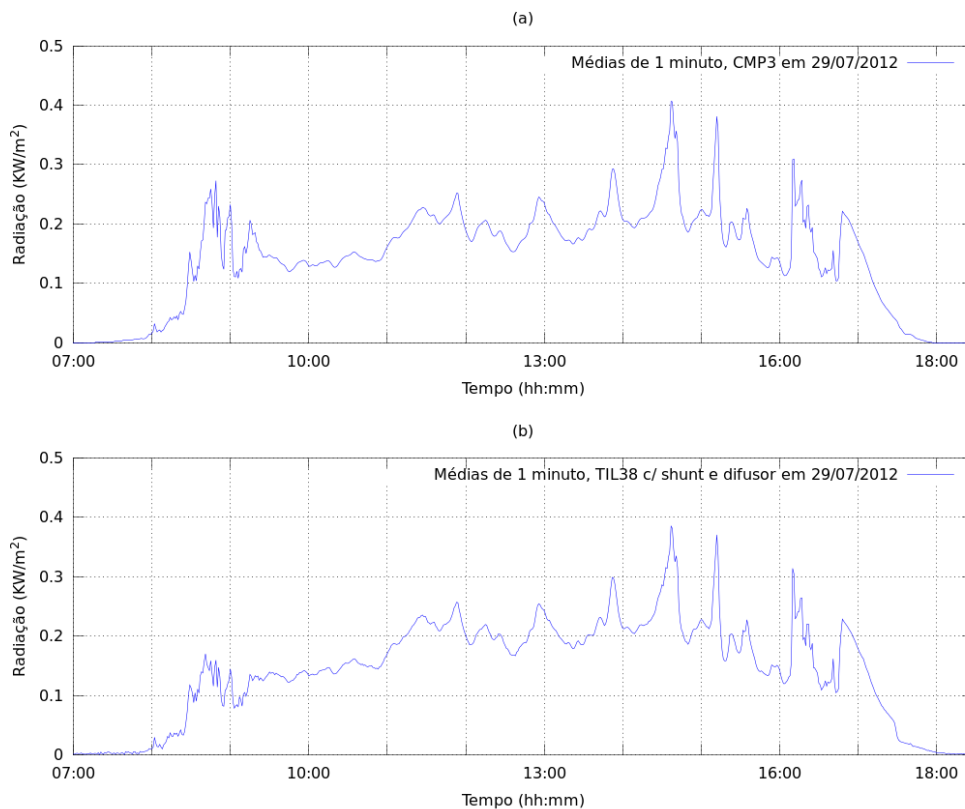


Figura 32 – (a) Radiação coletada via sensor CMP3 em  $\text{KW/m}^2$ , em 29 de julho de 2012; (b) Intensidade da radiação global medida em  $\text{KW/m}^2$  pelo TIL38, com o difusor e conectado em paralelo com o resistor *shunt*, em 29 de julho de 2012.

Novamente o resultado apresentado pelo gráfico “b” da Figura 32 apresenta um bom desempenho do protótipo utilizando o fotodiodo TIL38 se comparado com o gráfico “a” que apresenta a intensidade da radiação medida pelo piranômetro CMP3, já o gráfico da Figura 33 apresenta o gráfico tipo espalhamento referente à 29 de julho de 2012.



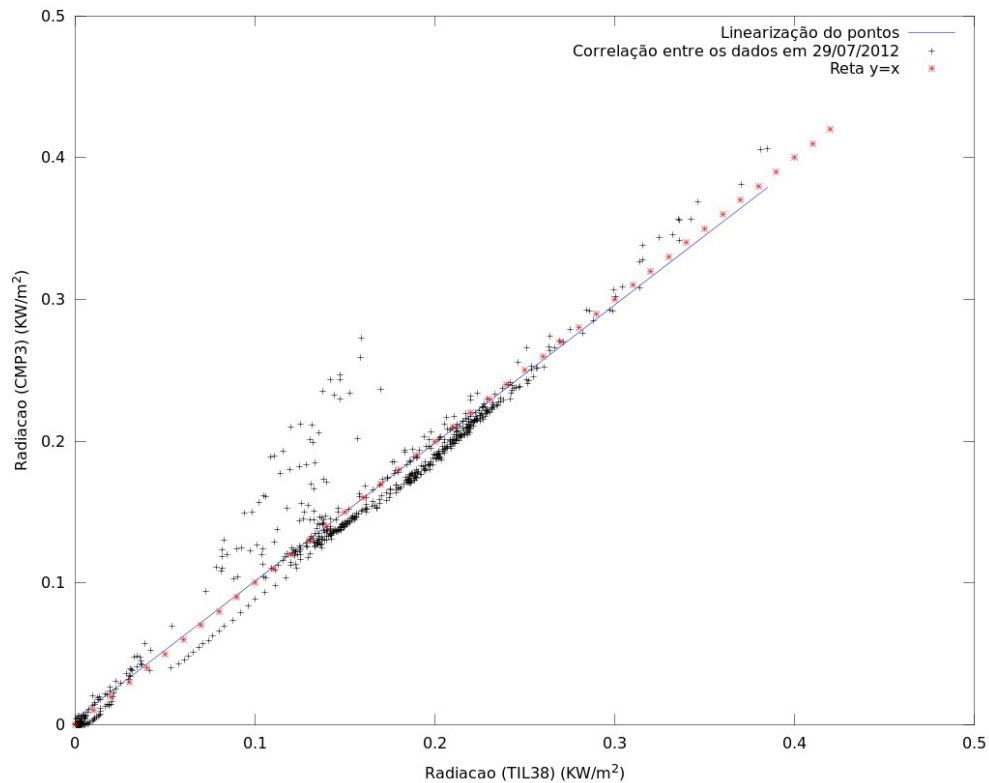


Figura 33 – Gráfico tipo espalhamento que compara intensidade da radiação global obtidas pelo protótipo em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 29 de julho de 2012, e uma reta que lineariza os pontos do gráfico.

Ao avaliar os gráficos das Figuras 30 e 33, evidencia-se um bom comportamento, viabilizando a utilização do protótipo como um piranômetro.

Já a tabela 5 contém os parâmetros estatísticos MB, MAGE, RMSE, a correlação, a covariância, o coeficiente angular e linear da linearização apresentada no gráfico a Figura 33, referentes aos dados obtidos em 29 de julho de 2012.

Tabela 5 – Parâmetros calculados a partir da comparação dos dados coletados com o sensor CMP3 e os dados, já convertidos, coletados pelo TIL38 abrigado com o difusor e ligado em paralelo com o *shunt* em 29 de julho de 2012.

<b>Parâmetro Estatístico</b>	<b>Valor</b>
MB	$2.094 \times 10^{-4}$
MAGE	$1.103 \times 10^{-2}$
RMSE	$1.859 \times 10^{-2}$
Coeficiente Angular	$9.740 \times 10^{-1}$
Coeficiente Linear	$3.991 \times 10^{-3}$
Desvio Padrão	$8.495 \times 10^{-2}$
Covariância	$7.027 \times 10^{-3}$
Correlação	$9.751 \times 10^{-1}$

Como apresentado anteriormente, o comportamento do protótipo foi satisfatório ao ser comparado com o do piranômetro CMP3. Exibindo uma correlação de  $9.751 \times 10^{-1}$  e uma incerteza associada a cada única medida (MAGE) de  $1.103 \times 10^{-2}$ .

A Figura 34 apresenta o gráfico da diferença entre o valor da intensidade da radiação global medida pelo piranômetro CMP3 menos a intensidade da radiação global medida pelo protótipo na data 29 de julho de 2012.

No gráfico da Figura 34 é possível perceber que o protótipo subestimou a intensidade da radiação em até  $0.1 \text{ KW}/\text{m}^2$ , visto em um pico entre as 07:00 h e as 10:45 h, e no restante do dia ele permaneceu aproximadamente medindo a mesma intensidade medida pelo piranômetro CMP3. Em uma comparação com o gráfico da Figura 34, cai por terra a hipótese levantada a partir do gráfico da Figura 31, pois agora o protótipo subestima pela parte da manhã, exatamente ao contrário do comportamento anterior.

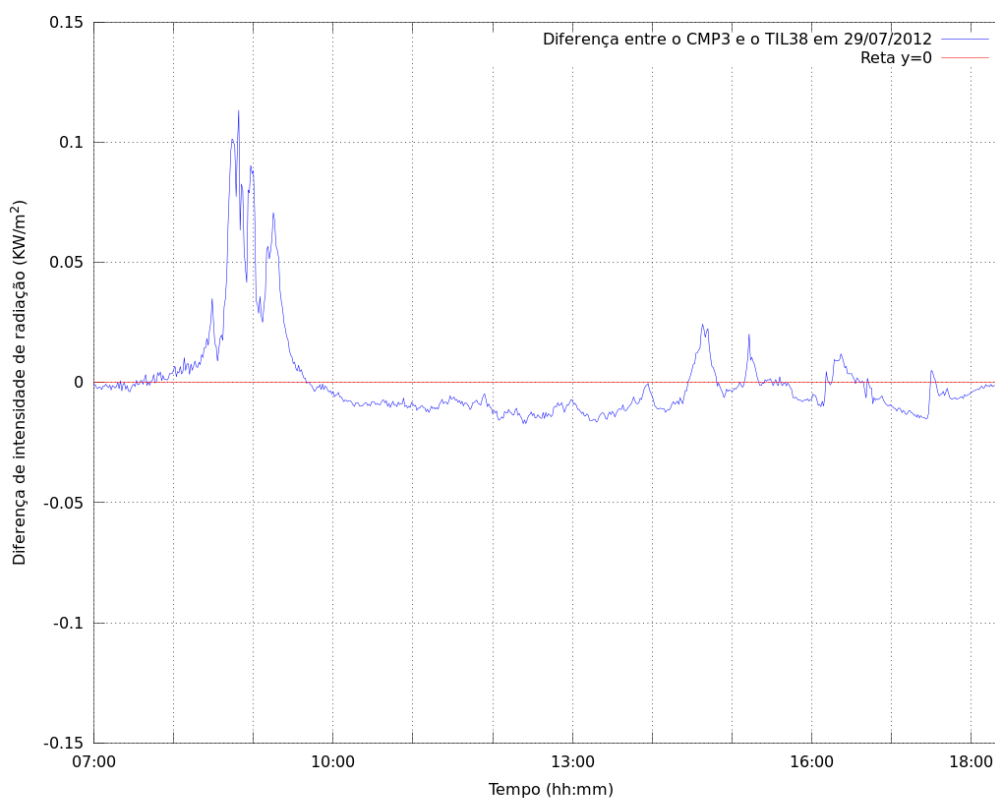


Figura 34 – Diferença entre os valores da intensidade da radiação global medida pelo CMP3 menos os valores obtidos pelo protótipo, em 29 de julho de 2012.

Porém, ao avaliar o comportamento do conjunto na data 30 de julho de 2012, evidencia-se a causa da possível incompreensão do comportamento do protótipo frente ao piranômetro padrão. As Figuras 35 e 36 mostram o comportamento do protótipo em comparação ao piranômetro CMP3.

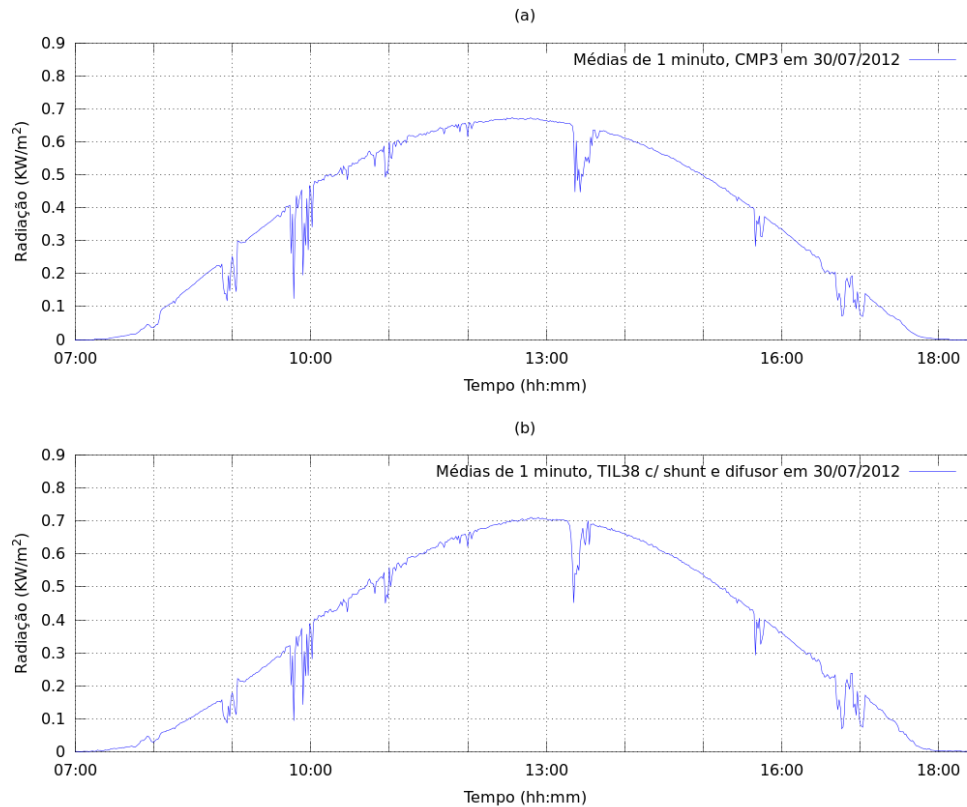


Figura 35 – (a) Radiação coletada via sensor CMP3 em KW/m<sup>2</sup>, em 30 de julho de 2012; (b) Intensidade da radiação global medida em KW/m<sup>2</sup> pelo TIL38, com o difusor e conectado em paralelo com o resistor *shunt*, em 30 de julho de 2012.

Através dos gráficos das Figuras 35 e 36, especialmente na comparação entre os gráficos “a” e “b” da Figura 35, percebe-se um comportamento muito semelhante do protótipo comparado ao piranômetro CMP3, porém o gráfico da Figura 36 mostra, em média um bom desempenho.

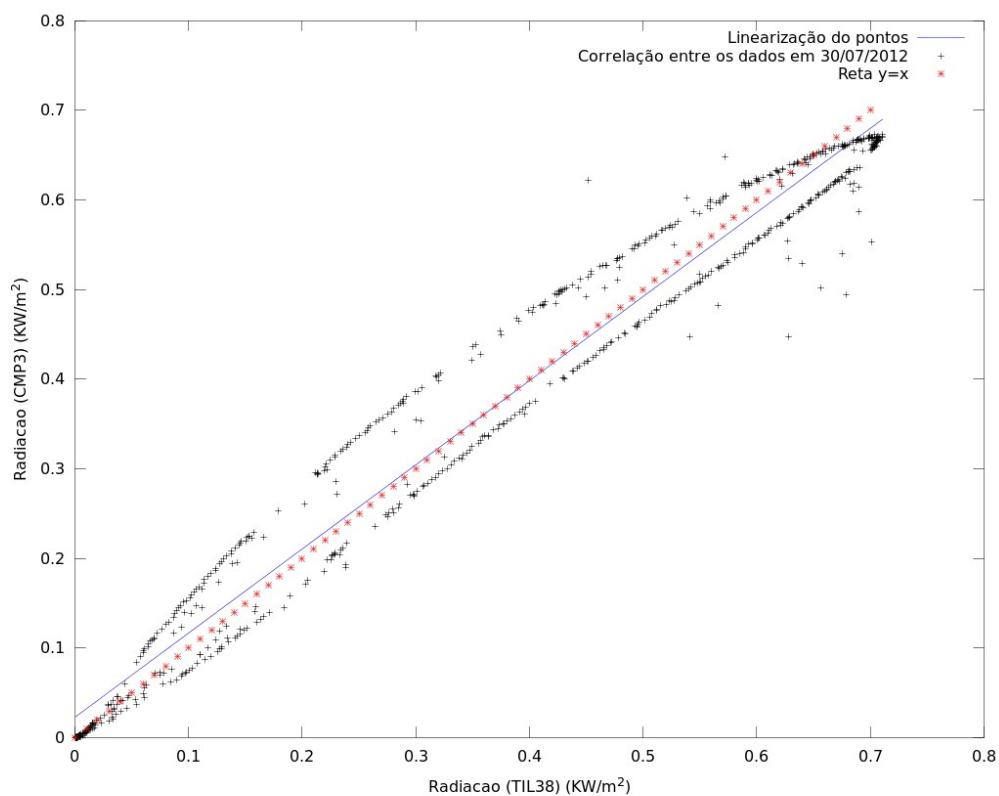


Figura 36 – Gráfico tipo espalhamento que compara intensidade da radiação global obtidas pelo protótipo em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 30 de julho de 2012, e uma reta que lineariza os pontos do gráfico.

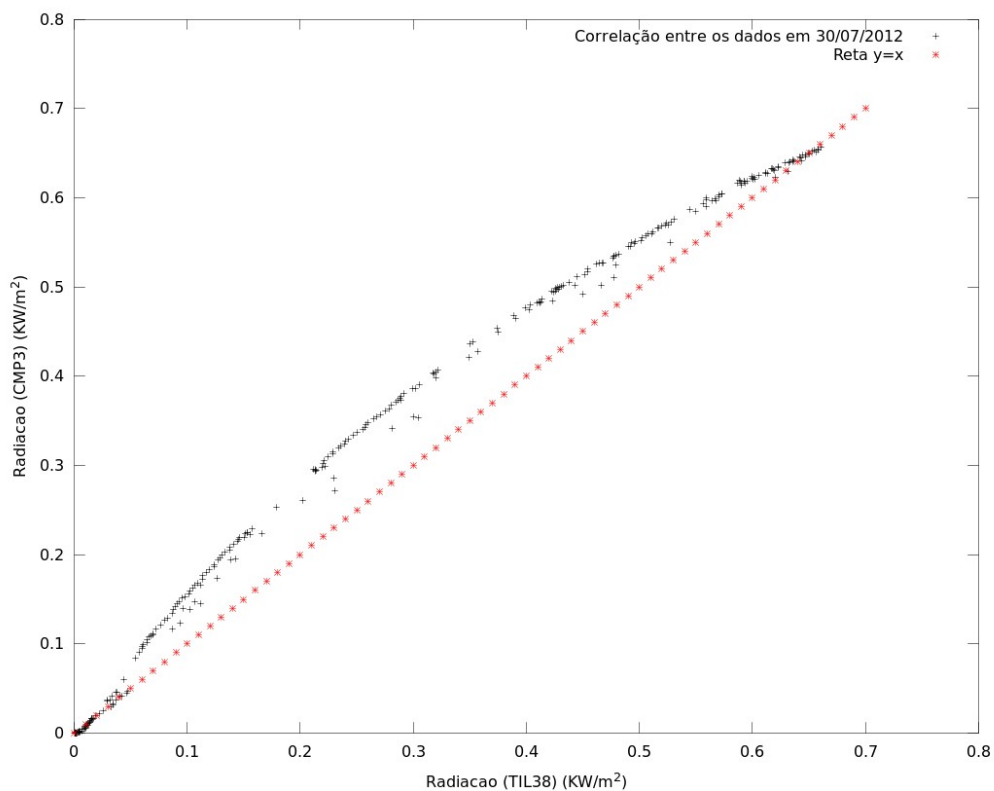


Figura 37 – Gráfico tipo espalhamento que compara intensidade da radiação global obtida pelo protótipo em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 30 de julho de 2012 pela manhã.

Em uma segunda avaliação gráfica resultou na Figura 37 e 38, que dividem o resultado do gráfico da Figura 36 em uma parcela para a manhã e outra para a tarde.

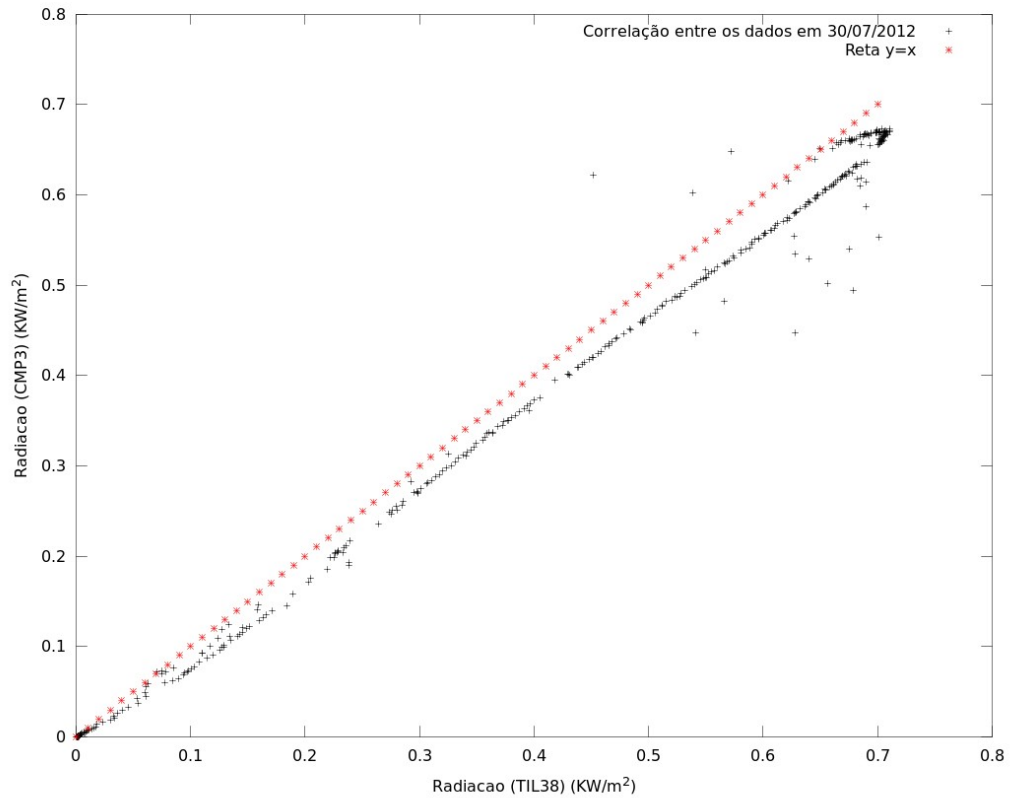


Figura 38 – Gráfico tipo espalhamento que compara intensidade da radiação global obtida pelo protótipo em comparação a radiação global medida pelo piranômetro CMP3, em 30 de julho de 2012 pela tarde.

Percebe-se que durante a manhã do dia 30 de julho de 2012, de acordo com o gráfico da Figura 37 o protótipo subestimou os valores da radiação, e a tarde de acordo com a Figura 38 ele superestimou os valores da radiação. Novamente, no tocante a subestimar ou superestimar, o protótipo não seguiu o padrão do dia 28/07/2012.

O gráfico da Figura 39 reforça a imagem do comportamento apresentado pelos gráficos das Figuras 37 e 38, exibindo os períodos em que o protótipo subestima.

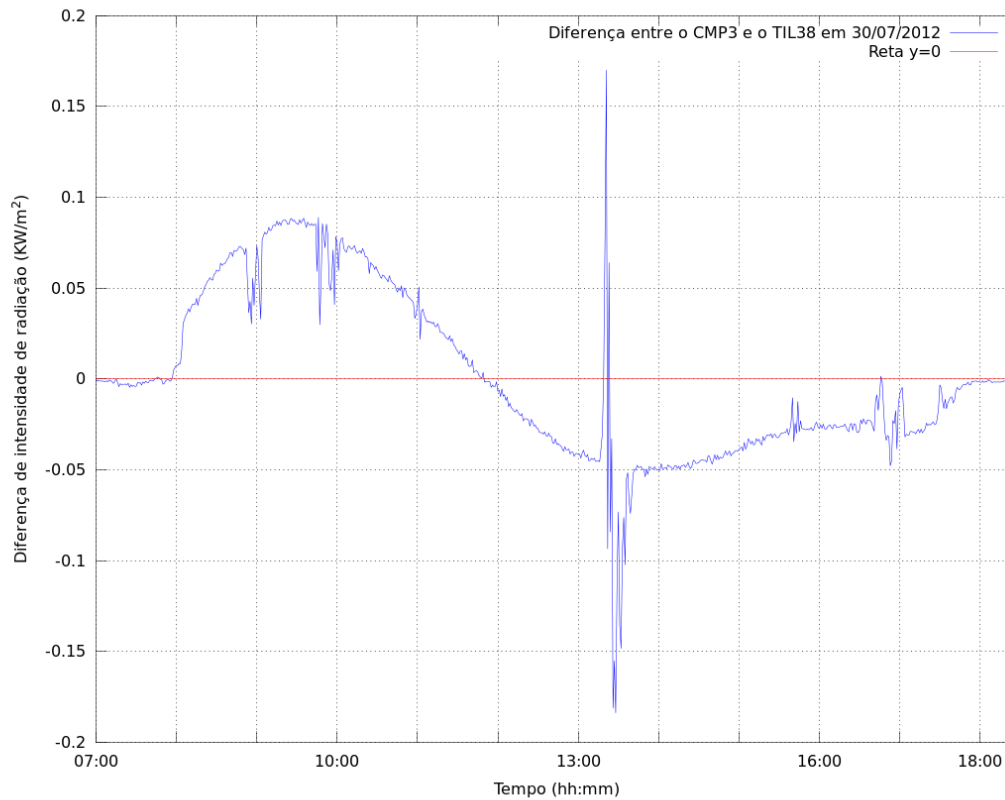


Figura 39 – Diferença entre os valores da intensidade da radiação global medida pelo CMP3 menos os valores obtidos pelo protótipo, em 30 de julho de 2012.

Em uma avaliação mais minuciosa os gráficos das Figuras 36, 37, 38 e 39 o protótipo apresenta um comportamento intrigante, ou seja, existem momentos que o protótipo superestima os valores da radiação e existem momentos que ele subestima os valores.

Para esclarecer esta questão foi produzido uma nova Figura (Figura 40), que expõe lado a lado os gráficos das Figuras 35 e 39. Através dela é verificado uma possível causa para os períodos de subestima dos valores coletados com o protótipo.



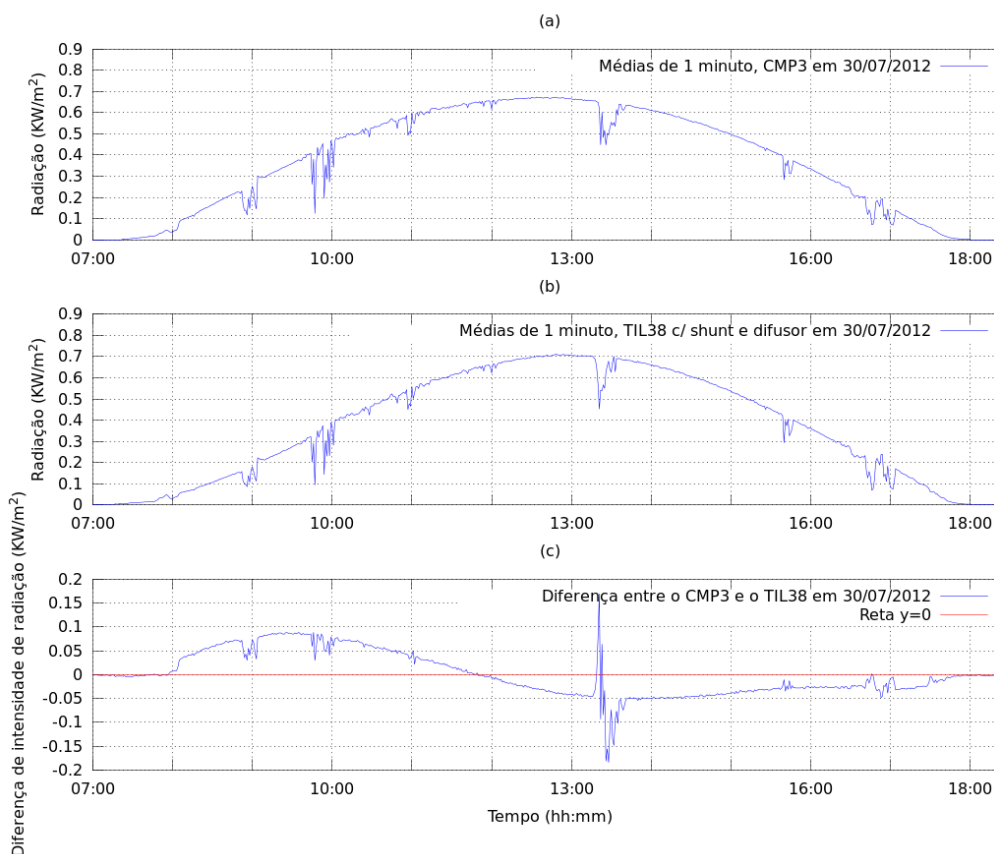


Figura 40 – (a) Radiação coletada via sensor CMP3 em KW/m<sup>2</sup>, em 30 de julho de 2012; (b) Intensidade da radiação global medida em KW/m<sup>2</sup> pelo TIL38, com o difusor e conectado em paralelo com o resistor *shunt*, em 30 de julho de 2012; (c) Diferença entre os valores da intensidade da radiação global medida pelo CMP3 menos os valores obtidos pelo protótipo, em 30 de julho de 2012.

Através dos gráficos da Figura 40 é possível verificar que a subtração, entre as medidas comparadas, oscila nos mesmos períodos em que a radiação medida pelo piranômetro CMP3 apresenta uma queda, uma hipótese é que essas quedas no valor da radiação são efeito da passagem de nuvens entre o Sol e os sensores.

Ainda existe a hipótese de que a oscilação entre o sinal produzido pelo protótipo e pelo piranômetro CMP3 é produzida pelo efeito da atenuação da radiação eletromagnética pelo vapor d'água no comprimento de onda de maior absorção pelo TIL38 (940 nm, Figura 11). Este fenômeno é visível no período compreendido entre as 07:00 h e as 10:45 h, no gráfico "c" da Figura 40, em que existem duas diminuições na radiação global em "a" e "b", provavelmente devido a passagem de nuvens, e nos respectivos instantes houve uma pequena subestima nos valores medidos pelo protótipo.

Pode-se perceber que existem diferenças de aproximadamente  $0.1\text{KW}/m^2$  referentes aos instantes de passagem de uma nuvem, logo, as demais diferenças apresentadas nos gráficos das Figuras 31, 34 e 39 podem também ter sido geradas pela interferência devido ao vapor d'água precipitável, tanto em forma de nuvens condensadas quanto na forma de vapor d'água não condensado.

No período de desenvolvimento do protótipo também foram realizados algumas tentativas de estimar o conteúdo de água precipitável presente na atmosfera.

Observou-se nas medidas obtidas com o protótipo que em momentos de grande variabilidade do conteúdo de vapor d'água precipitável o mesmo subestima os valores mensurados em torno  $0.1\text{KW}/m^2$  como apresentado na Figura 40. Ainda, avaliou-se o funcionamento do TIL38 operando juntamente com o fotodiodo TSFF5410, como um sensor de água precipitável tal o sensor MODIS.

Os dados obtidos com o protótipo eram comparados com os valores de conteúdo de água precipitável obtido através das sondagens meteorológicas realizadas na Base aérea de Santa Maria, porém não foi encontrada nenhuma grande correlação entre os dados. Em tal momento da pesquisa acreditava-se que o TIL38 não estaria lendo em um comprimento de onda de  $940\text{nm}$  ou que não seria sensível o suficiente para detectar variações no teor de água precipitável. Porém ficou evidente que ele também é sensível e capaz de ler o teor de água precipitável.

A baixa correlação encontrada entre os valores da sondagem e o do protótipo de fotômetro detector de água precipitável provavelmente foi devido ao tempo que uma radiossonda necessita para completar seu percurso de subida, bem como o deslocamento horizontal que a sonda atinge, chegando na casa dos quilômetros, que é uma distância grande e ultrapassa o limite de homogeneidade da grandeza de água precipitável.

## 5 CONCLUSÕES

Nesta dissertação é descrito o processo do desenvolvimento de um conjunto que opera com um sensor de radiação global, um protótipo de piranômetro.

Mostrou-se viável a construção de um sensor de radiação global de baixo custo. Sendo possível a sua reprodução tanto em baixa quanto em larga escala, ou seja, desde pequenos projetos de fabricação de uma única unidade em laboratórios de pesquisa para a obtenção de dados com baixo custo até a produção de numerosas unidades por empresas especializadas no ramo.

A questão da reprodutibilidade é viável, pois foram utilizados componentes de fácil obtenção, bem como os métodos de montagem são comuns em pequenas oficinas ou laboratórios que possuam um pequeno arsenal de ferramentas.

O comportamento do protótipo a piranômetro, ao mesmo tempo, é satisfatório e abre uma perspectiva para futuras pesquisas, por exemplo o desenvolvimento de outros fotômetros, com diferentes modelos de fotodiodos, para outras aplicações, como a estimativa de radiação fotossinteticamente ativa e o teor de água precipitável.

Porém o protótipo apresenta uma pequena incerteza associada, o tornando versátil, pois, o que por um lado não inviabiliza sua implementação por outro lado abre um caminho para pesquisas futuras sobre comportamento do teor de água precipitável e o comportamento do TIL38 como sensor para tal grandeza.

## REFERÊNCIAS

BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos S.A, 1999. 646 p.

CAMACHO, M. L. A., et al. Caracterización de la responsividad espectral de LEDs como detectores ópticos em el alcane de 20° C a 75° C. **Simposio de Metrología 2004** . [S.l.] Oct. 2004. 7 p.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica**. Rio de Janeiro: Campus, 1988. 928 p.

Fairchild Semiconductor Datasheet: TIL38 Infrared-Emitting Diode. In. Datasheet Archive. London, 2003. Disponível em: <<http://www.datasheetarchive.com/TIL38-datasheet.html#>>. Acesso em: 31 ago. 2012.

HAAG, R. **Desenvolvimento de um Radiômetro Espectral e Metodologia para caracterização do Espectro Solar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia ) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

HARTMANN D. L. **Global Physical Climatology** . Washington: Academic Press, 1994. 425 p.

LIOU, K. N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. 2<sup>a</sup> Ed. San Diego: Elsevier Science (USA), 2002.

MIMS F. M. An inexpensive and stable LED Sun photometer for measuring. **Geophysical Research Letters**, Texas, USA, V. 29, N. 13, p. 1-4, July. 2002.

MIYAZAKI, E; ITAMI, S.; ARAKI, T. Using a light-emitting diode as a high-speed, wavelength selective photodetector . **Review of Scientific Instruments**, USA, V. 69, N. 11, Aug. 1998.

NAZIAZENO, R. N. **Construção, calibração e análise de desempenho de um piranômetro de baixo custo, baseado no modelo kimball-hobbs**. 2009. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M. H. **Applied linear statistical models: regression, analysis of variance, and experimental designs**, 2nd ed., Homewood, Ill. : R.D. Irwin.

SUGAWARA , M. T. **Estudo de sensores de baixo custo para estação meteorológica automática**. 2003. 79 p. Tese (Mestrado em Meteorologia) Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2003.

TEICHRIEB, C. A. **Sensibilidade do BRAMS para descrição de chuva e temperatura, no nordeste do rio grande do sul, para diferentes resoluções espaciais**. 2008. 69 f. Dissertação (Mestrado em Física). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

THOMAZINI, D. **Sensores Industriais**. São Paulo: Érica, 2011. 224 p.

VILELA, W. A.; BELOTO, A.F. **Técnicas de calibração e caracterização de**

**sensor de radiação solar.** Campos do Jordão, 2009.

## APÊNDICES

## Apêndice A – Código de comandos computacionais compatível com *GNU octave*

```
clear all

close all

load 'd212.dat'

pir=d212(:,7);

fdr=d212(:,8);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MEDIAS %%%%%%%%%%%%%%
for i=1:689

    pirm(i)= mean((pir)(1+60*(i-1):60+60*(i-1)));

    fdrm(i)=mean((fdr)(1+60*(i-1):60+60*(i-1)));

    fdrmm(i)= 0.0034166*fdrm(i);

    i1(i)=1*i;

    diferenca(i)=(pirm(i)-fdrmm(i));

    diferencaabs(i)=abs((pirm(i)-fdrmm(i)));

    diferenca2(i)=((pirm(i)-fdrmm(i))^2);

endfor

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% GRAFICO DADO X DADO %%%%%%%%%%
figure(1)

subplot(2,1,1) % divide a tela em 2 linhas x 1 coluna e seleciona o primeiro grafico

plot (pirm,'-b; Médias de 1 minuto, CMP3 em 30/07/2012;')

set (gca,'xlim',[1 689])

set (gca,'XTick',[1:229:689])
```



```

dia=['07:00';'10:45';'14:45';'18:30'];

set(gca,'xTickLabel',dia);

title('(a)')

ylabel("Radiação (KW/m^2)")

xlabel('Tempo (hh:mm)')

print('radiacao cmp3212.png','-dpng')

subplot(2,1,2) % seleciona o segundo grafico

plot(fdrm,'-b;Médias de 1 minuto, TIL38 c/ shunt e difusor em 30/07/2012;')

set(gca,'xlim',[1 689])

set(gca,'XTick',[1:229:689])

dia=['07:00';'10:45';'14:45';'18:30'];

set(gca,'xTickLabel',dia);

title('(b)')

ylabel("Diferença de potencial (mV)")

xlabel('Tempo (hh:mm)')

print('prototipo_apenas_tensao_eletrica212.png','-dpng')

figure(2)

subplot(2,1,1) % divide a tela em 2 linhas x 1 coluna e seleciona o primeiro grafico

plot(pirm,'-b; Médias de 1 minuto, CMP3 em 30/07/2012;')

set(gca,'xlim',[1 689])

set(gca,'XTick',[1:229:689])

dia=['07:00';'10:45';'14:45';'18:30'];

```

```

set(gca,'xTickLabel',dia);

title('(a)')

ylabel("Radiação (KW/m^2)")

xlabel('Tempo (hh:mm)')

print('radiacao cmp3212.png','-dpng')

subplot(2,1,2) % seleciona o segundo grafico

plot(fdrmm,'-b;Médias de 1 minuto, TIL38 c/ shunt e difusor em 30/07/2012;')

set(gca,'xlim',[1 689])

set(gca,'XTick',[1:229:689])

dia=['07:00';'10:45';'14:45';'18:30'];

set(gca,'xTickLabel',dia);

title('(b)')

ylabel("Radiação (KW/m^2)")

xlabel('Tempo (hh:mm)')

print('prototipo1212.png','-dpng')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% AJUSTE LINEAR %%%%%%%%%%%%%%%
p=polyfit(fdrmm,pirm,1)

%(x,fx,n) <<<x=> observado> <fx+>calculado> <n e' o grau do polinomio>,,,,, <p é o
vetor que contem os coeficientes do polinomio

d=polyval(p,fdrmm);

%d contem os

figure(3)

```

```

plot(fdrmm,d,';Linearização dos pontos em 30/07/2012;',fdrmm,pirm,'+k;Correlação
entre os dados;')

set(gca,'xlim',[0 0.5])

set(gca,'ylim',[0 0.5])

legend('Linearização do pontos', ' Correlação entre os dados em 30/07/2012', 'location',
'northeast');

%title('Radiacao obtida via sensor CMP3(kipp & Zonen) versus dados obtidos via
prototipo')

xlabel('Radiacao (TIL38) (KW/m^2)')

ylabel('Radiacao (CMP3) (KW/m^2)')

replot

print('correlacao212.png','-dpng')

replot

%%%%%%%%%%          FATOR DE MULTIPLICACAO          %%%%%%%%%%%
pirmedio=mean(pir)

fdrmedio=mean(fdrm)

desvio=std(fdrmm)

covariancia=cov(fdrmm,pirm)

correlacao = corrcoef(fdrmm,pirm)

desviopadrao=std(fdrmm)

multiplicador=pirmedio/fdrmedio

im=max(i)

somadiferenca=sum(diferenca)

MB=(1/im)*(somadiferenca)

```

$abssum = \sum(diferencaabs)$

$MAGE = (1/im) * abssum$

$soma2 = \sum(diferenca2)$

$RMSE = \sqrt{(1/im) * soma2}$

## ANEXOS

## Anexo A – Datasheet do fotodiodo modelo TIL38

### General Description

The TIL38 is a p-n GaAs infrared-emitting diode in a low-cost plastic T1- $\frac{3}{4}$  package.

**Output Spectrally Compatible With Silicon Sensors**  
**High Power Output**  
**High Radiant Intensity**

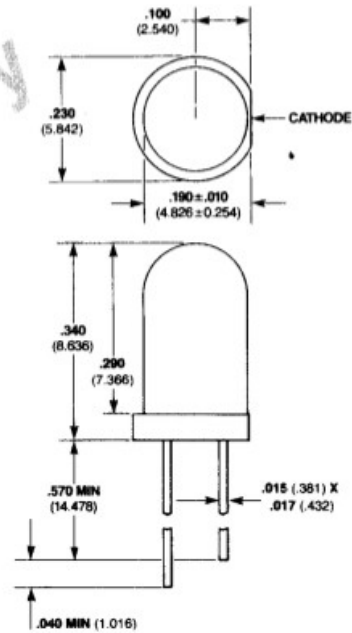
### Absolute Maximum Ratings

**Maximum Temperature**  
 Operating Temperature -55°C to +100°C  
 Storage Temperature -55°C to +100°C  
 Pin Temperature (Soldering, 3 s) 260°C

**Maximum Power Dissipation**  
 Total Dissipation at  $T_A = 25^\circ\text{C}$  125 mW  
 Derate Linearly at 25°C 1.3 mW/°C

**Maximum Voltage and Current**  
 $V_R$  Reverse Voltage 5 V  
 $I_F$  Forward dc Current (25°C) 150 mA

### Package Outline



### Notes

This device has a gray-tinted plastic body  
 All dimensions in inches **bold** and millimeters (parentheses)  
 Tolerance unless specified =  $\pm .015$  ( $\pm .381$ )

### Electrical Characteristics $T_A = 25^\circ\text{C}$

Symbol	Characteristic	Min	Typ	Max	Units	Test Conditions
$P_O$	Radiant Power Output	6	12		mW	$I_F = 100$ mA
$\lambda_{pk}$	Wavelength @ Peak Emission	915	940	975	nm	$I_F = 100$ mA
$\Delta\lambda$	Spectral Bandwidth Between Half-Power Points		50	75	nm	$I_F = 100$ mA
$\theta_{HII}$	Emission Beam Angle Between Half Intensity		60		degree	$I_F = 100$ mA
C	Capacitance		25		pF	$V_F = 0$ , $f = 1$ MHz
$t_r$	Radiant Rise Time		600		ns	$I_{FM} = 20$ mA, $t_w = 2$ $\mu$ s
$t_f$	Radiant Fall Time		350		ns	$f = 45$ kHz
$V_F$	Forward Voltage		2.55		V	$I_F = 1$ A

Datasheet adaptado de Fairchild Semiconductor (1980).

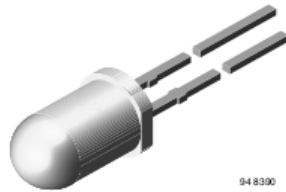
# Anexo B – Datasheet do fotodiodo modelo TSFF5410



**TSFF5410**

Vishay Semiconductors

## High Speed Infrared Emitting Diode, RoHS Compliant, 870 nm, GaAIAs Double Hetero



### FEATURES

- Package type: leaded
- Package form: T-1 $\frac{3}{4}$
- Dimensions (in mm):  $\varnothing$  5
- Leads with stand-off
- Peak wavelength:  $\lambda_p = 870$  nm
- High reliability
- High radiant power
- High radiant intensity
- Angle of half intensity:  $\varphi = \pm 22^\circ$
- Low forward voltage
- Suitable for high pulse current operation
- High modulation bandwidth:  $f_c = 24$  MHz
- Good spectral matching to Si photodetectors
- Lead (Pb)-free component in accordance with RoHS 2002/95/EC and WEEE 2002/96/EC



**RoHS COMPLIANT**

### DESCRIPTION

TSFF5410 is an infrared, 870 nm emitting diode in GaAIAs double hetero (DH) technology with high radiant power and high speed, molded in a clear, untinted plastic package.

### APPLICATIONS

- Infrared video data transmission between camcorder and TV set
- Free air data transmission systems with high modulation frequencies or high data transmission rate requirements

### PRODUCT SUMMARY

COMPONENT	$I_e$ (mW/sr)	$\varphi$ (deg)	$\lambda_p$ (nm)	$t_r$ (ns)
TSFF5410	70	$\pm 22$	870	15

**Note**

Test conditions see table "Basic Characteristics"

### ORDERING INFORMATION

ORDERING CODE	PACKAGING	REMARKS	PACKAGE FORM
TSFF5410	Bulk	MOQ: 4000 pcs, 4000 pcs/bulk	T-1 $\frac{3}{4}$

**Note**

MOQ: minimum order quantity

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Reverse voltage		$V_R$	5	V
Forward current		$I_F$	100	mA
Peak forward current	$t_p/T = 0.5, t_p = 100 \mu s$	$I_{FM}$	200	mA
Surge forward current	$t_p = 100 \mu s$	$I_{FSM}$	1	A
Power dissipation		$P_V$	180	mW

# TSFF5410

Vishay Semiconductors

High Speed Infrared Emitting Diode, RoHS Compliant, 870 nm, GaAlAs Double Hetero



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Junction temperature		$T_j$	100	$^{\circ}\text{C}$
Operating temperature range		$T_{\text{amb}}$	- 40 to + 85	$^{\circ}\text{C}$
Storage temperature range		$T_{\text{stg}}$	- 40 to + 100	$^{\circ}\text{C}$
Soldering temperature	$t \leq 5 \text{ s}$ , 2 mm from case	$T_{\text{sd}}$	260	$^{\circ}\text{C}$
Thermal resistance junction/ambient	J-STD-051, leads 7 mm, soldered on PCB	$R_{\text{thJA}}$	230	K/W

**Note**

$T_{\text{amb}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified

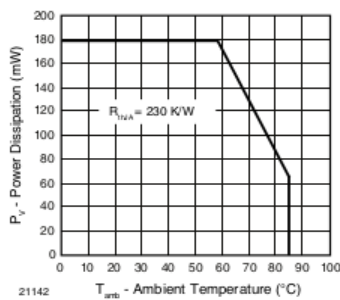


Fig. 1 - Power Dissipation Limit vs. Ambient Temperature

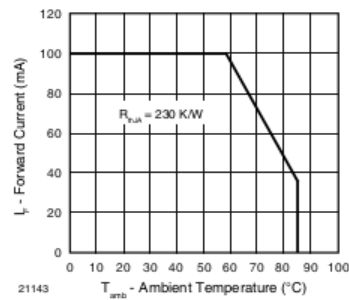


Fig. 2 - Forward Current Limit vs. Ambient Temperature

BASIC CHARACTERISTICS						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Forward voltage	$I_F = 100 \text{ mA}$ , $t_p = 20 \text{ ms}$	$V_F$		1.5	1.8	V
	$I_F = 1 \text{ A}$ , $t_p = 100 \text{ } \mu\text{s}$	$V_F$		2.3	3.0	V
Temperature coefficient of $V_F$	$I_F = 1 \text{ mA}$	$\text{TK}_{V_F}$		- 1.8		mV/K
Reverse current	$V_R = 5 \text{ V}$	$I_R$			10	$\mu\text{A}$
Junction capacitance	$V_R = 0 \text{ V}$ , $f = 1 \text{ MHz}$ , $E = 0$	$C_j$		125		pF
Radiant intensity	$I_F = 100 \text{ mA}$ , $t_p = 20 \text{ ms}$	$I_e$	45	70	135	mW/sr
	$I_F = 1 \text{ A}$ , $t_p = 100 \text{ } \mu\text{s}$	$I_e$		700		mW/sr
Radiant power	$I_F = 100 \text{ mA}$ , $t_p = 20 \text{ ms}$	$\phi_e$		50		mW
Temperature coefficient of $\phi_e$	$I_F = 100 \text{ mA}$	$\text{TK}_{\phi_e}$		- 0.35		%/K
Angle of half intensity		$\varphi$		$\pm 22$		deg
Peak wavelength	$I_F = 100 \text{ mA}$	$\lambda_p$		870		nm
Spectral bandwidth	$I_F = 100 \text{ mA}$	$\Delta\lambda$		40		nm
Temperature coefficient of $\lambda_p$	$I_F = 100 \text{ mA}$	$\text{TK}_{\lambda_p}$		0.25		nm/K
Rise time	$I_F = 100 \text{ mA}$	$t_r$		15		ns
Fall time	$I_F = 100 \text{ mA}$	$t_f$		15		ns
Cut-off frequency	$I_{\text{DC}} = 70 \text{ mA}$ , $I_{\text{AC}} = 30 \text{ mA pp}$	$f_c$		24		MHz
Virtual source diameter		$d$		2.1		mm

**Note**

$T_{\text{amb}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified





**TSFF5410**

High Speed Infrared Emitting Diode, RoHS Compliant, 870 nm, GaAlAs Double Hetero Vishay Semiconductors

**BASIC CHARACTERISTICS**

$T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , unless otherwise specified

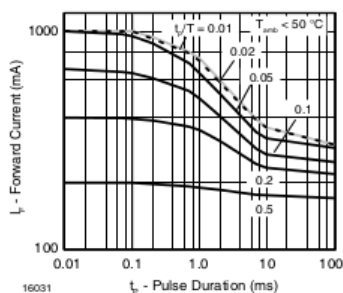


Fig. 3 - Pulse Forward Current vs. Pulse Duration

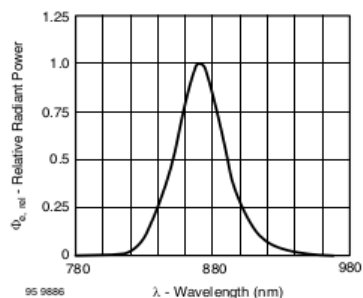


Fig. 6 - Relative Radiant Power vs. Wavelength

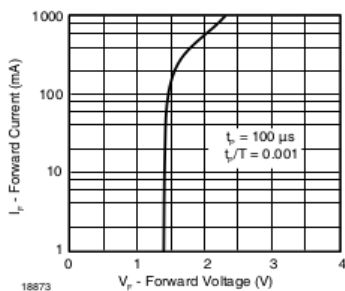


Fig. 4 - Forward Current vs. Forward Voltage

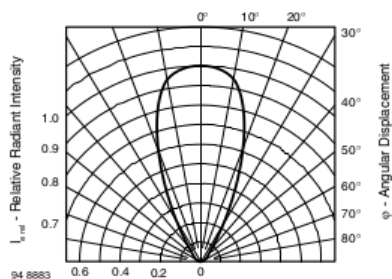


Fig. 7 - Relative Radiant Intensity vs. Angular Displacement

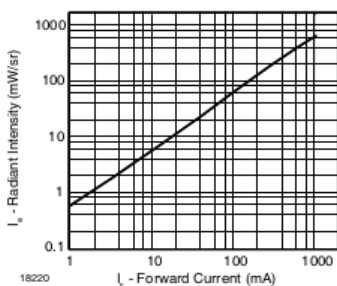


Fig. 5 - Radiant Intensity vs. Forward Current

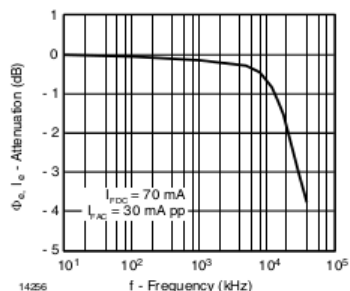


Fig. 8 - Attenuation vs. Frequency

## TSFF5410

Vishay Semiconductors

High Speed Infrared Emitting Diode, RoHS  
Compliant, 870 nm, GaAIAs Double Hetero



**PACKAGE DIMENSIONS** in millimeters



## Legal Disclaimer Notice

Vishay

### Disclaimer

All product specifications and data are subject to change without notice.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained herein or in any other disclosure relating to any product.

Vishay disclaims any and all liability arising out of the use or application of any product described herein or of any information provided herein to the maximum extent permitted by law. The product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein, which apply to these products.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay.

The products shown herein are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications unless otherwise expressly indicated. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so entirely at their own risk and agree to fully indemnify Vishay for any damages arising or resulting from such use or sale. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.