

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC
CAMPUS ARARANGUÁ – SC
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

Alex Da Silva De Luca

**MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO A PARTIR DE PROTÓTIPOS DE CÉLULAS DE
REFERÊNCIA CONSIDERANDO DISTINTOS MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO**

ARARANGUÁ

2021

Alex Da Silva De Luca

MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO A PARTIR DE PROTÓTIPOS DE CÉLULAS DE REFERÊNCIA CONSIDERANDO DISTINTOS MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Energia do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel/Licenciado em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Giuliano Arns Rampinelli

Araranguá

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

De Luca, Alex S.

MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO A PARTIR DE PROTÓTIPOS DE CÉLULAS DE
REFERÊNCIA CONSIDERANDO DISTINTOS MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO /
Alex S. De Luca ; orientador, Giuliano A. Rampinelli, 2021.
68 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,
Graduação em Engenharia de Energia, Araranguá, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia de Energia. 2. Radiação solar. 3. Célula
de referência. 4. Piranômetro. 5. Calibração. I. Rampinelli,
Giuliano A.. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia de Energia. III. Título.

Alex Da Silva De Luca

MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO A PARTIR DE PROTÓTIPOS DE CÉLULAS DE REFERÊNCIA CONSIDERANDO DISTINTOS MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro de Energia” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Energia

Prof.º Dr.º Giuliano Arns Rampinelli
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof.º Dr.º Leonardo Elizeire Bremermann
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof.º Dr.º Fernando Schuck de Oliveira
Avaliador
Faculdades João Paulo II

Certificamos que essa é a versão original e final do trabalho que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro/a de Energia.

Prof.º Dr.º Giuliano Arns Rampinelli
Orientador

Prof.º Luciano Lopes Pfitscher, Dr.
Coordenador do Curso

Alex Da Silva De Luca

Araranguá, 22 de maio de 2021

*Este trabalho é dedicado à minha companheira Jhoanne,
sem a qual nada disso seria possível.*

*E meus sinceros agradecimentos a todos meus professores
que me guiaram durante toda a jornada.*

RESUMO

A radiação solar é uma fonte energética inesgotável que fornece um enorme potencial de utilização a ser explorado pelo homem. Neste contexto faz-se necessário conhecer e explorar as ferramentas e os mecanismos dos sistemas que permitem a captação ou conversão da energia solar em outras formas de energia, bem como os melhores métodos para sua obtenção e medição. Os sistemas fotovoltaicos, tradicionalmente, sempre apresentaram altos custos de produção, o que inviabilizava a sua ampla utilização. Neste sentido, pesquisas científicas e desenvolvimento tecnológico permitiram uma redução gradual nos custos dos componentes e resultaram em viabilidade econômica desta tecnologia. Além de fornecer um dispositivo acessível financeiramente é fundamental conhecer a disponibilidade do recurso energético e para isso, são utilizados medidores de radiação solar. Desta forma o objetivo desse trabalho é analisar a influência dos métodos de calibração na medida da radiação solar por meio de protótipos de células de referência. Todos os procedimentos metodológicos foram realizados com uso de equipamentos e componentes disponíveis no Laboratório de Pesquisa Aplicada (LPA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Todas as células de referência foram desenvolvidas em processo semiprofissional e foram calibradas a partir de métodos *indoor* e *outdoor* no Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Quanto a análise da influência dos métodos de calibração, o método *indoor* por simulador solar demonstrou maior confiabilidade em relação aos demais quando comparados à medição de referência de uma estação meteorológica. Quanto a células monocristalinas estas apresentam maior estabilidade entre as células. Foi observada ainda uma maior efetividade do método *indoor* quando comparado ao método *outdoor*. Por fim, foi possível e viável a realização e utilização de protótipos de células de referência de baixo custo para medição de radiação solar.

Palavras-Chave: Radiação solar, Célula de referência, Piranômetro, Calibração

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes para a criação do Protótipo	17
Figura 2 - Apresentação da estrutura da célula de referência.....	17
Figura 3 - Esquema de módulo fotovoltaico.	18
Figura 4 - Laminadora Astro de módulos fotovoltaicos.....	19
Figura 5 - Distribuição da temperatura e pressão para a célula de referência do protótipo 4 no período de laminação.	20
Figura 6 - Protótipos de células de referência, m-Si, 4,5 e 6.....	21
Figura 7 - Protótipos de células de referência, mc-Si, 7, 8 e 9.....	21
Figura 8 - Curva Característica I-V	22
Figura 9 - Resistor shunt anexado na célula de referência.	22
Figura 10 - Vista interna do simulador com a célula de referência na caracterização elétrica ...	25
Figura 11 - Curvas I-V das células de referência de m-Si, $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{célula}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ e AM1,5.	26
Figura 12 - Curvas I-V das células de referência de mc-Si, $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{célula}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ e AM1,5.	26
Figura 13 - Calibração outdoor das células de referência.	27
Figura 14 - Protótipos na estrutura de medição.....	28
Figura 15 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência m-Si Cr4 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr4 calibrada por uma célula de referência padrão).	30
Figura 16 - - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência m-Si Cr5 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr5 calibrada por uma célula de referência padrão).	30
Figura 17 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência m-Si Cr6 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr6 calibrada por uma célula de referência padrão).	31
Figura 18 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si Cr7 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr7 calibrada por uma célula de referência padrão).	32

Figura 19 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si Cr8 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr8 calibrada por uma célula de referência padrão).	32
Figura 20 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si Cr9 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr9 calibrada por uma célula de referência padrão).	33
Figura 21 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência m-Si Cr4 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr4 calibrada por um piranômetro termoeletrico).	34
Figura 22 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência m-Si Cr6 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr6 calibrada por um piranômetro termoeletrico).	34
Figura 23 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si Cr7 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr7 calibrada por um piranômetro termoeletrico).	35
Figura 24 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si Cr8 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr8 calibrada por um piranômetro termoeletrico).	36
Figura 25 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si Cr9 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr9 calibrada por um piranômetro termoeletrico).	36
Figura 26 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência m-Si Cr4 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr4 calibrado por simulador solar).	37
Figura 27 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência m-Si Cr5 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr5 calibrado por simulador solar).	38
Figura 28 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência m-Si Cr6 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr6 calibrado por simulador solar).	38
Figura 29 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si Cr7 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr7 calibrado por simulador solar).	39

Figura 30 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si Cr8 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr8 calibrado por simulador solar).	39
Figura 31 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si Cr9 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr9 calibrado por simulador solar).	40
Figura 32 – Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência m-Si Cr4 em função da calibração por célula de referência padrão e por piranômetro termoelétrico.	42
Figura 33 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência m-Si Cr6 em função da calibração por célula de referência padrão e por piranômetro termoelétrico.	43
Figura 34 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência mc-Si Cr7 em função da calibração por célula de referência padrão e por piranômetro termoelétrico	43
Figura 35 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência mc-Si Cr8 em função da calibração por célula de referência padrão e por piranômetro termoelétrico.	43
Figura 36 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência mc-Si Cr9 em função da calibração por célula de referência padrão e por piranômetro termoelétrico	44
Figura 37 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência m-Si Cr4 em função da calibração por célula de referência padrão e por simulador solar.	44
Figura 38 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência m-Si Cr5 em função da calibração por célula de referência padrão e por simulador solar.	45
Figura 39 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência m-Si Cr6 em função da calibração por célula de referência padrão e por simulador solar.	45
Figura 40 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência mc-Si Cr7 em função da calibração por célula de referência padrão e por simulador solar.	45
Figura 41 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência mc-Si Cr8 em função da calibração por célula de referência padrão e por simulador solar.	46
Figura 42 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência mc-Si Cr9 em função da calibração por célula de referência padrão e por simulador solar.	46
Figura 43 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência m-Si Cr4 em função da calibração por piranômetro termoelétrico e por simulador solar.	47
Figura 44 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência m-Si Cr6 em função da calibração por piranômetro termoelétrico e por simulador solar.	47

Figura 45 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência mc-Si Cr7 em função da calibração por piranômetro termoeletrico e por simulador solar.....	47
Figura 46 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência mc-Si Cr8 em função da calibração por piranômetro termoeletrico e por simulador solar.....	48
Figura 47 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência mc-Si Cr9 em função da calibração por piranômetro termoeletrico e por simulador solar.....	48
Figura 48 - Curva de calibração outdoor do PROT 4 com a célula de referência.....	61
Figura 49 - Curva de calibração outdoor do PROT 5 com a célula de referência.....	61
Figura 50 - Curva de calibração outdoor do PROT 6 com a célula de referência.....	62
Figura 51 - Curva de calibração outdoor do PROT 7 com a célula de referência.....	62
Figura 52 - Curva de calibração outdoor do PROT 8 com a célula de referência.....	63
Figura 53 - Curva de calibração outdoor do PROT 9 com a célula de referência.....	63
Figura 54 - Curva de calibração outdoor do PROT 4 com o piranômetro termoeletrico.....	64
Figura 55 - Curva de calibração outdoor do PROT 6 com o piranômetro termoeletrico.....	64
Figura 56 - Curva de calibração outdoor do PROT 7 com o piranômetro termoeletrico.....	65
Figura 57 - Curva de calibração outdoor do PROT 8 com o piranômetro termoeletrico.....	65
Figura 58 - Curva de calibração outdoor do PROT 9 com o piranômetro termoeletrico.....	66
Figura 59 - Curva de calibração do resistor shunt do PROT 4.....	67
Figura 60 - Curva de calibração do resistor shunt do PROT 5.....	67
Figura 61 - Curva de calibração do resistor shunt do PROT 6.....	68
Figura 62 - Curva de calibração do resistor shunt do PROT 7.....	68
Figura 63 - Curva de calibração do resistor shunt do PROT 8.....	69
Figura 64 - Curva de calibração do resistor shunt do PROT 9.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estruturas das Células de referência.	20
Tabela 2 - Precisão do multímetro MDR-400 em diferentes faixas de escala para medição da tensão DC	29
Tabela 3 – Médias, medianas e desvio padrão amostral referente aos desvios percentuais das medições de irradiância nas células m-Si durante todo o período do estudo (abrangendo os dados mostrados nos Figura de 1 a 17).....	41
Tabela 4 - Médias, medianas e desvio padrão amostral referente aos desvios percentuais das medições de irradiância nas células mc-Si durante todo o período do estudo (abrangendo os dados mostrados nos Figura de 1 a 17).....	41
Tabela 5 - Desvio percentual das medidas de irradiância para as células m-Si.	49
Tabela 6 - Desvio percentual das medidas de irradiância para as células mc-Si.....	50

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. MÉTODOS	16
2.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS	16
2.2. PROCESSO DE LAMINAÇÃO	18
2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS CÉLULAS DE REFERÊNCIA	21
2.4. RESISTOR SHUNT	22
3. MEDIÇÃO DO DESEMPENHO DE MÓDULO E CALIBRAÇÃO	23
3.1. MÉTODOS <i>OUTDOOR</i> E <i>INDOOR</i>	24
4. RESULTADOS	25
4.1. CARACTERIZAÇÃO <i>INDOOR</i> DAS CÉLULAS DE REFERÊNCIA	25
4.2. CARACTERIZAÇÃO <i>OUTDOOR</i> DAS CÉLULAS DE REFERÊNCIA	27
4.3. CALIBRAÇÃO DO RESISTOR SHUNT	27
4.4. OBTENÇÃO DOS DADOS	28
4.5. DESVIOS PERCENTUAIS DE IRRADIÂNCIAS ENTRE AS CÉLULAS DE REFERÊNCIA E O PIRANÔMETRO DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA.....	29
4.6. DESVIO DAS MEDIDAS DE IRRADIÂNCIAS ENTRE AS METODOLOGIAS DE CALIBRAÇÃO	42
5. DISCUSSÃO	51
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
7. REFERÊNCIAS	57
ANEXO A – GRÁFICOS DOS PROTÓTIPOS NA CARACTERIZAÇÃO <i>OUTDOOR</i> ATRAVÉS DA CÉLULA DE REFERÊNCIA PADRÃO.....	61
ANEXO B – GRÁFICOS DOS PROTÓTIPOS NA CARACTERIZAÇÃO <i>OUTDOOR</i> ATRAVÉS DO PIRANÔMETRO TERMOELÉTRICO.....	64
ANEXO C – GRÁFICOS DOS PROTÓTIPOS NA CARACTERIZAÇÃO DO RESISTOR SHUNT	67

1. INTRODUÇÃO

A energia solar é de extrema importância para todas as formas de desenvolvimento da atmosfera, incluindo a manutenção da vida terrestre e desenvolvimento mundial (SOUZA; SILVA; TANAKA; ULIANA; ALMEIDA; KLAR; GOMES, 2017; POLVERINI; DODD; ESPINOSA, 2020). A radiação solar é uma fonte energética inesgotável e de extremo potencial a ser explorado, dessa forma o conhecimento dessa fonte permite maximizar seu aproveitamento, sendo este através da criação de sistema que permitam seu uso e conversão em fontes térmicas e/ou elétricas (PINHO; GALDINO, 2014; MEDEIROS; SILVA; BEZERRA, 2017).

As possibilidades de utilização e aplicação da energia solar já é amplamente caracterizada e reconhecida mundialmente, sendo seu aproveitamento fundamental para o desenvolvimento sustentável (HUBER; BUGLIARO; PONATER; GARNY; EMDE; MAYER, 2016). Dados recentes demonstram que o Brasil apresenta grande potencial solar, e que mesmo em regiões menos ensolarados é possível e viável instalar sistemas de energia solar fotovoltaica, o que permite viabilizar ainda mais a utilização desse sistema para a população nacional (SOUZA; TONOLO; YANG; TIEPOLO; URBANETZ JUNIOR, 2019). Segundos dados do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB) do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, anualmente o sol fornece a atmosfera terrestre, cerca de $1,5 \times 10^{18}$ kWh de energia, trata-se de um valor considerável, já que este corresponde a 10000 vezes o consumo mundial de energia para o período descrito (MONTEZANO, 2014).

Este fato fortalece a importância do entendimento para uso e correta aplicabilidade desse recurso. Indicando ainda que, além de ser responsável pela manutenção da vida na terra, a radiação solar é uma fonte inesgotável energética que fornece um enorme potencial de utilização a ser explorado pelo homem. Neste contexto é necessário entender o mecanismo de funcionamento dos sistemas, a serem empregados com a finalidade de conversão desses raios solares em outras formas de energia. Atuando dessa maneira como uma ferramenta fundamental e poderosa para o desenvolvimento mundial da energia renovável (PINHO; GALDINO, 2014).

Dentre as variadas formas para a realização da conversão da energia solar está a aplicação do efeito fotovoltaico que ocorre através de dispositivos chamados *células fotovoltaicas*. Estas células são componentes optoeletrônicos que convertem diretamente a radiação solar em eletricidade (MONTEZANO, 2014; KALOGIROU, 2014). E para

que realizem tal função essas células necessitam serem constituídas de materiais semicondutores, e na maioria dos dispositivos o silício é o material de primeira escolha e o mais empregado, devido ao seu desempenho (GREEN; HISHIKAWA; DUNLOP; LEVI; HOHL-EBINGER; HO-BAILLIE, 2017; MARION; SMITH, 2017).

Um ponto de atenção nesta questão, é que o processo de obtenção da conversão envolve altos custos de produção (CHANG; ZHENG; WU; SHEN; QI; CATCHPOLE; HO-BAILLIE; EGAN, 2020). O que acaba algumas vezes inviabilizando a sua ampla utilização. Na atualidade a comunidade científica vem reunindo esforços para o desenvolvimento de sistemas de geração fotovoltaica com menor custo e menor perdas elétricas nas células (BABAR; GRAVERSEN; BOSTRÖM, 2019; PHILIPPS, 2017). Outro importante fator a ser levado em consideração é a calibração de células e módulos de referência para medição de radiação solar, um ponto de grande relevância é a produção de dispositivos com reduzido custo de construção, porém que forneçam operação e resposta espectral idêntica à do módulo fotovoltaico já disponíveis no mercado. Tendo em vista a importância da conversão da energia solar para o desenvolvimento mundial (POLVERINI; DODD; ESPINOSA, 2020).

Para o maior entendimento de todo esse processo é preciso considerar a constante solar, o que envolve diretamente a distância entre o Sol e a Terra. E considerar que dessa interação apenas uma fração da radiação solar atinge a superfície terrestre. E isso ocorre devido à reflexão e absorção dos raios solares pela nossa atmosfera. (CHANG; ZHENG; WU; SHEN; QI; CATCHPOLE; HO-BAILLIE; EGAN, 2020). Esta fração que atravessa toda a espessura da atmosfera e atinge o solo é constituída por um componente direta e por uma componente difusa (YANG; GUEYMARD, 2020).

A componente direta é aquela que atravessa diretamente a atmosfera terrestre sem sofrer espalhamento e produz sombras nítidas, enquanto a componente difusa é aquela proveniente de todas as direções e que atinge a superfície após sofrer espalhamento ao entrar na atmosfera terrestre. Pode haver ainda um terceiro componente, e este está relacionado com a inclinação da superfície receptora em relação a horizontal, o que resultará em reflexão do ambiente do entorno, o que é denominado de albedo, alguns exemplos desde são solos, vegetação, obstáculos, e terrenos rochosos (PINHO; GALDINO, 2014; MONTEZANO, 2014).

A medição da radiação solar, tanto a componente direta como a componente difusa na superfície terrestre são de grande importância para os estudos das influências das condições climáticas e atmosféricas. Com a caracterização dessas medidas, pode-se

predizer a viabilidade de um projeto de instalações dos sistemas fotovoltaicos em uma determinada região. O que permite o aproveitamento máximo ao longo da estação do ano, onde as variações da intensidade da radiação solar podem sofrer significativas alterações. Por exemplo, em um dia de céu totalmente claro, cerca de 20% da radiação solar que atinge a superfície é proveniente da componente difusa, já em um dia totalmente nublado, 100% é proveniente da componente difusa (CROTTI; RAMPINELLI, 2018).

Os instrumentos para medição da radiação solar comercialmente disponíveis são conhecidos como: piranômetro e pireliômetro, o primeiro é usado para medições de radiação solar global (direta + difusa) que é a radiação de importância para os dispositivos fotovoltaicos (MARTÍNEZ; ANDÓJAR; ENRIQUE, 2009; SIMÓN-MARTÍN; ALONSO-TRISTÁN; GONZÁLEZ-PEÑA; DíEZ-MEDIAVILLA, 2015). O segundo é usado para medidas da componente direta da radiação solar (CROTTI; RAMPINELLI, 2018). Sendo o Piranômetro o método empregado em nosso estudo. As vantagens da utilização dos piranômetro fotovoltaico são o seu baixo custo, resposta espectral idêntica à de um módulo fotovoltaico convencional de célula de c-Si e o tempo de resposta praticamente instantâneo (ordem de 10 μ s) e linear com a irradiância (PINHO e GALDINO, 2014; BHARADWAJ; JOHN, 2014; SRIKRISHNAN; YOUNG; WITMER; BROWNSON, 2015).

A partir do conhecimento da irradiância solar local e do perfil de seu comportamento, pode-se viabilizar a instalação de sistemas fotovoltaicos garantindo o seu máximo aproveitamento. Desta forma, a informação sobre o recurso solar é a variável de maior importância no desenvolvimento de um projeto de sistema de aproveitamento da energia solar (TAKIGAWA; ARANHA NETO; FERNANDES; CAMPOS; CARDOSO, 2019).

Neste contexto o objetivo deste trabalho é analisar a influência dos métodos de calibração na medida da radiação solar por meio de protótipos de células de referência, desenvolvidas no Laboratório de Pesquisa Aplicada (LPA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e calibradas no Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

2. MÉTODOS

O desenvolvimento e os procedimentos metodológicos foram realizados com uso de equipamentos e componentes disponíveis no Laboratório de Pesquisa Aplicada (LPA) do Centro de Ciências Tecnológicas e Saúde (CTS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O processo de calibração das células de referência foi realizado no Laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

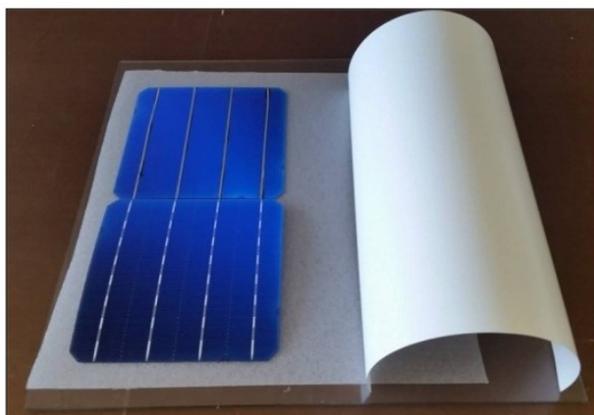
2.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

Para a produção e desenvolvimento dos protótipos de células de referência foi necessário os seguintes recursos;

- Células fotovoltaicas de m-Si e mc-Si: 4,74 W, 0,5 V, $i = 9,48$ A, $\eta = 19,4$;
- Acetato de etil vinila - EVA;
- Vidro;
- Estação de solda por indução, utilização de caneta de fluxo;
- Fita de estanho de 1,8 mm e 5 mm;
- Tedlar;
- Alumínio;
- Tesoura;
- Estilete;
- Utilização da laminadora Astro;
- O uso de Piranômetro fotovoltaico da planta piloto;
- Piranômetro termoeletrico EPPLEY do LABSOL;
- Célula de Referência SOZ-03 do LABSOL;
- Multímetro Minipa ET-2082D;
- Multímetro MultiMeter MDR-400;
- Agilent Technologies 34980A – datalogger Multifunction Switch/Measure Unit;
- Resistor shunt padrão do LABSOL
- Simulador Solar Pasan SunSim 3c.

Para a obtenção dos protótipos foi utilizado o polímero *Tedlar* como material base, além disso o polímero EVA foi necessário para o encapsulamento das células fotovoltaicas e o vidro foi empregado como material de cobertura. E para a construção desses protótipos foi utilizada uma célula de m-Si (monocristalino) ou mc-Si (multicristalino) para as células de referência. O que pode ser observado na figura 1.

Figura 1 - Componentes para a criação do Protótipo



Fonte: Dados do autor, 2020.

Primeiramente foi utilizada a caneta de fluxo nos terminais da célula. Em seguida para o processo de metalização da célula foi integrado uma fita de alumínio estanhada com 1,8 mm nas células, utilizando uma estação de solda por indução. Alguns cortes de *tedlar* foram utilizados para isolar as ligações das células. O método realizado para metalização das células fotovoltaicas para a construção das células de referência é o mesmo método utilizado na construção dos módulos de referência. A metalização ocorreu em apenas 1 célula fotovoltaica de m-Si e mc-Si como pode ser observado na Figura 2. Após a metalização uma camada de EVA foi inserida na superfície superior e inferior da célula.

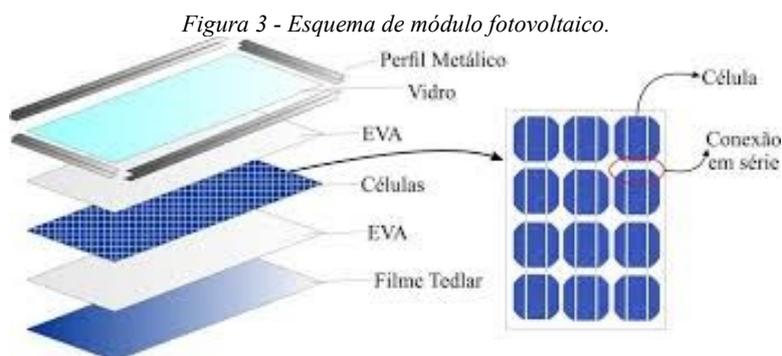
Figura 2 - Apresentação da estrutura da célula de referência.



Fonte: Dados do autor, 2020.

Os protótipos desenvolvidos passaram pelo processo de laminação para o encapsulamento das células fotovoltaicas. O material utilizado como encapsulante na produção de módulos fotovoltaicos foi o EVA, este recurso permite um acoplamento

óptico entre célula e os outros componentes. Fornecendo dessa forma o isolamento elétrico e físico para as células fotovoltaicas. Os módulos foram montados conforme demonstrado na Figura 3 com camadas de vidro/EVA/célula/EVA/Tedlar® (MACHADO; MIRANDA, 2015). Após a montagem dos componentes, o módulo foi inserido em uma laminadora.



Fonte: Machado e Miranda (2015).

2.2. PROCESSO DE LAMINAÇÃO

O processo se iniciou com o fechamento da câmara e um pré-aquecimento até a temperatura de 70°C. O primeiro ciclo da laminação o EVA se encontra na forma de gel, e então, se inicia o vácuo na parte interior da câmara.

No segundo ciclo, a temperatura chega a 90 °C e a parte superior do vácuo se desliga, fazendo com que a membrana de silicone pressione o módulo. No terceiro e último ciclo a temperatura sobe aproximadamente à 150 °C para a realização da fundição e cura do EVA. Depois da cura, o sistema é refrigerado com água até atingir uma temperatura de aproximadamente 75 °C, após esse processo, é conectado o vácuo na parte superior da câmara para soltar a membrana de silicone do módulo fotovoltaico (SANTOS, 2008).

Todo processo de construção e de laminação dos protótipos de células e módulos de referência foi realizado no Laboratório de Pesquisa Aplicada – LPA da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC campus Araranguá/SC. Para o processo de laminação dos protótipos foi utilizado uma laminadora da marca *Astro* conforme apresentado na figura 4.

Figura 4 - Laminadora Astro de módulos fotovoltaicos.

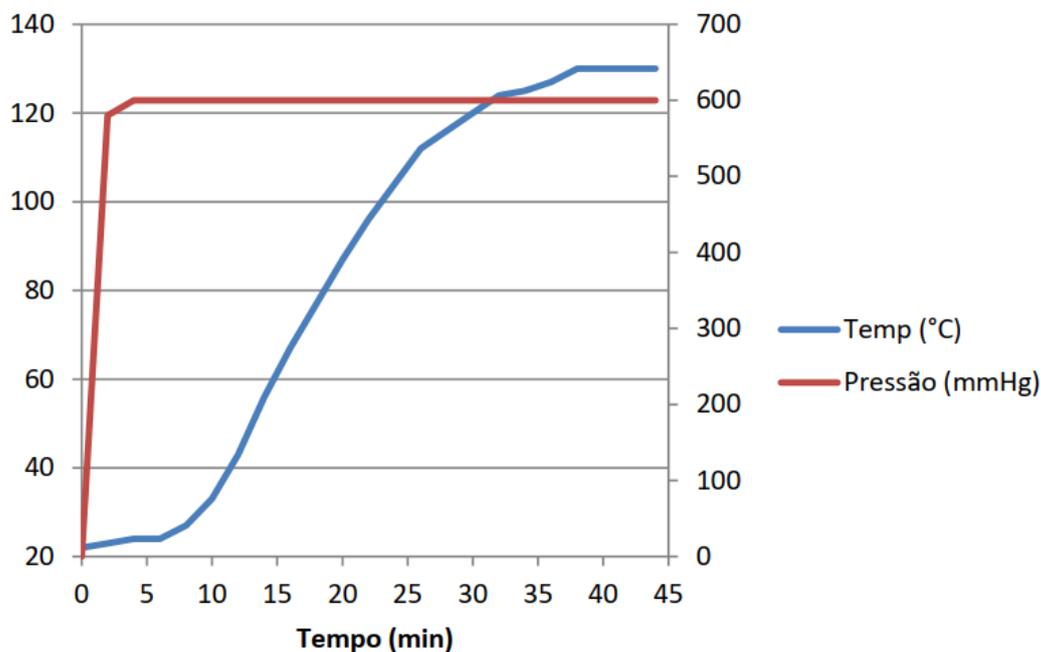


Fonte: Dados do autor, 2020.

No processo de laminação são alcançadas temperaturas entre 120 °C e 150 °C, quando o EVA se torna líquido e as eventuais bolhas de ar geradas são eliminadas (Pinho e Galdino, 2014). No processo de laminação dos protótipos, a pressão é reduzida entre 600 mmHg e 610 mmHg e a temperatura atingiu até 132 °C.

Foi observado que o perfil de temperatura ao longo do tempo é linear em praticamente todo o processo de laminação, o que pode ser observado na figura 5. A pressão em curto tempo se torna constante com valor de 610 mmHg, até o término da laminação. Observa-se, que o tempo total de laminação da célula de referência foi de aproximadamente 44 minutos.

Figura 5 - Distribuição da temperatura e pressão para a célula de referência do protótipo 4 no período de laminação.



Fonte: (ROSSO, 2019)

A estrutura de encapsulamento e tecnologias das células fotovoltaicas dos protótipos estão apresentadas na Tabela 1. As células de referência foram construídas usando diferentes tecnologias de silício cristalino. As tecnologias das células utilizada na construção foram de m- Si e mc-Si

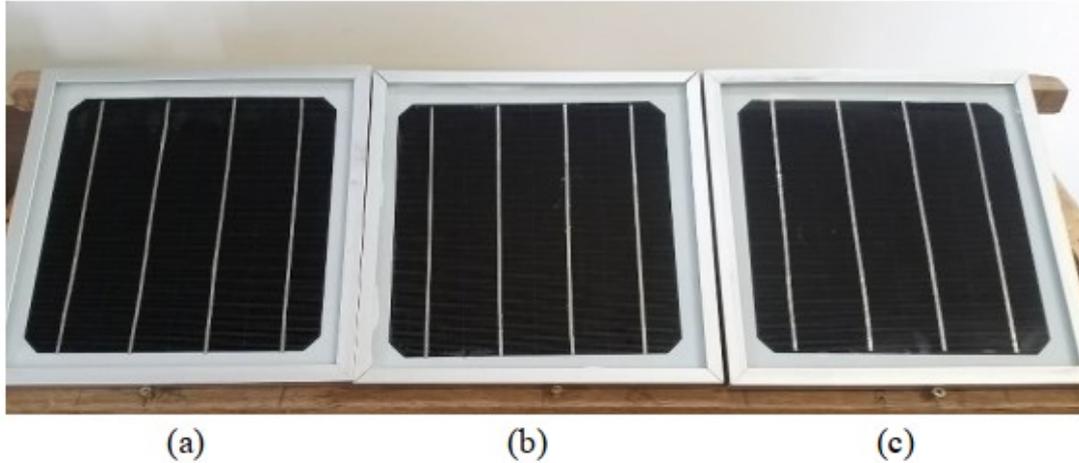
Tabela 1 - Estruturas das Células de referência.

Protótipo	Estrutura	Célula Fotovoltaica
Célula de Referência 4	Vidro/EVA/Tedlar	m-Si
Célula de Referência 5	Vidro/EVA/Tedlar	m-Si
Célula de Referência 6	Vidro/EVA/Tedlar	m-Si
Célula de Referência 7	Vidro/EVA/Tedlar	mc-Si
Célula de Referência 8	Vidro/EVA/Tedlar	mc-Si
Célula de Referência 9	Vidro/EVA/Tedlar	mc-Si

Fonte: Dados do autor, 2020.

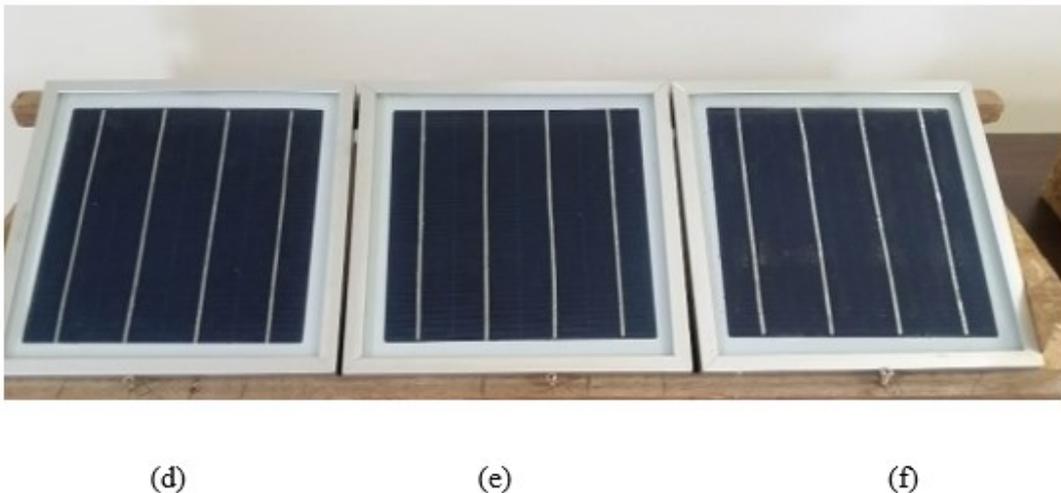
Foi empregado o método de inspeção visual para avaliação dos protótipos os quais não apresentaram nenhuma formação de bolhas no EVA após o processo de laminação. O que pode ser observado nas figuras 6 e 7.

Figura 6 - Protótipos de células de referência, m-Si, 4,5 e 6.



Legenda: (a) – Célula de referência 4; (b) - Célula de referência 5 e (c) Célula de referência 6.
Fonte: Dados do autor, 2020.

Figura 7 - Protótipos de células de referência, mc-Si, 7, 8 e 9.



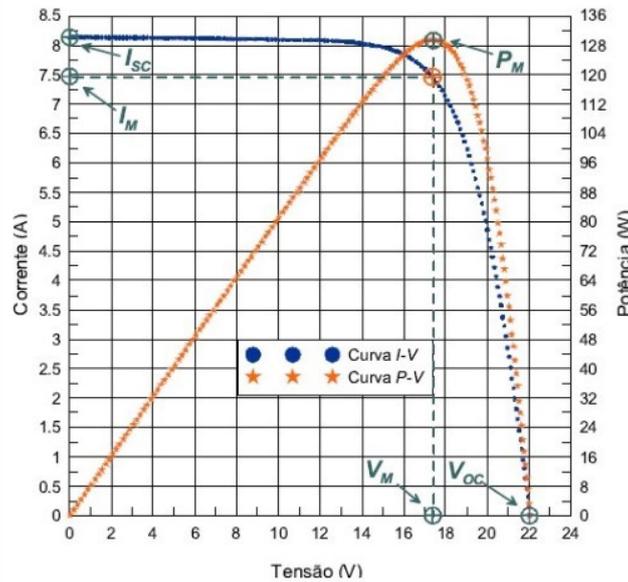
Legenda: (d) – Célula de referência 7; (e) - Célula de referência 8 e (f) Célula de referência 9.
Fonte: Dados do autor, 2020.

2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS CÉLULAS DE REFERÊNCIA

As células de referência foram submetidas às condições padrões de ensaio sob simulador solar (*Standart Test Conditions –STC*), ou seja, nível de irradiância de 1000 W/m² ou também conhecido como 1 sol, distribuição espectral correspondente a AM1,5 e temperatura de célula de 25°C. Uma fonte de tensão variável realiza uma varredura entre uma tensão negativa em relação aos terminais do módulo, até ultrapassar a tensão de circuito aberto do módulo com a corrente ficando negativa. Durante esta varredura são registrados pares de dados de tensão e corrente, permitindo o traçado de uma curva característica (HIOKI; SILVA; VILELA JUNIOR; LOURES, 2019).

A Figura 8 exemplifica a curva característica $I-V$, para um módulo fotovoltaico de 36 células em série, bem como a curva de potência *versus* tensão para este mesmo módulo.

Figura 8 - Curva Característica I-V



Fonte: Bühler (2011).

2.4. RESISTOR SHUNT

Martínez-Moreno et al, 2012 utilizaram um módulo de referência como sensor exclusivo de radiação solar e temperatura da célula. Adicionaram uma caixa de conexão ao módulo que inclui uma resistência de derivação e sua fiação, conhecido como resistor *shunt* (MARTÍNEZ-MORENO et al, 2012).

A corrente elétrica formada através da irradiância incidida no módulo atravessa o resistor *shunt*. No resistor *shunt* haverá uma queda de tensão e com esse valor pode-se estimar a corrente correspondente da irradiância no momento da medição. O resistor *shunt* deve estar calibrado e com a constante de calibração conhecida (ROSSO, 2019).

Figura 9 - Resistor shunt anexado na célula de referência.



Fonte: Dados do autor, 2020.

3. MEDIÇÃO DO DESEMPENHO DE MÓDULO E CALIBRAÇÃO

As medições são um fator importante para avaliar o desempenho de um módulo ou de um sistema fotovoltaico. E estas medições devem ser efetuadas em condições operacionais do módulo ou do sistema (GARCIA, 2015; (HIOKI; SILVA; VILELA JUNIOR; LOURES, 2019).

O desempenho de células e módulos fotovoltaicos é associado às condições de teste padrão (*Standart Test Conditions –STC*), ou seja, é associado ao nível de irradiância de 1000 W/m² também conhecido como 1 sol, sendo que essa distribuição espectral correspondente a AM1,5 e temperatura de célula de 25°C. Essa demonstração refere-se as condições de irradiância de operação considerando um dia de céu limpo e claro, entretanto, a temperatura em operação frequentemente resulta em temperaturas próximas a 50 °C. (MACÊDO, 2006; CROTTI; RAMPINELLI, 2018).

As diferenças geradas pelas mudanças de temperatura ocasionam também uma diferença entre a potência que será entregue pelo módulo fotovoltaico e sobre a potência nominal. O que se dá pela queda de tensão (BURGER; RÜTHER, 2006; HABTE; SENGUPTA; ANDREAS; REDA; ROBINSON, 2016).

Outro fator importante para ser considerado é a calibração, os procedimentos e métodos de calibração podem ser realizados mediante medições em simulador solar ou sob radiação solar. Já a correção de correspondência depende tanto do espectro de calibração quanto da resposta espectral da célula analisada (KIM; LEE; ZO; LEE; JUNG; RIM; JANG, 2018).

Outro fator é o controle de qualidade das instalações fotovoltaicas, que depende do padrão de condições de teste, controle das amostras de módulos fotovoltaicos individuais, as quais são realizadas em laboratórios especializados antes de sua instalação no campo. Isso permite garantir a resposta da potência inicial entregue da fábrica dos módulos fotovoltaicos, mas não exclui a ocorrências de fenômenos indesejáveis, como degradação, pontos quentes, polarização e assim por diante que também faz parte das realidades de campo (MARTÍNEZ-MORENO et al,2012). A principal caracterização elétrica de um módulo fotovoltaico é a curva característica I- V apresentado na figura 8.

3.1. MÉTODOS *OUTDOOR* E *INDOOR*

Dentre as possibilidades de sistemas para calibração de piranômetros, como é o apresentado neste trabalho, estão os métodos *outdoor* e *indoor* já discutidos previamente na introdução desse trabalho (AZOUZOUTE; MERROUNI; BENNOUNA; GENNIOUI, 2019). No método *outdoor*, a fonte de radiação é o Sol e os instrumentos de referência podem variar entre pireliômetro e um piranômetro sombreado, um pireliômetro e o próprio piranômetro sob calibração sombreado, ou apenas um piranômetro, desde que todos ou cada um deles tenha rastreabilidade, sendo à referência a Radiometria Mundial (GUIMARÃES, 2013; A CASTILLO-MATADAMAS; MOLINA-VAZQUEZ; QUINTERO-TORRES, 2015).

Já para a realização do método *indoor*, é necessário a calibração em um laboratório utilizando uma fonte artificial de radiação, por exemplo uma bancada óptica ou lâmpadas. E neste caso o instrumento de referência, é o piranômetro seguindo também a referência de rastreabilidade (GUIMARÃES, 2013; KIM; LEE; ZO; LEE; JUNG; RIM; JANG, 2018; AZOUZOUTE; MERROUNI; BENNOUNA; GENNIOUI, 2019).

4. RESULTADOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram necessários meticolosos métodos de calibragem garantindo uma precisão considerável. Esses métodos foram discutidos com maior detalhamento no estudo de ROSSO, 2019.

4.1. CARACTERIZAÇÃO *INDOOR* DAS CÉLULAS DE REFERÊNCIA

A caracterização das células de referência fora realizada através de um simulador solar. A simulação consiste em verificar os aspectos técnicos e parâmetros das curvas I-V incluindo a variação de irradiância. Os testes foram realizados no laboratório de Energia Solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). (ROSSO, 2019).

O simulador solar empregado consiste em um túnel que é composto de paredes escuras de material com baixa refletância nos comprimentos de onda de interesse. Nesta câmara fica o suporte para o encaixe, onde se encontra a célula de referência sob teste, a uma distância específica da lâmpada de xenônio geradora de flash (Figura 10).

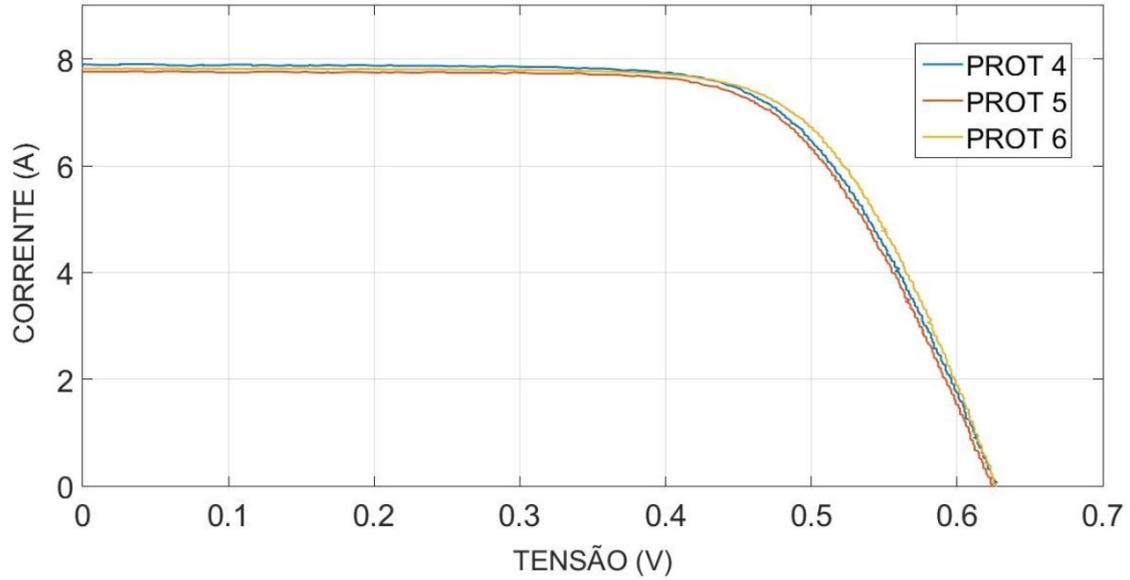
Figura 10 - Vista interna do simulador com a célula de referência na caracterização elétrica



Fonte: (ROSSO, 2019).

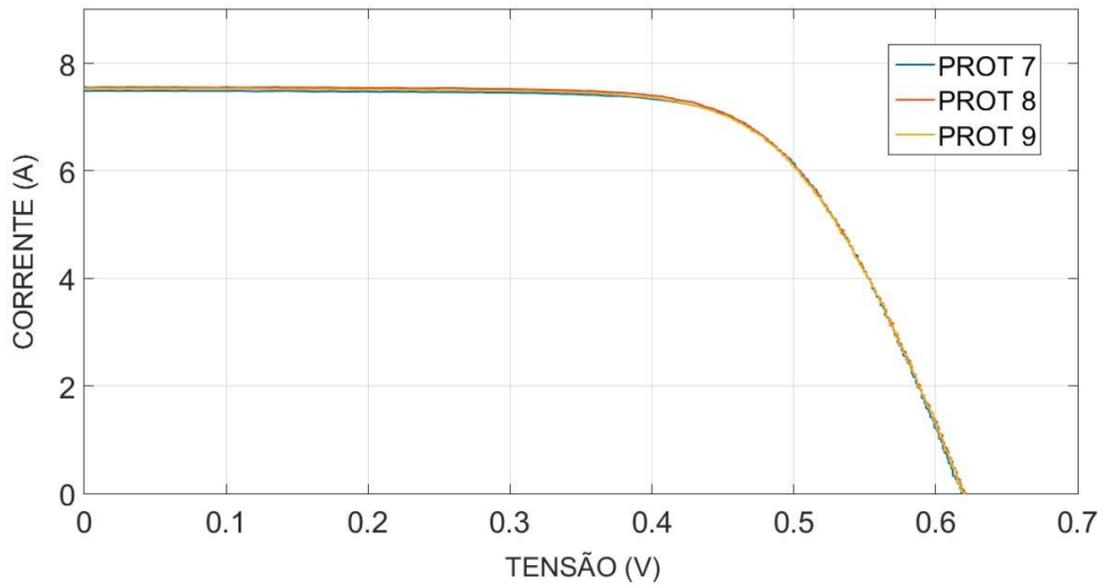
Os ensaios para a caracterização elétrica dos protótipos em simulador solar (*Indoor*) tiveram como intuito a obtenção da curva característica I-V para cada um dos protótipos de célula de referência (Figuras 11 e 12), avaliando principalmente os dados de I_{sc} (corrente de curto-circuito).

Figura 11 - Curvas I-V das células de referência de m-Si, $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{célula}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ e AM1,5.



Fonte: (ROSSO, 2019)

Figura 12 - Curvas I-V das células de referência de mc-Si, $G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{\text{célula}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ e AM1,5.



Fonte: (ROSSO, 2019)

A I_{sc} gerada pelas células de mc-Si é menor que a corrente gerada pelas células de m-Si devido a tecnologia das células e essa diferença é notável na curva I-V obtida. A I_{sc} nas células de m-Si é aproximadamente de 7,8 A enquanto a I_{sc} para as células de mc-Si é aproximadamente de 7,5 A (ROSSO, 2019).

4.2. CARACTERIZAÇÃO *OUTDOOR* DAS CÉLULAS DE REFERÊNCIA

Os ensaios para a calibração das células foram realizados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e ocorreram por duas metodologias confiáveis, através de um piranômetro termoelétrico dentro dos conformes da IS/ISSO 9847:1992, e com constante de calibração de $8,28 \times 10^{-6} V/(W/m^2)$. E a partir de célula de referência padrão, com a calibração previamente realizada e com uma constante de calibração de $88,5 mV/(kW/m^2)$ (ROSSO, 2019). As seis células de referência, o piranômetro termoelétrico e uma célula de referência padrão foram anexadas em uma plataforma com orientação horizontal e exposta ao sol (sem nuvens), conforme a figura 13.

Figura 13 - Calibração outdoor das células de referência.



Fonte: (ROSSO, 2019)

As medidas de tensão das células de referência foram realizadas, e as curvas de calibração e as equações preliminares para calibração por célula de referência padrão (calibrada) encontram-se completos no ANEXO A. E as curvas de calibração e as equações preliminares da calibração das células de referência por piranômetro termoelétrico encontram-se completos no ANEXO B.

4.3. CALIBRAÇÃO DO RESISTOR SHUNT

Na calibração dos resistores shunts, os resistores foram conectados em série uma com a outra. O primeiro resistor é conectado com o resistor shunt padrão que é ligado na fonte de corrente e a um multímetro, no último o resistor shunt do conjunto é conectado também a fonte de corrente. A escolha dos valores de corrente aplicada foi decorrente aos valores desejáveis que variaram de 1,008 a 10,021 A, com passo de 1 A. Nos dias

ensolarados a corrente elétrica na célula fotovoltaica dificilmente atingi um valor de 10 A. Para cada passo foi medido a queda de tensão nos resistores shunts de cada protótipo.

Como a resistência do resistor shunt padrão é conhecida de $R = 0,01 \Omega$, foi determinada a corrente elétrica em todos os protótipos para cada passo aplicado. A tensão (mV) nos resistores shunts de cada protótipo foi medida para cada valor de corrente aplicado. Com os valores de tensão e corrente se determina o valor de resistência de cada resistor shunt. A constante de calibração do shunt para cada protótipo foi determinada através da linha de tendência e a equação da reta gerada. Os gráficos de calibragem e as equações preliminares se encontram todas no ANEXO C.

4.4. OBTENÇÃO DOS DADOS

Para a obtenção dos dados as seis células de referência foram dispostas em uma localidade livre de estruturas que poderiam vir a gerar sombras. As células foram anexadas a uma estrutura, que permitisse fácil acesso aos polos do resistor *shunt* e com orientação horizontal como demonstrado na figura 14.

Figura 14 - Protótipos na estrutura de medição.



Fonte: Dados do autor, 2020

Para a obtenção dos dados do presente trabalho foi utilizado um Multímetro MultiMeter MDR-400 (Tabela 2) para as medições de queda de tensão sobre o resistor *shunt*, realizadas no período das 9 às 16 horas em dias de sol e de céu limpo sendo as medições intercaladas de 15 em 15 minutos. As medições ocorreram entre nov/2018 à mar/2020.

Tabela 2 - Precisão do multímetro MDR-400 em diferentes faixas de escala para medição da tensão DC

Faixa	Resolução	Precisão
400 mV	0,1 mV	($\pm 0,5\% \pm 2$ dgts)
4 V	1 mV	
40 V	10 mV	($\pm 1,2\% \pm 2$ dgts)
400 V	100 mV	
1000 V	1 V	($\pm 1,5\% \pm 2$ dgts)

Fonte: Manual de instruções do fabricante MultiMeter MDR-400.

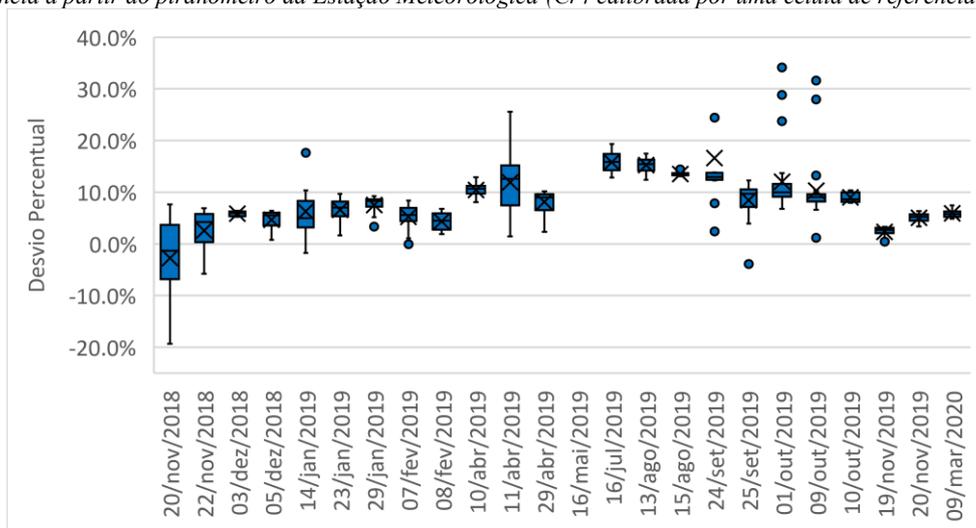
4.5. DESVIOS PERCENTUAIS DE IRRADIÂNCIAS ENTRE AS CÉLULAS DE REFERÊNCIA E O PIRANÔMETRO DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA.

As figuras a seguir apresentam a comparação entre os dados medidos nas células de referência em comparação com os dados verificados na estação meteorológica da planta piloto bioclimática do Laboratório de Pesquisa Aplicada (LPA) da UFSC – Campus Araranguá. Para apresentar o desempenho das células de referência foram aplicadas diferentes metodologias de calibração.

O primeiro conjunto de dados que são representados nas figuras de 15 a 20 apresentam os desvios percentuais entre a medida da irradiância medida nas células de referência (m-Si e mc-Si) e a medida da irradiância do piranômetro da estação meteorológica da planta piloto bioclimática, tendo como referência a calibração de todos os protótipos pela célula de referência padrão.

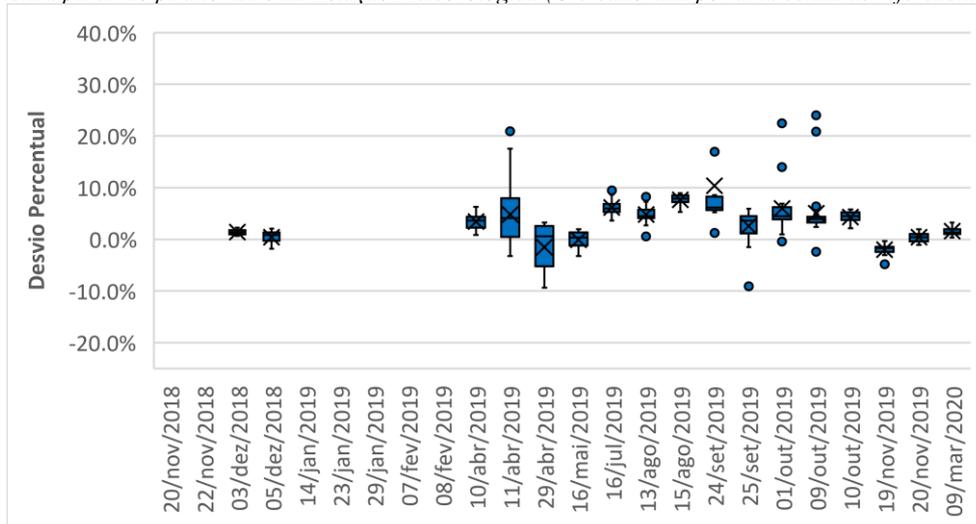
Pode-se observar na figura 15 que o protótipo de célula de referência *Cr4* obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 8,64% (Tabela 3), o que demonstra uma divergência considerável quanto ao piranômetro de referência da planta bioclimática. Constatou-se também que em alguns períodos do ano estes desvios variaram bastante, e encontraram-se próximos de 25%.

Figura 15 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência m-Si Cr4 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr4 calibrada por uma célula de referência padrão).



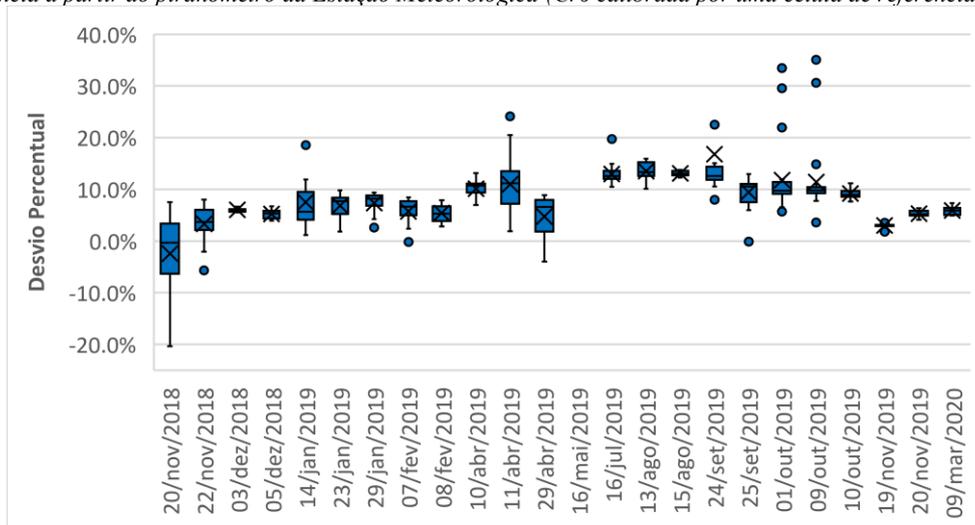
Pode-se observar na figura 16 que o protótipo de célula de referência Cr5 obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 2,88% (Tabela 3), o que demonstra uma correlação aceitável entre as medidas pelo piranômetro de referência da planta bioclimática. Constatou-se também que em alguns períodos do ano há uma grande variação destes desvios, os quais encontraram-se próximos de 20%. No caso do protótipo Cr 5 não foram feitas medições para todos os períodos de estudo, devido a um defeito estrutural nos polos da célula que posteriormente fora corrigido, o que proporciona uma grande divergência entre as demais células.

Figura 16 - - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência m-Si Cr5 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr5 calibrada por uma célula de referência padrão).



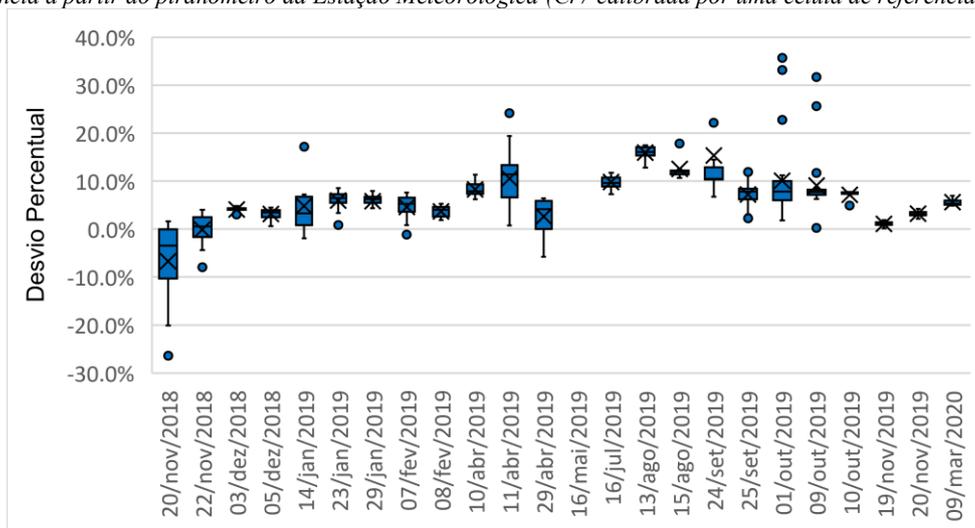
Pode-se observar na figura 17 que o protótipo de célula de referência *Cr6* obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 8,34% (Tabela 3), o que demonstra uma divergência considerável quanto ao piranômetro de referência da planta bioclimática. Constatou-se também que em alguns períodos do ano estes desvios variaram significativamente, e encontraram-se próximos de 20%.

Figura 17 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência m-Si Cr6 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr6 calibrada por uma célula de referência padrão).



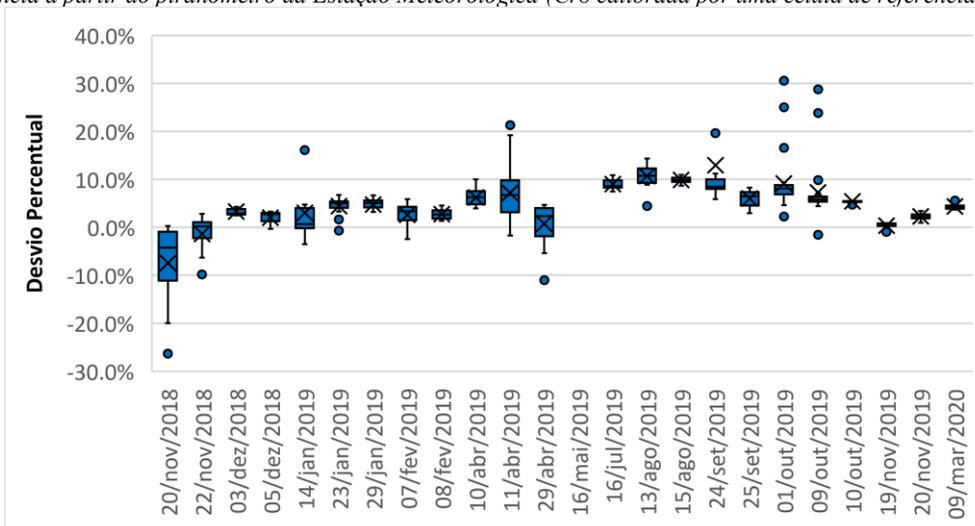
Pode-se observar na figura 18 que o protótipo de célula de referência *Cr7* obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 6,25% (Tabela 3), o que demonstra uma divergência considerável quanto ao piranômetro de referência da planta bioclimática, contudo com uma variação menor que os protótipos de célula de referência produzidos com célula m-Si (*Cr4*, *Cr5* e *Cr6*). Constatou-se então que em alguns períodos do ano estes desvios variaram significativamente, e encontraram-se próximos de 20%.

Figura 18 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si Cr7 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr7 calibrada por uma célula de referência padrão).



Pode-se observar na figura 19 que o protótipo de célula de referência Cr8 obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 4,98% (Tabela 3), o que demonstra uma divergência aceitável (abaixo de 5%) quanto ao piranômetro de referência da planta bioclimática, contudo com uma variação menor que os protótipos de célula de referência produzidos com célula m-Si (Cr4, Cr5 e Cr6). Novamente constatou-se que em alguns períodos do ano estes desvios variaram bastante, e encontraram-se próximos de 20%.

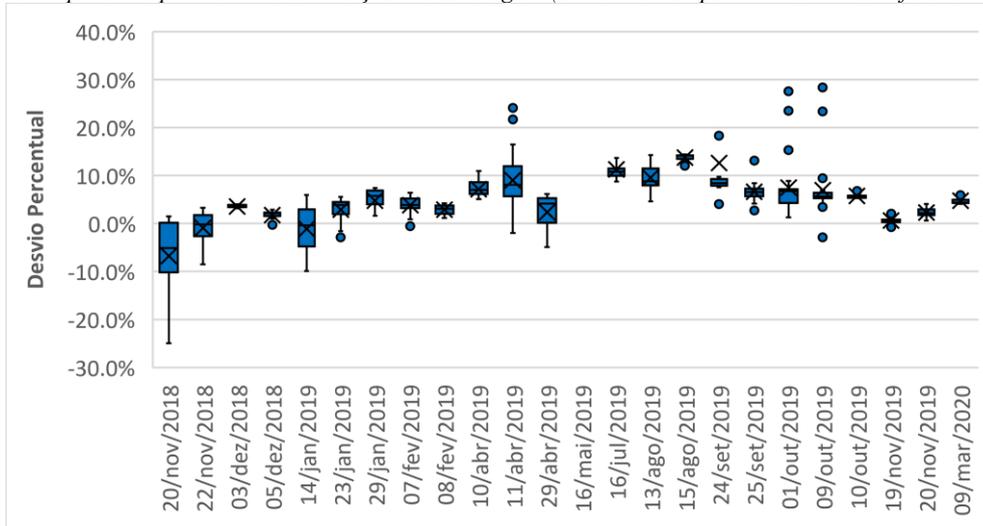
Figura 19 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si Cr8 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr8 calibrada por uma célula de referência padrão).



Pode-se observar na figura 20 que o protótipo de célula de referência Cr9 obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 5,38% (Tabela 3), o que demonstra uma divergência considerável quanto ao piranômetro de referência da

planta bioclimática, contudo com uma variação menor que os protótipos de célula de referência produzidos com célula m-Si (*Cr4*, *Cr5* e *Cr6*). Constatou-se novamente que em alguns períodos do ano estes desvios variaram significativamente, e encontraram-se próximos de 25%.

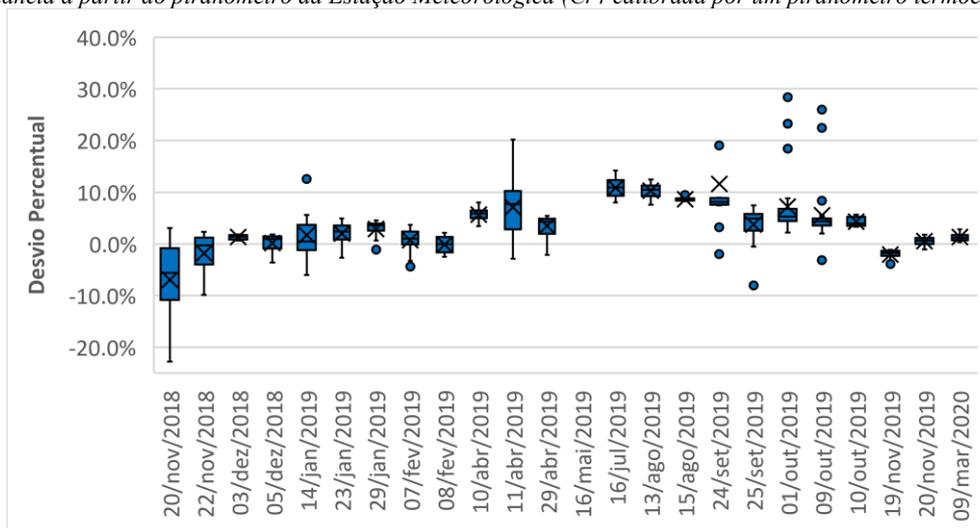
Figura 20 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si *Cr9* e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (*Cr9* calibrada por uma célula de referência padrão).



O segundo conjunto de dados que são representados nas figuras de 21 a 25 apresentam os desvios percentuais entre a medida da irradiância medida nas células de referência (m-Si e mc-Si) e a medida da irradiância do piranômetro da estação meteorológica da planta piloto bioclimática, tendo como referência a calibração de todos os protótipos por um piranômetro termoeletrônico padrão.

Constata-se na figura 21 que o protótipo de célula de referência *Cr4* obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 3,96% (Tabela 3), o que demonstra uma divergência aceitável (abaixo de 5%) quanto ao piranômetro de referência da planta bioclimática. Observa-se também que em alguns períodos do ano estes desvios variaram bastante, e encontraram-se próximos de 20%.

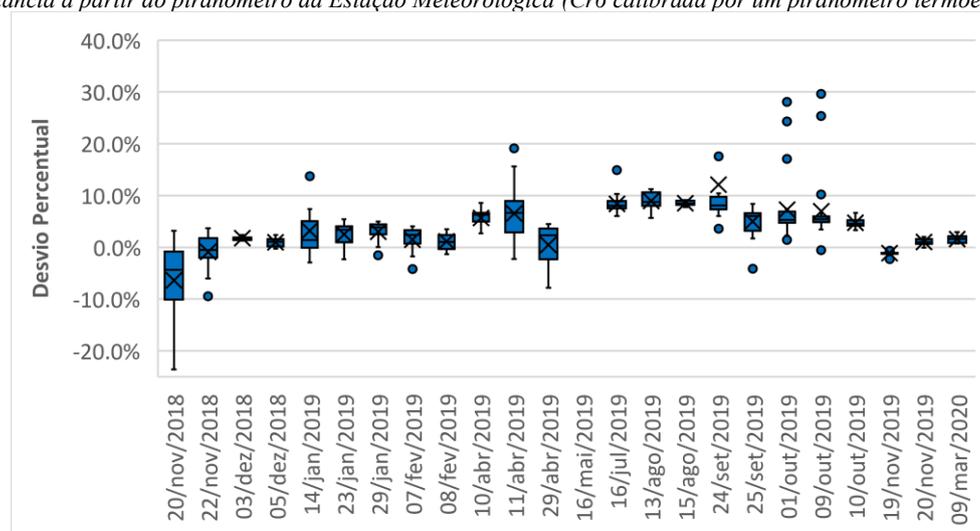
Figura 21 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência m-Si Cr4 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr4 calibrada por um piranômetro termoelétrico).



A inexistência de uma comparação entre as medições do protótipo *Cr5* com o piranômetro da planta piloto bioclimática consiste no fato de que o protótipo se encontrava em reparo nos dias em que foram realizados os ensaios para a calibrações por piranômetro termoelétrico.

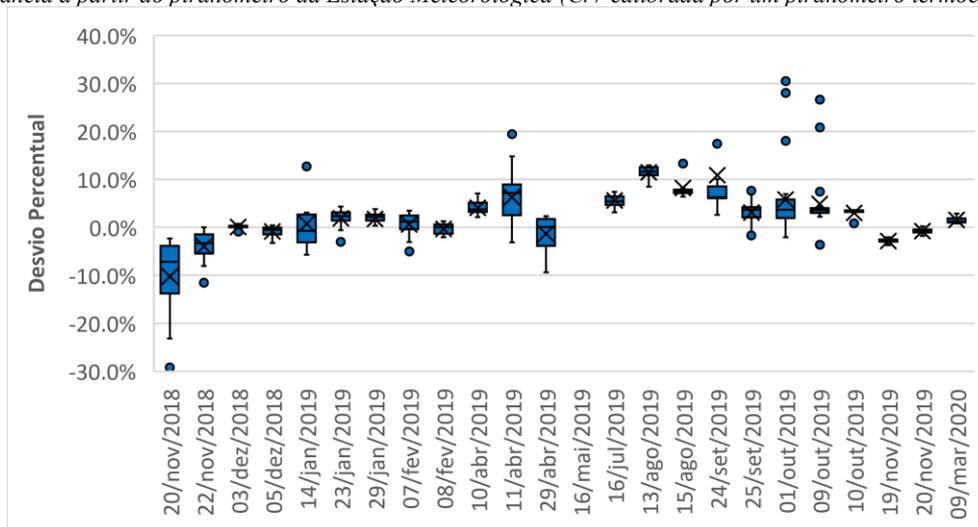
Constata-se na figura 22 que o protótipo de célula de referência *Cr6* obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 3,97% (Tabela 3), o que demonstra uma divergência aceitável (abaixo de 5%) quanto ao piranômetro de referência da planta bioclimática. Observa-se também que em alguns períodos do ano estes desvios variaram bastante, e encontraram-se próximos de 25%.

Figura 22 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência m-Si Cr6 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr6 calibrada por um piranômetro termoelétrico).



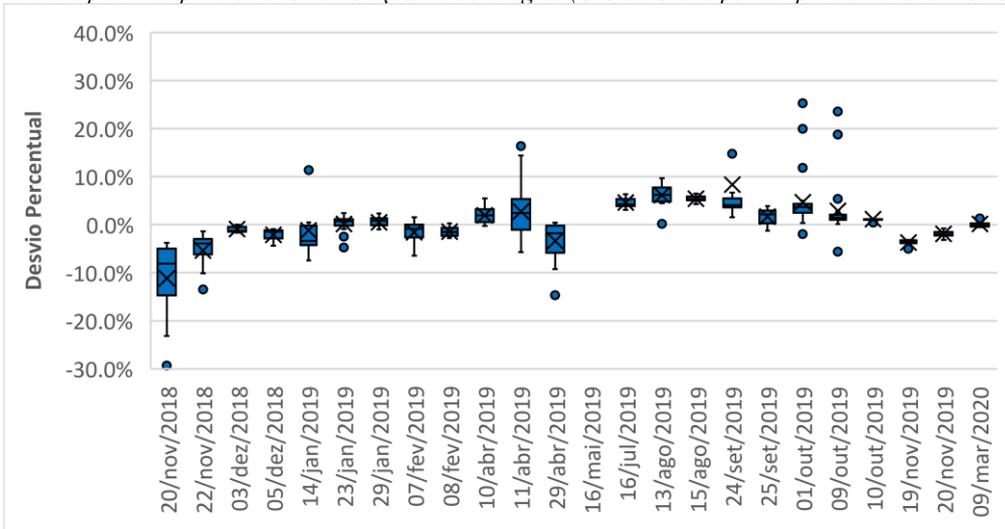
Pode ser observado na figura 23 que o protótipo de célula de referência *Cr7* obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 2,55% (Tabela 3), o que demonstra uma divergência aceitável (abaixo de 5%) quanto ao piranômetro de referência da planta bioclimática, e com uma variação menor que os protótipos de célula de referência produzidos com célula m-Si (*Cr4* e *Cr6*). Observa-se novamente que em alguns períodos do ano estes desvios variaram significativamente, e encontraram-se próximos de 20%.

Figura 23 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si *Cr7* e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (*Cr7* calibrada por um piranômetro termoeletrônico).



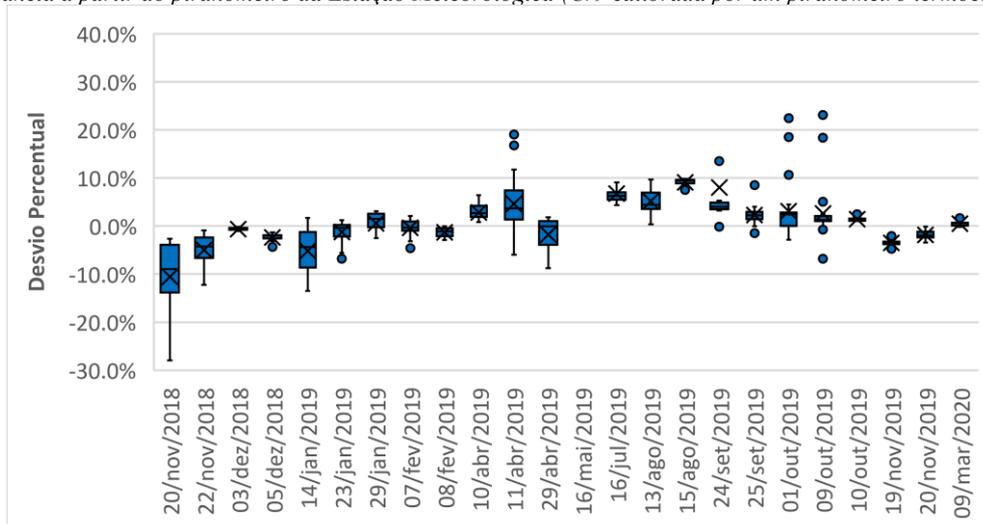
Contata-se na figura 24 que o protótipo de célula de referência *Cr8* obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 0,71% (Tabela 3), o que demonstra uma divergência mínima (abaixo de 2%) entre os dados medidos quanto ao piranômetro de referência da planta bioclimática, e também com uma variação menor que os protótipos de célula de referência produzidos com célula m-Si (*Cr4* e *Cr6*). Observa-se também que em alguns períodos do ano estes desvios variaram bastante, e encontraram-se próximos de 20%.

Figura 24 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si Cr8 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr8 calibrada por um piranômetro termoeletrônico).



Contata-se na figura 25 que o protótipo de célula de referência Cr9 obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 1,11% (Tabela 3), o que demonstra uma divergência mínima (abaixo de 2%) entre os dados medidos quanto ao piranômetro de referência da planta bioclimática, e também com uma variação menor que os protótipos de célula de referência produzidos com célula m-Si (Cr4 e Cr6). Observa-se também que em alguns períodos do ano estes desvios variaram bastante, e encontraram-se próximos de 25%.

Figura 25 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si Cr9 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr9 calibrada por um piranômetro termoeletrônico).

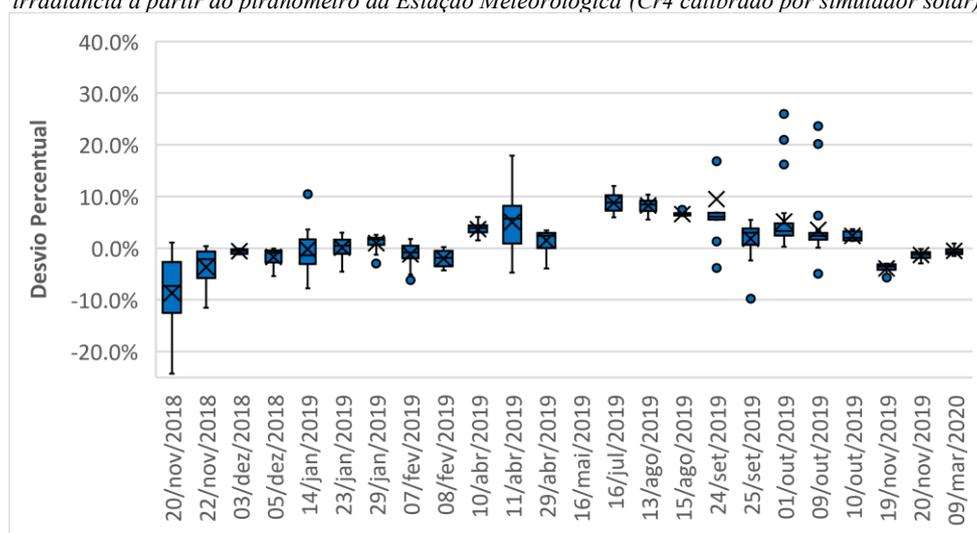


O terceiro conjunto de dados que são apresentados nas figuras de 26 a 31 apresentam os desvios percentuais entre a medida da irradiância medida nas células de referência (m-Si e mc-Si) e a medida da irradiância do piranômetro da estação

meteorológica da planta piloto bioclimática, tendo como referência a calibração de todos os protótipos por simulador solar em condições padrão de ensaio.

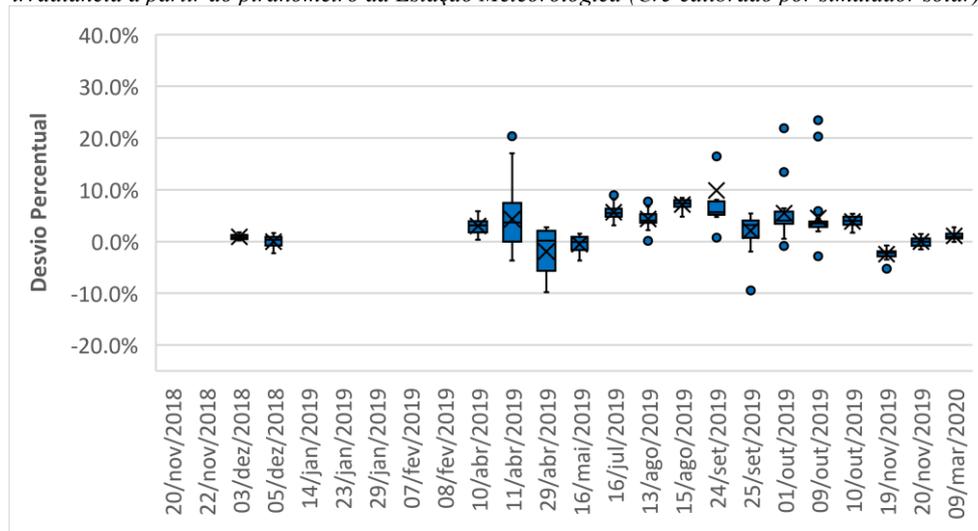
É caracterizado na figura 26 que o protótipo de célula de referência *Cr4* obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 2,02% (Tabela 3), o que demonstra uma divergência mínima (próxima a 2%) entre os dados medidos quanto ao piranômetro de referência da planta bioclimática. É também observado que em alguns períodos do ano estes desvios variaram bastante, e encontraram-se próximos de 25%.

Figura 26 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência m-Si *Cr4* e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (*Cr4* calibrado por simulador solar).



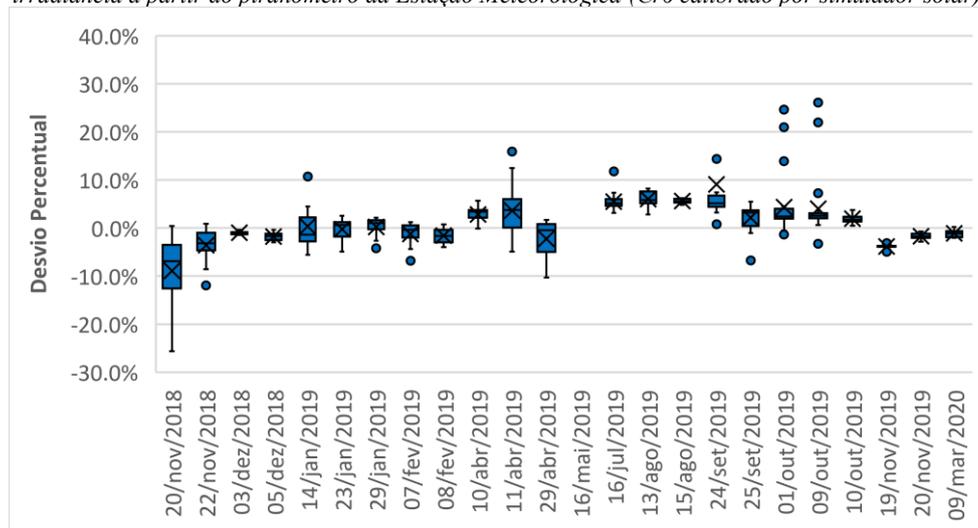
É caracterizado na figura 27 que o protótipo de célula de referência *Cr5* obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 2,42% (Tabela 3), o que demonstra uma divergência aceitável (abaixo de 5%) entre os dados medidos quanto ao piranômetro de referência da planta bioclimática. É também observado que em alguns períodos do ano estes desvios variaram significativamente, e encontraram-se próximos de 15%. Lembrando também, que não foram observados dados para o protótipo *Cr5* durante todo o período de estudo.

Figura 27 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência m-Si Cr5 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr5 calibrado por simulador solar).



É caracterizado na figura 28 que o protótipo de célula de referência Cr6 obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 1,16% (Tabela 3), o que demonstra uma divergência mínima (abaixo de 2%) entre os dados medidos quanto ao piranômetro de referência da planta bioclimática, desta forma demonstrando-se o protótipo com melhor desempenho entre as células de referência monocristalinas. É observado que em alguns períodos do ano estes desvios variaram bastante, e encontraram-se próximos de 25%.

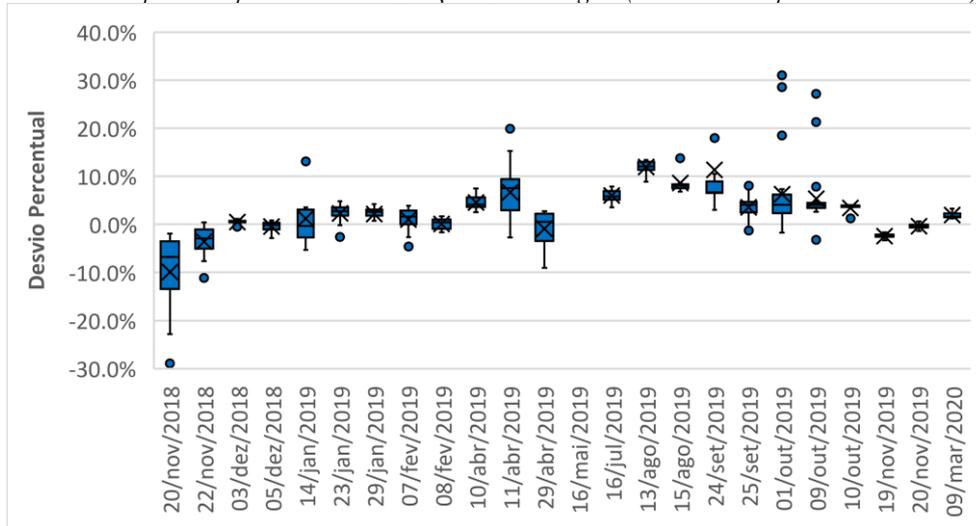
Figura 28 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência m-Si Cr6 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr6 calibrado por simulador solar).



É caracterizado na figura 29 que o protótipo de célula de referência Cr7 obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 2,96% (Tabela 3), o que demonstra uma divergência aceitável (abaixo de 5%) entre os dados medidos quanto

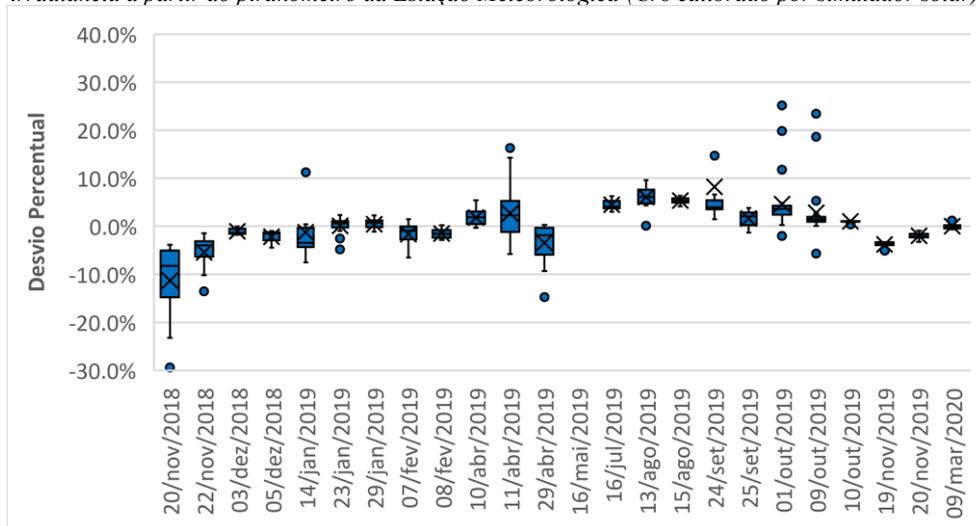
ao piranômetro de referência da planta bioclimática. Observa-se também que em alguns períodos do ano estes desvios apresentaram significativa variação, e encontraram-se próximos de 20%.

Figura 29 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si Cr7 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr7 calibrado por simulador solar).



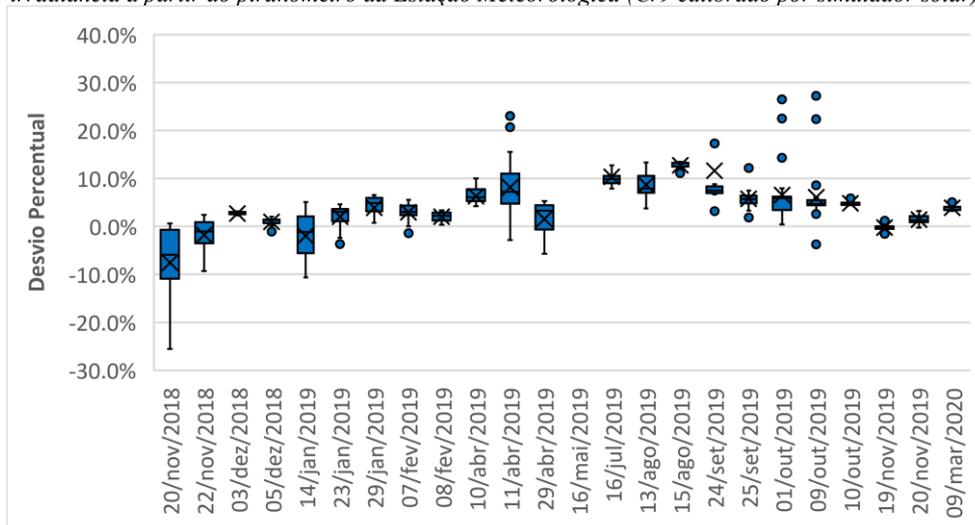
É caracterizado na figura 30 que o protótipo de célula de referência Cr8 obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 0,62% (Tabela 3), o que demonstra uma divergência mínima (abaixo de 2%) entre os dados medidos quanto ao piranômetro de referência da planta bioclimática. O protótipo Cr8 sobre a metodologia de calibração *indoor* por simulador solar por sua vez apresentou os resultados mais próximos aos observados pelo piranômetro da planta piloto bioclimática. Observa-se também que em alguns períodos do ano estes desvios foram significativamente variantes, e encontraram-se próximos de 20%.

Figura 30 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si Cr8 e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (Cr8 calibrado por simulador solar).



É caracterizado na figura 31 que o protótipo de célula de referência *Cr9* obteve uma média entre os desvios percentuais total de aproximadamente 4,50% (Tabela 3), o que demonstra uma divergência aceitável (abaixo de 5%) entre os dados medidos quanto ao piranômetro de referência da planta bioclimática. Foi observado também nesta figura que para alguns períodos do ano estes desvios foram significativamente variantes, e encontraram-se próximos de 25%.

Figura 31 - Desvio percentual entre a medida da irradiância solar da Célula de Referência mc-Si *Cr9* e a medida da irradiância a partir do piranômetro da Estação Meteorológica (*Cr9* calibrado por simulador solar).



Foi observado em todas as figuras anteriores a existência de dias em que as amplitudes nos desvios percentuais foram extremamente altas. Em uma consideração mais abrangente esses valores deveriam ser reavaliados, sugere-se novas análises em futuros estudos.

A partir da análise de todos os dados medidos e caracterizados nas figuras anteriores foi possível desenvolver as tabelas 3 e 4. As tabelas apresentam as médias (desconsiderando 5% do número de dados, onde as medições se encontraram com as maiores amplitudes quanto ao desvio percentual, as medianas e o desvio padrão para a amostra de dados).

Tabela 3 – Médias, medianas e desvio padrão amostral referente aos desvios percentuais das medições de irradiância nas células m-Si durante todo o período do estudo (abrangendo os dados mostrados nos Figura de 1 a 17)

REFERÊNCIA CENTRAL METEOROLOGICA DA PLANTA PILOTO						
	Cr4		Cr5		Cr6	
Calibração por célula de referência usual, Método <i>Outdoor</i>	8,64% ^a	±6,25 ^c	2,88%	±4,98	8.34%	±5.48
	8,22% ^b		2,68%		8.12%	
Calibração pelo Piranômetro Usual	3,96%				3,97%	
Método <i>Outdoor</i>	3,56%	±5,98			3,75%	±5.63
Calibração por simulador solar, Método <i>Indoor</i>	2,02%		2,42%		1.16%	
	1,62%	±5,87	2,22%	±4,96	0.96%	±5.48

^a Média Interna dos resultados, com 5% dos dados extremos desconsiderados.

^b Mediana.

^c Desvio Padrão da amostra (em desvio percentual).

Tabela 4 - Médias, medianas e desvio padrão amostral referente aos desvios percentuais das medições de irradiância nas células mc-Si durante todo o período do estudo (abrangendo os dados mostrados nos Figura de 1 a 17)

REFERÊNCIA CENTRAL METEOROLOGICA DA PLANTA PILOTO						
	Cr7		Cr8		Cr9	
Calibração por célula de referência usual	6,65% ^a	±6,38 ^c	4,98%	±5,78	5,38%	±5,95
	6,47% ^b		4,89%		5,30%	
Calibração pelo Piranômetro Usual	2,55%		0,71%		1,11%	
Método <i>Outdoor</i>	2,38%	±6,14	0,62%	±5,54	1,04%	±5,70
Calibração por simulador solar, Método <i>Indoor</i>	2,96%		0,62%		4,50%	
	2,79%	±6,16	0,53%	±5,54	4,43%	±5,90

^a Média Interna dos resultados, com 5% dos dados extremos desconsiderados.

^b Mediana.

^c Desvio Padrão da amostra (em desvio percentual).

Foi constatado a partir das tabelas 3 e 4 que os protótipos de células de referência que foram calibrados pela metodologia *outdoor* utilizando piranômetro termoeletrico e pela metodologia *indoor* por simulador solar, poderiam ser utilizadas para a obtenção de dados em campo, considerando uma faixa de erro aceitável. Pode-se considerar também que um motivo provável para o mal desempenho na calibração por células de referência padrão, possa ser devido a uma descalibração da célula de referência padrão no período em que os ensaios de calibração dos protótipos ocorrerão. Ou também por interferências ambientais pontuais (sombra, nuvens, etc.).

Observou-se também que as células de referência produzidas a partir de silício multicristalino obtiveram os melhores resultados em um contexto geral. Contudo, as células de referência produzidas a partir de células de silício monocristalinas obtiveram

uma dinâmica melhor tanto uma comparação entre protótipos de mesma tecnologia. Isto se torna evidente quando observamos os valores nas tabelas já descritas. Este fato se deve pelas características quanto a tecnologia, onde as células m-Si possuem características elétricas mais parecidas entre si, pelo seu grau de pureza quanto aos cristais, enquanto as células mc-Si são constituídas por múltiplos cristais de silício com diferentes graus de pureza.

4.6. DESVIO DAS MEDIDAS DE IRRADIÂNCIAS ENTRE AS METODOLOGIAS DE CALIBRAÇÃO

As figuras a seguir (32 a 47), demonstram o desvio das medidas de irradiâncias a partir dos protótipos de célula de referência em função de duas distintas metodologias de calibração. Quanto a análise do conjunto de Figura de 32 a 47, é apresentado o desvio das medidas a partir da célula de referência em função de duas metodologias de calibração, sendo estas método: 1) Calibração por célula de referência usual em função da calibração por piranômetro termoelétrico (Figura de 32 a 36); 2) Calibração por célula de referência padrão em função da calibração por simulador solar (Figura 37 a 42); 3) Calibração por piranômetro termoelétrico em função da calibração por simulador solar (Figura 43 a 47).

Quando observamos os dados referente ao primeiro conjunto de figuras (32 a 36) referente a comparação, é verificado a diferença média nas medições para as células foram de aproximadamente 32 W/m^2 nas células monocristalinas (Cr4 e Cr6) e 30 W/m^2 para as células multicristalinas (Cr7, Cr8 e Cr9).

Figura 32 – Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência m-Si Cr4 em função da calibração por célula de referência padrão e por piranômetro termoelétrico.

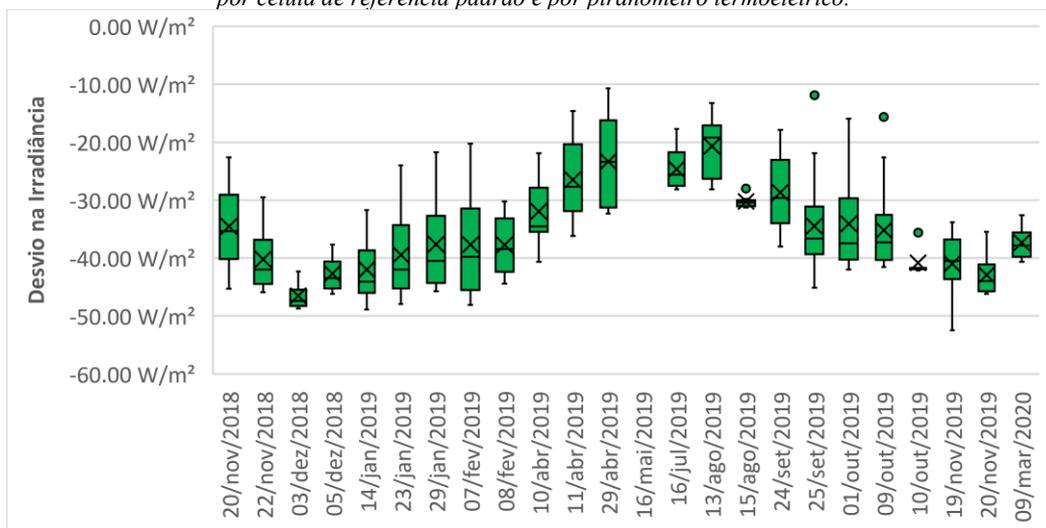


Figura 33 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência m-Si Cr6 em função da calibração por célula de referência padrão e por piranômetro termoeletrico.

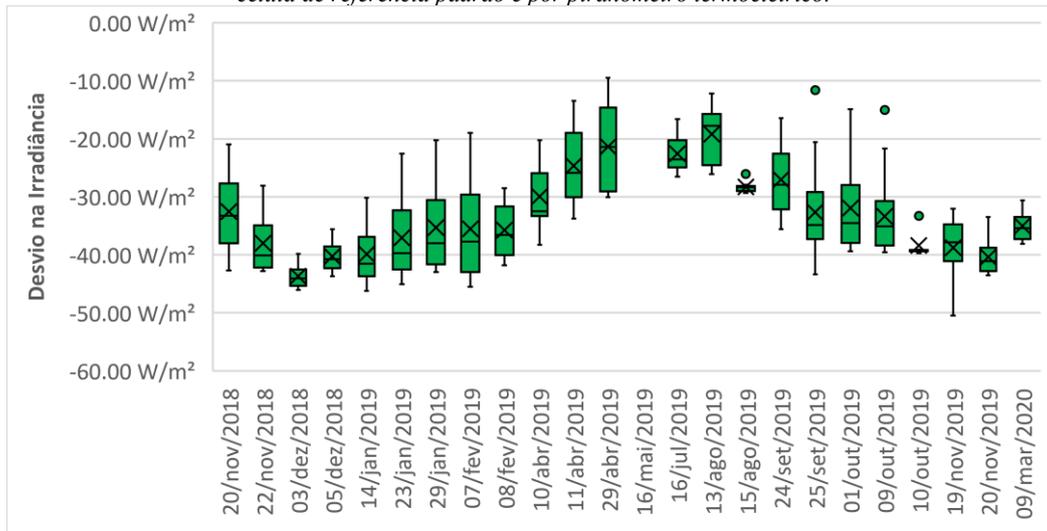


Figura 34 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência mc-Si Cr7 em função da calibração por célula de referência padrão e por piranômetro termoeletrico

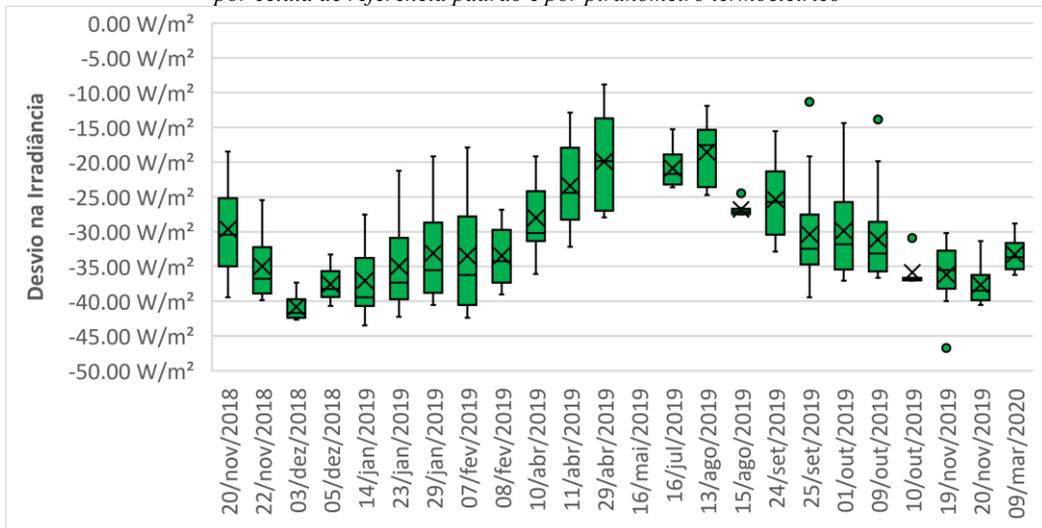


Figura 35 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência mc-Si Cr8 em função da calibração por célula de referência padrão e por piranômetro termoeletrico.

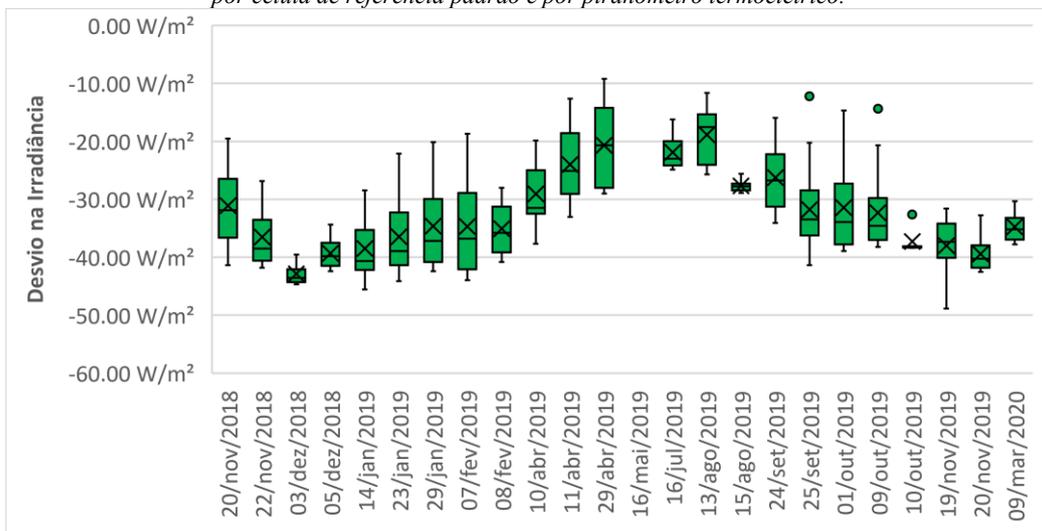
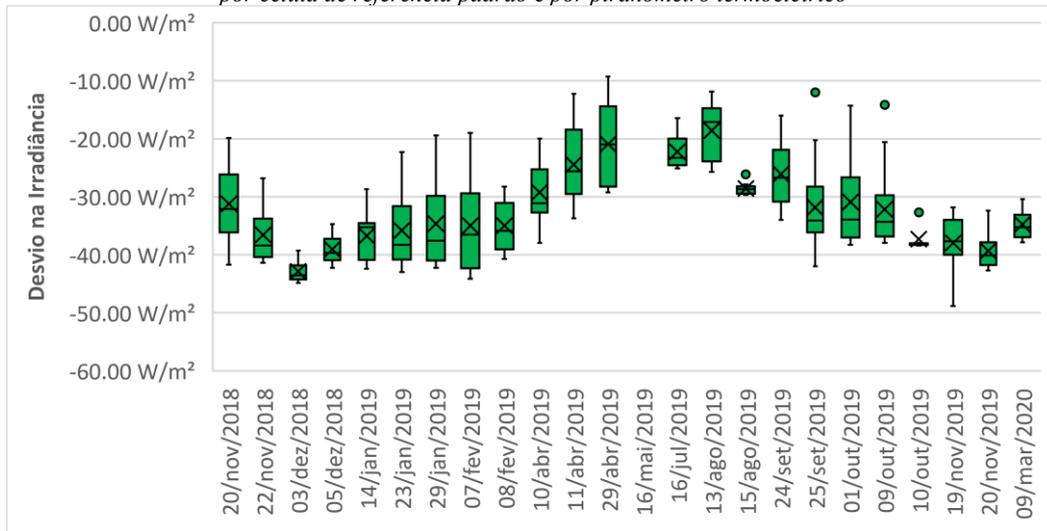


Figura 36 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência mc-Si Cr9 em função da calibração por célula de referência padrão e por piranômetro termoeletrico



Na segunda comparação que abrange as figuras 37 a 42, a diferença média nas medições em comparação para as células foi de aproximadamente $48 W/m^2$ para as células monocristalinas Cr4 e Cr6 e de apenas $3 W/m^2$ para as células Cr5. E nas células multicristalinas aproximadamente $28 W/m^2$ para as células Cr7 e Cr8 e $6 W/m^2$ para a célula Cr9.

Figura 37 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência m-Si Cr4 em função da calibração por célula de referência padrão e por simulador solar.

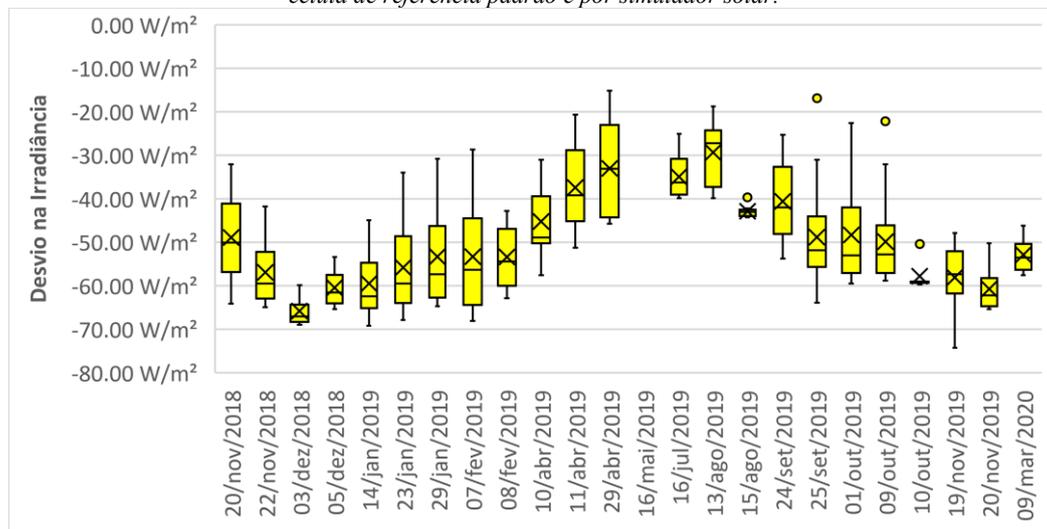


Figura 38 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência m-Si Cr5 em função da calibração por célula de referência padrão e por simulador solar.

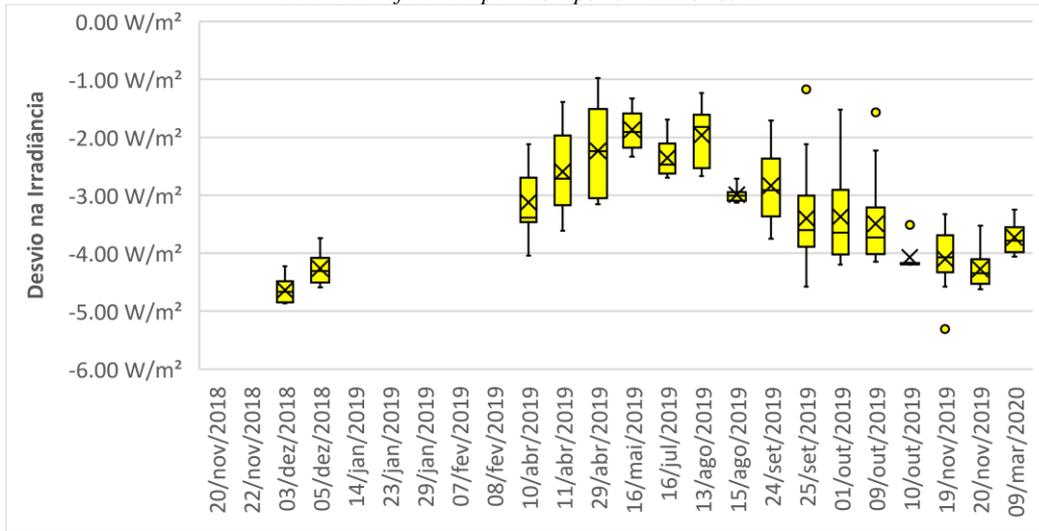


Figura 39 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência m-Si Cr6 em função da calibração por célula de referência padrão e por simulador solar.

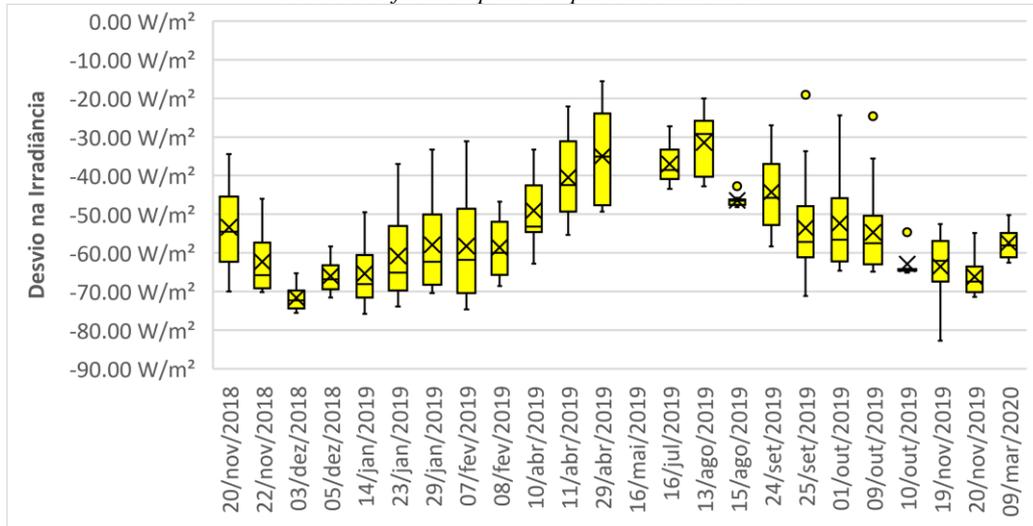


Figura 40 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência mc-Si Cr7 em função da calibração por célula de referência padrão e por simulador solar.

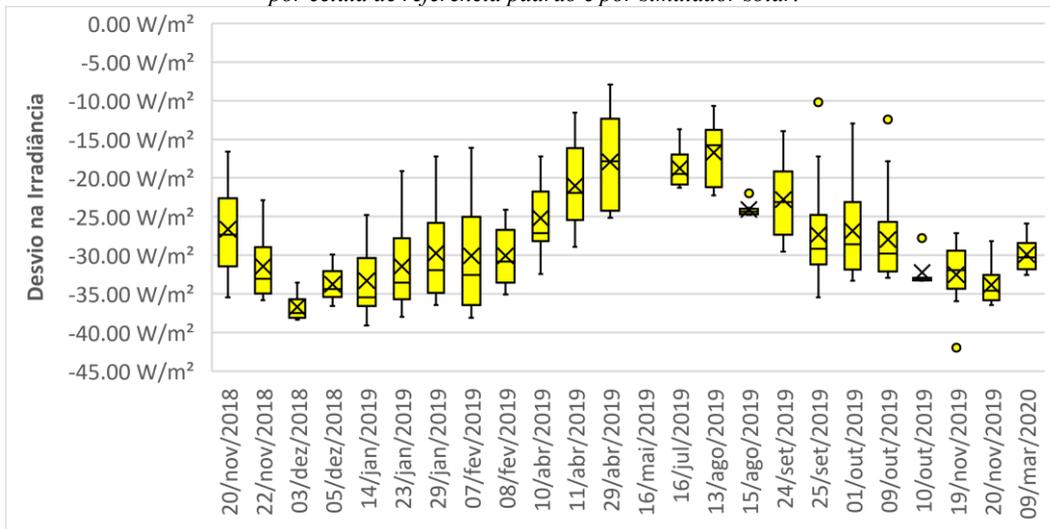


Figura 41 - Desvio da medida de irradiação a partir da Célula de Referência mc-Si Cr8 em função da calibração por célula de referência padrão e por simulador solar.

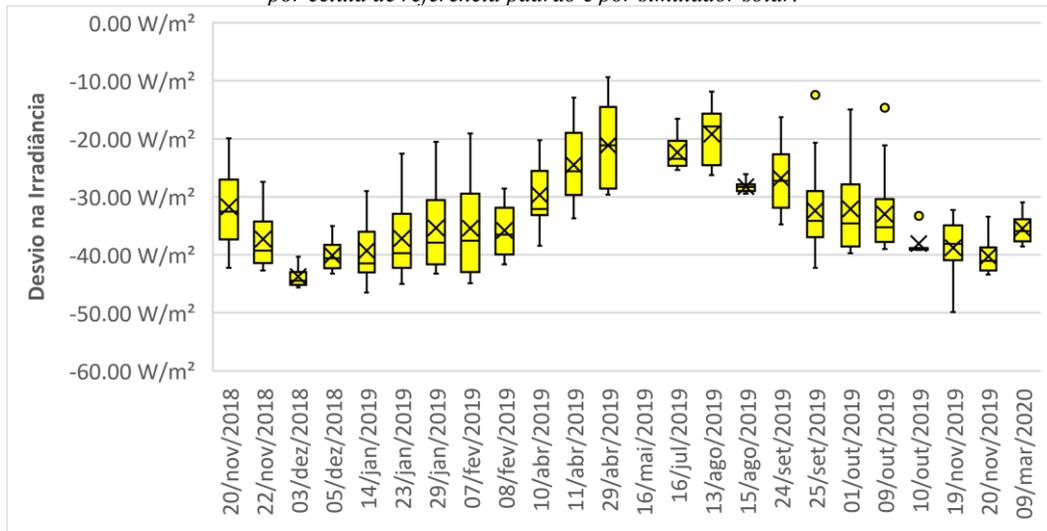
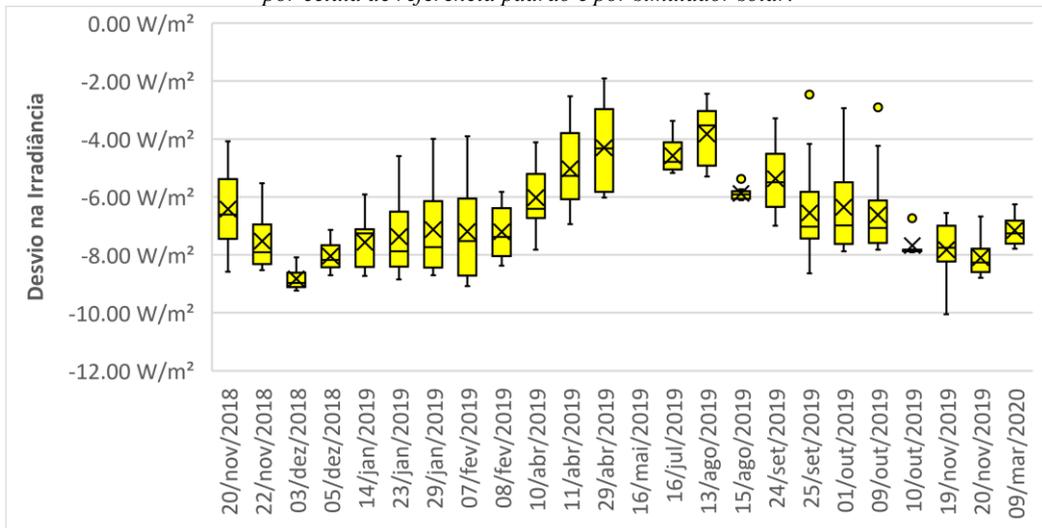


Figura 42 - Desvio da medida de irradiação a partir da Célula de Referência mc-Si Cr9 em função da calibração por célula de referência padrão e por simulador solar.



Na terceira análise que abrange as figuras 43 a 47, a diferença média entre as medições foram de aproximadamente de 17 W/m^2 para as células monocristalinas (Cr4 e Cr6) e para as células multicristalinas Cr7 e Cr8 foi de aproximadamente 2 W/m^2 , enquanto para Cr9 a diferença foi de 24 W/m^2 .

Figura 43 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência m-Si Cr4 em função da calibração por piranômetro termoeletrico e por simulador solar.

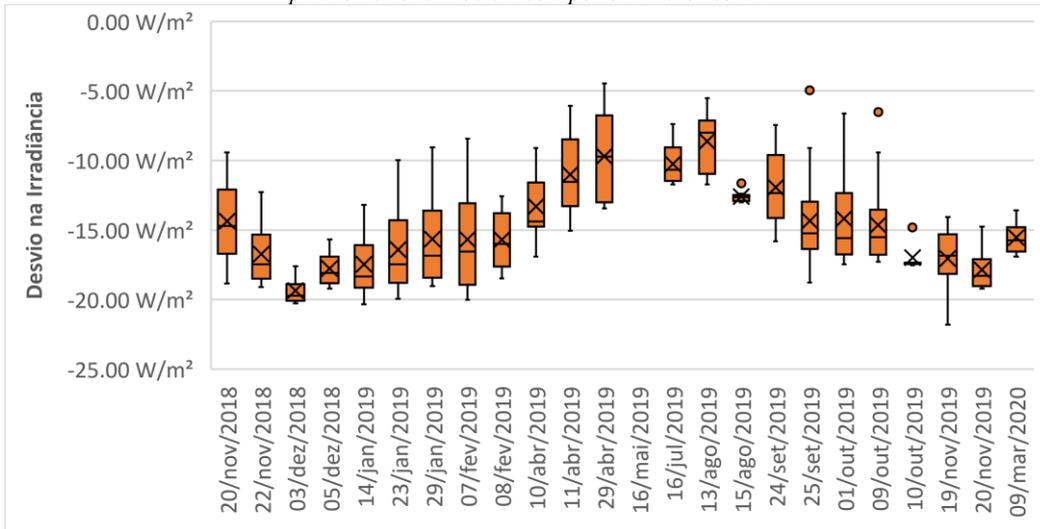


Figura 44 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência m-Si Cr6 em função da calibração por piranômetro termoeletrico e por simulador solar.

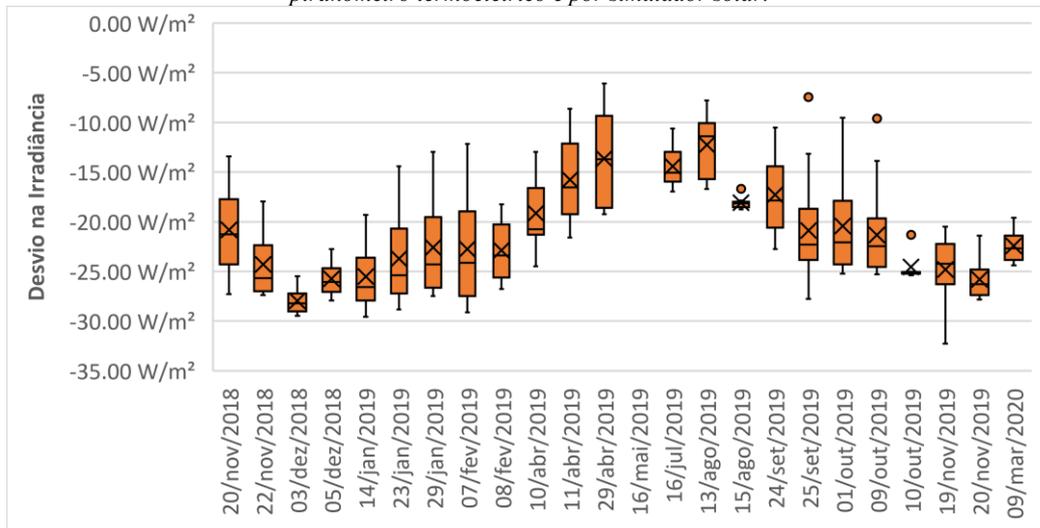


Figura 45 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência mc-Si Cr7 em função da calibração por piranômetro termoeletrico e por simulador solar.

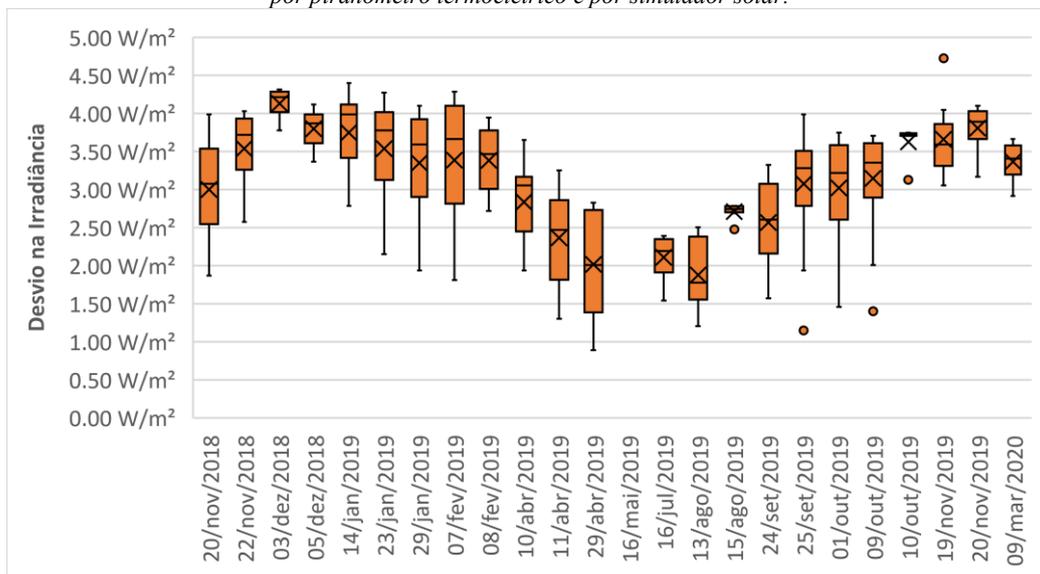


Figura 46 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência mc-Si Cr8 em função da calibração por piranômetro termoeletrico e por simulador solar.

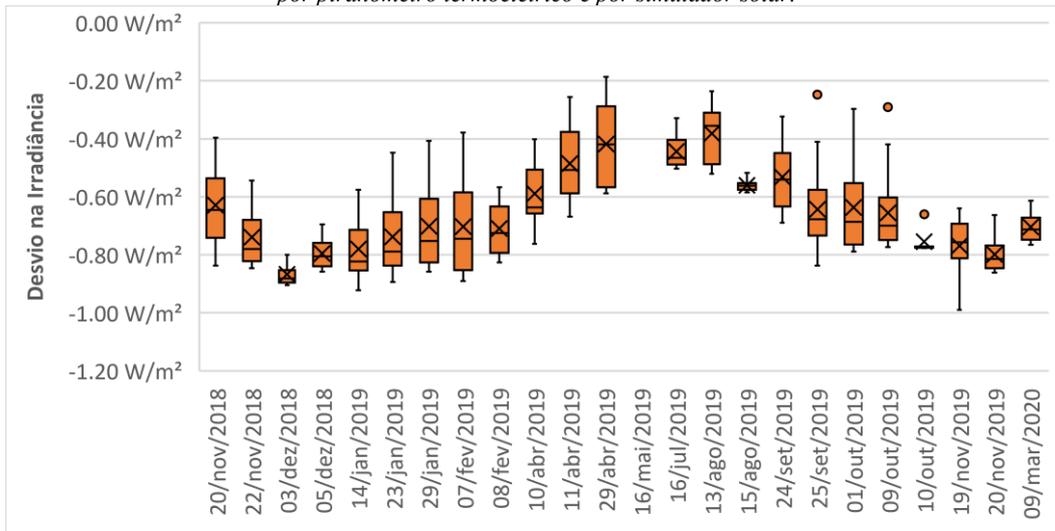
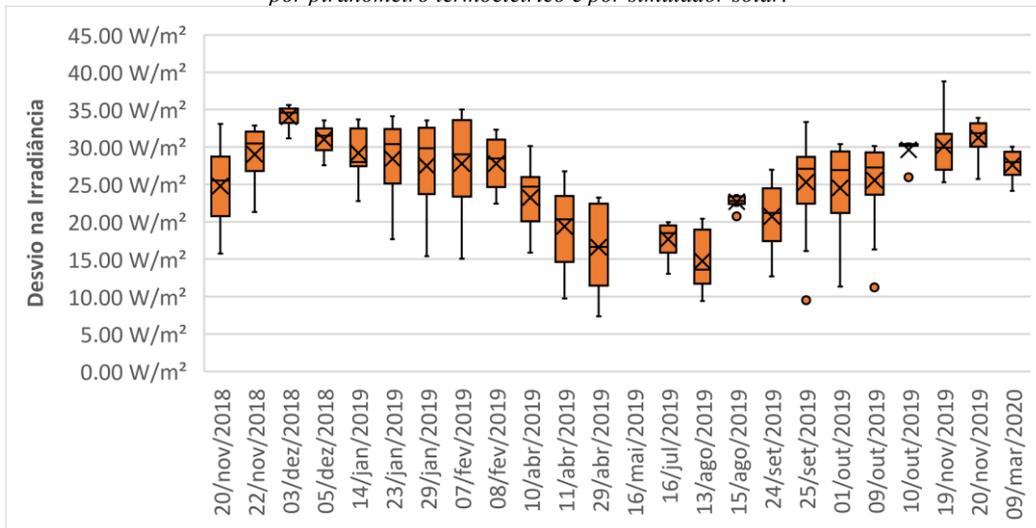


Figura 47 - Desvio da medida de irradiância a partir da Célula de Referência mc-Si Cr9 em função da calibração por piranômetro termoeletrico e por simulador solar.



Em um contexto geral foi possível observar um dinamismo entre os dados em todas as figuras acima. Observou-se ainda que nos meses de inverno o desvio das medidas entre as metodologias era muito menor se formos comparar aos meses de verão em muitos dos casos analisados. Isto se deve principalmente por dois motivos, o primeiro é a intensidade de radiação que chega até as células de referência nos meses de verão, os quais possui uma maior instabilidade cronológica diária, em contexto, a mudança de amplitude da irradiação solar entre as 9h as 12h pode variar a ponto de no começo do dia medirmos uma irradiação de $400W/m^2$ e no apogeu do sol atingirmos aproximadamente $1000W/m^2$, enquanto nos meses de inverno a irradiação solar pode ser totalmente constante durante todo o período de exposição solar.

O segundo motivo para a dinâmica observada em todas as figuras é a mudança da altura solar. Onde nos meses de verão (quando o sol se encontra em suas maiores alturas solares) a maior parte da radiação captada pelas células de referência são de origem direta e de baixa refletância. Enquanto nos meses de inverno (quando o sol se encontra em suas menores alturas solares) a maior parte da radiação captada pelas células de referência são de origem difusa e de alta refletância.

A partir das medições de dados caracterizadas nas figuras acima, foi possível desenvolver as tabelas 5 e 6 que apresentam valores de correlação entre as medições de diferentes metodologias de calibração. As tabelas foram organizadas onde apresentam uma metodologia de calibração e função direta a outra. Foi observado durante a análise dos dados que todos os valores mostrados nas tabelas 5 e 6 são valores absolutos para os protótipos analisados, ou seja, se demonstram inalterados de uma comparação de medições para outra.

Tabela 5 - Desvio percentual das medidas de irradiância para as células m-Si.

	Calibração por célula de referência usual			Calibração pelo Piranômetro Usual <i>Outdoor</i>			Calibração pela corrente do shunt, Método <i>Indoor</i>		
	Cr4	Cr5	Cr6	Cr4	Cr5	Cr6	Cr4	Cr5	Cr6
Calibração por célula de referência usual, Método <i>Outdoor</i>				4.50%		4.21%	6.49%	0.45%	7.10%
Calibração pelo Piranômetro Usual, Método <i>Outdoor</i>	-4.30%		-4.04%				1.91%		2.77%
Calibração por simulador solar, Método <i>Indoor</i>	-6.10%	-0.45%	-6.63%	-1.87%		-2.69%			

Tabela 6 - Desvio percentual das medidas de irradiância para as células mc-Si.

	Calibração por célula de referência usual			Calibração pelo Piranômetro Usual <i>Outdoor</i>			Calibração pela corrente do shunt, Método <i>Indoor</i>		
	Cr7	Cr8	Cr9	Cr7	Cr8	Cr9	Cr7	Cr8	Cr9
Calibração por célula de referência usual				4.00%	4.24%	4.23%	3.58%	4.33%	0.84%
Calibração pelo Piranômetro Usual <i>Outdoor</i>	-3.85%	-4.07%	-4.05%				-0.40%	0.09%	-3.25%
Calibração por simulador solar, Método <i>Indoor</i>	-3.46%	-4.15%	-0.83%	0.40%	-0.09%	3.36%			

Ao analisarmos os dados abaixo foi possível constatar que houve baixos desvios entre as medições quando comparávamos as metodologias de calibração (*outdoor*, por piranômetro termoelétrico, e *indoor*, por simulador solar). Desta forma constatando que ambas possuem um alto grau de confiabilidade entre os protótipos de célula de referência calibrados com estas diferentes metodologias.

5. DISCUSSÃO

A mensuração da radiação solar é de suma importância para a sociedade. Na agricultura, evita perdas na plantação devido à exposição das plantas a radiação, na meteorologia auxilia na previsão e estudos de casos, por afetar direta ou indiretamente os processos físicos que ocorrem na atmosfera. Sendo também importante e utilizada na área da saúde. Além disso, a radiação solar é uma fonte de energia renovável mundial, tendo sua utilização grande importância para o desenvolvimento da vida humana (SOUZA; SILVA; TANAKA; ULIANA; ALMEIDA; KLAR; GOMES, 2017; POLVERINI; DODD; ESPINOSA, 2020).

Em um sistema fotovoltaico, os módulos são os componentes que convertem energia solar em energia elétrica, por meio do efeito físico chamado de efeito fotovoltaico, que acontece nas células solares. Sendo assim, os módulos fotovoltaicos são os dispositivos que apresentam maior confiabilidade ao sistema. E para que um sistema fotovoltaico produza energia com a confiabilidade necessária, o projeto, a instalação e a manutenção devem ser otimizados (LORENZO, 2006; PINHO E GALDINO, 2014; ZANESCO, 2014; MARTINS et al, 2018).

É de extrema importância e deve ser levar em consideração as medições ao avaliar o desempenho de um módulo ou de um sistema fotovoltaico, além dos materiais e os métodos a serem empregados. Pois ambos os fatores influenciam no processo. As medições devem ser efetuadas em condições operacionais do módulo ou do sistema para se garantir confiabilidade da calibração do projeto que está sendo realizado.

Outro fator é o sistema para calibração a qual o módulo foi avaliado, neste trabalho foi utilizado um piranômetro para que fosse feitas comparações entre as metodologias *outdoor* e *indoor* de calibração. A principal desvantagem do método *outdoor* em relação ao *indoor* é com relação à necessidade de vários dias de céu claro (céu aberto com pouquíssimas nuvens) tornando a calibração um processo lento e restrito algumas épocas do ano em certas regiões. (GUIMARÃES, 2013; KIM; LEE; ZO; LEE; JUNG; RIM; JANG, 2018).

Neste contexto a utilização de uma metodologia *indoor* que apresente resultados satisfatórios em termos de requisitos de incerteza possibilitaria a realização de calibrações em curto espaço de tempo, além de verificações intermediárias hoje indispensáveis dentro dos projetos de pesquisa tendo em vista além da disponibilidade de instrumentos reservas, o custo operacional da

retirada dos instrumentos de sítios distantes e de locais de difícil acesso. A grande dificuldade na utilização de sistemas de calibração *indoor* está no alto custo dos simuladores solares de espectros expandidos que aproximam mais do espectro solar (AZOUZOUTE; MERROUNI; BENNOUNA; GENNIOUI, 2019).

Buscando explorar as possibilidades obtidas com matérias de baixo custo vamos apresentar as medições de seis células de referências (Cr4, Cr6, Cr7, Cr8 e Cr9) produzidas no LPA realizadas durante um período de tempo (1 ano). Sendo que as medições da Cr5 possuem ausência de dados para alguns períodos de medição devido a um defeito ocasional, posteriormente corrigido e retomando as medições desta célula. Sendo os dados apresentados em desvio percentual.

Primeiramente todos os dados apresentados (Figura de 15 a 31) demonstram os desvios percentuais durante o período de coleta de dados das células de referência comparados com a central meteorológica do laboratório, e também quanto aos métodos utilizados para a calibração das células.

Quanto ao desvio percentual entre a medida de irradiância solar das células de silício monocristalinas de referência, para as análises dos métodos de calibração: padrão, calibração por piranômetro usual e calibração por simulador solar. O método de calibração por simulador solar foi o que apresentou menor desvio percentual, quando comparado aos dados da central meteorológica para todas as células. O mesmo resultado foi observado para todas as células m-Si, sendo o método de calibração por simulador solar apresentando os dados mais próximos e fidedignos aos da central meteorológica do laboratório, dados que vão ao encontro do estudo apresentado por GUIMARÃES, 2013. Esses dados podem ser melhor observados na Tabela 3, onde para Cr4, Cr5 e Cr6 a calibração pela corrente do shunt, método *indoor* apresentou dados melhores de média, mediana e desvio padrão.

O método de Calibração pelo piranômetro usual método *Outdoor*, também apresentou dados significativos. Esses dados podem ter apresentado maior significância por terem sido obtidos por métodos equipamentos de funcionalidade similar, ou seja, a calibração por um piranômetro comparado com um piranômetro da central meteorológica. Já os dados obtidos pelo método de calibração por célula de referência usual, método *outdoor*, apresentaram dados mais oscilantes de desvio padrão e média quando comparados aos demais métodos aplicados. Um motivo provável para o mal desempenho na calibração por células de referência padrão, possa ser devido a uma

descalibrarão da célula de referência padrão no período em que os ensaios de calibração dos protótipos ocorreram, ou também por interferências ambientais pontuais.

Quanto a análise das células multi cristalinas Cr7, Cr8 e Cr9 na Tabela 4, pode ser observado que para Cr7 e Cr9 a calibração por piranômetro usual, metodologia *outdoor* está célula apresentou o menor desvio percentual médio em comparação aos demais métodos utilizados. Já Cr8, apresentou menor desvio percentual médio quando houve a calibração pelo método *indoor* de calibração solar. Essas mudanças observadas entre as células quanto aos métodos podem ser devido a erros sistemáticos durante as medições e por características construtivas das células.

Em um contexto geral as células mc-Si se sobressaíram em relação ao desempenho quando comparadas as células m-Si, o que pode ser observado nas tabelas 3 e 4. Entretanto as células m-Si apresentaram melhor relação entre os dados analisados, desta forma esses protótipos quando calibrados por simulador solar apresentam menor discrepância entre os resultados obtidos pelas células analisadas.

Quando são analisados as Figuras de 15 a 20 as quais apresentam o desvio percentual entre as irradiâncias das células de referência, a partir do piranômetro da estação meteorológica (calibradas por células de referência padrão) para o período analisado. Assim podemos observar de forma geral que os menores desvios percentuais ocorreram durante os meses de verão (desvio percentual aproximadamente entre 0 e 5%). Já nos dados obtidos nos meses de inverno os desvios variaram de forma mais regular, contudo, com maior amplitude de percentual (desvio percentual aproximadamente entre 5 e 15%).

Já em relação as Figuras de 21 a 31, estas apresentam os desvios percentuais entre as irradiâncias das células de referência a partir do piranômetro da estação meteorológica (calibradas por piranômetro termoelétrico usual e calibração por simulador solar). Nos meses que correspondem ao inverno podemos observar um maior desvio percentual nas células monocristalinas (desvio percentual aproximadamente entre 5 e 10%). Quanto aos meses de verão os desvios percentuais se mantiveram em maioria estáveis e aproximadamente em 0 e 5 %.

Neste contexto é importante salientar que a estação com meses mais ensolarados e com menor nebulosidade, proporciona melhor estabilidade da obtenção de dados. Ou seja, para caracterizar novas células de referência pelas metodologias *outdoor* a estação do verão com mais dias ensolarados viabiliza a aplicação deste método, sem grandes erros sistemáticos.

Quando se compara as metodologias de calibração estas possuem um certo dinamismo persistente. Na tabela 5 e 6 pode-se observar os desvios percentuais das medidas de irradiância para as células m-Si e mc-Si. Durante esta análise comparativa, foi constatado que os desvios percentuais das células em diferentes métodos de calibrações apresentaram valores absolutos, entre as comparações para todas as células de referências analisadas. Desta forma, através desse valor absoluto obtido é possível estimar a irradiância das células. Assim as tabelas apresentam uma metodologia em função da outra, sendo possível análises prévias dos próximos dados a serem obtidos.

Quanto a análise do conjunto das Figuras de 32 a 47, é apresentado o desvio das medidas a partir da célula de referência em função de duas metodologias de calibração, sendo estas método: 1) Calibração por célula de referência usual em função da calibração por piranômetro termoeletrico (Figuras de 32 a 36); 2) Calibração por célula de referência padrão em função da calibração por simulador solar (Figuras 37 a 42); 3) Calibração por piranômetro termoeletrico em função da calibração por simulador solar (Figuras 43 a 47).

Analisando o conjunto de dados das Figuras, pode-se observar que as maiores variações entre as metodologias empregadas, ocorreram nos meses de estação de verão e as menores variações no inverno. Nas estações de outono e primavera houve uma estabilidade dos desvios das medidas. Isso se enquadra e pode ser verificado nos dados obtidos no período de dados apresentados nas figuras.

Referente a primeira comparação a diferença média nas medições para as células foram de aproximadamente $32 W/m^2$ nas células monocristalinas (Cr4 e Cr6) e $30 W/m^2$ para as células multicristalinas (Cr7, Cr8 e Cr9). Na segunda comparação a diferença média nas medições em comparação para as células foi de aproximadamente $48 W/m^2$ para as células monocristalinas Cr4 e Cr6 e de apenas $3 W/m^2$ para as células Cr5. E nas células multicristalinas aproximadamente $28 W/m^2$ para as células Cr7 e Cr8 e $6 W/m^2$ para a célula Cr9. Na última análise a diferença média entre as medições foram de aproximadamente de $17 W/m^2$ para as células monocristalinas (Cr4 e Cr6) e para as células multicristalinas Cr7 e Cr8 foi de aproximadamente $2 W/m^2$, enquanto para Cr9 a diferença foi de $24 W/m^2$.

Desta forma foi possível constatar que células de referência de baixo custo poderia ser calibradas tanto por simulador solar (*indoor*), ou por piranômetro termoeletrico

(*outdoor*) e serem utilizadas em conjunto para avaliarem o potencial de irradiação solar para avaliação de projetos de instalação de sistemas fotovoltaicos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho realizou a construção, e análise de protótipos de células para medição da radiação solar. Algumas técnicas e métodos em escala de laboratório foram utilizadas para construção, caracterização desses protótipos

A radiação solar é uma fonte inesgotável energética que fornece um enorme potencial de utilização a ser explorado pelo homem, conhecer e explorar as ferramentas e os mecanismos dos sistemas que permitem a conversão da energia solar em outras formas de energia, permite planejar o melhor desenvolvimento sustentável ao mundo, utilizando a radiação solar como uma valiosa ferramenta para desenvolvimento global.

Quanto a análise dos nossos dados houve influência das estações do ano, o que já era esperado e também de conhecimento da literatura, nossa região apresenta grande sazonalidade de temperaturas o que influencia a leitura dos dados obtidos. Quanto a células monocristalinas estas apresentam maior estabilidade entre as células. Quanto a análise da influência dos métodos de calibração, o método por simulador solar demonstrou maior confiabilidade em relação aos dados base meteorológicos. Foi observada ainda uma maior efetividade do método *indoor* quando comparado aos métodos *outdoor*.

Um dos principais resultados desse trabalho é que vai ao encontro de literaturas que viabilizam o uso de matérias de baixo custo para realização de protótipos para medição de radiação solar, os quais vem se mostrando eficazes, podendo dessa forma ser reproduzidos e aplicados em grande escala.

Todas as metodologias de calibração empregadas apresentaram características viáveis de utilização para os fins de obtenção de dados de medição de irradiação solar. Porém os dados deste trabalho demonstraram em sua análise que o método de calibração por simulador solar foi a metodologia mais efetiva. E considerando também que a metodologia de calibração *outdoor* por piranômetro termoelétrico é bastante atrativa em contexto de resultados e custo.

7. REFERÊNCIAS

A CASTILLO-MATADAMAS, H; MOLINA-VAZQUEZ, J C; QUINTERO-TORRES, R. Unexplored Indoors method for pyranometers calibration traceable to SI. **Journal Of Physics: Conference Series**, [S.L.], v. 582, p. 012051, 14 jan. 2015. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/582/1/012051>.

ALMEIDA, Marcelo Pinho; ZILLES, Roberto; LORENZO, Eduardo. Extreme overirradiance events in São Paulo, Brazil. **Solar Energy**, [S.L.], v. 110, p. 168-173, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.09.012>.

AZOUZOUTE, Alae; MERROUNI, Ahmed Alami; BENNOUNA, El Ghali; GENNIOUI, Abdellatif. Accuracy Measurement of Pyranometer vs Reference cell for PV resource assessment. **Energy Procedia**, [S.L.], v. 157, p. 1202-1209, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.286>.

BABAR, Bilal; GRAVERSEN, Rune; BOSTRÖM, Tobias. Solar radiation estimation at high latitudes: assessment of the cmsaf databases, asr and era5. **Solar Energy**, [S.L.], v. 182, p. 397-411, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.058>.

BHARADWAJ, Pallavi; JOHN, Vinod. Design, fabrication and evaluation of solar irradiation meter. **2014 Ieee International Conference On Power Electronics, Drives And Energy Systems (Pedes)**, [S.L.], p. 1-6, dez. 2014. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/pedes.2014.7041993>.

BÜHLER, Alexandre José. **Estudo de técnicas de determinação experimental e pós-processamento de curvas características de módulos fotovoltaicos**. 2011. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul., Rio Grande do Sul, 2011. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/30213>. Acesso em: 07 maio 2021.

BURGER, Bruno; RÜTHER, Ricardo. Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. **Solar Energy**, [S.L.], v. 80, n. 1, p. 32-45, jan. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2005.08.012>.

CHANG, Nathan L.; ZHENG, Jianghui; WU, Yiliang; SHEN, Heping; QI, Fred; CATCHPOLE, Kylie; HO-BAILLIE, Anita; EGAN, Renate J.. A bottom-up cost analysis of silicon-perovskite tandem photovoltaics. **Progress In Photovoltaics: Research and Applications**, [S.L.], p. 1-13, 27 out. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.3354>.

CROTTI, P.; RAMPINELLI, GA Estimativa dos componentes solar direto e difuso na superfície horizontal para Araranguá / SC a partir de redes meteorológicas. *VII CBENS 2018, 09/01* .

GREEN, Martin A.; HISHIKAWA, Yoshihiro; DUNLOP, Ewan D.; LEVI, Dean H.; HOHL-EBINGER, Jochen; HO-BAILLIE, Anita W.y.. Solar cell efficiency tables (version 51). **Progress In Photovoltaics: Research and Applications**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 3-12, 14 dez. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.2978>.

GUIMARÃES, Patrícia Lúcia de Oliveira. AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE UM SISTEMA DE CALIBRAÇÃO INDOOR PARA PIRANÔMETROS BASEADO EM UM SIMULADOR SOLAR. **Revista Brasileira de Energia Solar**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 17-24, jun. 2013.

HABTE, Aron; SENGUPTA, Manajit; ANDREAS, Afshin; REDA, Ibrahim; ROBINSON, Justin. Radiometer calibration methods and resulting irradiance differences. **Progress In Photovoltaics: Research and Applications**, [S.L.], v. 25, n. 7, p. 614-622, 7 out. 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.2812>.

HIOKI, André Tsuyoshi; SILVA, Vilson Roiz Gonçalves Rebelo da; VILELA JUNIOR, João Américo; LOURES, Eduardo de Freitas Rocha. Performance Analysis of Small Grid Connected Photovoltaic Systems. **Brazilian Archives Of Biology And Technology**, [S.L.], v. 62, n. , p. 1-10, 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-smart-2019190018>.

HUBER, Isabelle; BUGLIARO, Luca; PONATER, Michael; GARNY, Hella; EMDE, Claudia; MAYER, Bernhard. Do climate models project changes in solar resources? **Solar Energy**, [S.L.], v. 129, p. 65-84, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.016>

ISO 9060: 2018 Energia solar - Especificação e classificação dos instrumentos de medição da radiação solar hemisférica e solar direta”, vol. 2018. 2018.

KALOGIROU, S. A. Solar Energy Engineering Processes and Systems. 2 ed., Academic Press is an imprint of Elsevier, 2014.

KIM, Bu-Yo; LEE, Kyu-Tae; ZO, Il-Sung; LEE, Sang-Ho; JUNG, Hyun-Seok; RIM, Se-Hun; JANG, Jeong-Pil. Calibration of the Pyranometer Sensitivity Using the Integrating Sphere. **Asia-Pacific Journal Of Atmospheric Sciences**, [S.L.], v. 54, n. 4, p. 639-648, 25 out. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13143-018-0085-0>.

MACHADO, Carolina T.; MIRANDA, Fabio S. Photovoltaic Solar Energy: a briefly review. **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 126-146, 2015. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20150008>.

MARION, Bill; SMITH, Benjamin. Photovoltaic system derived data for determining the solar resource and for modeling the performance of other photovoltaic systems. **Solar Energy**, [S.L.], v. 147, p. 349-357, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.043>.

MARTÍNEZ, Miguel; ANDÖJAR, José; ENRIQUE, Juan. A New and Inexpensive Pyranometer for the Visible Spectral Range. **Sensors**, [S.L.], v. 9, n. 6, p. 4615-4634, 12 jun. 2009. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s90604615>.

MARTÍNEZ-MORENO, F.; Lorenzo, E.; Muñoz, J.; Moretón, R. On the testing of large PV arrays, ResearchGate, **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 1102, 2012.

International Organization for Standardization, “Solar energy - Calibration of a pyranometer using pyrhelimeter”, ISO 9846, 1993.

International Organization for Standardization, “Solar energy - Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer”, ISO 9847, 1992.

MCCORMICK, P.G.; SUEHRCKE, H.. The effect of intermittent solar radiation on the performance of PV systems. **Solar Energy**, [S.L.], v. 171, p. 667-674, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2018.06.043>.

MEDEIROS, Felipe J. de; SILVA, Claudio M. Santos e; BEZERRA, Bergson G. Calibration of Ångström-PreScott Equation to Estimate Daily Solar Radiation on Rio Grande do Norte State, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 32, n. 3, p. 409-416, set. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863230008>.

MONTEZANO, Bruno. **Radiação Solar**: CRESESB. CRESESB. 2014. CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. Disponível em: http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=301.

PHILIPPS et al., 12 de julho de 2017. Photovoltaics Report, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, Freiburg, (< <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/.../studies/Photovoltaics-Report.pdf>>).

PINHO, J. T., GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2014.

POLVERINI, Davide; DODD, Nicholas; ESPINOSA, Nieves. Potential regulatory approaches on the environmental impacts of photovoltaics: expected improvements and impacts on technological innovation. **Progress In Photovoltaics: Research and Applications**, [S.L.], p. 1-15, 18 out. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.3344>.

ROSSO, Andre Possamai. **Desenvolvimento de células e módulos de referência para medição da radiação solar**. 2019. 134 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade, Araranguá, 2019. Disponível em: <http://www.bu.ufsc.br/teses/PGES0013-D.pdf>

SIMÓN-MARTÍN, Miguel de; ALONSO-TRISTÁN, Cristina; GONZÁLEZ-PEÑA, David; Díez-Mediavilla, Montserrat. New device for the simultaneous measurement of diffuse solar irradiance on several azimuth and tilting angles. **Solar Energy**, [S.L.], v. 119, p. 370-382, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.001>.

SOUZA, Adilson Pacheco de; SILVA, Andréa Carvalho da; TANAKA, Adriana Aki; ULIANA, Eduardo Morgan; ALMEIDA, Frederico Terra de; KLAR, Antonio Evaldo; GOMES, Anthony Wellington Almeida. Global radiation by simplified models for the state of Mato Grosso, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 52, n. 4, p. 215-227, abr. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2017000400001>

SOUZA, Muriele Bester de; TONOLO, Édwin Augusto; YANG, Renata Lautert; TIEPOLO, Gerson Máximo; URBANETZ JUNIOR, Jair. Determination of Diffused Irradiation from Horizontal Global Irradiation - Study for the City of Curitiba. **Brazilian**

Archives Of Biology And Technology, [S.L.], v. 62, n. , p. 1-9, 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-smart-2019190014>.

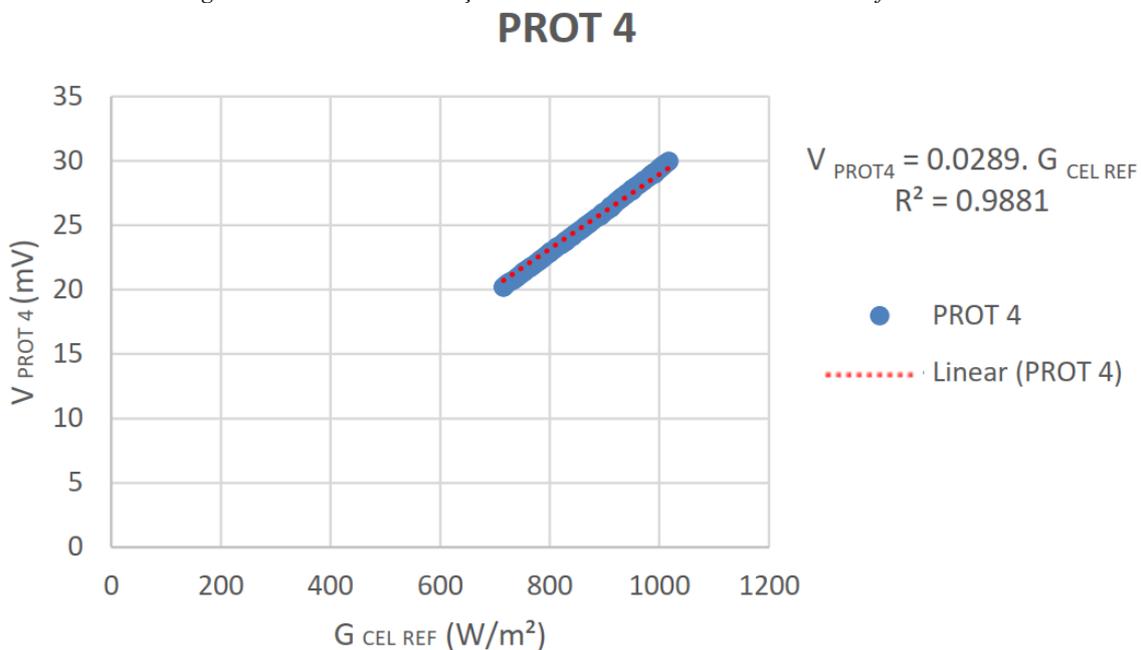
SRIKRISHNAN, Vivek; YOUNG, George S.; WITMER, Lucas T.; BROWNSON, Jeffrey R.s.. Using multi-pyranometer arrays and neural networks to estimate direct normal irradiance. **Solar Energy**, [S.L.], v. 119, p. 531-542, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.004>.

TAKIGAWA, Fabrício Y. K.; ARANHA NETO, Edison A. C.; FERNANDES, Rubipiara C.; CAMPOS, Dyego de; CARDOSO, Mauro. Analysis of the Financial Viability of a Photovoltaic System to a Consumer Unit in South Brazil. **Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 131-141, mar. 2019. SciELO Agência Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID). <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-33052019000100131>.

YANG, Dazhi; GUEYMARD, Christian A.. Ensemble model output statistics for the separation of direct and diffuse components from 1-min global irradiance. **Solar Energy**, [S.L.], v. 208, p. 591-603, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.082>.

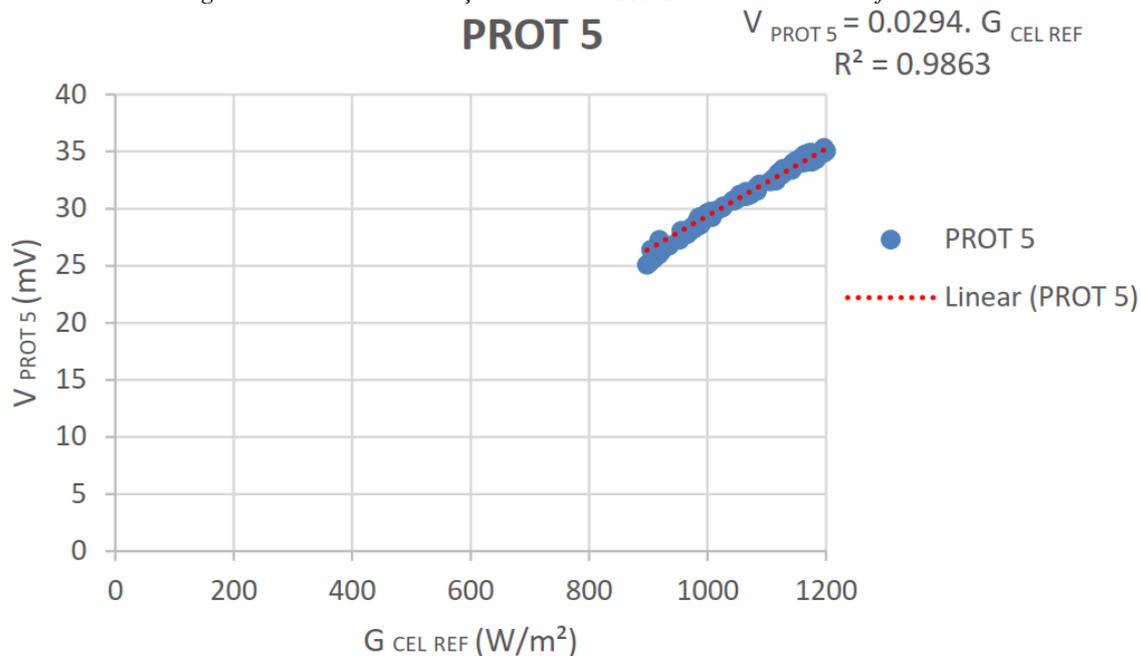
ANEXO A – GRÁFICOS DOS PROTÓTIPOS NA CARACTERIZAÇÃO OUTDOOR ATRAVÉS DA CÉLULA DE REFERÊNCIA PADRÃO

Figura 48 - Curva de calibração outdoor do PROT 4 com a célula de referência.



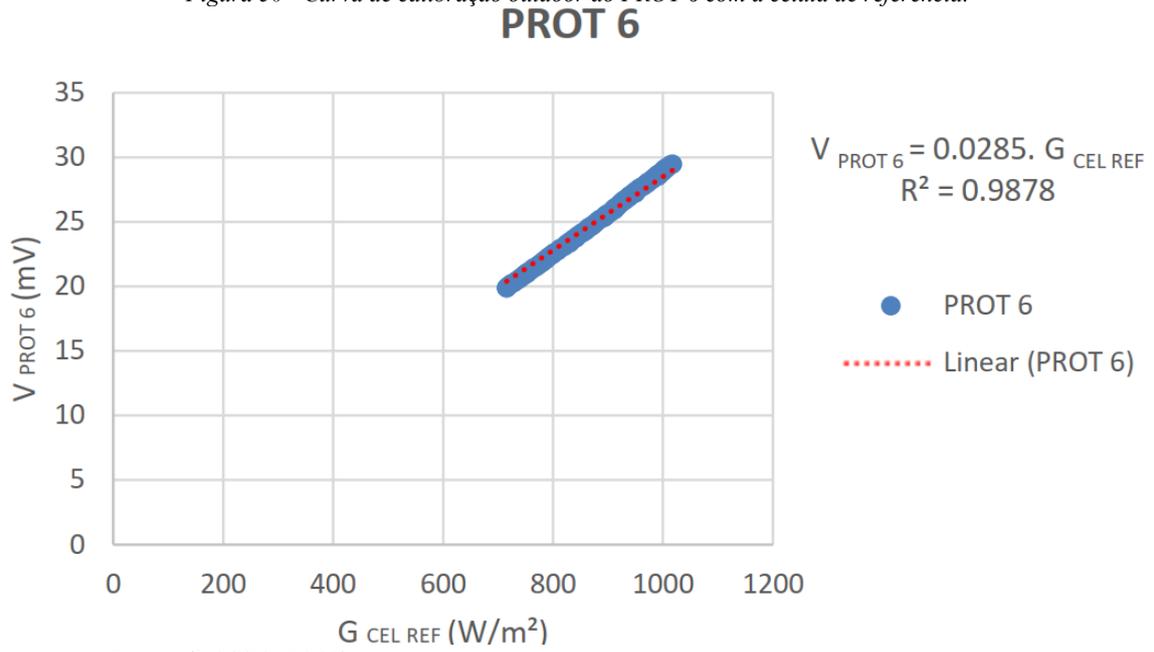
Fonte: (ROSSO, 2019)

Figura 49 - Curva de calibração outdoor do PROT 5 com a célula de referência.



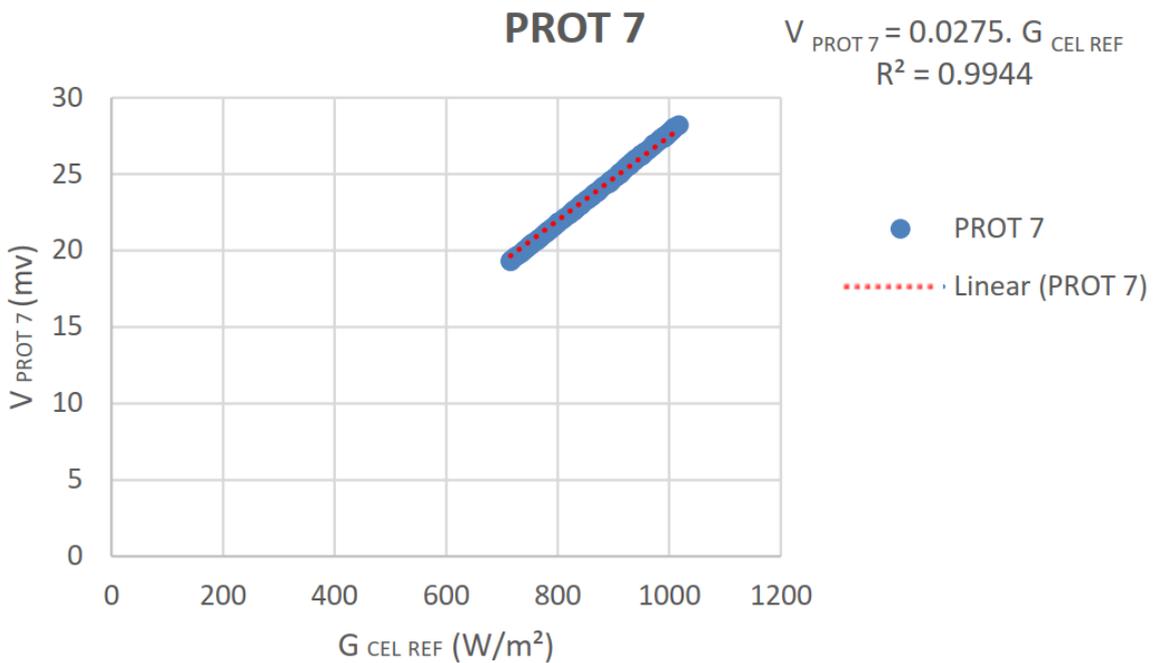
Fonte: (ROSSO, 2019)

Figura 50 - Curva de calibração outdoor do PROT 6 com a célula de referência.



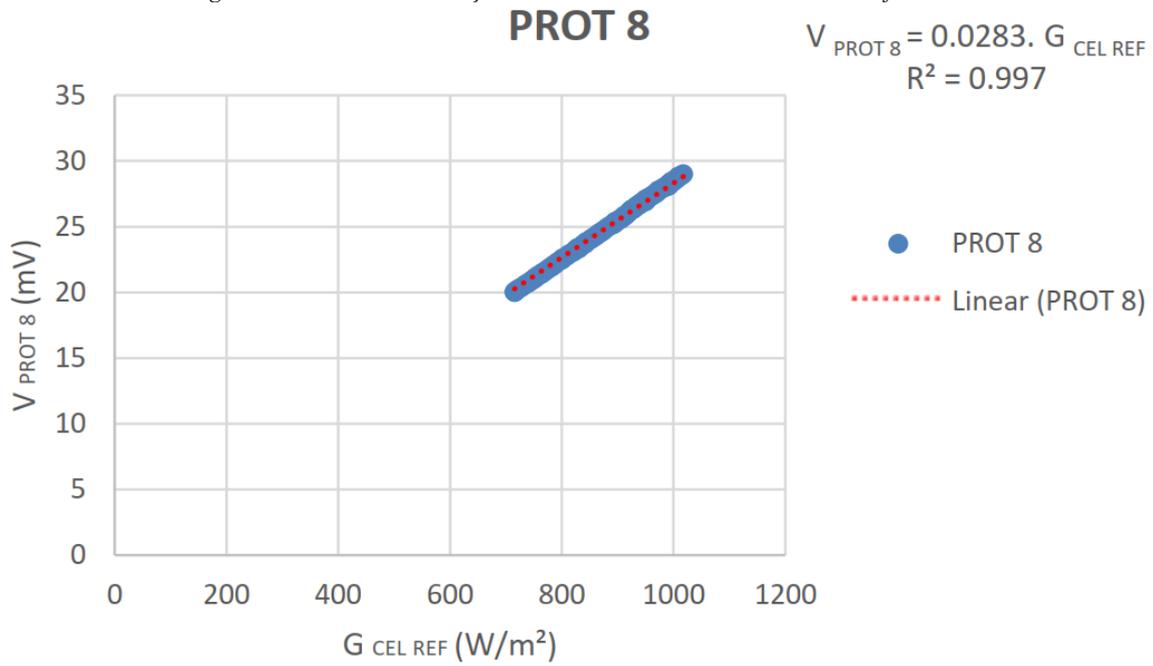
Fonte: (ROSSO, 2019)

Figura 51 - Curva de calibração outdoor do PROT 7 com a célula de referência.



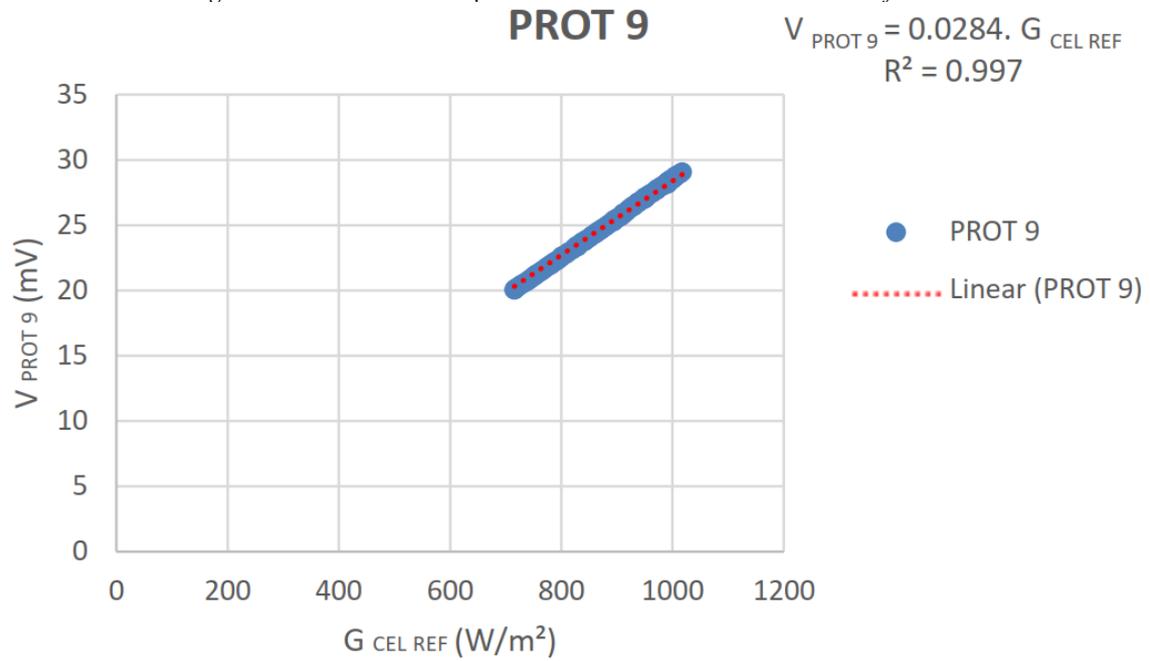
Fonte: (ROSSO, 2019)

Figura 52 - Curva de calibração outdoor do PROT 8 com a célula de referência.



Fonte: (ROSSO, 2019)

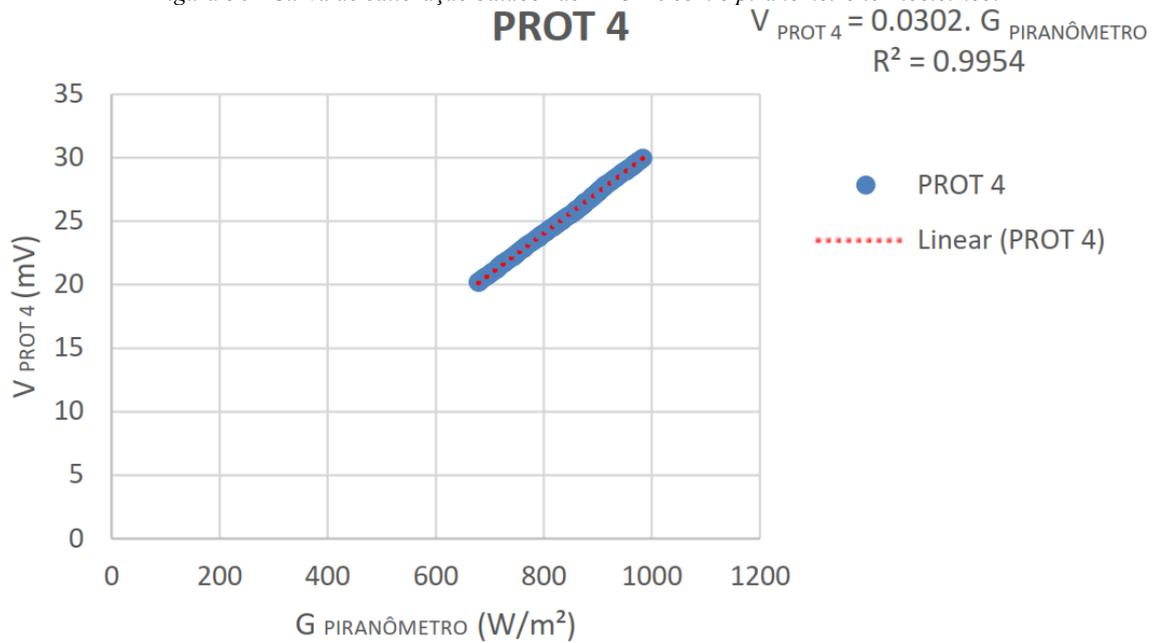
Figura 53 - Curva de calibração outdoor do PROT 9 com a célula de referência.



Fonte: (ROSSO, 2019)

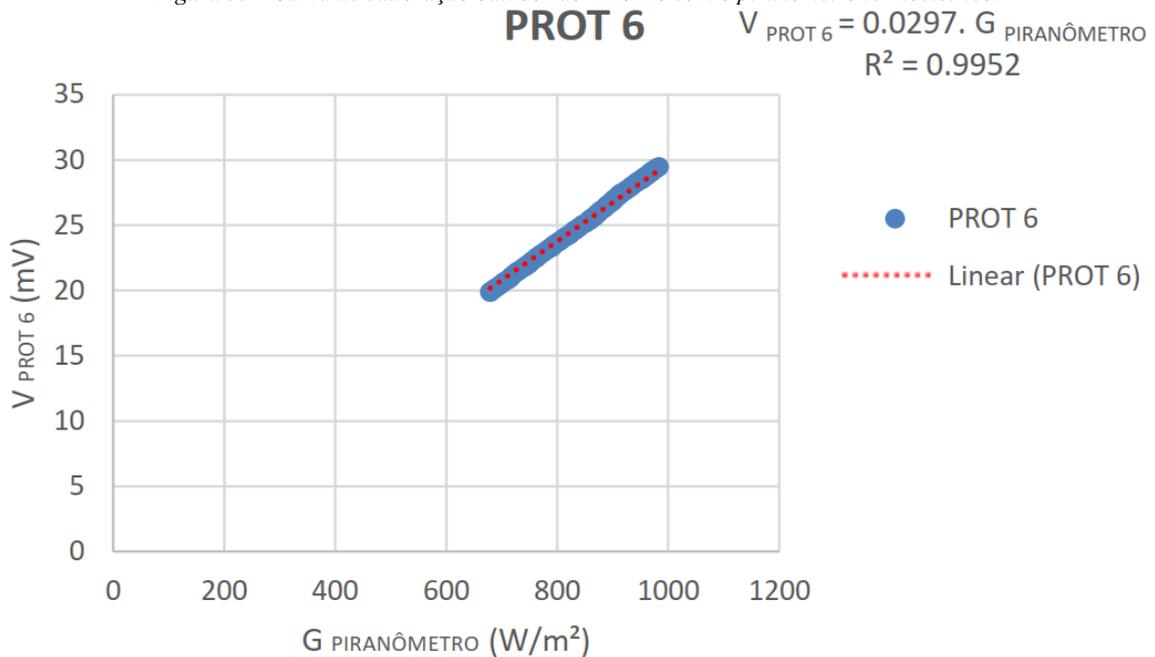
ANEXO B – GRÁFICOS DOS PROTÓTIPOS NA CARACTERIZAÇÃO OUTDOOR ATRAVÉS DO PIRANÔMETRO TERMOELÉTRICO

Figura 54 - Curva de calibração outdoor do PROT 4 com o piranômetro termoeletrico.



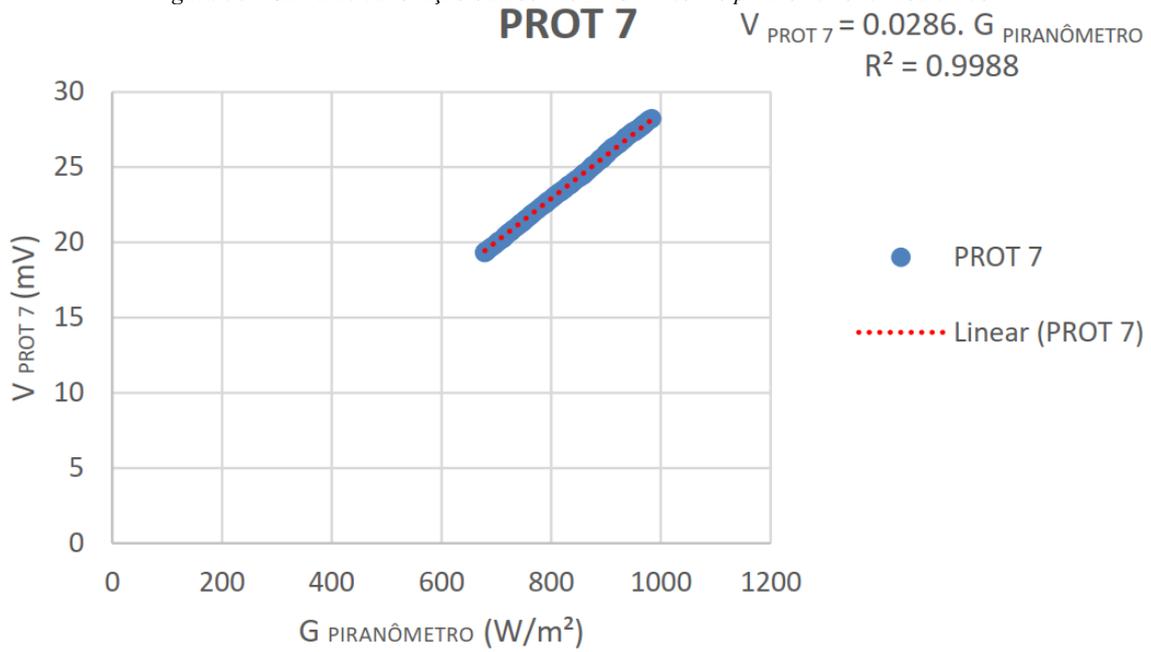
Fonte: (ROSSO, 2019)

Figura 55 - Curva de calibração outdoor do PROT 6 com o piranômetro termoeletrico.



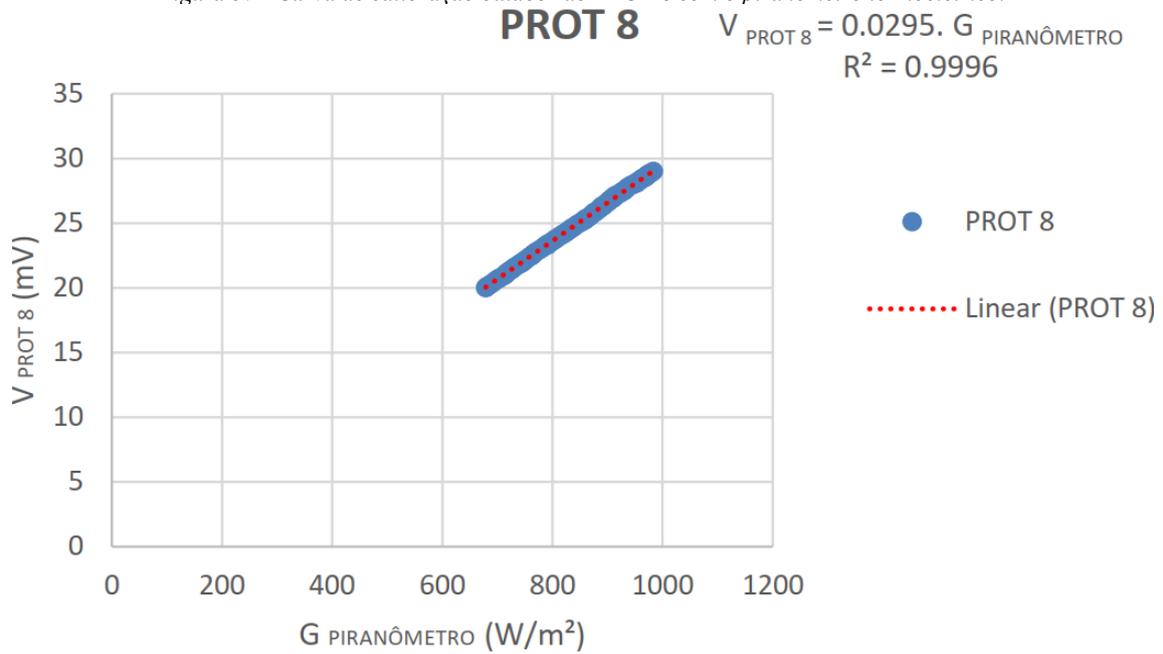
Fonte: (ROSSO, 2019)

Figura 56 - Curva de calibração outdoor do PROT 7 com o piranômetro termoeletrico.



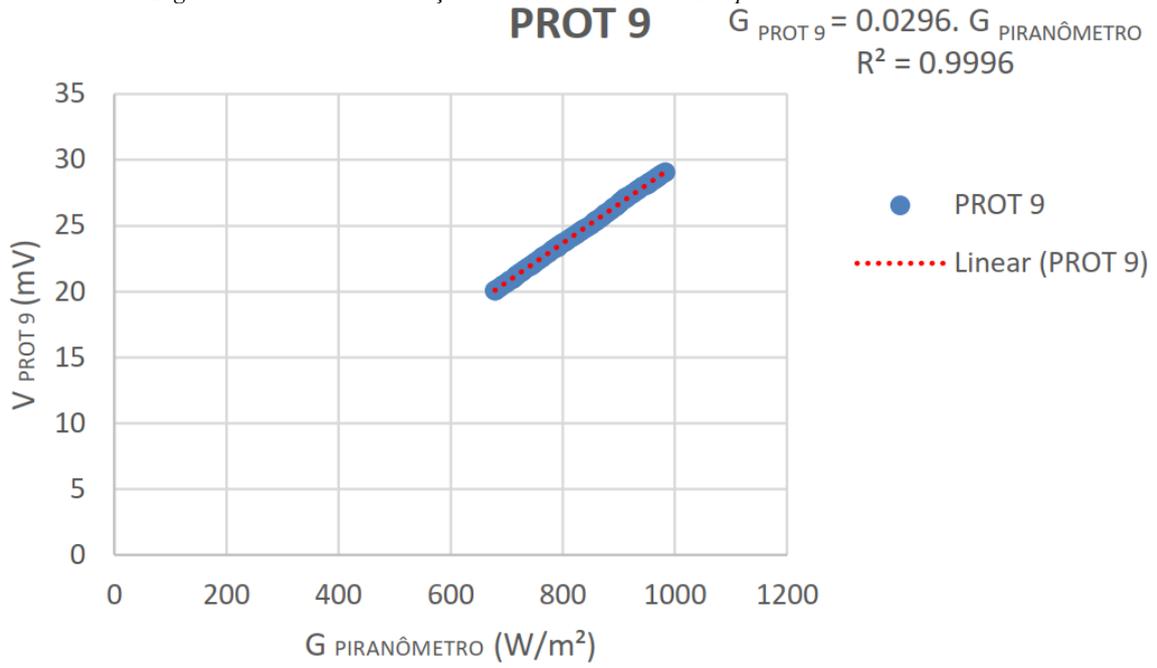
Fonte: (ROSSO, 2019)

Figura 57 - Curva de calibração outdoor do PROT 8 com o piranômetro termoeletrico.



Fonte: (ROSSO, 2019)

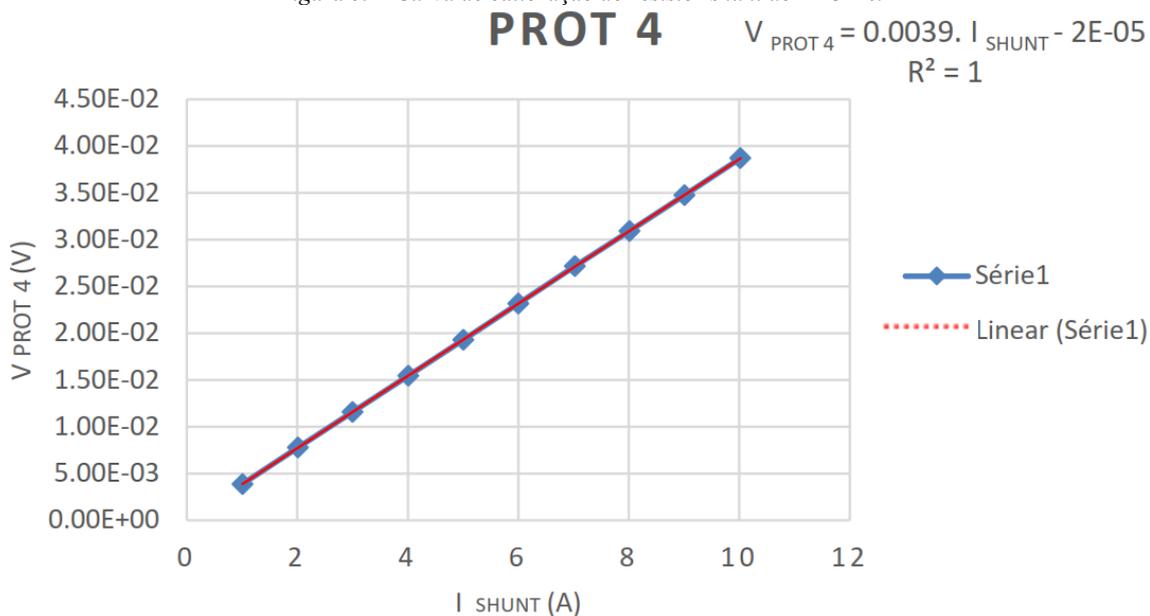
Figura 58 - Curva de calibração outdoor do PROT 9 com o piranômetro termoeletrico.



Fonte: (ROSSO, 2019)

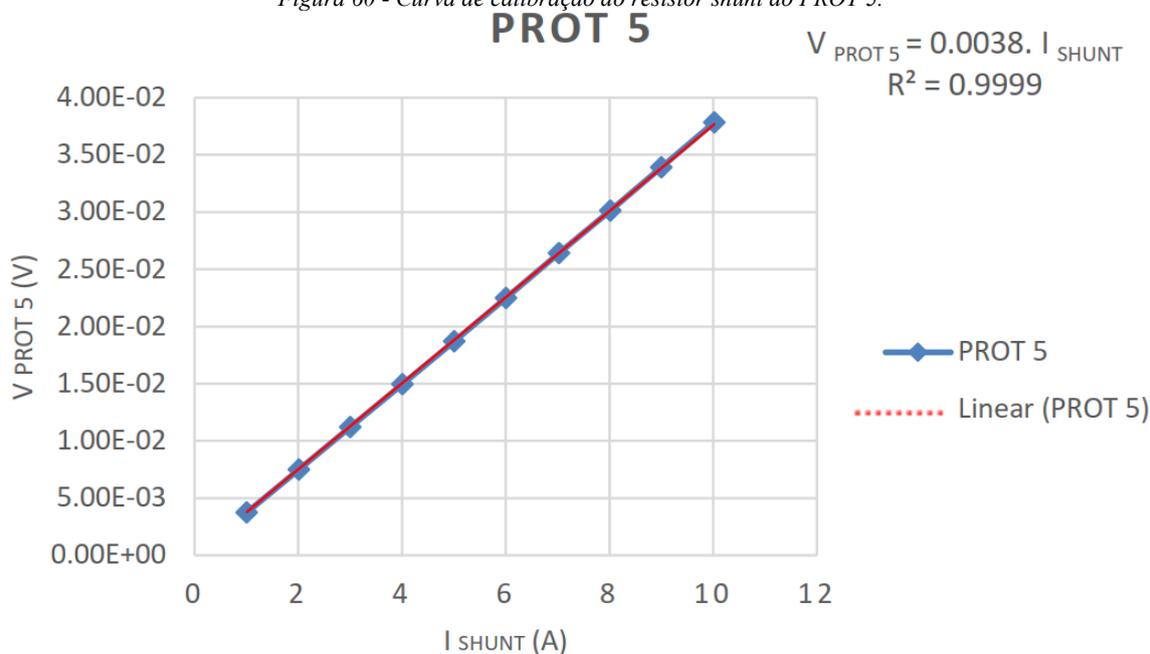
ANEXO C – GRÁFICOS DOS PROTÓTIPOS NA CARACTERIZAÇÃO DO RESISTOR SHUNT

Figura 59 - Curva de calibração do resistor shunt do PROT 4.



Fonte: (ROSSO, 2019)

Figura 60 - Curva de calibração do resistor shunt do PROT 5.



Fonte: (ROSSO, 2019)

Figura 61 - Curva de calibração do resistor shunt do PROT 6.

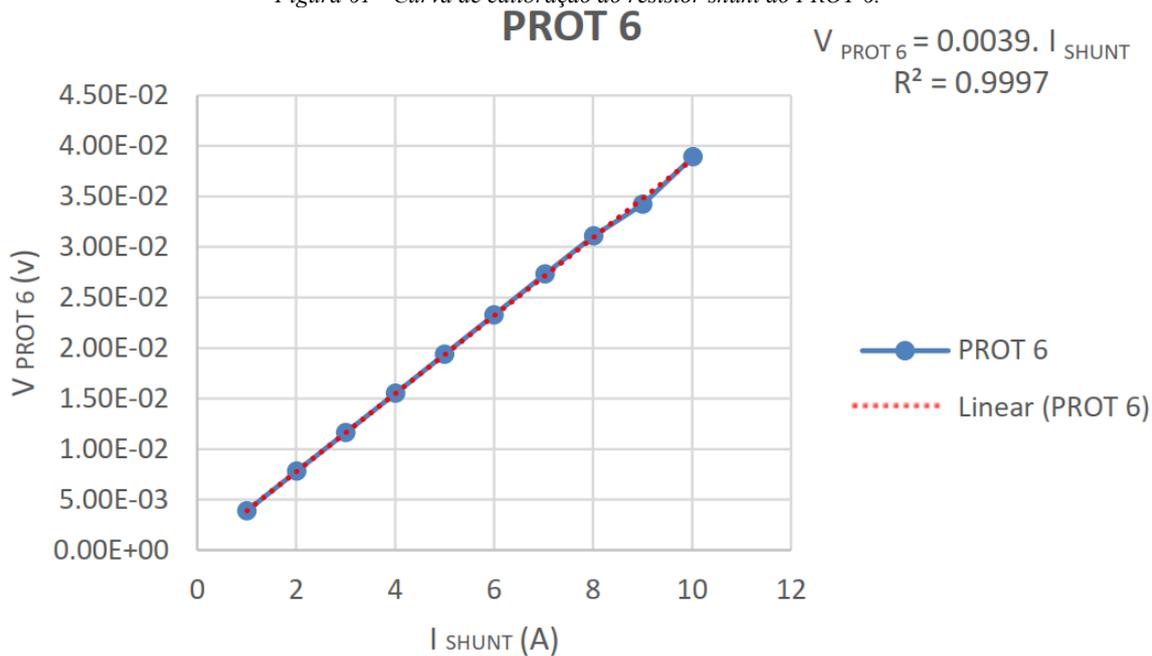


Figura 62 - Curva de calibração do resistor shunt do PROT 7.

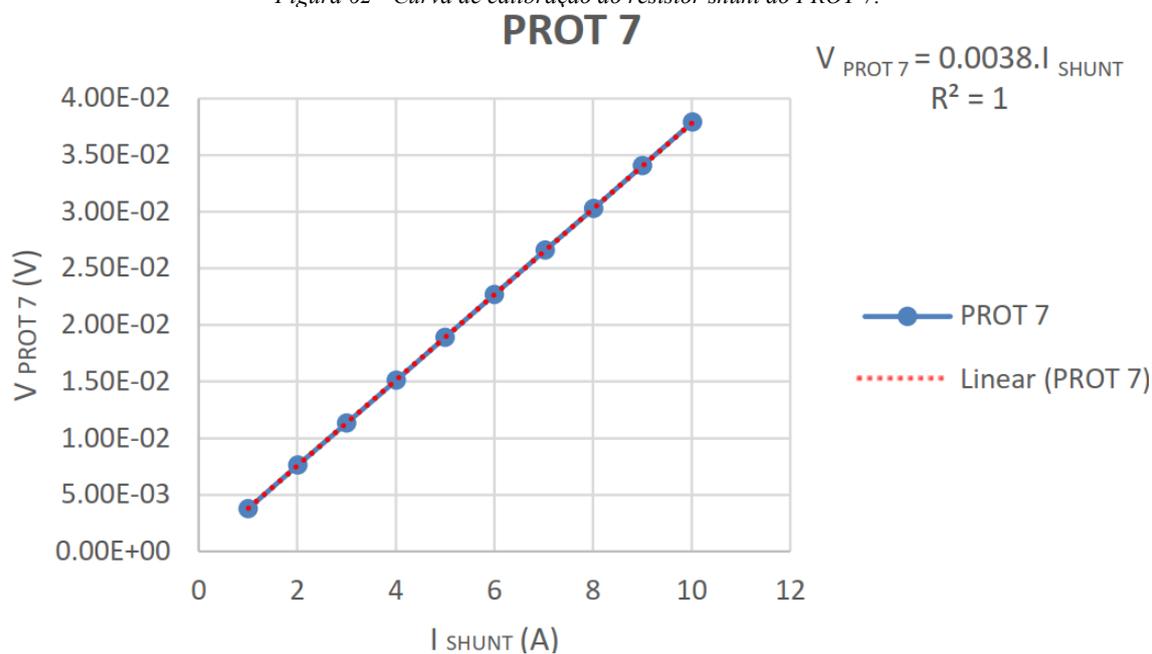


Figura 63 - Curva de calibração do resistor shunt do PROT 8.

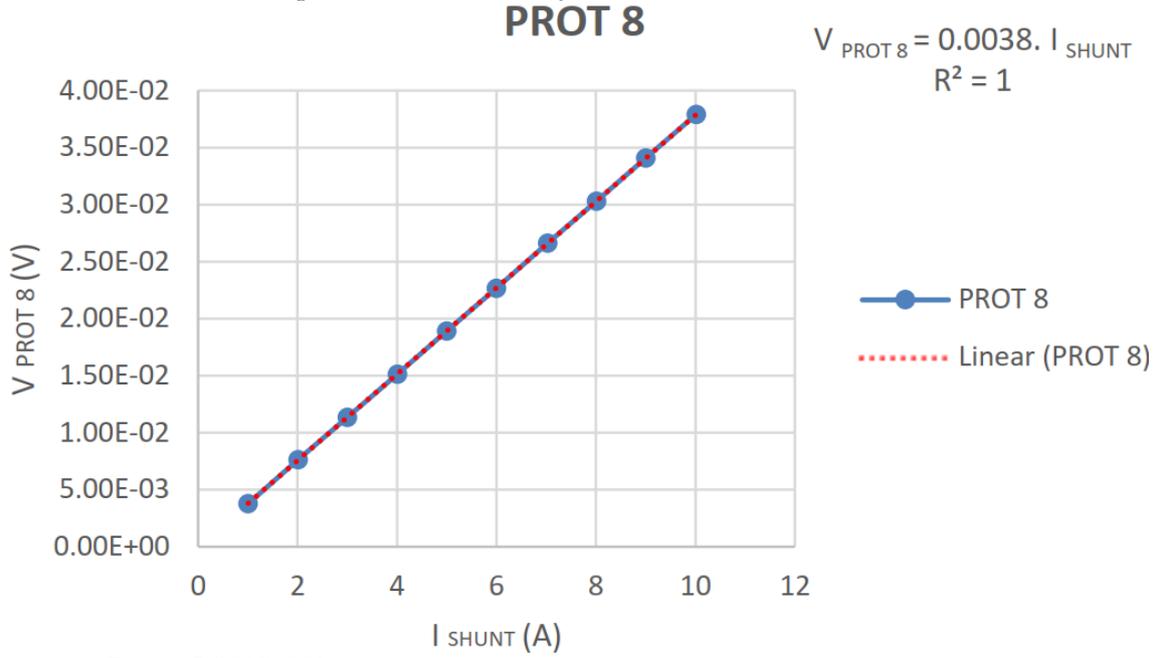


Figura 64 - Curva de calibração do resistor shunt do PROT 9.

