

PROJETO E MONTAGEM DO PAINEL ELÉTRICO PARA MONITORAMENTO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Leonardo Ricardo Bernardes da Conceição¹ e Emanuel Marques de Mattos²

RESUMO

Com o crescente aumento do consumo de energia elétrica do mundo e o atual cenário ambiental e climático, surgiu a necessidade de um estudo, visando retardar ou até mesmo diminuir degradações causadas pelo uso de fontes de energia não-renováveis. Esse trabalho tem a finalidade de projetar, especificar os componentes e fazer a montagem de um painel elétrico que interliga os painéis fotovoltaicos, localizado no Campus da UERJ em São Cristóvão a um controlador lógico programável, com o objetivo de fazer um monitoramento de eficiência do sistema fotovoltaico. Serão feitas a averiguação e modernização das instalações elétricas atuais, o levantamento da carga, o dimensionamento da instalação do painel e eletrodutos e a instalação do painel elétrico para o monitoramento do sistema fotovoltaico. Também foram apresentadas as cotações dos componentes adquiridos para implementação do painel elétrico ao sistema fotovoltaico.

Palavras-chave: Energia Solar. Painel Fotovoltaico, Instalação Elétrica. Fonte de Energia Renovável.

¹Engenheiro Eletricista, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Pós-graduado em Instalações Elétricas Residenciais, Ucamprominas. Pós-graduado em Instalações Elétricas Industriais, Ucamprominas. E-mail: leonardo.rbconceicao@gmail.com

²Engenheiro Eletricista, Universidade do Estado Rio de Janeiro. E-mail: marquesdemattos@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

Necessitamos buscar formas alternativas de utilização dos recursos naturais, sem esgotá-los, existe interesse maior do mundo para diminuição dos gases do efeito estufa e também minimizar os impactos socioambientais decorrentes da criação e implementação de usinas de energia convencionais. Com o aumento da demanda de energia e também dos crescentes problemas ambientais e climáticos que estão ocorrendo no mundo, faz-se necessário o estudo para buscas de fontes alternativas de energia, sendo cada vez mais feitos investimentos para a produção de energia renovável.

O efeito fotovoltaico foi observado, pela primeira vez, em 1839 pelo físico francês Alexandre Edmund Becquerel que realizou experiências com placas metálicas imersas em eletrólito, quando foi colocado sob a luz surgiu uma diferença de potencial. Esse efeito ficou conhecido como efeito fotovoltaico, união das palavras foto (luz) e volt (unidade de medida de potencial elétrico).

Segundo a (CRESESB, 2006), com a crise mundial de energia de 1973/74, a preocupação em estudar novas formas de produção de energia fez com que a utilização de células fotovoltaicas não se restringisse somente para programas espaciais, mas que fossem intensamente estudados e utilizados no meio terrestre para suprir o fornecimento de energia.

1.1 Objetivos

O objetivo do trabalho consistiu em projetar, especificar os componentes e fazer a montagem de um painel elétrico que interliga os painéis fotovoltaicos, localizado no Campus da UERJ em São Cristóvão a um CLP, com o objetivo de fazer um monitoramento de eficiência do sistema fotovoltaico.

No painel elétrico, os contadores farão a comutação entre a carga utilizada para o estudo (MOSFET) e a instalação anteriormente existente. Os transdutores serão utilizados para medição de tensão e corrente enviando sinais ao CLP com objetivo de fazer o monitoramento do sistema fotovoltaico.

Foram feitas a verificação e modernização das instalações elétricas atuais, o levantamento da carga, o dimensionamento da instalação do painel e eletrodutos e, finalmente, a implementação do quadro elétrico.

2 DIMENSIONAMENTOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO PAINÉL ELÉTRICO

2.1. Dimensionamento dos Condutores

De acordo com o manual do painel fotovoltaico a tensão de saída no ponto de máxima potência é de 33,7 V e a corrente de saída neste mesmo ponto é de 3,87 A. Com isso a potência máxima de saída será de $33,7 \text{ V} \times 3,87 \text{ A} = 130,4 \text{ W}$.

Para a especificação da bitola do cabo foi utilizada a norma ABNT 5410:2004. O cabo é de cobre e estará fixado na parede sem exposição ao Sol. Para esses casos, a norma recomenda o método A1 condutores isolados em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolantada, conforme Tabela 4 abaixo.

A bitola calculada foi de $0,5 \text{ mm}^2$, porém, será utilizada de $2,5 \text{ mm}^2$ pois comercialmente essa é a bitola mínima para cabos solares.

2.2 Dimensionamento do Eletroduto dos Painéis Fotovoltaicos até o Painel Elétrico

Para o cálculo do eletroduto, as dimensões do eletroduto e suas conexões devem permitir que, após montagem da linha, os condutores possam ser instalados e retirados com facilidade. Portanto a área máxima a ser utilizada pelos condutores, incluindo o isolamento, deve ser de 40% no caso de 3 ou mais condutores.

Como a área do eletroduto é dada pela Equação 1:

$$A_{\text{eletroduto}} = \frac{\pi(D_i)^2}{4} \quad (1)$$

Em que:

$A_{\text{eletroduto}}$ = área do eletroduto

$\pi = 3,14$

D_i = diâmetro interno do eletroduto, considerando que:

$\sum A_{\text{cond}}$ = soma das áreas internas dos condutores a serem instalados

Então a Equação 2 fica da seguinte maneira:

$$40\% = \frac{\sum A_{\text{cond}}}{\frac{\pi(D_i)^2}{4}} \quad (2)$$

Para encontrar o diâmetro interno, teremos a Equação 3:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \times \sum A_{\text{cond}}}{0,40 \times \pi}} \quad (3)$$

São 7 cabos dos termopares de 1,5mm² com sua área externa de 7,1mm² e 14 cabos monopares com condutores isolados com PVC 70°C de 2,5mm², com sua área externa de 10,7mm², conforme Tabela 5.

Tabela 1 – Dimensões totais de condutores isolados.

Seção nominal (mm ²)	Diâmetro externo*	Área total* (mm ²)
1,5	2,8/3,0	6,2/7,1
2,5	3,4/3,7	9,1/10,7
4	3,9/4,2	11,9/13,8
6	4,4/4,8	15,2/18,1
10	5,6/5,9	24,6/27,3
16	6,5/6,9	33,2/37,4
25	8,5	56,7
35	9,5	71
50	11	95
70	13	133
95	15	177
120	16,5	214
150	18	254
185	20	314

Fonte: Instalações Elétricas, Julio Niskier (4ª edição).

Substituindo os valores:

$$\sum A_{\text{cond}} = 7 \times 7,1\text{mm}^2 + 14 \times 10,7\text{mm}^2 = 199,5\text{mm}^2$$

$$D_i = \sqrt{\frac{4 \times \sum A_{\text{cond}}}{0,40\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 199,5}{0,40\pi}} = 25,20 \text{ mm}$$

Utilizando a Tabela 6 na página seguinte, para um diâmetro nominal de 25mm a referência de rosca é de 3/4". Como o valor encontrado no cálculo ultrapassa os 25mm da tabela, optou-se pelo diâmetro de 1".

Tabela 2 - Eletroduto rígido de PVC, do tipo rosqueável.

Rígido, Tipo Rosqueável - Classe B					
Referência de Rosca	Diâmetro Nominal	D_i (aprox.)mm	e mm	L mm	S (aprox.) mm²
3/8	16	12,8	1,8	3000	128,7
1/2	20	16,4	2,2	3000	211,2
3/4	25	21,3	2,3	3000	356,3
1	32	27,5	2,7	3000	593,9
1 1/4	40	36,1	2,9	3000	1023,5
1 1/2	50	41,4	3	3000	1346,1
2	60	52,8	3,1	3000	2189,6
2 1/2	75	67,1	3,8	3000	3536,2
3	85	79,6	4	3000	4976,4
Não previsto pela EB-744					
4	110	103,1	5	3000	8348,5

Fonte: Instalações Elétricas, Hélio Creder (12ª edição).

2.3 Dimensionamento do Eletroduto da Tomada de Alimentação até o CLP

O percurso do eletroduto entre a tomada de alimentação de 127 volts, até o CLP é de 36,70 metros, com 9 curvas de 90°. Utilizando as mesmas tabelas do dimensionamento do eletroduto dos painéis fotovoltaicos até o painel elétrico o cálculo será:

Um circuito monofásico com condutores isolados com PVC 70°C de 2,5mm² com sua área externa de 10,7mm².

Substituindo os valores:

$$\Sigma A_{\text{cond}} = 2 \times 10,7 \text{ mm}^2 = 21,4 \text{ mm}^2$$

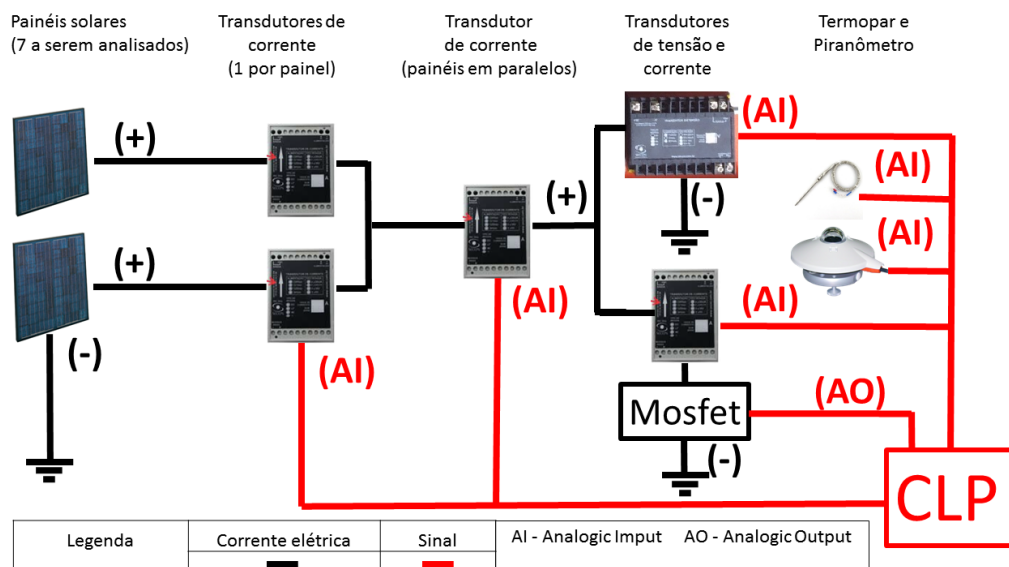
$$Di = \sqrt{\frac{4 \times \Sigma A_{\text{cond}}}{0,40\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 21,4}{0,40\pi}} = 8,25 \text{ mm}$$

Para um diâmetro nominal de 8,25 mm a referência de rosca é de 3/8". Como não deve haver trechos contínuos (sem interposição de caixas de derivação ou aparelhos) retilíneos de tubulação maiores do que 15 metros, é adicionada condutores. Atendendo a Norma em que para cada curva de 90° do eletroduto é reduzida 3 metros desses 15 metros, então, foi calculada a necessidade de 4 condutores.

2.4 Dimensionamento da Calha do Painel Elétrico

Primeiramente é necessário entender como é composto o sistema fotovoltaico interligado no quadro elétrico para o estudo. Na Figura 9 é mostrado o esquema de ligação do painel elétrico.

Figura 1 - Diagrama da ligação do painel elétrico.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

O sistema é composto pelos painéis fotovoltaicos, transdutores de corrente, transdutor de tensão e pelo CLP.

O transdutor é um dispositivo que converte uma grandeza física em outra. Por exemplo, o transdutor de corrente transforma a corrente elétrica gerada pelos painéis em pequenos sinais elétricos.

2.5 Cálculo das Calhas

Para as calhas foi feito o seguinte cálculo de acordo com a equação 4:

$$S_c = \frac{N\pi(D_i)^2}{4} \times \frac{1}{0,35} \quad (4)$$

S_c - seção ocupada pelos condutores [mm²].

N - número de condutores.

D_i – diâmetro externo dos condutores [mm²].

A ocupação máxima é de 35% da área útil da calha, portanto, multiplica-se por $\frac{1}{0,35}$.

N - a calha foi calculada com base no número máximo de cabos que passarão num mesmo lugar, portanto será 14 condutores.

D_i - para cabo 2,5 mm² sua área útil é de 10,7mm²

$$S_c = \frac{7\pi(10,7)^2}{4} \times \frac{1}{0,35} = 1797,49 \text{ mm}^2$$

Comercialmente o tamanho da seção das calhas são conforme a Tabela 7 e como 2500 mm² é a área da seção que ultrapassa o valor calculado usamos uma calha com largura de 50 mm e altura de 50 mm.

Tabela 3 – Dimensionamento de calhas.

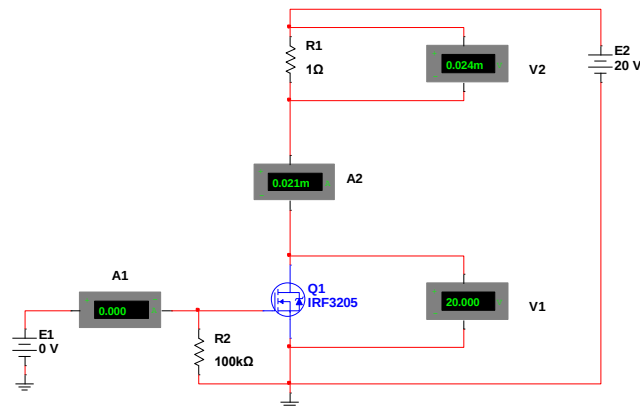
Largura (mm)	Altura (mm)	Área da seção (mm ²)
40	40	1600
50	50	2500
60	60	3600

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

3 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO

O seguinte experimento foi realizado para descobrir a corrente total teórica da saída dos painéis e consequentemente sua potência total dissipada. A simulação, ilustrada na Figura 2, mostra o comportamento de um MOSFET típico. Foi utilizado um IRF 3205 na simulação polarizado com $V_t = 4V$, $V_{gs} = 20V$.

Figura 2 - Simulação do Circuito com o MOSFET IRF3205.



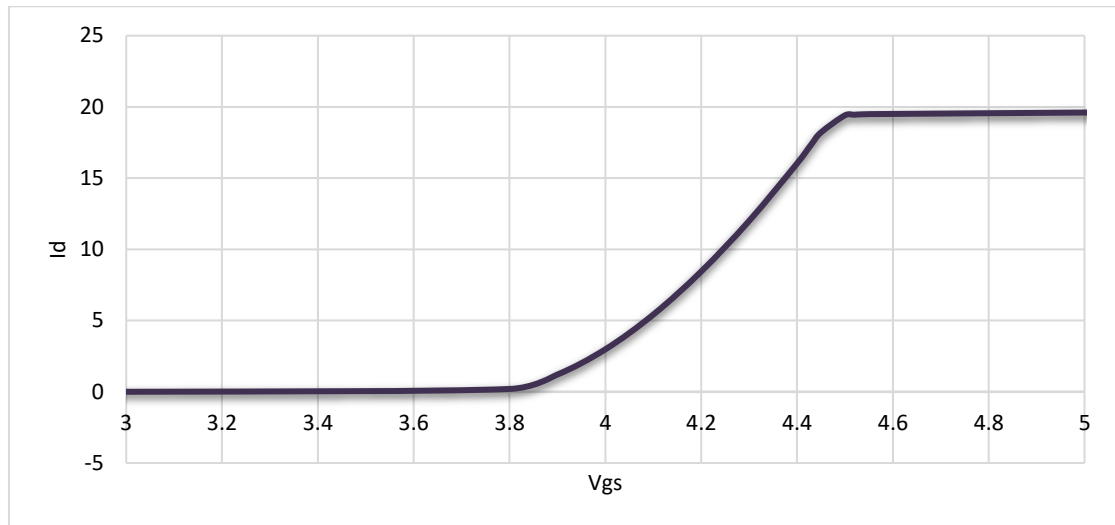
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

A partir dos dados obtidos na simulação foi montada a Tabela 4 e a Figura 3.

Tabela 4 - Variação na entrada de tensão E1 do circuito com MOSFET IRF3205.

E1 (V)	A1 (A)	A2 (A)	V1 (V)	V2 (V)
0	0	0,000021	20	0,000024
2	0,00002	0,000021	20	0,000024
3	0,00002	0,000021	20	0,000024
3,8	0,000038	0,198	19,802	0,198
3,9	0,000039	1,211	18,789	1,211
4	0,00004	2,981	17,089	2,981
4,1	0,000041	5,417	14,583	5,417
4,2	0,000042	8,443	11,557	8,443
4,3	0,000043	11,996	8,004	11,996
4,4	0,000044	16,026	3,974	16,026
4,43	0,000044	17,371	2,679	17,371
4,45	0,000044	18,205	1,794	18,205
4,5	0,000045	19,407	0,593	19,407
4,52	0,000045	19,449	0,551	19,449
4,55	0,000045	19,493	0,507	19,493
6	0,00006	19,791	0,209	19,791
8	0,000079	19,839	0,161	19,839
20	0,195	19,875	0,125	19,875

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Figura 3 - Curva $V_{gs} \times I_d$.

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Observando-se a Tabela 4 e a Figura 3 nota-se que V_t está próximo de 3,8 Volts, e que pode controlar o MOSFET com pequenas correntes (sinais).

3.1 Cálculo da Potência Total Dissipada

O MOSFET IRN3205 tem por potência máxima de dissipação 200 W.

Sabendo que a conexão com os MOSFETs será com os painéis em paralelo, a corrente total teórica de saída dos painéis será de 3,87 A por painel, portanto, para os 7 painéis será de $7 \times 3,87 = 27,09$ A. A tensão teórica por painel será de 33,7 V, e, como estão em paralelo será a mesma. A potência total fornecida pelos painéis será de $27,09 \text{ A} \times 33,7 \text{ V} = 912,933 \text{ W}$.

Serão utilizados três FETs, com respectivos dissipadores, por painel, totalizando 21 conjuntos. Assim, conforme observado na Equação 7, cada FET deverá ser capaz de dissipar 43,5W.

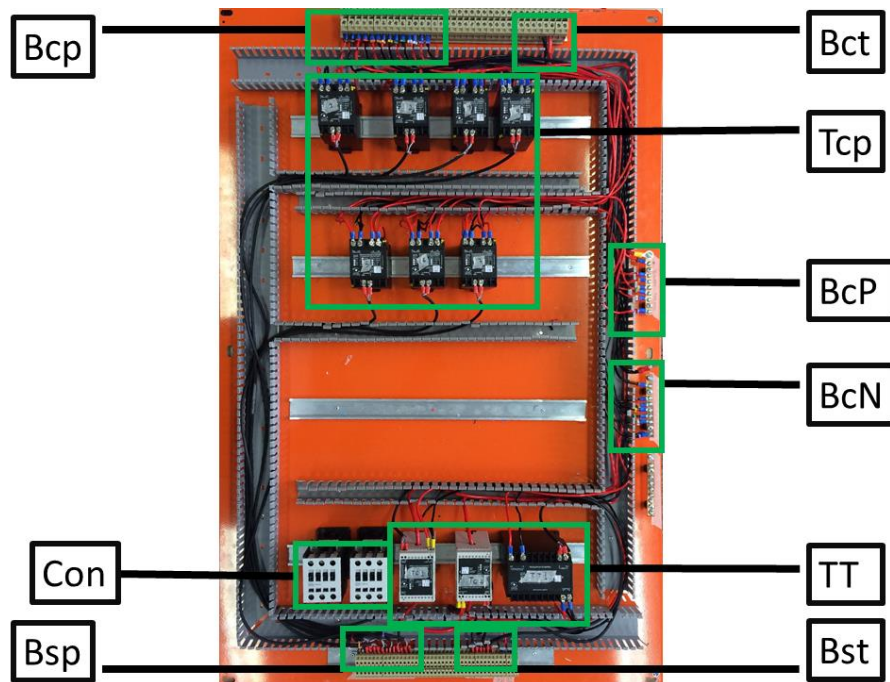
$$\frac{912,933 \text{ W}}{21} = 43,473 \text{ W} \quad (5)$$

Com a passagem da corrente o MOSFET transforma energia elétrica em energia térmica e quanto maior corrente mais calor precisa ser dissipado. O dissipador serve para que o dispositivo atue na região de triodo sem queimar.

4 MONTAGEM DO PAINEL ELÉTRICO E REALIZAÇÃO DOS TESTES

Após a execução da cotação, compra, dimensionamento e simulação do circuito, por fim, foi realizado a montagem do painel. Na Figura 4 apresentam-se as especificações dos componentes do painel elétrico, ficando propício para realização de testes práticos.

Figura 4 - Painel Elétrico inserido no projeto.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Bct- Bornes de correntes, positiva e negativa, totais.

Bcp- Bornes de correntes dos painéis.

BcN- Barramento de corrente negativa.

BcP- Barramento de corrente positiva.

Tcp- Transdutor de corrente por painel.

Bsp- Bornes de sinais dos Tcp.

TT- Transdutores de corrente e tensão para medição do somatório das correntes da tensão em paralelo dos painéis.

Bst- Borne de sinal dos TT.

Con- Contatores.

4.1 Realização dos Testes

Após a montagem do painel foi realizado um teste para avaliar, tanto o funcionamento dos componentes, quanto os cálculos teóricos.

Primeiro foram alimentados os transdutores com uma tensão de 24 Vdc. Após isso, foi colocado uma tensão de 24 Vdc nos bornes destinados à conexão dos painéis fotovoltaicos para simulá-los. A corrente medida pelo multímetro é a que passa diretamente sobre a carga, portanto, varia de 0 a 3,56 A. A corrente medida pelo LabView será aquela que sai dos transdutores e está em uma faixa de 4 mA a 20 mA. No programa LabView analisamos a saída de corrente nos terminais de sinal dos equipamentos e os valores medidos estão nas Tabelas 5, 7, e 8.

Tabela 5 - Testes realizados com circuito aberto.

	Lab View (mA)	Multímetro (mA)
TC Painel 1	4,0	0
TC Painel 2	4,0	0
TC Painel 3	4,0	0
TC Painel 4	4,0	0
TC Painel 5	4,0	0
TC Painel 6	4,0	0
TC Painel 7	4,0	0
TC Total 1	4,1	0
TC Total 2	4,1	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Para análise experimental utilizamos os valores abaixo:

Tensão na potência máxima fornecida pelos painéis: 33,7 V

Corrente na potência máxima fornecida pelos painéis: 3,56 A

Corrente máxima suportada pelos transdutores dos painéis: 5 A

Corrente máxima suportada pelos transdutores do somatório de corrente dos painéis: 35 A

Faixa de corrente dos sinais dos transdutores: 4 mA - 20 mA

Após algumas manipulações matemáticas, foram obtidas as Equações 6, 7 e

8.

a = Corrente na potência máxima fornecida pelos painéis

b = Corrente máxima suportada pelos transdutores dos painéis

c = Corrente de saída do transdutor

d = Faixa de corrente dos sinais dos transdutores

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d} \quad (6)$$

Ou seja, para os transdutores dos painéis:

$$\frac{a}{5} = \frac{c - 4}{20 - 4} \quad (7)$$

Para os transdutores do somatório de corrente dos painéis:

$$\frac{a}{35} = \frac{c - 4}{20 - 4} \quad (8)$$

Para determinar as resistências de testes foram consideradas as correntes de 3,56 A, $\frac{3,56}{2} = 1,78$ A e próximo à 0 A. Na Tabela 6 mostra a relação entre a tensão e a corrente para o cálculo das cargas.

Tabela 6 – Valores aplicados nos testes.

Tensão	24	24
Corrente	3,6	0,02
Carga teórica	6,5	1200

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

4.1.1 Aplicando uma carga de 1,2k Ω .

Realizando a lei de Ohm para a descoberta da corrente teórica temos:

$$V = R \times I \quad (9)$$

$$24 \text{ V} = (1,2\text{k}\Omega) \times I$$

$$I = 20 \text{ mA}$$

Aplicando nas Equações 7 e 8, encontramos os seguintes resultados:

$$\frac{0,02}{5} = \frac{c - 4}{20 - 4}$$

A corrente teórica para os transdutores dos painéis de saída representa $c = 4,064 \text{ mA}$

$$\frac{0,02}{35} = \frac{c - 4}{20 - 4}$$

Logo, a corrente teórica para os transdutores do somatório de corrente dos painéis de saída representa $c = 4,009 \text{ mA}$.

Por seguinte, foram feitos testes aplicando a carga de 1200Ω e os resultados encontram-se na Tabela 7:

Tabela 7 - Testes realizados com carga de 1200Ω .

	Lab View (mA)	Multímetro (mA)
TC Pannel 1	4,02	20
TC Pannel 2	4,00	20
TC Pannel 3	4,08	20
TC Pannel 4	4,03	20
TC Pannel 5	4,04	20
TC Pannel 6	4,00	20
TC Pannel 7	4,07	20
TC Total 1	4,13	20
TC Total 2	4,13	20

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

4.1.2 Aplicando uma carga de $6,5 \Omega$

Aplicando a equação 9 para a descoberta da corrente teórica temos:

$$V = (6,5 \, \Omega) \times I$$

$$I = 3,69 \, A$$

Novamente, aplicando as Equações 7 e 8, ficamos com:

$$\frac{3,69}{5} = \frac{c - 4}{20 - 4}$$

A corrente teórica para os transdutores dos painéis de saída representa $c = 15,808 \, mA$.

$$\frac{3,69}{35} = \frac{c - 4}{20 - 4}$$

Logo, a corrente teórica para os transdutores do somatório de corrente dos painéis de saída representa $c = 5,686 \, mA$.

Foram feitos testes aplicando a carga de $6,5 \, \Omega$ e os resultados encontram-se na Tabela 8:

Tabela 8 - Testes realizados com carga de $6,5 \, \Omega$.

	Lab View (mA)	Multímetro (mA)
TC Painei 1	15,6	3,53
TC Painei 2	15,7	3,52
TC Painei 3	15,2	3,53
TC Painei 4	15,3	3,53
TC Painei 5	15,6	3,52
TC Painei 6	15,6	3,52
TC Painei 7	15,8	3,53
TC Total 1	5,70	3,53
TC Total 2	5,82	3,52

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

5 CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho foi projetar um painel elétrico, montar e testar os dispositivos eletrônicos para verificar se estão funcionando corretamente. Com base na NBR 5410:2004 foram dimensionados os materiais necessários para montagem do painel.

Ao realizar a cotação foi verificado que os valores calculados diferem de valores comerciais, portanto foram orçados os materiais sempre respeitando a respectiva norma.

Após montagem do painel foram realizados testes para analisar se os equipamentos estão atendendo os valores de temperatura e aos limites de operação de corrente. Os testes mostraram que a temperatura dos cabos e ligações atende a norma citada anteriormente. Quanto aos transdutores os testes se mostraram satisfatórios já que as faixas de limites dos sinais de saída foram obtidas conforme indica o manual do fabricante. Com isso concluímos que a montagem do painel foi feita de modo correto e atende as expectativas quanto ao seu objetivo.

6 REFERÊNCIAS

MAMEDE, J. Manual dos Equipamentos Elétricos, 4ª edição, 2011.

CREDER, H. Instalações Elétricas, 15ª edição, 2007.

ABNT. Norma Brasileira ABNT NBR 5410 Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Brasília: ABNT, 2004.

BOYLESTAD, R. L. Análise de Circuitos. Pearson, 12ª edição, 2011.

MAMMANO, B. Current Sensing Solutions for Power Supply Designers, 1997.

MACÊDO, W. N. Análise do fator de dimensionamento do inversor (FDI) aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR). Tese de Doutorado, PIPGE/USP. São Paulo, 2006.

DIAS, J. B. Instalação fotovoltaica conectada à rede: Estudo experimental para otimização do fator de dimensionamento. Tese de Doutorado, PROMEC/UFRGS. Porto Alegre, 2006.

CRESESB. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, 2014.
Disponível em: <www.cresesb.cepel.br/publicacoes/index.php?task=livro&cid=481>
Acesso em Jan. 2017.