



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

RUAN CARLOS MARQUES GOMES

**PROJETO, MONTAGEM E DEFINIÇÃO DE
PROCEDIMENTOS DE USO DE UMA BANCADA
PARA TESTE DE INVERSORES MONOFÁSICOS
CONECTADOS EM SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2016

RUAN CARLOS MARQUES GOMES

**PROJETO, MONTAGEM E DEFINIÇÃO DE
PROCEDIMENTOS DE USO DE UMA BANCADA
PARA TESTE DE INVERSORES MONOFÁSICOS
CONECTADOS EM SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração : Processamento de Energia

Orientador: Prof. Dr. Montiê Alves Vitorino

Campina Grande, Paraíba

Outubro de 2016

RUAN CARLOS MARQUES GOMES

**PROJETO, MONTAGEM E DEFINIÇÃO DE
PROCEDIMENTOS DE USO DE UMA BANCADA
PARA TESTE DE INVERSORES MONOFÁSICOS
CONECTADOS EM SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração : Processamento de Energia

Aprovado em: / /

Professor Avaliador
Avaliador

Prof. Dr. Montiê Alves Vitorino
Orientador, UFCG

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2016

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por está comigo em todos os momentos desta minha longa jornada, sempre me dando forças nas horas em que pensei em desistir. Pelo dom da vida e por todas as oportunidades que Ele me deu.

Agradeço também à minha mãe, Maria do Socorro Marques por ter se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, por ter me alimentado com saúde, força e coragem, as quais que foram essenciais para superação de todas as adversidades ao longo desta caminhada.

Agradeço também a toda minha família, que com todo carinho e apoio, não mediu esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida. A todos os meus amigos que me acompanharam durante essa jornada de cinco anos Rodrigo Lacerda, Filipe Vieira, José Fábio Brillhante e Carlos Anacleto, sempre me dando apoio e força. Aos amigos que nos encontramos no decorrer da trajetória Mateus Lucena, Luciano Alves, Raoni Pegado, Zózimo Pereira, Vinícius Siqueira, Igor Ulisses e Lucas Vinícios.

Agradecimentos especiais ao Professor Montiê Alves Vitorino, e ao Professor Maurício B. R. Correa, por terem me dado a oportunidade de estágio no LEAIM/UFCG.

*“Nada poderá me abalar,
nada poderá me derrotar,
pois minha força e vitória
tem um nome. É Jesus.”
(Eliana Ribeiro).*

RESUMO

O presente relatório de estágio é referente ao cumprimento do estágio supervisionado obrigatório ao estagiário Ruan Carlos Marque Gomes, onde cumpriu a carga horária exigida no Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamentos de Máquinas (LEIAM) na Universidade Federal de Campina Grande, sob orientação do Prof. Dr. Montiê Alves Vitorino, e supervisão do Prof. Dr. Maurício B. R. Correa.

O estágio realizado foi de continuação a um anterior, com o intuito de se realizar adição de conteúdos técnicos, bem como de realizar a qualificação do presente estagiário para conhecimento dos temas envolvidos.

O projeto da bancada para teste de inversores, que é o objetivo final da realização do estágio, teve algumas atividades desenvolvidas pelo estagiário, sendo estas: construção do modelo 3D do *layout* da estrutura da bancada, que se encontrava no LEIAM; seleção de relés compatíveis ao objetivo de uso específico imposto pelas características de uso da bancada; projeto de uma placa de circuito impresso para o acoplamento e comando dos relés; projeto do painel de comunicação e ligações entre os emuladores e o inversor; alocação dos pontos de medições das grandezas de interesse; uma reapresentação dos diagramas funcionais da estrutura proposta, assim como de uma lista de materiais que serão utilizados; apresentação de cenários de ensaios para validação de um inversor.

Palavras-chave: bancada, emuladores, inversor.

ABSTRACT

This internship report concerns about the compulsory supervised internship of the student Ruan Carlos Marque Gomes, where it was attained the workload demanded by the Engine Drive and Industrial Electronic Laboratory (LEIAM) at the Federal University of Campina Grande, under the orientation of the Prof. Dr. Montiê Alves Vitorino and supervision of Prof. Dr. Maurício B. R. Correa.

The Internship was a continuation of a former one in order to make an addition of the technical subject, as well as to do the qualification of the internship student for the knowledge of the theme studied.

The project of the stand for inverter tests, which is the final aim of the , have had some activities developed by the students, they are: building of a 3D model of the structure of the stand which was in the laboratory LEIAM, selection of compatible relays to the specific usage imposed by the stand characteristics of working, design of a board in order to fulfil the coupling and the relays command, design of communication panel and paths between emulators and inverters, placement of measurement points of the interested parameters, list of the material which will be applied, presentation rehearsal scenario for inverter validation.

Keywords: stand, emulators, inverters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura básica de uma célula de silício.	16
Figura 2 – Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica.	17
Figura 3 – Curva de $I \times V$ e de $P \times V$ de uma célula fotovoltaica.	18
Figura 4 – Associação em série de células fotovoltaicas e curva $I \times V$	20
Figura 5 – Associação em paralelo de células fotovoltaicas e curva $I \times V$	21
Figura 6 – Curva $I \times V$ de uma associação em série paralelo de células fotovoltaicas.	21
Figura 7 – Curvas $I \times V$ para um sistema fotovoltaico dada uma variação de irradiância à temperatura constante.	23
Figura 8 – Curvas $I \times V$ para um sistema fotovoltaico dada uma variação de temperatura à irradiância constante.	24
Figura 9 – Estrutura básica de um SFCR.	25
Figura 10 – NI cDAQ 9184, a esquerda, e NI 9234, a direita.	28
Figura 11 – Ponta de prova diferencial de alta tensão, à direita, e ponta de prova de corrente, à esquerda.	28
Figura 12 – Analisador de alimentação CA Agilent 6813B.	29
Figura 13 – Emulador de painel solar Agilent EA380A.	30
Figura 14 – Emulador de carga eletrônica California Instruments 3091LD.	31
Figura 15 – Estrutura interna da bancada, vista frontal.	32
Figura 16 – Estrutura interna da bancada, vista lateral esquerda.	32
Figura 17 – Estrutura interna da bancada, partes de montagem.	33
Figura 18 – Estrutura externa da bancada, vista frontal.	33
Figura 19 – Estrutura externa da bancada, vista lateral esquerda.	33
Figura 20 – Estrutura externa da bancada, partes de montagem	34
Figura 21 – Relé 66.22 da <i>finder</i>	35
Figura 22 – Contatos e distâncias dos terminais do relé 66.22 da <i>finder</i>	35
Figura 23 – Circuito para acionamento dos relés.	36
Figura 24 – PCI, escala 2:5 : a) vista <i>bottom</i> ; b) lugares dos componentes.	37
Figura 25 – PCI, visualização em 3D : a) vista superior; b) vista perspectiva superior-frontal.	37
Figura 26 – Placa de montagem do painel com os componentes inseridos.	40
Figura 27 – Visualização da estrutura externa do painel : a) vista lateral esquerda; b) vista inferior; c) vista lateral direita; d) vista superior.	41
Figura 28 – Pontos dos locais de medições.	42
Figura 29 – Pontos de conexões dos emuladores.	42
Figura 30 – Vista frontal canto superior direito da bancada finalizada.	43

Figura 31 – Vista posterior canto superior esquerdo da bancada finalizada.	43
Figura 32 – Diagrama funcional, folha 1.	45
Figura 33 – Diagrama funcional, folha 2.	46
Figura 34 – Diagrama funcional, folha 3.	47
Figura 35 – Diagrama funcional, folha 4.	48
Figura 36 – Diagrama funcional, folha 5.	49
Figura 37 – Layout, folha 1.	50
Figura 38 – Layout, folha 2.	51
Figura 39 – Layout, folha 3.	52
Figura 40 – Layout, folha 4.	53
Figura 41 – Lista de materias, folha 1.	54
Figura 42 – Lista de materias, folha 2.	55
Figura 43 – Lista de materias, folha 3.	56
Figura 44 – Diagrama de ligações dos emuladores com o inversor para ensaios. . . .	60
Figura 45 – Curva de FP em função da potência ativa de saída do inversor.	67
Figura 46 – Limites operacionais de injeção/demanda de potência reativa para sistemas com potência nominal superior a 6 kW.	69
Figura 47 – Representação gráfica do tempo de desconexão.	72
Figura 48 – Representação gráfica do tempo de resposta à condições anormais de frequência.	75
Figura 49 – Representação gráfica do controle da potência ativa em sobrefrequência. .	77
Figura 50 – Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede (<i>fault ride through-FRT</i>).	87
Figura 51 – Falta trifásica simétrica (5%).	88
Figura 52 – Falta trifásica simétrica (45%).	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC/CC	Corrente Contínua/Corrente Contínua
CC/CA	Corrente Contínua/Corrente Alternada
LEIAM	Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas
PV	<i>Photovoltaics</i>
PCI	Placa de Circuito Impresso
<i>STC</i>	<i>Standard Test Conditions</i> (Condições Padrão de Ensaio)
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
SPMP	Seguimento do Ponto de Máxima Potência
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.2	Local de Estágio	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Sistemas Fotovoltaicos	16
2.1.1	Modelo Matemático das Células Fotovoltaicas	17
2.1.2	Associações de Células Fotovoltaicas	18
2.1.2.1	Em série	19
2.1.2.2	Em paralelo	20
2.1.2.3	Em série-paralelo	21
2.1.3	Características Elétricas dos Sistemas Fotovoltaicos Quanto a Parâmetros Externos	21
2.1.3.1	Influência da irradiância solar	22
2.1.3.2	Influência da temperatura	22
2.2	Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede	24
2.3	Seleção dos Emuladores e da Carga Eletrônica	27
2.3.1	Sistema de aquisição de dados e instrumentos de leitura	27
2.3.2	Emulador de rede elétrica	29
2.3.3	Emulador de gerador fotovoltaico	30
2.3.4	Emulador de carga eletrônica	30
3	ATIVIDADES DESENVOLVIDAS	32
3.1	Desenho do Layout da Bancada	32
3.2	Projeto do Driver de Acionamento dos Relés	34
3.2.1	Relés Selecionados	34
3.2.2	Circuito para acionamento	35
3.2.3	PCI projetada	37
3.3	Projeto do Painel	38
3.4	Locais de Medições das Grandezas de Interesse e Conexões	41
3.5	Estrutura Geral da Bancada	42
3.6	Diagramas Funcionais e Detalhes Técnicos	44
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
	REFERÊNCIAS	58

	ANEXO A – PROCEDIMENTOS DE USO - REALIZAÇÃO DE ENSAIOS	60
A.1	Injeção de componente CC	61
A.2	Harmônicos e distorção de forma de onda	63
A.3	Fator de potência	65
A.3.1	Fator de potência fixo	65
A.3.2	Fator de potência com curva do FP	66
A.4	Injeção/demanda de potência reativa	69
A.5	Condições anormais de tensão	71
A.6	Condições anormais de frequência	74
A.7	Controle da potência ativa em sobrefrequência	76
A.8	Religamento automático fora de fase	79
A.9	Modulação de potência ativa	81
A.10	Modulação de potência reativa	83
A.11	Desconexão do sistema fotovoltaico da rede	85
A.12	Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede (<i>fault ride through-FRT</i>)	87
A.13	Proteção contra inversão de polaridade	90
A.14	Sobrecarga do Inversor	91

1 INTRODUÇÃO

A energia solar se caracteriza como inesgotável e é considerada uma alternativa energética muito promissora para enfrentar os desafios da expansão da oferta de energia com menor impacto ambiental.

As aplicações práticas da energia solar podem ser divididas em dois grupos: energia solar fotovoltaica, processo de aproveitamento da energia solar para conversão direta em energia elétrica, utilizando os painéis fotovoltaicos e a energia térmica relacionada basicamente aos sistemas de aquecimento de água.

As vantagens da energia solar ficam evidentes, quando os custos ambientais de extração, geração, transmissão, distribuição e uso final de fontes fósseis de energia são comparadas à geração por fontes renováveis, como elas são classificadas.

O Brasil, por sua localização e extensão territorial, recebe energia solar da ordem de 1013 MWh (mega Watt hora) anuais, o que corresponde a cerca de 50 mil vezes o seu consumo anual de eletricidade. Apesar disso, possui poucos equipamentos de conversão de energia solar em outros tipos de energia.

A geração de energia elétrica usando painéis solares possibilita tanto a criação de grandes unidades de geração próximas aos centros de consumo quanto a instalação de pequenas unidades geradoras, que consomem a própria energia produzida. Este sistema de geração distribuída já foi regulamentado pela resolução da ANEEL 482/2012, em que foram estabelecidas normas para micro e mini geradores, dando assim, um incentivo maior para o uso, pesquisa e desenvolvimento destas fontes energéticas, (PEREIRA, 2016).

O conversor estático de potência ou simplesmente inversor é conhecido na literatura para nomear os equipamentos que fazem o acoplamento entre o gerador fotovoltaico e a rede elétrica. Além da conversão da corrente contínua em corrente alternada, os inversores utilizados nos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCCR) devem efetuar o seguimento do ponto de máxima potência (SPMP) do gerador fotovoltaico, realizar a sincronização com a rede elétrica e apresentar dispositivos de proteção contra eventuais características de anormalidade da rede, (PEREIRA, 2016).

No que diz respeito aos requerimentos técnicos de qualidade, proteção e segurança, as Portarias Inmetro nº 4/2011, nº 357/2014 e nº 17/2016 estabelecem procedimentos de avaliação de conformidade em inversores. As normas ABNT NBR IEC 62116:2012, ABNT NBR 16149:2013 e ABNT NBR 16150:2013 apresentam juntas 17 ensaios para os inversores CC/CA para sistemas fotovoltaicos conectados à rede, nas quais definem os requerimentos mínimos a serem exigidos destes equipamentos, (PEREIRA, 2016).

1.1 Objetivos

O presente trabalho de estágio tem como objetivo o desenvolvimento técnico, posteriormente construtivo, de uma bancada de ensaio de conformidade de inversores monofásicos conectados em sistema fotovoltaico de acordo com as normas ABNT NBR IEC 62116:2012, ABNT NBR 16149:2013 e ABNT NBR 16150:2013. As tarefas realizadas foram:

- Desenho em 3D no AutoCAD da estrutura física da bancada;
- Elaboração de uma PCI para acionamento dos relés;
- Projeto do painel de comunicação e conexão;
- Elaboração dos diagramas funcionais da bancada, assim como de uma listagem de materiais;
- Listagem dos procedimentos para realização dos ensaios.

1.2 Local de Estágio

O estágio obrigatório supervisionado foi realizado no LEIAM, cujo mesmo está localizado no bloco CH da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O LEIAM é um laboratório voltado à pesquisa e desenvolvimento que tem como principais áreas de pesquisa: qualidade de energia, fontes alternativas de energia, acionamento e controle de máquinas elétricas, processamento de energia, entre outras, sendo o laboratório referência em nível de pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Será apresentado uma breve descrição sobre sistemas fotovoltaico, assim como uma apresentação dos componentes presentes na bancada proposta, sendo eles selecionados de acordo com os requisitos feitos pelas normas NBR 16149 NBR 16150 de 2013, todos eles sendo devidamente explicado anteriormente por (PEREIRA, 2016).

2.1 Sistemas Fotovoltaicos

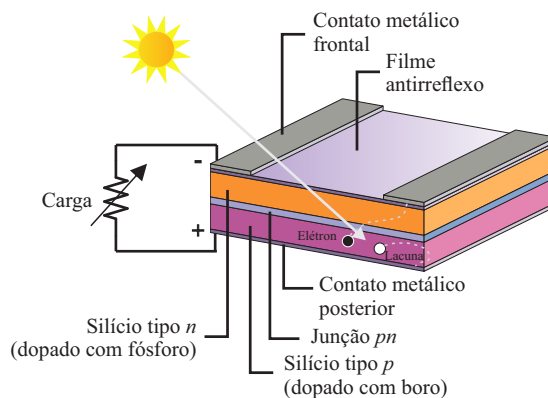
Todo e qualquer sistemas de geração fotovoltaica é constituído em sua estrutura mais básica por células fotovoltaicas, sendo elas associadas em série, em paralelo, ou em série paralelo, como será relatado posteriormente.

Para formar uma célula fotovoltaica são unidos os dois tipos de semicondutores, os semicondutores tipo p e os semicondutores tipo n , porém, o tipo p possuirá uma espessura maior que a do tipo n .

Na região onde ocorre união do tipo n com a do tipo n , chamada de junção- pn , os elétrons livres do semicondutor tipo n migrarão para o semicondutor tipo p para ocuparem esses espaços. Essa migração não ocorre indefinidamente, pois forma-se um campo elétrico, barreira de potencial, na área de junção que impede que os elétrons continuem fluindo.

Ao receberem fótons de luz visível os elétrons são energizados, mas não conseguem fluir da camada n para a camada p , esse comportamento se deve pelo campo elétrico da junção pn . Se ligarmos as duas camadas externamente, por uma carga, podemos aproveitar a corrente elétrica que se forma na passagem dos elétrons de uma camada para outra, onde os elétrons são orientados a fluírem da camada p para a camada n .

Figura 1 – Estrutura básica de uma célula de silício.

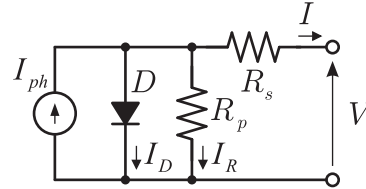


Fonte: Pinho J. T. e Galdino (2014), alterado pelo autor.

2.1.1 Modelo Matemático das Células Fotovoltaicas

O modelo elétrico detalhado de uma célula fotovoltaica pode ser representado como pode ser visualizado pela Fig. 2.

Figura 2 – Modelo elétrico de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Gomes et al. (2015).

A fonte de corrente I_{ph} representa a corrente elétrica gerada pelo feixe de radiação luminosa incidente sobre a superfície ativa da célula, esta corrente unidirecional é constante para uma dada radiação incidente. Como a célula é composta por silício, a célula se comportará como um diodo que é atravessado por uma corrente interna unidirecional I_D , que depende da tensão V nos terminais da célula. Na célula observa-se uma queda de tensão no circuito até os contatos exteriores, a qual é causada por uma resistência que pode ser representada por uma resistência parasita série R_s . Do mesmo modo, também existe corrente de fuga, provocada por uma resistência paralela que pode ser descrita por uma resistência parasita paralelo, R_p .

A corrente I devido a uma carga é dada por:

$$I = I_{ph} - I_D - I_R \quad (2.1)$$

Onde I_{ph} , I_D e I_R , são respectivamente, corrente gerada pela célula, corrente do diodo, corrente que passa pela resistência em paralelo.

Temos que a corrente que passa através do diodo é dada por:

$$I_D = I_0 \left(\exp \left(\frac{V + R_s I}{m V_t} \right) - 1 \right) \quad (2.2)$$

Onde I_0 , V , m , R_s e V_t , são respectivamente, corrente reversa máxima de saturação do diodo, tensão nos terminais da célula, fator de idealidade do diodo, resistência parasita série e potencial térmico, onde k é representado pelo constante de Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), T é a temperatura absoluta da célula em K e q é a carga do elétron ($q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C). A corrente que passa através da resistência paralelo é dada por:

$$I_R = \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (2.3)$$

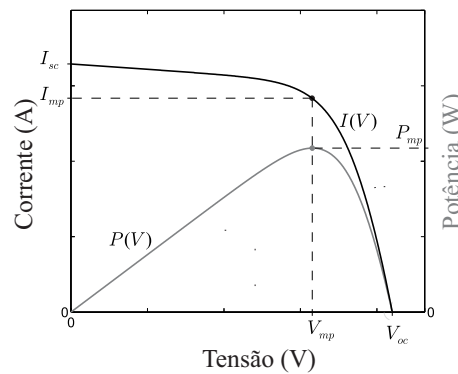
Onde R_s é a resistência parasita série e R_p é a resistência parasita paralelo.

Com todas as equações de corrente apresentadas, podemos substituí-las na equação da corrente sobre a carga. Resultando em:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{mkT} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.4)$$

A equação acima descreve uma equação transcendental, intrínseca em I , que é resolvida através de métodos iterativos. Baseado Eq. (2.4), tem-se a curva característica de uma célula fotovoltaica, a mesma pode ser visualizada pela Fig. 3.

Figura 3 – Curva de $I \times V$ e de $P \times V$ de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Gomes et al. (2015).

Em destaque na Fig. 3, tem-se alguns pontos que caracterizam as células fotovoltaicas, assim como os sistemas fotovoltaicos, são eles:

- I_{sc} - Corrente de curto circuito;
- V_{oc} - Tensão de circuito aberto;
- I_{mp} - Corrente no ponto de máxima potência;
- V_{mp} - Tensão no ponto de máxima potência;
- P_{mp} - Potência no ponto de máxima potência.

2.1.2 Associações de Células Fotovoltaicas

Assim como alguns sistemas de geração elétrica, as células fotovoltaicas podem ser associadas de tal forma a se obter características de tensão, corrente, ou tensão e corrente que se desejam. Nas seções anteriores serão apresentados como se realizam essas associações, assim como seu comportamento quanto à equação característica e curva $I \times V$.

2.1.2.1 Em série

Na conexão em série, o terminal positivo de um dispositivo fotovoltaico é conectado ao terminal negativo do outro dispositivo, e assim por diante. Para dispositivos idênticos e submetidos à mesma irradiância, quando a ligação é em série, as tensões são somadas e a corrente elétrica não é afetada, ou seja:

$$V_s = V_1 + V_2 + \dots + V_{n_s} \quad (2.5)$$

$$I_s = I_1 = I_2 = \dots = I_{n_s} \quad (2.6)$$

Pelo encandeamento em série pode-se afirmar que a tensão verificada entre os terminais das células será dado por:

$$V_s = N_s \cdot V \quad (2.7)$$

, onde N_s é o número de células ligadas em série, V_s é a tensão nos terminais da associação em série, e V é a tensão de uma única célula. Com base nessas afirmações podemos calcular a corrente que passa pela resistência em paralelo será dada por:

$$I_R = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} = \frac{\frac{V_s}{N_s} + I \cdot R_s}{R_p} = \frac{V_s + N_s \cdot I \cdot R_s}{N_s \cdot R_p} \quad (2.8)$$

Na equação do diodo, para N_s células, é possível escrever a tensão do diodo como sendo:

$$V_D = \frac{V + N_s \cdot R_s \cdot I}{N_s} \quad (2.9)$$

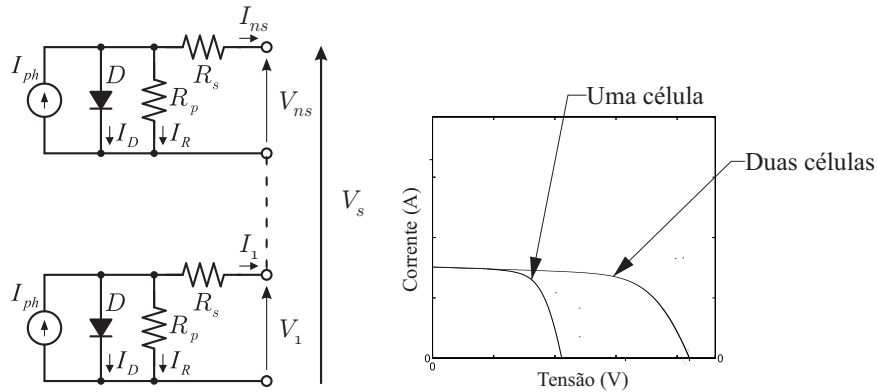
Com o intuito de se realizar uma pequena simplificação nas equações que serão apresentadas, consideremos que $V_t = k \cdot T/q$

O que resulta por fim na equação:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{(V_s + N_s \cdot R_s \cdot I)}{N_s \cdot m \cdot V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V_s + N_s \cdot I \cdot R_s}{N_s \cdot R_p} \quad (2.10)$$

A visualização de como se dá a associação em série das células assim como da curva de $I \times V$ resultante, é feita pela Fig. 4, onde pode ser verificado as considerações realizadas quanto ao comportamento da tensão e da corrente para as N_s células associadas.

Figura 4 – Associação em série de células fotovoltaicas e curva $I \times V$.



Fonte: elaborado pelo autor.

2.1.2.2 Em paralelo

Agora para a associação de N_p células ligadas em paralelo, temos que a tensão em seus terminais é equivalente a tensão de apenas uma única célula, porém, a corrente de saída I será a soma das correntes de cada célula, assim temos:

$$I_p = I_1 + I_2 + \dots + I_{np} \quad (2.11)$$

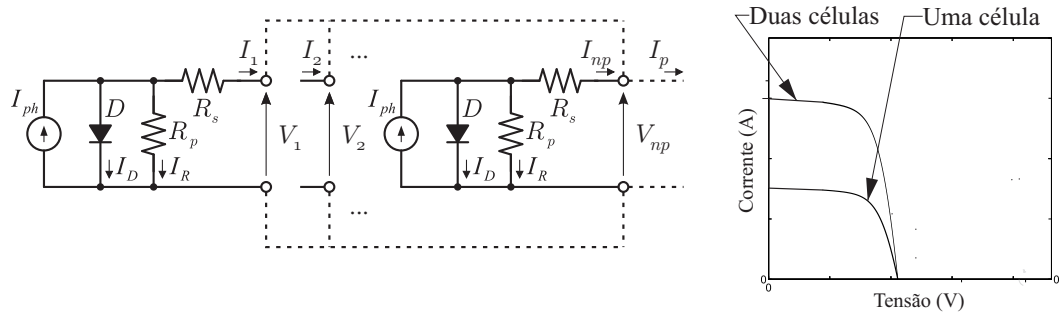
$$V_p = V_1 = V_2 = \dots = V_{np} \quad (2.12)$$

Realizando as considerações agora para a associação em paralelo, o resultado final da nova equação característica é dado por:

$$I_p = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_0 \left(\exp \left(\frac{V + \frac{R_s \cdot I_p}{N_p}}{m \cdot V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + \frac{R_s \cdot I_p}{N_p}}{\frac{R_p}{N_p}} \quad (2.13)$$

A visualização de como se dá a associação em paralelo das células assim como da curva de $I \times V$ resultante, é feita pela Fig. 5, onde pode ser verificado as considerações realizadas quanto ao comportamento da tensão e da corrente para as N_s células associadas.

Figura 5 – Associação em paralelo de células fotovoltaicas e curva $I \times V$.



Fonte: elaborado pelo autor.

2.1.2.3 Em série-paralelo

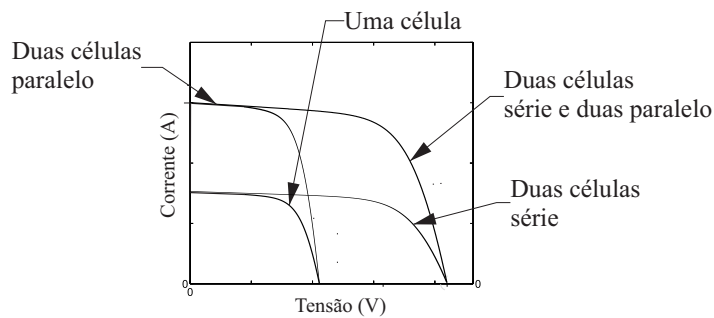
Realizando as considerações, agora ao que desrespeito à tensão em N_s células em série, cujo estão em paralelo com N_p associações de N_s células em série, chegar-se-ia à seguinte equação:

$$I_{sp} = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_0 \left(\exp \left(\frac{V_{sp} + \frac{N_s \cdot R_s \cdot I_{sp}}{N_p}}{m \cdot V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V_{sp} + \frac{N_s \cdot R_s \cdot I_{sp}}{N_p}}{\frac{N_s \cdot R_p}{N_p}} \quad (2.14)$$

, onde I_{sp} é a corrente de saída das células conectadas em série-paralelo, e V_{sp} a tensão.

A visualização de como se dá a curva de $I \times V$ resultante da associação série-paralelo, é feita pela Fig. 6.

Figura 6 – Curva $I \times V$ de uma associação em série paralelo de células fotovoltaicas.



Fonte: elaborado pelo autor.

2.1.3 Características Elétricas dos Sistemas Fotovoltaicos Quanto a Parâmetros Externos

Na seção anterior foi relatado como se dar o comportamento de células fotovoltaicas sendo apresentadas equações. tanto para apenas uma célula, assim como, de associações

de células, e observou-se que ocorre uma variação do comportamento da curva $I \times V$, para as diferentes associações.

O comportamento da saída de um sistema fotovoltaico não depende apenas do número de células conectadas em série ou em paralelo, como também dependerá dos valores de temperatura e de irradiância sobre as mesmas.

Dado essas mudanças no comportamento elétrico de saída serão apresentadas nas seções seguintes o comportamento dos sistemas fotovoltaicos quando apresenta-se tais variações.

2.1.3.1 Influência da irradiância solar

A irradiância solar incidente afeta a curva $I \times V$ de uma célula fotovoltaica de silício, mantida na temperatura de 25 °C, como visualizada pela Fig. 7. A corrente elétrica gerada por uma célula fotovoltaica aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente, enquanto que a tensão de circuito aberto (V_{oc}) aumenta de forma logarítmica, se mantida a mesma temperatura.

A I_{sc} de uma célula pode ser relacionada à irradiância incidente pela Eq. 2.15, (PINHO J. T. E GALDINO, 2014).

$$I_{sc} = I_{sc_{stc}} \times \frac{G}{1000} \quad (2.15)$$

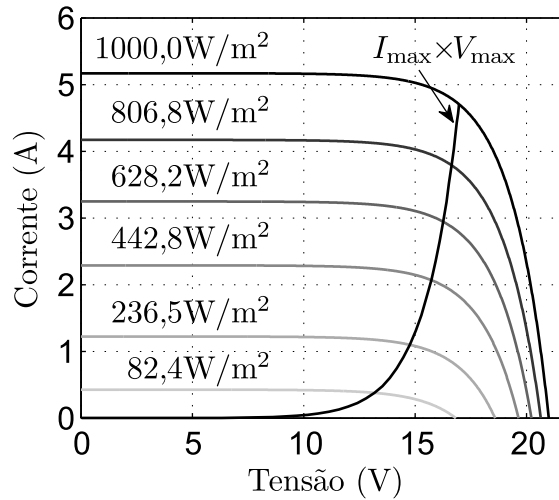
Onde:

- I_{sc} (A) - corrente de curto-circuito do módulo, para a irradiância G e uma temperatura de 25 °C;
- $I_{sc_{stc}}$ (A) - corrente de curto circuito do módulo nas STC ;
- G (W/m²) - irradiância incidente sobre o módulo;
- 1000(W/m²) - irradiância nas STC .

2.1.3.2 Influência da temperatura

A temperatura de operação das células fotovoltaicas é outro fator que influencia o comportamento da curva $I \times V$, analisando agora para uma irradiância constante. Um aumento da temperatura da célula, consequência de um aumento da temperatura ambiente e/ou da irradiância incidente, tende a reduzir sua eficiência, pois, a tensão da célula diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto que sua corrente sofre uma elevação muito pequena.

Figura 7 – Curvas $I \times V$ para um sistema fotovoltaico dada uma variação de irradiância à temperatura constante.



Fonte: elaborado pelo autor.

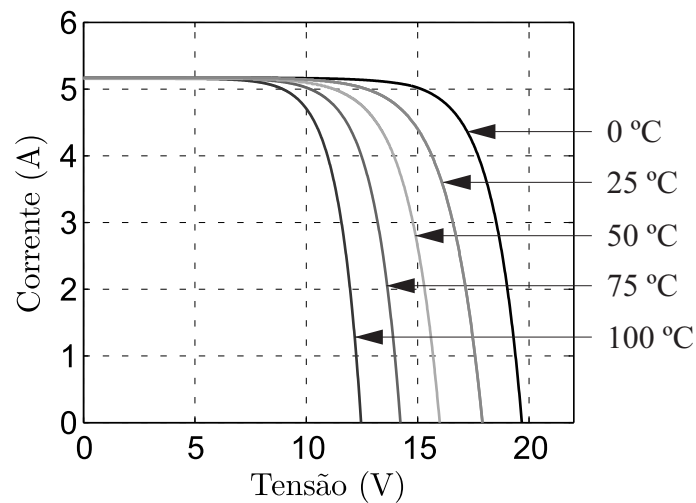
A I_0 de uma célula pode ser relacionada à temperatura incidente pela Eq. 2.16, (GOMES et al., 2015).

$$I_0 = I_{0_{stc}} \cdot \frac{T^3}{T_{stc}} \cdot \exp\left(\frac{\epsilon}{m} \left(\frac{1}{V_{t_{stc}}} - \frac{1}{V_t}\right)\right) \quad (2.16)$$

Onde:

- I_0 (A) - corrente de saturação reversa do diodo, para a temperatura T e uma irradiância de 1000 W/m²;
- $I_{0_{stc}}$ (A) - corrente de saturação reversa do diodo nas STC ;
- T (K) - temperatura de operação do módulo;
- T_{stc} (K) - temperatura nas STC ;
- ϵ (eV) - banda de energia do silício, $\epsilon = 1,12$ eV;
- m - constante de idealidade do diodo;
- $V_{t_{stc}}$ (V) - potencial térmico nas STC ;
- V_t (V) - potencial térmico na temperatura de operação.

Figura 8 – Curvas $I \times V$ para um sistema fotovoltaico dada uma variação de temperatura à irradiância constante.



Fonte: elaborado pelo autor.

2.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

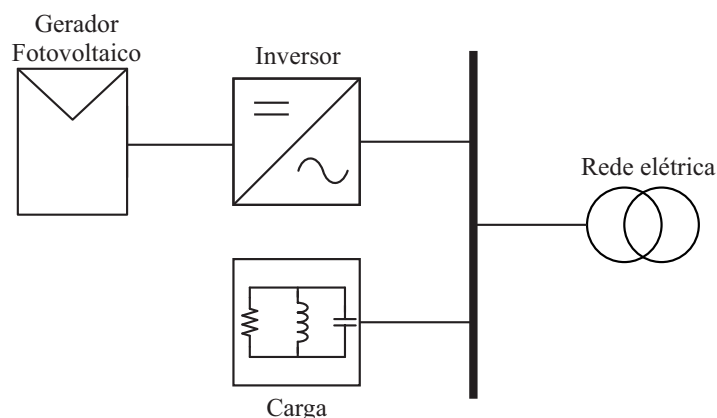
Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede elétrica fornecem eletricidade para o consumidor junto com a rede elétrica tradicional. Toda a eletricidade produzida a partir do Sol pode ser usada para o consumo próprio. Quando existe luz do Sol o consumidor usa a energia elétrica produzida localmente. Nos períodos em que não existe luz solar o consumidor continua sendo abastecido normalmente pela rede elétrica pública. O sistema fotovoltaico conectado à rede não utiliza baterias para armazenamento de energia, pois a própria rede elétrica é utilizada como meio de armazenamento. Toda a energia gerada pelo sistema fotovoltaico é imediatamente injetada na rede elétrica, sendo consumida internamente ou exportada para a concessionária, de acordo com os níveis de geração e consumo instantâneo.

Um SFCR possui uma construção básica que pode ser visualizada na Fig. 9, onde os componentes utilizados são:

- Gerador Fotovoltaico;
- Inversor CC/CA;
- A carga;
- Rede elétrica.

A Fig. 9 mostra apenas uma visualização bastante básica de um SFCR. Várias estruturas com topologias diferentes são apresentadas em NETO (2012), onde basicamente ocorre uma mudança quanto ao sistema de geração fotovoltaica, sendo introduzidas algumas

Figura 9 – Estrutura básica de um SFCR.



Fonte: elaborado pelo autor.

associações, que por decorrente mudará a forma em que se apresenta o estágio de inversão de energia, ou seja, outra forma de se apresentar o inversor da estrutura básica.

Segundo Pinho J. T. e Galdino (2014), as características a serem observadas nas especificações de um inversor fotovoltaico são as seguintes:

- *Forma de onda e Distorção harmônica* - a forma de onda da tensão CA produzida deve ser a senoide pura. A distorção harmônica total (*THD*) deve ser inferior a 5% em qualquer potência nominal de operação;
- *Eficiência na conversão de potência* - Segundo os critérios especificados no RAC para ensaios de equipamentos fotovoltaicos do Inmetro, a eficiência do inversor isolado deverá ser superior a 80% na faixa de operação entre 10% e 50% da potência nominal e igual ou superior a 85% na faixa entre 50% e 100% da potência nominal. Atualmente, tem-se no mercado inversores que apresentam eficiências bastante altas, o que permite especificações de níveis superiores a pelo menos 85 e 90%, respectivamente;
- *Potência nominal de saída* - indica a potência que o inversor pode prover à carga em regime contínuo. Para os SFCRs, a potência do inversor está associada à potência do painel fotovoltaico utilizado;
- *Taxa de utilização* - é o número de horas que o inversor poderá fornecer energia operando com potência nominal;
- *Tensão de entrada* - é a tensão CC do inversor. A tensão de entrada do inversor deve ser especificada tanto maior quanto maior for a potência demandada pelas cargas ao sistema fotovoltaico, a fim de se manter as correntes CC em níveis aceitáveis. Nos inversores para SFCRs, os requisitos relacionados à tensão de entrada do inversor devem ser sempre atendidos pela associação em série/paralelo de módulos;

- *Tensão de saída* - para SFCRs, a regulamentação específica que devem operar em BT para potências de até 100 kW, enquanto que para potências superiores até 1 MW, a injeção deverá ser feita na MT de distribuição (13,8 kV);
- *Regulação de tensão* - indica a variação de amplitude permitida na tensão de saída CA. As variações na tensão de saída devem estar de acordo com os limites estabelecidos pela Aneel-PRODIST e devem considerar a queda de tensão no circuito de distribuição de energia;
- *Frequência da tensão de saída* - indica a frequência da tensão CA de saída do inversor;
- *Fator de potência* - é desejável que a carga tenha um fator de potência elevado, uma vez que isto reduz a corrente necessária para qualquer nível de potência. O inversor deve ter um fator de potência nominal compatível com o fator de potência desejado para as cargas;
- *Consumo de potência sem carga (consumo permanente, autoconsumo, consumo em standby)* - é a quantidade de potência que o inversor utiliza, mesmo quando nenhuma carga está sendo alimentada;
- *Modularidade* - alguns modelos de inversores podem ser conectados em paralelo para operarem diferentes cargas. Algumas vezes é fornecido um chaveamento de carga manual para permitir que o inversor possa atender às cargas críticas em caso de falha. Esta característica aumenta a confiabilidade do sistema.
- *Temperatura e umidade do ambiente* - devem ser citada a temperatura ambiente máxima do local da instalação na qual se requer a potência nominal do inversor, pois a temperatura de operação do mesmo afeta sua eficiência. Deve ser sempre especificada dissipação de calor por convecção natural, e o local de instalação deve possuir ventilação adequada. Além disso, deve também ser citada a umidade relativa do ambiente e solicitada proteção adequada quanto a este quesito.
- *Compatibilidade eletromagnética* - uma vez que efetuam chaveamento em alta frequência, os inversores podem ser elementos geradores de interferência eletromagnética capaz de prejudicar outros equipamentos eletrônicos e, principalmente, de telecomunicações. Os inversores para SFCRs dotados do selo CE mantem (filtragem, blindagem) os níveis de emissões abaixo dos valores máximos estabelecidos pelas normas europeias de EMC.
- *Grau de proteção* - o grau de proteção *IP (Ingress Protection)* a ser especificado varia de acordo com o ambiente onde o inversor será instalado, se abrigado ou não. Normalmente, para ambientes desabrigados se estabelece IP54 ou melhor e para ambientes abrigados IP20 ou melhor.

Com as características anteriormente descritas, é de total interesse que a avaliação dos inversores fotovoltaicos seja feita levando em consideração os fatores de Qualidade de Energia Elétrica, que é a medida de quão bem a energia elétrica pode ser utilizada pelos usuários, cujo está atrelada a uma variedade de fenômenos eletromagnéticos que se destacam entre eles:

- Transitórios;
- Variações de tensão de curta e longa duração;
- Desequilíbrio de sistemas trifásicos;
- Distorções de formas de onda;
- Flutuações de tensão;
- Variações de frequência.

Sendo esse fenômenos explicados detalhadamente em NETO (2012).

2.3 Seleção dos Emuladores e da Carga Eletrônica

Baseado em (PEREIRA, 2016), o mesmo apresenta algumas considerações a serem tomadas com relação aos emuladores que farão parte da bancada para teste de inversores, todas essas considerações foram tomadas respeitando a NBR 16149/2013, e NBR 16150/2013. O mesmo apresenta os equipamentos que serão relatados posteriormente como sendo adequados para realização dos testes para inversores.

2.3.1 Sistema de aquisição de dados e instrumentos de leitura

O CompactDAQ 9184 é uma plataforma portátil de aquisição de dados de alta robustez, com Entrada/Saída modulares que integram conectividade e condicionamento de sinais para proporcionar interfaceamento direto a qualquer sensor ou sinal elétrico. É possível usar o CompactDAQ e o software LabVIEW para customizar a análise dos dados medidos e realizar as medições da forma de onda, tensão, frequência, potência, a distorção harmônica e o tempo de desconexão. Na Fig. 10 à esquerda mostra uma imagem do cDAQ 9184. O NI 9234 apresentado na Fig. 10 à direita é um módulo de aquisição de sinais dinâmicos de quatro canais para fazer medições de alta precisão de sensores Piezoelétrico Eletrônico Integrado - IEPE. Este módulo oferece faixa dinâmica de 102 dB e incorpora condicionamento de sinal. Os quatro canais de entrada possuem uma taxa de amostragem de 51,2 KHz. Este módulo é acoplado com as pontas de prova de corrente e tensão para realizar as medições dos sinais de onda de tensão e corrente na bancada de ensaio.

Figura 10 – NI cDAQ 9184, a esquerda, e NI 9234, a direita.



Fonte: site do fabricante.

As pontas de provas de corrente CA/CC 1146A de 100 kHz/100 A mostrada na Fig. 11 à esquerda possuem as seguintes características:

- Faixa de frequência: 0 a 100 kHz (-3dB de decaimento da corrente);
- Faixa da corrente: 100 mV/A: 100 mA até 10 A pico, 10 mV/A: 1 até 100 A pico;
- Precisão de corrente CA: 100 mV/A (50 mV até 10 A pico) - 3% de leitura = 50 mA
10 mV/A (500 mA até 40 A pico) - 4% de leitura = 50 mA
10 mV/A (40 A até 100 A pico) - 15% máximo a 100 A;
- Tensão operacional: 600 V no máximo;
- Pilha alcalina de 9 V.

Figura 11 – Ponta de prova diferencial de alta tensão, à direita, e ponta de prova de corrente, à esquerda.



Fonte: site do fabricante.

A ponta de prova diferencial de alta tensão N2791A de 25 MHz ilustrada na Fig. 11 à direita apresenta as seguintes características técnicas:

- Largura de banda: 25 MHz;
- Atenuação escolhida pelo usuário: 10:1 ou 100:1;

- Usado para medir tensões diferenciais e de modo comum de até ± 700 V em modo 100:1;
- Funciona com 4 pilhas AA ou cabo USB conectado ao osciloscópio ou PC.

2.3.2 Emulador de rede elétrica

O emulador de rede elétrica utilizado nos ensaios deve satisfazer as condições especificadas que se encontram em (PEREIRA, 2016) e ser capaz de variar a tensão e frequência em degraus, nos quais o valor final deve ser atingido em um período máximo de 16 ms. Além disso, o emulador da rede elétrica deve ser capaz de produzir deslocamento de fase da tensão de 90° e 180° .

O Analisador de Alimentação CA Agilent 6813B ilustrado na Fig. 12 é um equipamento que emula as principais características da rede elétrica. Além disso, este emulador apresenta outras funcionalidades tais como multímetro, osciloscópio, analisador harmônico, gerador de forma de onda arbitrária e analisador de energia. Este equipamento também pode ser utilizado para gerar energia DC ou corrente alternada a partir de um desvio de corrente contínua. Está disponível um segundo analisador de alimentação opcional que pode ser usado de forma independente a partir da fonte ou para medições de nó duplo, tais como teste de eficiência de entrada/saída.

Figura 12 – Analisador de alimentação CA Agilent 6813B.



Fonte: site do fabricante.

As características gerais do equipamento são:

- Características de saída CA:
 - Potência: 1750 VA;
 - $300 V_{\text{rms}}$, 13 A;
 - Pico máximo de corrente: 80 A;
 - Frequência: 1000 Hz.
- Característica de saída CC:
 - Potência: 1350 W;

- 425 V, 10 A;
- Pico máximo de corrente: 80 A;

2.3.3 Emulador de gerador fotovoltaico

O simulador de gerador fotovoltaico, utilizado nos ensaios, deve ser capaz de simular as características de $I \times V$ e tempo de resposta de um gerador fotovoltaico, conforme especificações que se encontram em (PEREIRA, 2016) e não pode suprimir o ripple inserido pelo inversor do lado CC, quando ele utilizá-lo em seu algoritmo de SPMP.

O Emulador de Painel Solar Agilent E4360A ilustrado na Fig. 13 é uma fonte de alimentação CC com duas saídas, que simula a curva $I \times V$ de diferentes painéis sob várias condições ambientais. Esse emulador possui dois módulos com potência de 510 W.

Figura 13 – Emulador de painel solar Agilent EA380A.



Fonte: site do fabricante.

As características gerais do equipamento são:

- Alimentação do Emulador - 110 V/220 V_{CA};
- Potência de saída por módulo - 510 W;
- Potência total de saída (dois módulos) - 510/1020 W.

2.3.4 Emulador de carga eletrônica

O Emulador de Carga Eletrônica da série 3091LD ilustrado na Fig. 14 é projetado para fornecer cargas precisamente controladas, para testar equipamentos de geração de energia como fontes de corrente alternada. Além disso, todos os dispositivos contábeis atuais ativos ou passivos, tais como interruptores, disjuntores, fusíveis, conectores e semicondutores de potência podem ser testados. O usuário pode variar corrente, fator de crista e fator de potência para assegurar que os produtos em teste são avaliados sob piores condições, semelhantes às encontradas em situações reais.

Figura 14 – Emulador de carga eletrônica California Instruments 3091LD.



Fonte: site do fabricante.

A seguir as características desse equipamento:

- Potência de 3kW;
- Corrente de 30 A RMS;
- Tensão de 50 a 350 V;
- Máximo pico de corrente 90 A;
- Máximo pico de tensão 500 V;
- Frequência de 45 a 440 Hz.

3 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

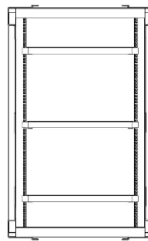
No período da realização do presente estágio, várias atividades, que tratam da montagem da bancada proposta, foram desenvolvidas, entre elas, que serão apresentadas nas seções seguintes, destacam-se: desenho da bancada, e dos componentes nela presentes em modelos 3D; projeto do painel para comunicação e conexão dos emuladores da bancada; projeto de uma PCI para acionamento dos relés de conexão.

3.1 Desenho do Layout da Bancada

Tendo em vista que a estrutura física da bancada de testes já se encontrava em posse do LEIAM, foi-se desenvolvido o desenho em 3D da respectiva bancada, com o intuito de se apresentar o projeto técnico de todas as partes da mesma. A estrutura pode ser separada em duas partes: a estrutura interna, o esqueleto, da bancada, onde serão colocados os emuladores, e a partes onde faz-se a construção da estrutura geral; a estrutura externa, que são as paredes laterais, superior e traseira, a porta, e a base.

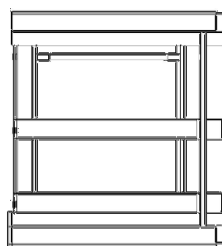
Após medições de todas as partes da bancada elaborou-se os desenhos da mesma, cujo resultado se encontra nas Figs. 15 - 17.

Figura 15 – Estrutura interna da bancada, vista frontal.



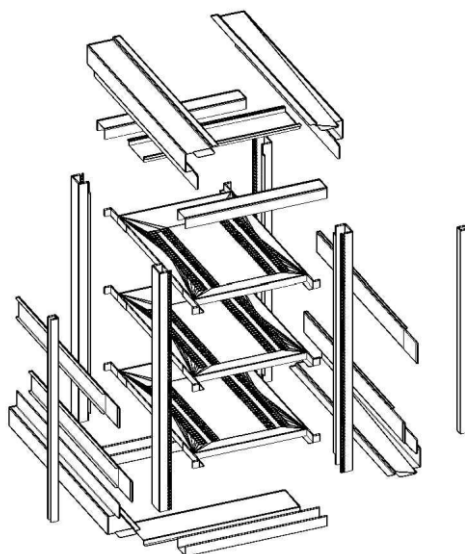
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 16 – Estrutura interna da bancada, vista lateral esquerda.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 17 – Estrutura interna da bancada, partes de montagem.



Fonte: elaborado pelo autor.

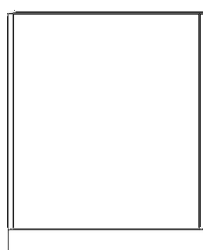
Os desenhos da estrutura externa da bancada são apresentados pelas Figs. 18 - 20.

Figura 18 – Estrutura externa da bancada, vista frontal.



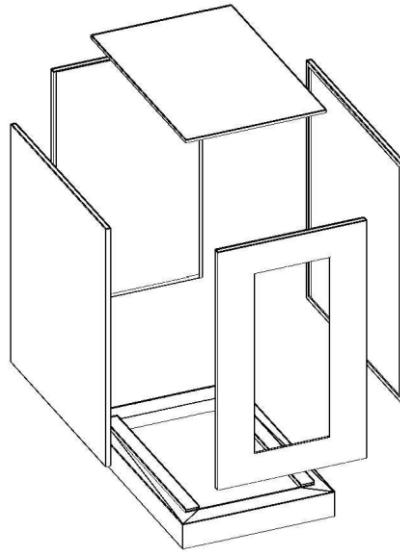
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 19 – Estrutura externa da bancada, vista lateral esquerda.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 20 – Estrutura externa da bancada, partes de montagem .



Fonte: elaborado pelo autor.

3.2 Projeto do Driver de Acionamento dos Relés

Os relés, no projeto da bancada, serão os responsáveis por realizar as conexões das saídas dos emuladores e do inversor de forma automatizada, utilizando as saídas do NI cDAQ, para tal finalidade, daí, ocorre da utilização de um circuito auxiliar, pois a alimentação das bobinas dos relés é de 12 Vdc e a saída das pontas do NI cDAQ são de 5 Vdc.

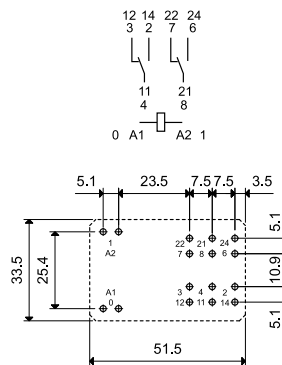
3.2.1 Relés Selecionados

Baseado em Pereira (2016), a corrente máxima de operação da bancada é dada quando o emulador de PV é selecionado para que suas saídas forneçam a potência máxima disponível, cujo mesmo apresenta uma potência de $P = 1020 \text{ W}$, o resultado dos cálculos feitos por Pereira (2016) resultam em uma corrente de 17,76 A fornecida pelo Emulador de PV, essa é corrente relacionada ao lado CC do inversor, ou seja, sua entrada. No lado CA a corrente calculada foi de 10 A, então, dadas as correntes referidas, foi-se realizado uma pesquisa de mercado para selecionar o relé que suportará tais correntes, dentre os disponibilizados no mercado foi-se escolhido o relé 66.22, de fabricação da *fnder*, o mesmo suporta uma corrente nominal de operação de 30 A, sua montagem é feita em PCI, e possui 2 contatos reversíveis ou NA, importante para a ligação dos emuladores. A Fig. 21 faz a ilustração do relé selecionado, e a Fig. 22 faz a especificação técnica quanto aos seus contatos e dimensões.

Segundo a folha de dados do fabricante, a bobina do relé possui uma faixa de operação para a tensão de alimentação cujos valores são: $U_{min} = 9,9 \text{ V}$, $U_N = 12 \text{ V}$,

Figura 21 – Relé 66.22 da *finder*.

Fonte: site do fabricante.

Figura 22 – Contatos e distâncias dos terminais do relé 66.22 da *finder*.

Fonte: site do fabricante.

e $U_{max} = 13,2 \text{ V}$, onde são respectivamente as tensão de alimentação mínima, tensão de alimentação nominal, e tensão de alimentação máxima. A folha de dados fornece também o valor da resistência da bobina que é $R_{bobi} = 85 \Omega$, onde proporciona uma corrente consumida, para operação nominal de $I = 141 \text{ mA}$. Esses valores serão utilizados para dimensionamento dos componentes que serão utilizados no circuito eletrônico para acionamento dos relés.

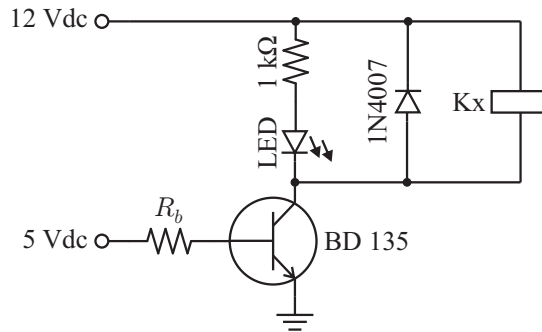
3.2.2 Circuito para acionamento

Como orientado pelo professor orientador, foi-se utilizado o circuito de acionamento que se encontra na Fig. 23. O circuito é alimentado por uma tensão de 12 Vdc, para alimentação dos relés, e tem como entradas as cinco saídas de 5 Vdc do NI cDAQ, cada qual realizando o acionamento de um relé diferente.

O circuito foi projetado com o cálculo do valor do resistor de base, R_b , de tal forma a garantir que o transistor se encontre na região de saturação.

Considerando que o LED, para visualização dos estados dos relés, seja um LED de cor vermelha, cuja tensão que ficará sobre ele é de $V_{LED} \approx 2 \text{ V}$. Substituindo a bobina do relé por sua respectiva resistência equivalente, R_{bobi} . Realizando uma análise circuital

Figura 23 – Circuito para acionamento dos relés.



Fonte: elaborado pelo autor.

entre a tensão de entrada de 5 Vdc base e terra, tem-se a seguinte equação:

$$R_b \cdot i_b + V_{be} = 5 \quad (3.1)$$

, onde V_{be} é a tensão sobre a base e o emissor do transistor, usualmente tem-se que $V_{be} = 0,7 \text{ V}$, daí encontramos a equação:

$$R_b = \frac{5 - 0,7}{i_b} = \frac{4,3}{i_b} \quad (3.2)$$

Agora observado o lado do coletor emissor tem-se que a corrente que passará pelo mesmo é dada por:

$$i_c = \frac{12 - 2 - V_{ce}}{1000} + \frac{12 - V_{ce}}{85} \quad (3.3)$$

, onde V_{ce} é a tensão sobre o coletor e emissor quando do transistor conduzindo. Utilizando $V_{ce} = 0,3 \text{ V}$, tem-se como resultado:

$$i_c = \frac{12 - 2 - 0,3}{1000} + \frac{12 - 0,3}{85} = 0,147 \text{ A} \quad (3.4)$$

Com o valor de i_c calcula-se agora o valor da corrente i_b , considerando um $h_{fe} = 40$, por:

$$i_b = \frac{i_c}{h_{fe}} = 3,675 \text{ mA} \quad (3.5)$$

Por fim, o valor de R_b é dado por:

$$R_b = \frac{4,3}{0,003675} = 1170 \ \Omega \quad (3.6)$$

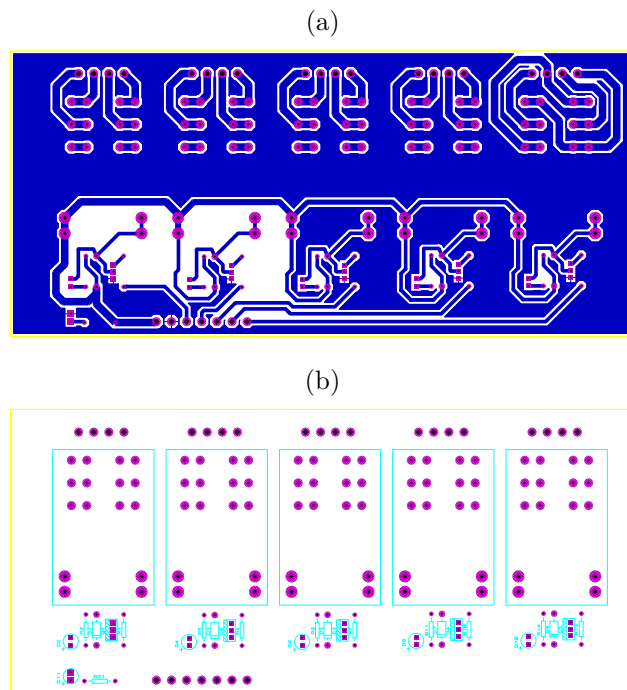
Comercialmente utilizaremos um resistor de $R_b = 1 \text{ k}\Omega$.

3.2.3 PCI projetada

A PCI que se foi projetada possui sete entradas, que correspondem à alimentação de 12 Vdc, o comum da fonte, e as cinco entradas de acionamento para os cinco relés, e vinte saídas, que são os contatos para ligação das saídas dos emuladores e do inversor.

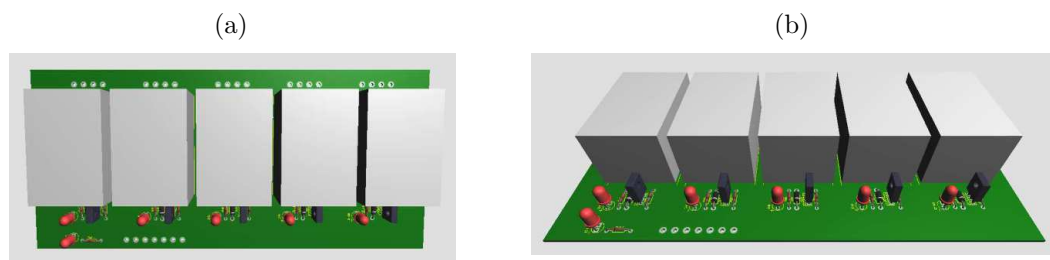
Após realizar a simulação do circuito proposto de acionamento para o cinco relés, foi-se realizado o projeto do esquemático para PCI, do circuito finalizado, o resultado final é apresentado pelas Figs. 24(a)-(b) e 25(a)-(b) , onde pode ser visualizado as vistas *button*, lugares de montagem dos elementos e uma visualização em 3D de como será a PCI após montagem física.

Figura 24 – PCI, escala 2:5 : a) vista *button*; b) lugares dos componentes.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 25 – PCI, visualização em 3D : a) vista superior; b) vista perspectiva superior-frontal.



Fonte: elaborado pelo autor

3.3 Projeto do Painel

O painel de comunicação e alimentação foi projetado para realização das conexões entre os emuladores, alimentação dos emuladores, e comunicação entre o Ni-cDaq e os relés. De uma maneira geral, o painel foi projetado para realizar as conexões apresentadas no diagrama funcional do projeto.

São componentes que se encontram dentro do painel, e suas respectivas funções:

- Disjuntor bipolar - alimentação dos emuladores;
- Disjuntor monopolar - alimentação para fonte de 12 Vdc;
- Fonte de 12 Vdc - alimentar a PCI, driver dos relés
- PCI, driver dos relés - realizar a comunicação das saídas do Ni-cDaq, que é de 5 Vdc, para acionamento do relés, cuja tensão de alimentação é de 12 Vdc;
- Relés - conexão entre as saídas dos emuladores e do inversor;
- Régua de borne de comunicação - bornes para realizar as ligações entre a saída do NI-cDaq e as entradas da PCI;
- Régua de borne de força - bornes para realizar as ligações entre os contatos dos relés e as saídas dos emuladores e do inversor;
- Régua de borne de alimentação - bornes para ligação do painel à rede elétrica, assim como da alimentação do painel aos emuladores.

Observando a quantidade de condutores que se encontrarão dentro do painel, foi escolhido como meio de passagem dos respectivos condutores a canaleta perfurada de 50×50. Após realizar a colocação de todos os componentes do painel e observar suas respectivas dimensões, foi selecionado, dentre os disponíveis no mercado, o quadro de comando Cemar Standard Ref. 9 023 24, com dimensões de 600×800×250 mm, onde o mesmo apresenta espaço suficiente para montagem do painel projetado.

Uma das considerações realizadas quanto a colocação do painel na estrutura da bancada é relacionada ao peso adicional em apenas umas das laterais, daí, foi-se realizado um cálculo do peso estimado do mesmo, as contribuições dos pesos dos componentes se encontram na Tab. .

Devido ao peso considerável adicionado à lateral do painel, é recomendado se realizar uma consulta com o fabricante da estrutura do painel para verificar se o mesmo pode suportar o devido peso sem que o mesmo tenha risco de se inclinar na direção onde se estar adicionando o devido peso.

Tabela 1 – Estimativa de peso do painel.

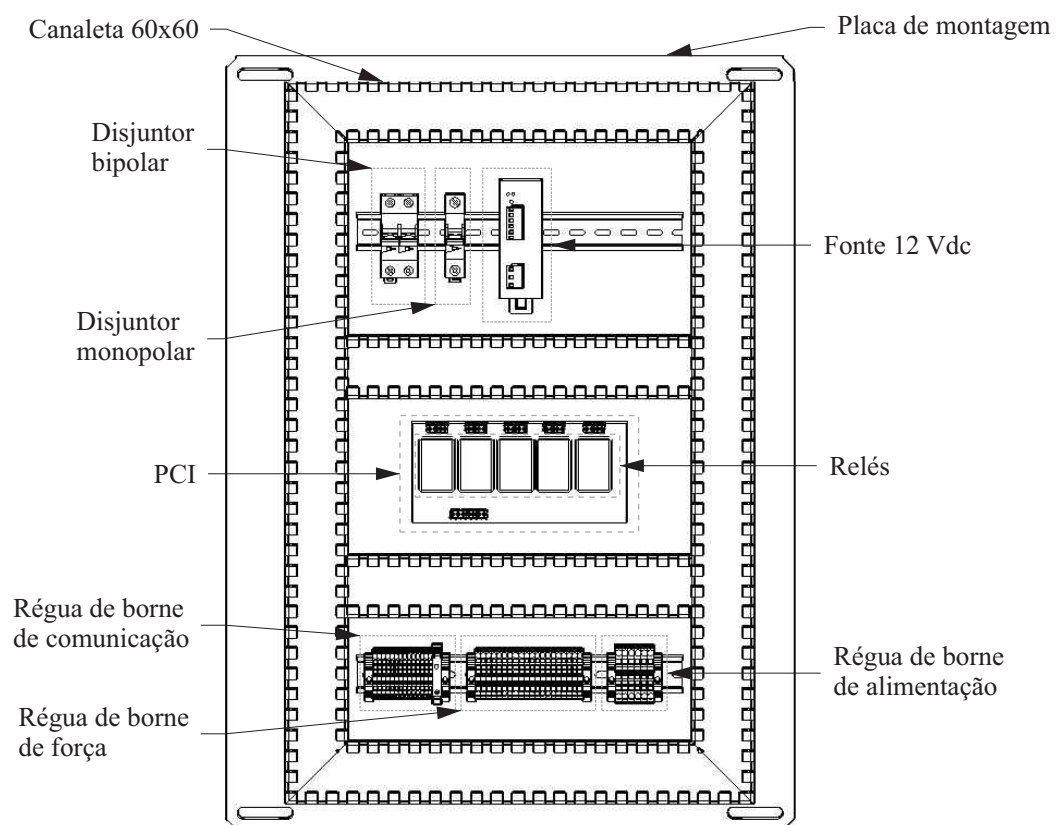
Componente	peso (Kg)
Painel de comando	25,29
Disjuntor bipolar	0,18
Disjuntor monopolar	0,09
Fonte de 12 Vdc	1,00
PCI	0,10
Relés	0,40
Régua de borne de comunicação	0,16
Régua de borne de força	0,21
Régua de borne de alimentação	0,08
Demais componentes	1,50
Total	29,01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma solução que pode ser adotada, caso a bancada não suporte tal peso adicional, é a colocação de um contra peso no lado inferior esquerdo do painel, com o intuito de equilibrar o mesmo. Uma solução adicional, porém não desejada, pois a bancada deve oferecer mobilidade entre locais, é o chumbamento da bancada no piso.

Agora uma visualização dos componentes com suas localizações na placa de montagem do painel é feita pela Fig. 26.

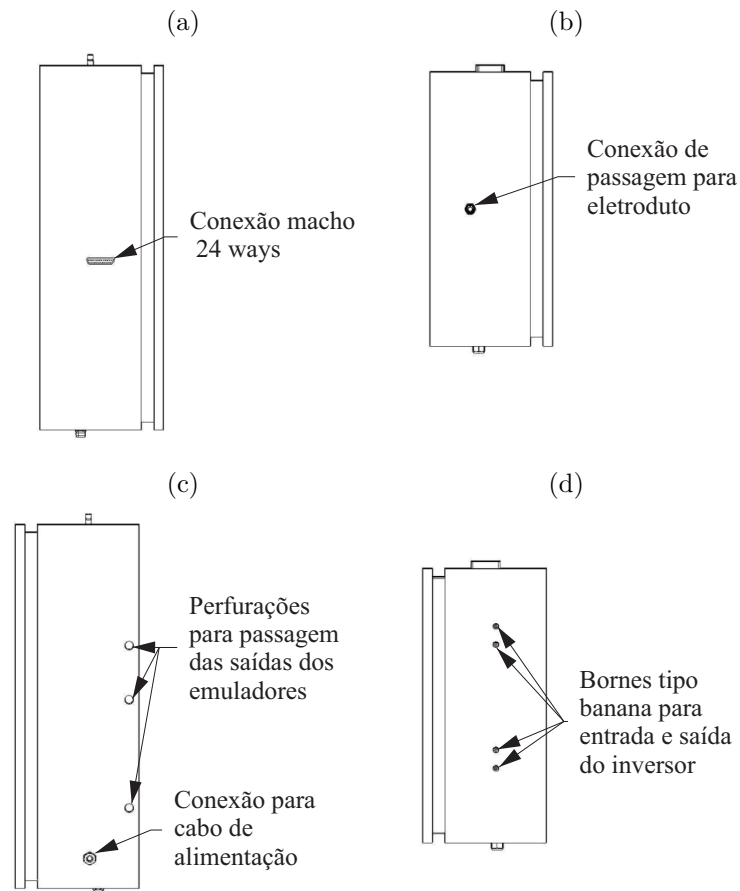
Figura 26 – Placa de montagem do painel com os componentes inseridos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Por fim tem-se o esquema da estrutura externa do mesmo, com suas perfurações, e conexões.

Figura 27 – Visualização da estrutura externa do painel : a) vista lateral esquerda; b) vista inferior; c) vista lateral direita; d) vista superior.



Fonte: elaborado pelo autor

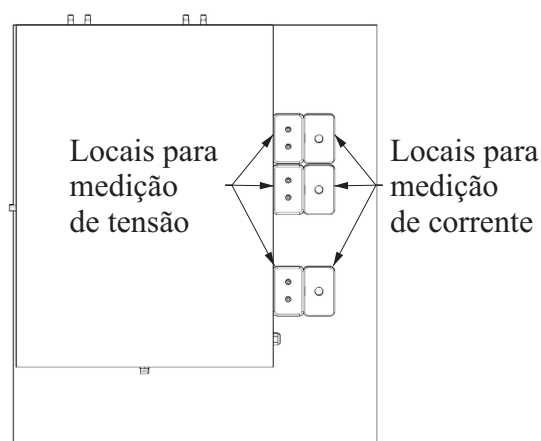
3.4 Locais de Medições das Grandezas de Interesse e Conexões

As localizações dos emuladores e do inversor na bancada já estão definidas. Um ponto que se foi colocado é quanto à medida das variáveis que se necessitam, para a realização dos ensaios. Após realizar uma observação do conjunto geral da bancada, e observar o grau de dificuldade colocada para se retirar os componentes da bancada, foi-se escolhido os pontos para colocação de medição de corrente e tensão dos emuladores e do inversor como visualizado pela Fig. 28.

Os locais de medição são caixas 4×2 para sistema X, onde para os locais que se realizará a medição de corrente não será colocado nenhum espelho, e nos locais onde será medido tensão, assim como os locais de conexão dos emuladores, será colocado um espelho cego com dois bornes tipo banana.

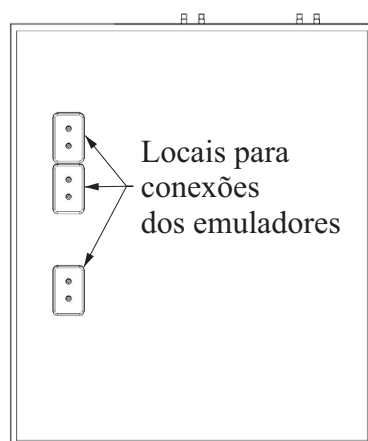
Quanto à conexão dos emuladores tem-se a Fig. 29, que mostra a parte interior da parede lateral esquerda, onde será colocado o painel.

Figura 28 – Pontos dos locais de medições.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 29 – Pontos de conexões dos emuladores.

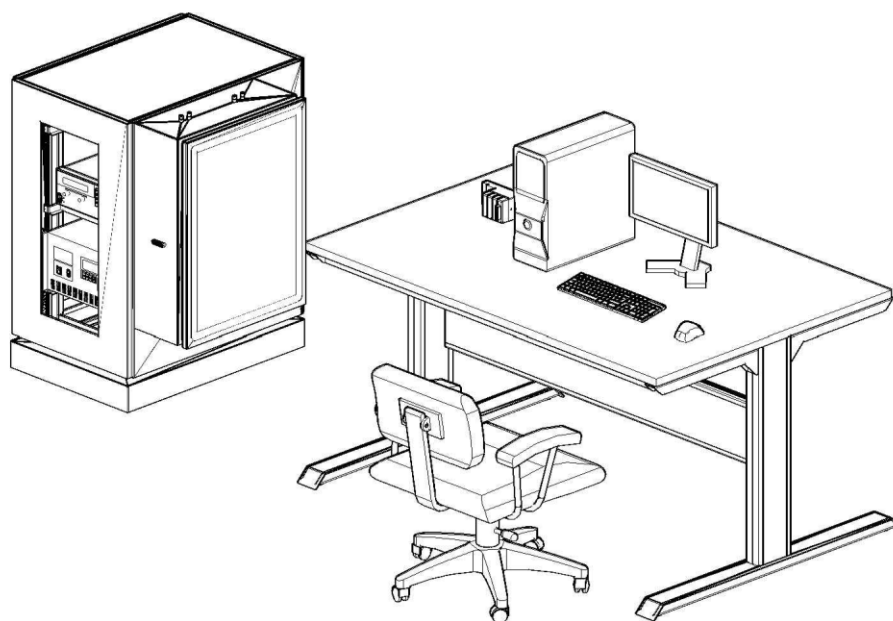


Fonte: elaborado pelo autor.

3.5 Estrutura Geral da Bancada

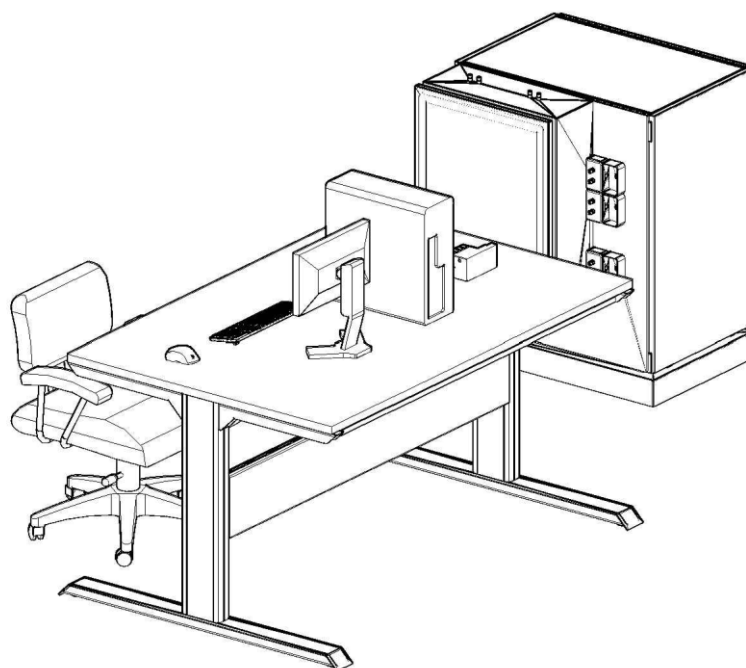
Para se realizar uma visualização da estrutura final após a montagem a física, tem-se as Fig. 30 e 31, onde com as mesmas é possível realizar a verificação visual de como será a bancada proposta após sua construção.

Figura 30 – Vista frontal canto superior direito da bancada finalizada.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 31 – Vista posterior canto superior esquerdo da bancada finalizada.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.6 Diagramas Funcionais e Detalhes Técnicos

Tendo todo o projeto da bancada realizado, agora basta ser apresentado o diagrama funcional da mesma, onde pode ser acompanhado, a um nível técnico, como serão realizadas as ligações entre todos os componentes da bancada. As figuras que seguem nessa seção são os resultados de mais uma parte do estágio realizado.

Figura 32 – Diagrama funcional, folha 1.

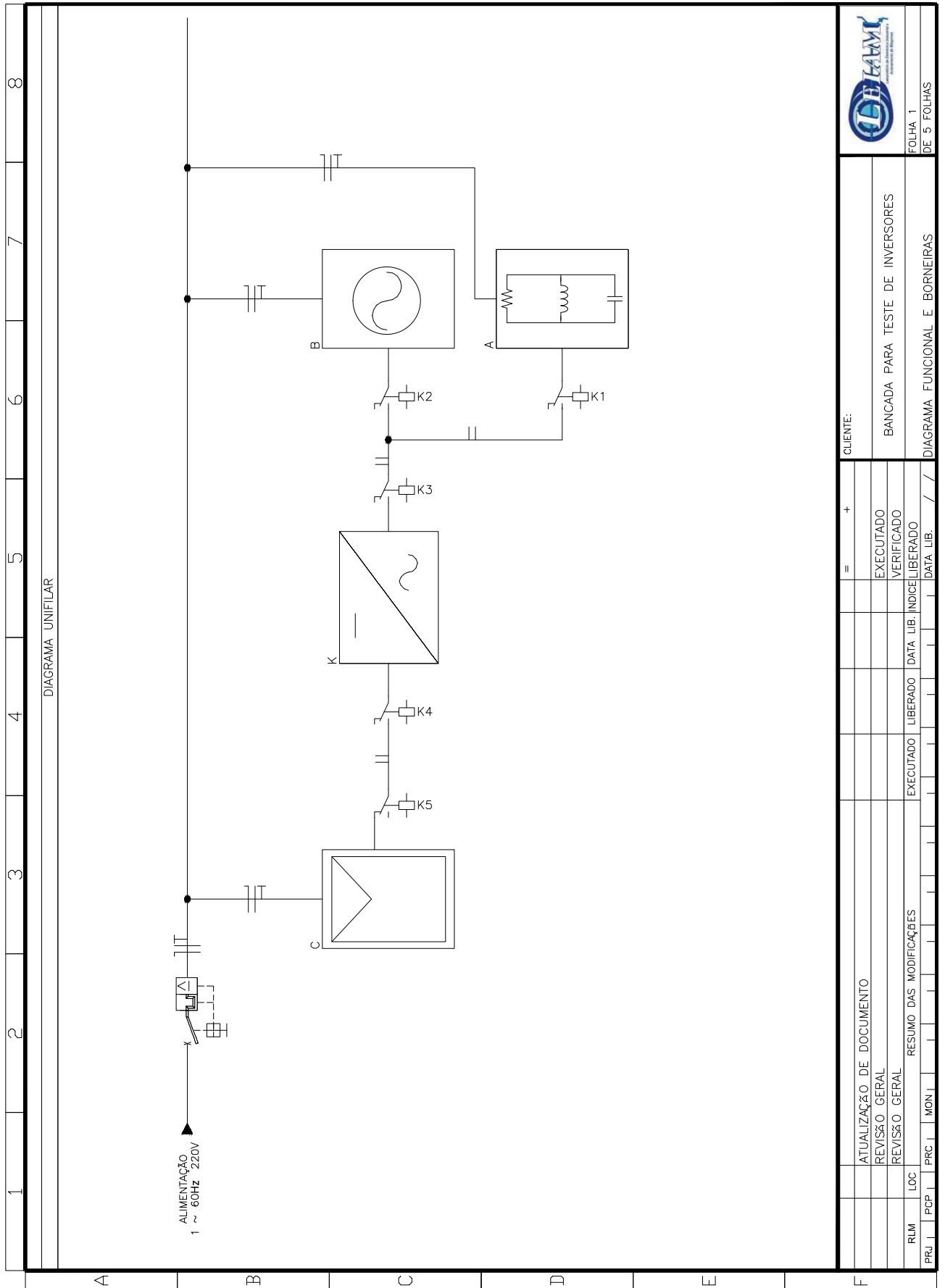
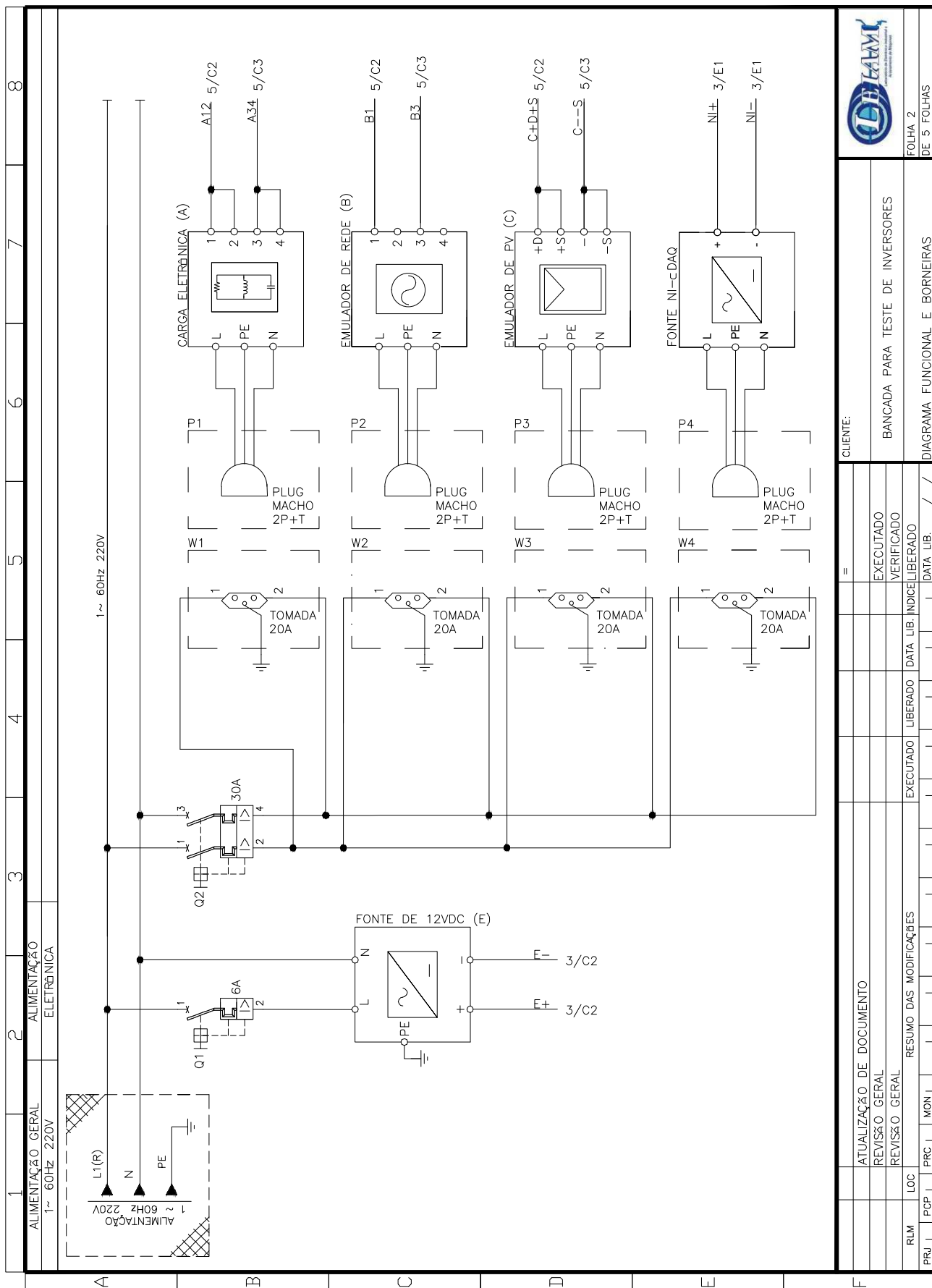
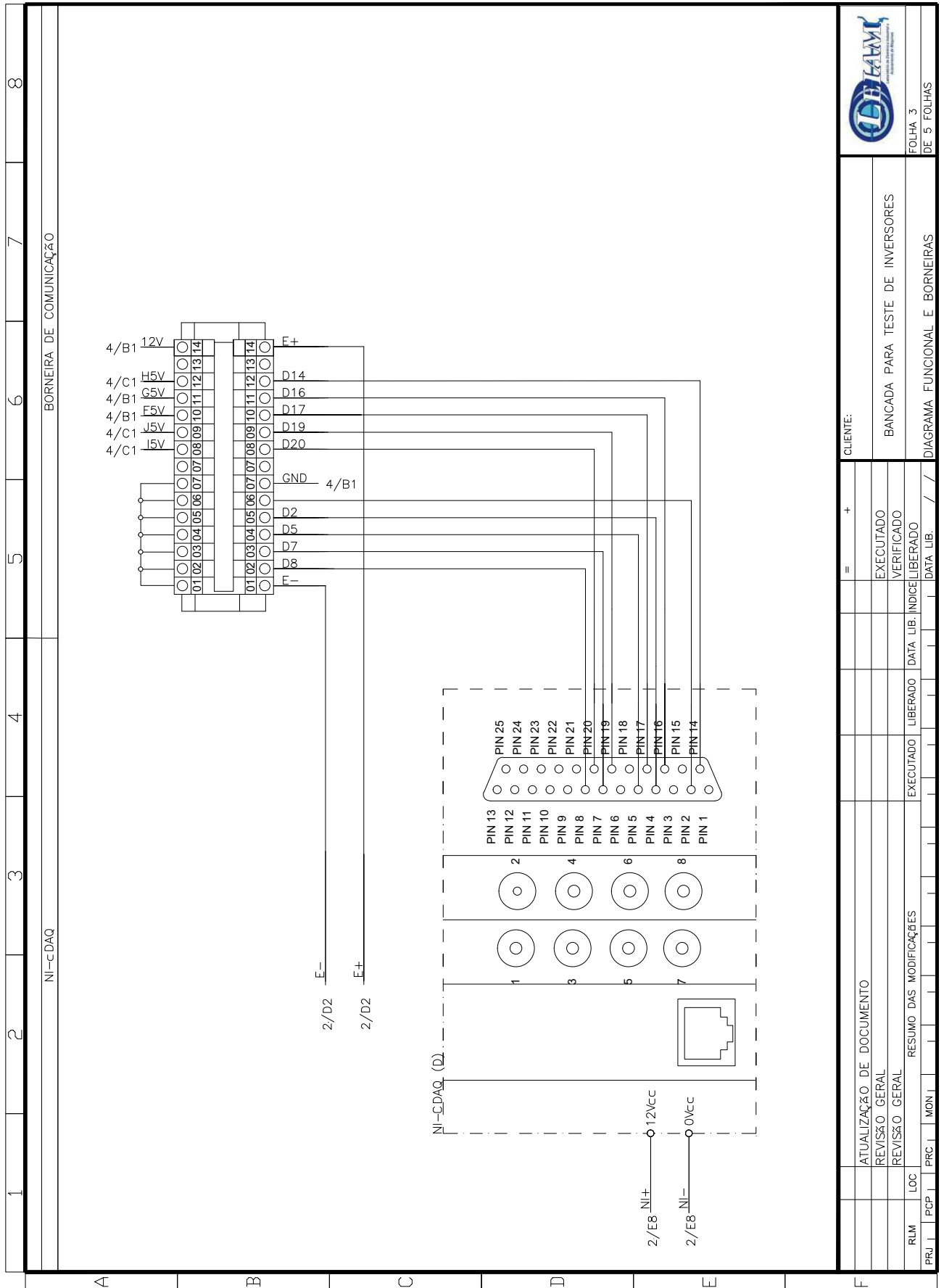


Figura 33 – Diagrama funcional, folha 2.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 34 – Diagrama funcional, folha 3.



FOLHA 3
DE 5 FOLHAS

CLIENTE:
BANCADA PARA TESTE DE INVERSORES
DIAGRAMA FUNCIONAL E BORNEIRAS

RIM	LOC	RESUMO DAS MODIFICAÇÕES	EXECUTADO	LIBERADO	DATA	LIB.	ÍNDICE	LIBERADO
		ATUALIZAÇÃO DE DOCUMENTO						
		REVISÃO GERAL						
		REVISÃO GERAL						
PRJ	PCP	PRC	MON					

Figura 35 – Diagrama funcional, folha 4.

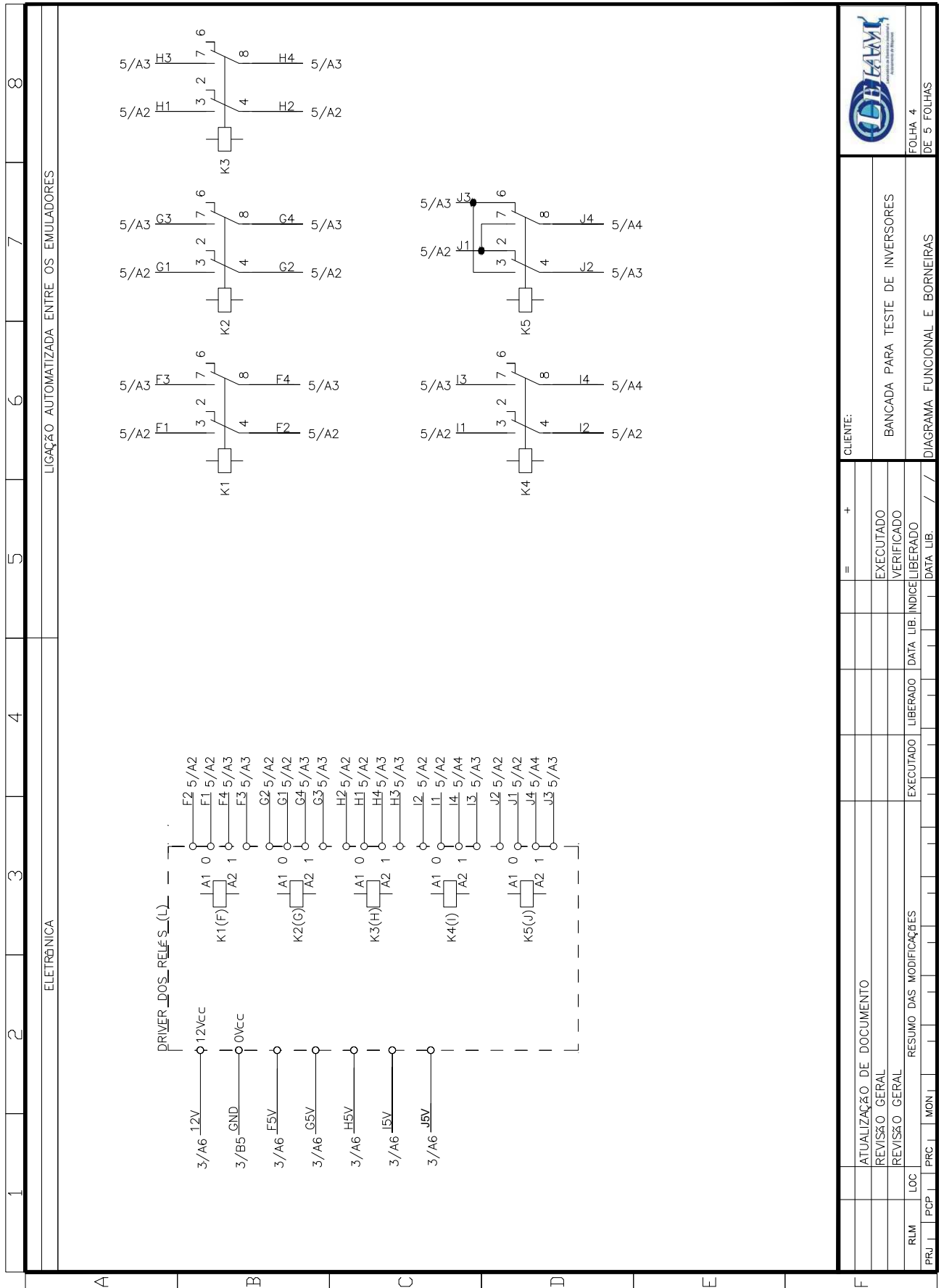


Figura 36 – Diagrama funcional, folha 5.

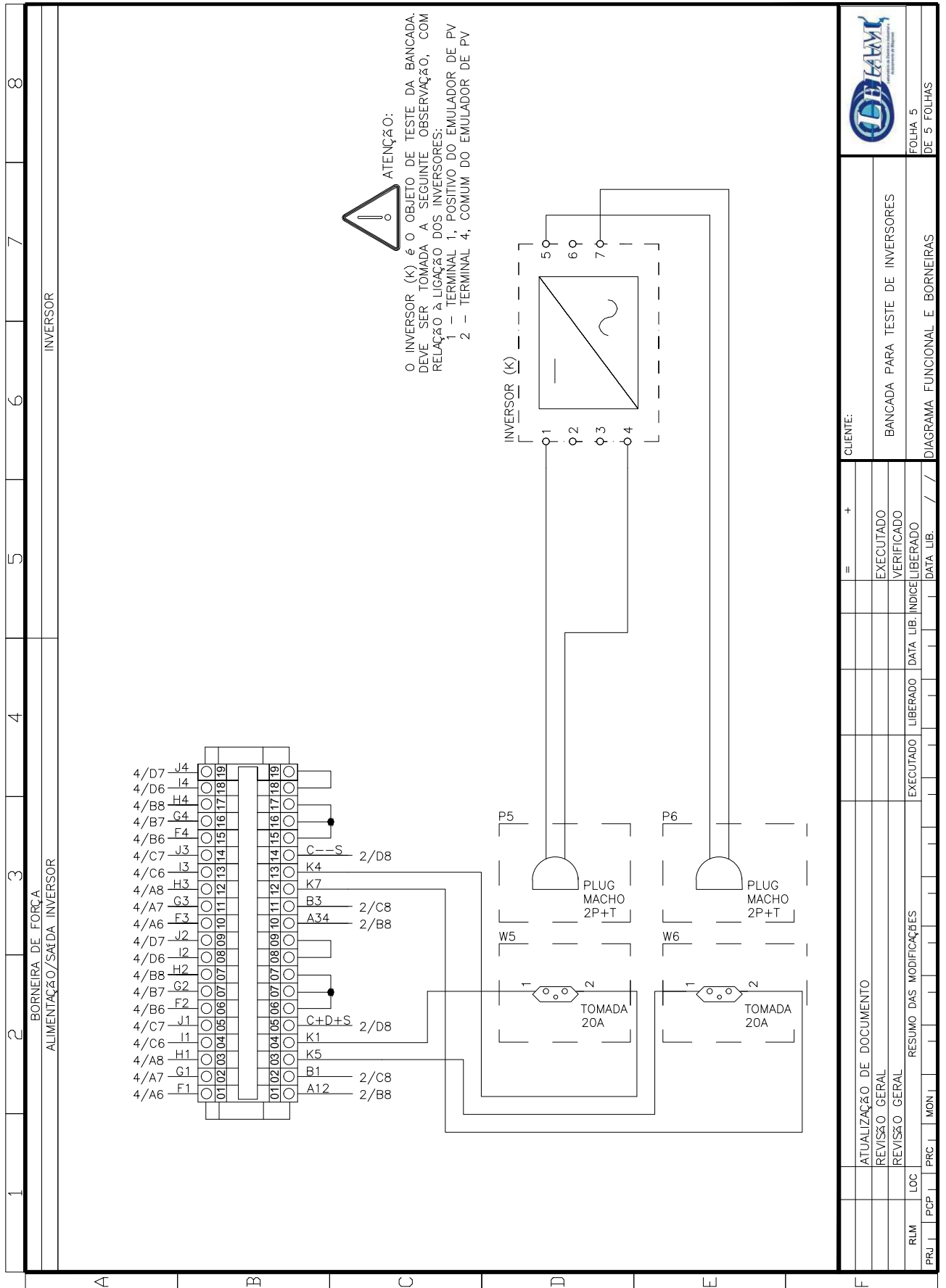


Figura 37 – Layout, folha 1.



Figura 38 – Layout, folha 2.

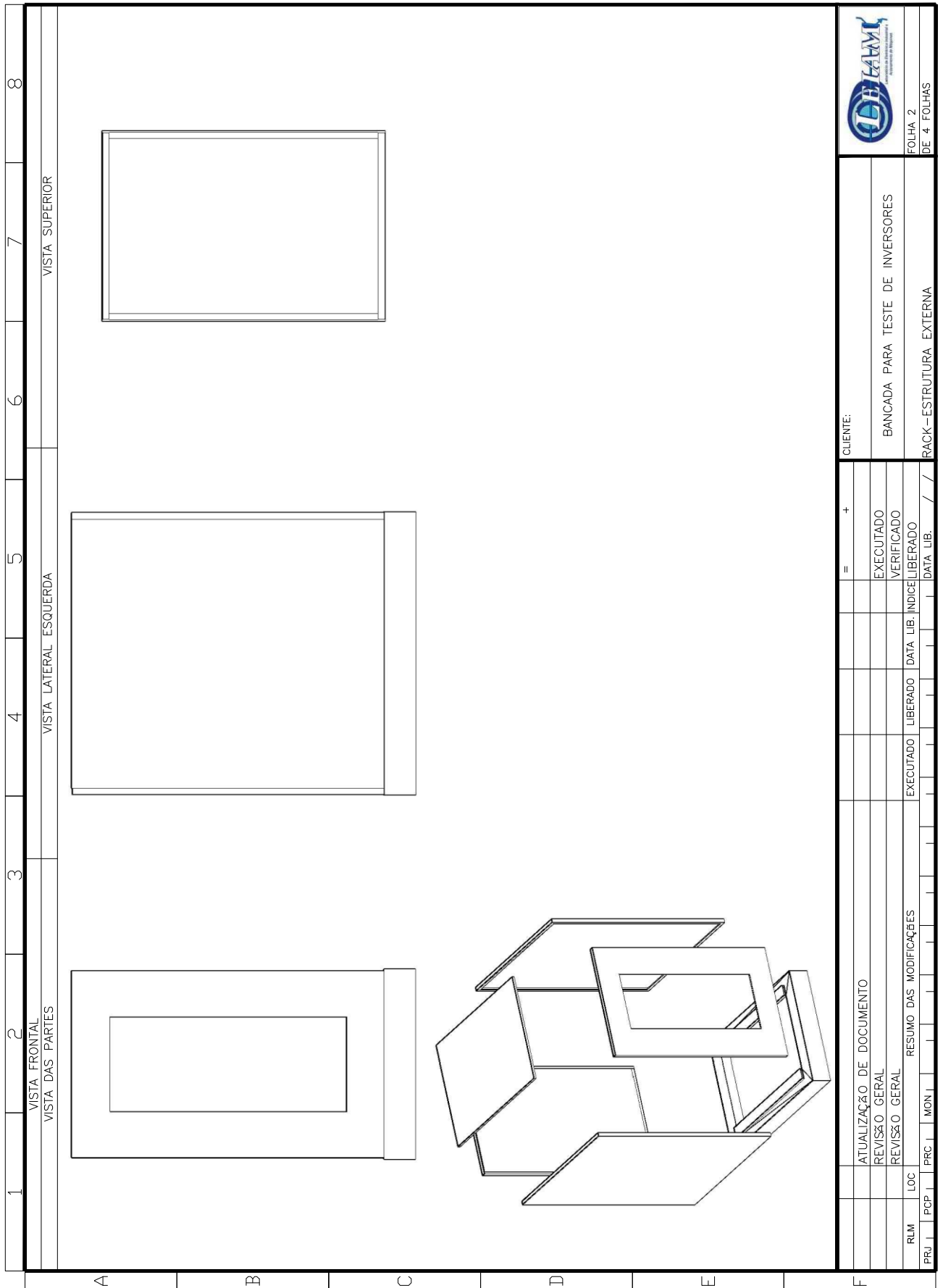
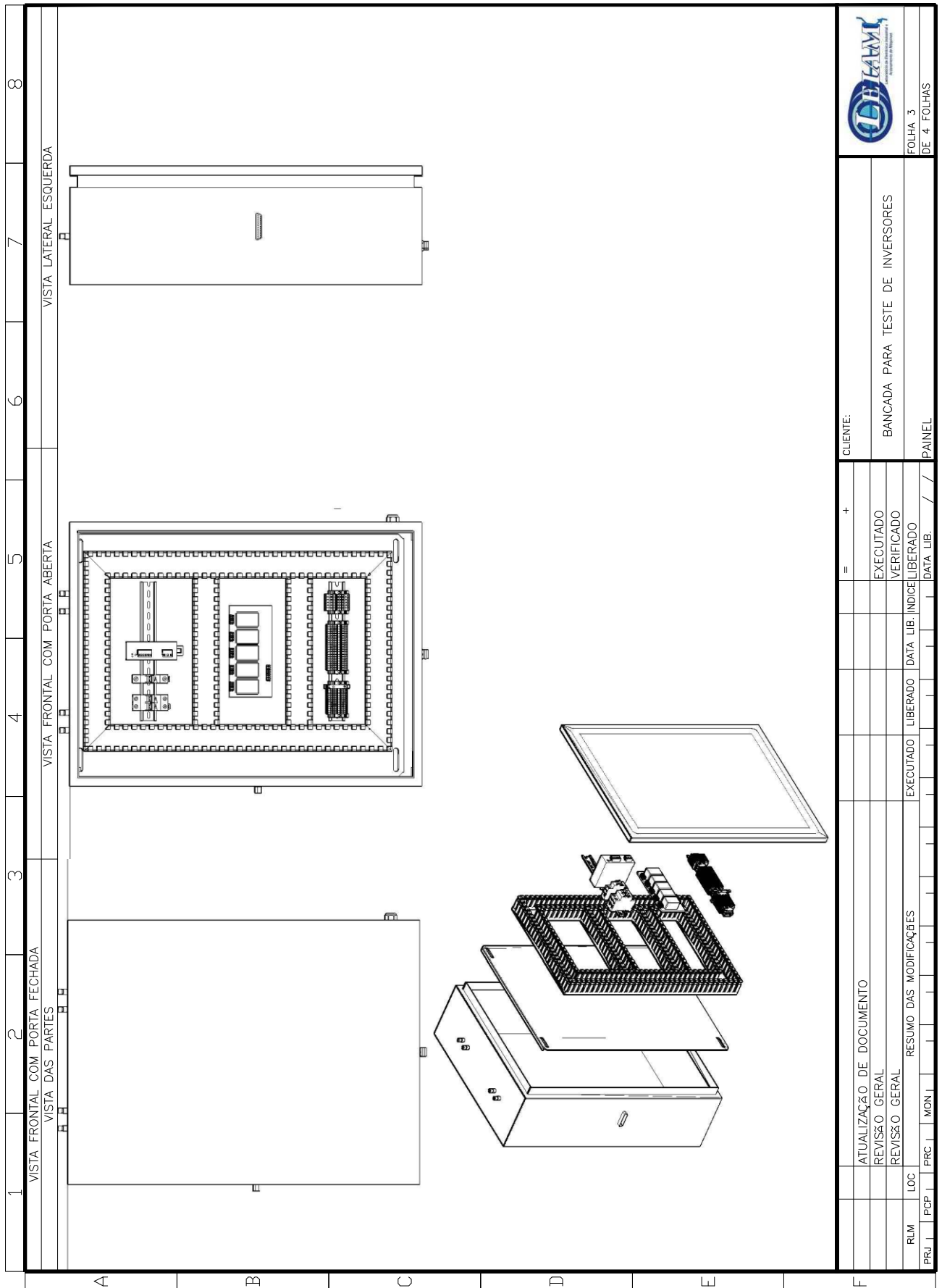


Figura 39 – Layout, folha 3.



FOLHA 3
DE 4 FOLHAS

CLIENTE:		BANCADA PARA TESTE DE INVERSORES	
EXECUTADO		LIBERADO	
VERIFICADO		DATA LIB. / /	
RESUMO DAS MODIFICAÇÕES		RESUMO DAS MODIFICAÇÕES	
PRJ	PCP	PRC	MON
RLM	LOC	EXECUTADO	LIBERADO
		DATA LIB.	INDICE

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o fim do estágio, tendo o estagiário cumprido a carga horária de 180 horas, realizando projetos e pesquisas para uma adição construtiva na bancada anteriormente proposta por Pereira (2016), o mesmo se acha apto para realizar outros projetos, a nível de engenharia técnica, que desrespeitam todos os pontos incluídos para sua finalização.

Durante a realização do estágio a relação com todo o pessoal envolvido no projeto da bancada foi requisitada, com retornos sempre eficientes da equipe, para podermos realizar um projeto mais elaborado, e válido.

O ponto de construção física da bancada, não pôde ter sido realizado, pois, para construção final da mesma, ainda alguns pontos devem entrar em um discursão e apoio da equipe supervisora, que tanto deram a oportunidade, apoi e orientação para a realização do estágio.

REFERÊNCIAS

GOMES, R. C. M.; VITORINO, M. A.; CORRÊA, M. B. R.; WANG, R.; FERNANDES, D. A. Photovoltaic parameter extraction using shuffled complex evolution. In: *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. Citado 3 vezes nas páginas 17, 18 e 23.

NETO, A. F. d. C. P. *Qualificação e Etiquetagem de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede*. Dissertação — Universidade de São Paulo, Março 2012. Citado 6 vezes nas páginas 24, 27, 60, 72, 73 e 75.

PEREIRA, D. F. L. Projeto de uma bancada de conformidade em inversor monofásico conectado em sistema fotovoltaico. Relatório de estágio/UFMG. 2016. Citado 14 vezes nas páginas 14, 16, 27, 29, 30, 34, 57, 60, 67, 69, 77, 87, 88 e 89.

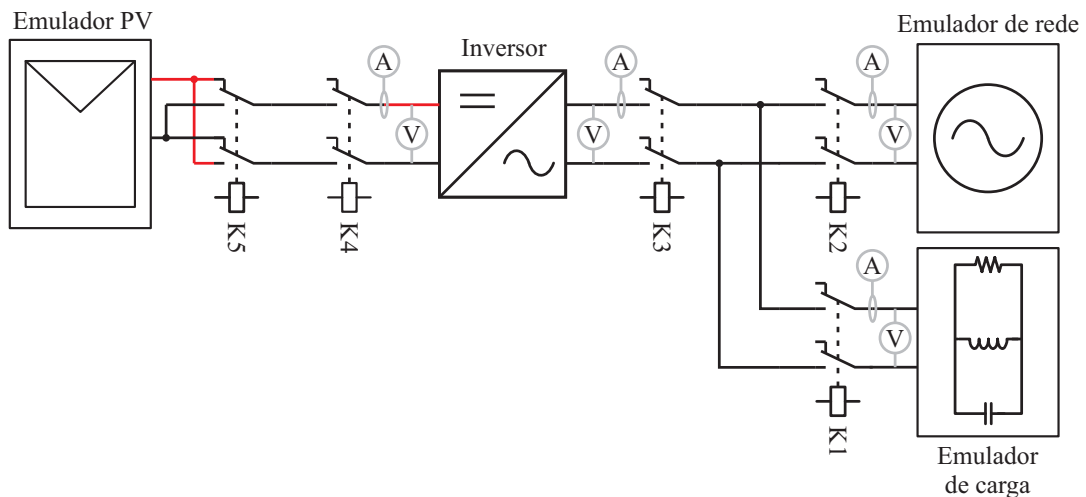
PINHO J. T. E GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. [S.l.]: Grupo de Trabalho de Energia Solar-GTES, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 16, 22 e 25.

Anexos

ANEXO A – PROCEDIMENTOS DE USO - REALIZAÇÃO DE ENSAIOS

Quando da construção final da bancada proposta, o esquemático de ligações será dado como pode ser visualizado pela Fig. 44, onde tem-se a representação dos emuladores e do inversor, os relés de chaveamento para as conexões dos mesmos, e os pontos onde ocorrerão as medições das grandezas de interesse.

Figura 44 – Diagrama de ligações dos emuladores com o inversor para ensaios.



Fonte: elaborado pelo autor.

Os procedimentos para realização de cada ensaio são dados por NETO (2012) e por Pereira (2016), que foram adaptados para a bancada proposta, os ensaios são dados nas seções seguintes.

NOTA 1: o relé que libera a saída do emulador de carga eletrônica deve SEMPRE ser acionado antes do relé que libera o emulador de rede, ou seja, SEMPRE acionar K1 antes de K2.

NOTA 2: quando da realização dos ensaios ao ler-se: "**Fechar os contatos dos relés pelo cDAQ, seguindo a ordem de conexão ao inversor sugerida pelo fabricante...**", os relés mencionados são os relés: K1, K2, K3, K4. O relé K5 só será comutado no ensaio de *Proteção contra inversão de polaridade*.

A.1 Injeção de componente CC

Este teste verifica se o inversor está injetando corrente contínua na rede elétrica da concessionária que pode saturar os transformadores levando-os ao aquecimento, à deterioração do isolamento e outros efeitos adversos.

O procedimento a ser realizados para este teste é descrito abaixo:

- 1) Conectar o inversor aos emuladores de gerador fotovoltaico, rede elétrica e carga eletrônica, e em seguida, acoplar os instrumentos de medição;
- 2) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico para o inversor fornecer 33% da sua potência CA nominal. O fator de forma e a tensão de entrada são arbitrários.
- 3) Configurar o emulador de rede elétrica para operar na tensão nominal de ensaio a 60 Hz.
- 4) Configurar o emulador de carga eletrônica para absorver até 110% da potência CA máxima do inversor, a 60 Hz e a tensão nominal de ensaio
- 5) Fechar os contatos dos relés pelo cDAQ, seguindo a ordem de conexão ao inversor sugerida pelo fabricante e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min.
- 6) Deslocar a corrente de saída, de forma que a componente contínua seja superior a 0,5% da corrente nominal do inversor.
- 7) Medir e registrar o tempo decorrido até a desconexão (contado a partir da aplicação do deslocamento de corrente).

OBS : no monitor do computador é possível visualizar as formas de onda de tensão e corrente no osciloscópio do LabVIEW medidos no emulador da rede elétrica, ou na saída CA do inversor. Esses sinais são os mesmos, pois quando o relé K2 e o relé K3 estiverem acionados, o barramento entre eles será o mesmo. A partir desses sinais pode-se medir o tempo decorrido até a desconexão.

- 8) Repetir do passo 2) ao 5) com o emulador de gerador fotovoltaico configurado para o inversor fornecer 66% de sua potência nominal.
- 9) Repetir do passo 2) ao 5) com o emulador de gerador fotovoltaico configurado para o inversor fornecer 100% de sua potência nominal.

TESTE: o inversor é considerado em conformidade se os valores de tempo de desconexão medidos devido à injeção de componente contínua não excederem os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149. Nesta norma informa que o sistema fotovoltaico deve

parar de fornecer energia à rede em 1 s se a injeção de componente CC na rede elétrica for superior a 0,5% da corrente nominal do inversor.

O sistema fotovoltaico com transformador com separação galvânica de 60 Hz não precisa ter proteções adicionais para atender a este requisito.

A.2 Harmônicos e distorção de forma de onda

É conveniente que a energia injetada pelo sistema fotovoltaico tenha baixos níveis de distorção harmônica de corrente para garantir que nenhum efeito adverso ocorra em outro equipamento conectado à rede. Níveis aceitáveis de distorção harmônica de tensão e corrente dependem do tipo das características da rede de distribuição, tipo de serviço, cargas conectadas e procedimentos para rede.

O procedimento a ser realizados para este teste é descrito abaixo:

- 1) Conectar o inversor aos emuladores de gerador fotovoltaico, rede elétrica e carga eletrônica, e em seguida, acoplar os instrumentos de medição.
- 2) Identificar as potências de entrada do inversor equivalentes a 10%, 20%, 30%, 50%, 75% e 100% da potência nominal de saída, necessitando, dessa forma, simular seis diferentes curvas de um gerador fotovoltaico.
- 3) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico com a menor tensão da faixa de operação do SPMP e para que o inversor forneça um dos seis níveis de carregamento identificados no passo 2). O fator de forma é arbitrário.
- 4) Configurar o emulador de rede elétrica para operar na tensão nominal de ensaio a 60 Hz.
- 5) Configurar o emulador de carga eletrônica para absorver até 110% da potência CA máxima do inversor, a 60 Hz e a tensão nominal de ensaio
- 6) Fechar os contatos dos relés pelo cDAQ, seguindo a ordem de conexão ao inversor sugerida pelo fabricante e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min.
- 7) Medir e registrar o valor da THD_i .

OBS : no monitor do computador é possível visualizar os espectros de frequências dos sinais de onda de tensão e corrente no LabVIEW medidos no emulador da rede elétrica ou na saída CA do inversor. Esses sinais são os mesmos, pois quando o relé K2 e o relé K3 estiverem acionados, o barramento entre eles será o mesmo. A partir desses sinais pode-se calcular a THD_i de cada harmônica pela equação a seguir:

$$TSD_i\% = \frac{I_n}{I_1} \times 100,$$

Onde, I_1 é o valor eficaz da corrente na frequência fundamental e I_n é o valor eficaz da corrente na frequência de ordem n . Além disso, deve-se calcular a distorção harmônica total THD pela equação a seguir:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{33} I_n^2}}{I_1}$$

- 8) Repetir do passo 3) ao 5) para cada um dos outros cinco níveis de carregamento do inversor definidos no passo 2).

TESTE: O inversor é considerado em conformidade se os valores de THD_i medidos não excederem os limites estabelecidos na ABNT NBR 16149. Nesta norma informa que a distorção harmônica total de corrente deve ser inferior a 5% em relação à corrente fundamental na potência nominal do inversor. Cada harmônica individual deve está limitada aos valores apresentados na Tab. 2, abaixo.

Tabela 2 – Limite de distorção harmônica de corrente.

Harmônicas ímpares	Limite de distorção (%)
3° a 9°	< 4,0
11° a 15°	< 2,0
17° a 21°	< 1,5
23° a 33°	< 0,6
Harmônicas pares	Limite de distorção (%)
2° a 8°	< 1
10 a 32°	0,5

A.3 Fator de potência

Quando a potência ativa injetada na rede for superior a 20% da potência nominal do inversor, o sistema fotovoltaico deve ser capaz de operar dentro das faixas de fator de potência nas próximas subseções.

Após uma mudança na potência ativa, o sistema fotovoltaico deve ser capaz de ajustar a potência reativa de saída automaticamente, para corresponder ao fator de potência predefinido.

Qualquer ponto operacional resultante destas definições/curvas deve ser atingido em, no máximo, 10 s. O inversor deve sair de fábrica com fator de potência igual a 1.

A.3.1 Fator de potência fixo

Aplicado para sistemas fotovoltaicos com potência nominal menor ou igual a 3 kW.

O procedimento a ser realizados para este teste é descrito abaixo:

- 1) Configurar o inversor operar com fator de potência capacitivo mínimo definido na ABNT NBR 16149. Nesta norma, o fator de potência mínimo é de 0,98 capacitivo.
- 2) Conectar o inversor aos emuladores de gerador fotovoltaico, rede elétrica e carga eletrônica, e em seguida, acoplar os instrumentos de medição.
- 3) Identificar as potências de entrada do inversor equivalentes a 10%, 20%, 30%, 50%, 75% e 100% da potência nominal de saída, necessitando, dessa forma, simular seis diferentes curvas de um gerador fotovoltaico.
- 4) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico com a menor tensão da faixa de operação do SPMP e para que o inversor forneça um dos seis níveis de carregamento identificados no passo 3). O fator de forma e a tensão são arbitrários.
- 5) Configurar o emulador de rede elétrica para operar na tensão nominal de ensaio a 60 Hz.
- 6) Configurar o emulador de carga eletrônica para absorver até 110% da potência CA máxima do inversor, a 60 Hz e a tensão nominal de ensaio.
- 7) Fechar os contatos dos relés pelo cDAQ, seguindo a ordem de conexão ao inversor sugerida pelo fabricante e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min.
- 8) Medir e registrar o valor do fator de potência

OBS : no monitor do computador é possível visualizar os espectros de frequências dos sinais de onda de tensão e corrente no LabVIEW medidos no emulador da rede elétrica ou na saída CA do inversor. Esses sinais são os mesmos, pois quando o relé K2 e o relé K3 estiverem acionados, o barramento entre eles será o mesmo. A partir desses sinais pode-se calcular o fator de potência pela equação a seguir:

$$FP = \frac{\cos(\phi_1)}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

Onde, $\cos(\phi_1)$ é o valor de potência fundamental e THD é a distorção harmônica total que pode ser obtida da seguinte forma:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{33} I_n^2}}{I_1}$$

Onde, I_1 é o valor eficaz da corrente na frequência fundamental e I_n é o valor eficaz da corrente na frequência de ordem n .

- 9) Repetir do passo 4) ao 6) para cada um dos outros cinco níveis de carregamento do inversor definidos no passo 3).
- 10) Repetir do passo 1) ao 7), porém com o inversor configurado para operar com fator de potência indutivo mínimo definido na ABNT NBR 16149. Nesta norma, o fator de potência mínimo é de 0,98 indutivo.
- 11) Repetir do passo 1) ao 7), porém com o inversor configurado para operar com fator de potência unitário.

TESTE: O inversor é considerado em conformidade se a diferença entre os valores de fator de potência medidos e os valores esperados estiver dentro da tolerância de $\pm 0,025$.

A.3.2 Fator de potência com curva do FP

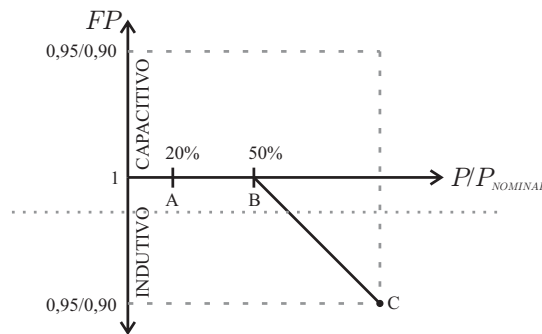
Aplicado para sistemas fotovoltaicos com potência nominal maior que 3 kW e menor ou igual a 6 kW.

O procedimento a ser realizados para este teste é descrito abaixo:

- 1) Configurar o inversor para operar com fator de potência segundo a curva do FP em função da potência ativa de saída do sistema fotovoltaico, estabelecido na ABNT NBR 16149. Nesta norma diz:

FP igual 1 ajustado em fábrica, com tolerância de trabalhar na faixa de 0,98 indutivo até 0,98 capacitivo. O inversor deve apresentar, como opcional, a possibilidade de

Figura 45 – Curva de FP em função da potência ativa de saída do inversor.



Fonte: Pereira (2016) elaborado pelo autor.

operar de acordo com a curva da Fig. 45 e com FP ajustável de 0,95 indutivo até 0,95 capacitivo.

Dependendo da topologia, carregamento da rede e potência a ser injetada, o operador da rede pode fornecer uma curva diferente, que deve ser implementada nos inversores por meio de ajuste dos pontos A, B, e C da Fig. 45.

A curva da Fig. 45 só deve ser habilitada quando a tensão da rede ultrapassar a tensão de ativação, valor ajustável entre 100% e 110% da tensão nominal da rede, com valor padrão em 104% ajustado em fábrica.

A curva-padrão só deve ser desabilitada quando a rede retroceder para um valor abaixo da tensão de desativação, valor ajustável entre 90% e 100% da tensão nominal da rede, com valor padrão em 100% ajustado em fábrica.

- 2) Conectar o inversor aos emuladores de gerador fotovoltaico, rede elétrica e carga eletrônica, e em seguida, acoplar os instrumentos de medição.
- 3) Identificar as potências de entrada do inversor equivalentes a 10%, 20%, 30%, 50%, 75% e 100% da potência nominal de saída, necessitando, dessa forma, simular seis diferentes curvas de um gerador fotovoltaico.
- 4) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico com a menor tensão da faixa de operação do SPMP e para que o inversor forneça um dos seis níveis de carregamento identificados no passo 3). O fator de forma e a tensão são arbitrários.
- 5) Configurar o emulador de rede elétrica para operar na tensão nominal de ensaio a 60 Hz.
- 6) Configurar o emulador de rede para absorver até 110% da potência CA máxima do inversor, a 60 Hz e a tensão nominal de ensaio.

- 7) Fechar os contatos dos relés pelo cDAQ, seguindo a ordem de conexão ao inversor sugerida pelo fabricante e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min.
- 8) Medir e registrar o valor do fator de potência

OBS : no monitor do computador é possível visualizar os espectros de frequências dos sinais de onda de tensão e corrente no LabVIEW medidos no emulador da rede elétrica ou na saída CA do inversor. Esses sinais são os mesmos, pois quando o relé K2 e o relé K3 estiverem acionados, o barramento entre eles será o mesmo. A partir desses sinais pode-se calcular o fator de potência pela equação a seguir:

$$FP = \frac{\cos(\phi_1)}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

Onde, $\cos(\phi_1)$ é o valor de potência fundamental e THD é a distorção harmônica total que pode ser obtida da seguinte forma:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{33} I_n^2}}{I_1}$$

Onde, I_1 é o valor eficaz da corrente na frequência fundamental e I_n é o valor eficaz da corrente na frequência de ordem n .

- 10) Repetir do passo 4) ao 6) para cada um dos outros cinco níveis de carregamento do inversor definidos no passo 3).
- 11) Repetir do passo 1) ao 7), porém com o inversor configurado para operar com fator de potência indutivo mínimo definido na ABNT NBR 16149. Nesta norma, o fator de potência mínimo é de 0,98 indutivo.
- 12) Repetir do passo 1) ao 7), porém com o inversor configurado para operar com fator de potência unitário.

TESTE: o inversor é considerado em conformidade se a diferença entre os valores de fator de potência medidos e os valores esperados (curva FP) estiver dentro da tolerância de $\pm 0,025$.

A.4 Injeção/demanda de potência reativa

Quando a potência ativa injetada na rede for superior a 20% da potência nominal do inversor, o sistema fotovoltaico deve ser capaz de operar dentro das faixas de fator de potência nas próximas subseções.

Após uma mudança na potência ativa, o sistema fotovoltaico deve ser capaz de ajustar a potência reativa de saída automaticamente, para corresponder ao fator de potência predefinido.

Qualquer ponto operacional resultante destas definições/curvas deve ser atingido em, no máximo, 10 s. O inversor deve sair de fábrica com fator de potência igual a 1.

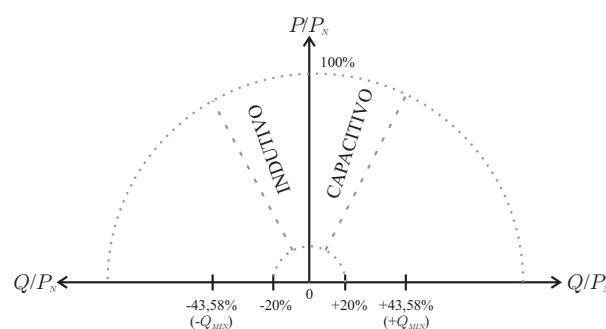
Teste aplicado para sistemas fotovoltaicos com potência nominal maior que 6 kW.

O procedimento a ser realizados para este teste é descrito abaixo:

- 1) Configurar o inversor para fornecer potência reativa igual a 43,58% da potência ativa de ensaio (operação capacitiva).

O sistema fotovoltaico pode operar com duas possibilidades: (i) FP igual a 1 ajustado em fábrica, com tolerância de trabalhar na faixa de 0,98 indutivo até 0,98 capacitivo. O inversor deve apresentar, como opcional, a possibilidade de operar de acordo com a curva da Fig. 45 e com FP ajustável de 0,90 indutivo até 0,90 capacitivo; ou (ii) controle de potência reativa (VAr), conforme a Fig. 46.

Figura 46 – Limites operacionais de injeção/demanda de potência reativa para sistemas com potência nominal superior a 6 kW.



Fonte: Pereira (2016) elaborado pelo autor.

- 2) Conectar o inversor aos emuladores de gerador fotovoltaico, rede elétrica e carga eletrônica, e em seguida, acoplar os instrumentos de medição.
- 3) Identificar as potências de entrada do inversor equivalentes a 10%, 20%, 30%, 50%, 75% e 100% da potência nominal de saída, necessitando, dessa forma, simular seis diferentes curvas de um gerador fotovoltaico.

- 4) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico com a menor tensão da faixa de operação do SPMP e para que o inversor forneça um dos seis níveis de carregamento identificados no passo 3). O fator de forma e a tensão são arbitrários.
- 5) Configurar o emulador de rede elétrica para operar na tensão nominal de ensaio a 60 Hz.
- 6) Configurar o emulador de carga eletrônica para absorver até 110% da potência CA máxima do inversor, a 60 Hz e a tensão nominal de ensaio.
- 7) Fechar os contatos dos relés pelo cDAQ, seguindo a ordem de conexão ao inversor sugerida pelo fabricante e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min.
- 8) Medir e registrar o valor da potência reativa na saída do inversor.

OBS : no monitor do computador é possível visualizar os espectros de frequências dos sinais de onda de tensão e corrente no LabVIEW medidos no emulador da rede elétrica ou na saída CA do inversor. Esses sinais são os mesmos, pois quando o relé K2 e o relé K3 estiverem acionados, o barramento entre eles será o mesmo.

- 9) Repetir do passo 4) ao 6) para cada um dos outros cinco níveis de carregamento do inversor definidos no passo 3).
- 10) Repetir do passo 1) ao 7), porém com o inversor configurado para demandar potência reativa igual a 43,58% da potência ativa de ensaio (operação indutiva).
- 11) Repetir do passo 1) ao 7), porém com o inversor configurado para fornecer apenas potência ativa (operação resistiva).

TESTE: o inversor é considerado em conformidade se a diferença entre os valores de potência reativa medidos e os valores esperados estiver dentro da tolerância de $\pm 2,5\%$ da potência nominal do inversor.

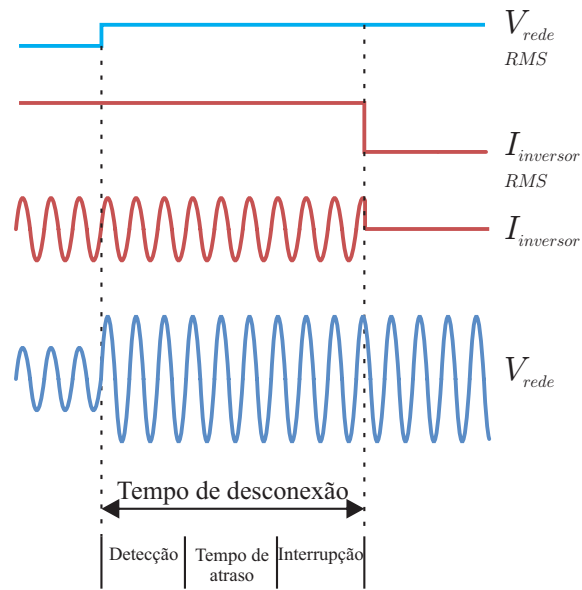
A.5 Condições anormais de tensão

O inversor de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica deve estar em conformidade com os padrões da rede elétrica brasileira, no que diz respeito à Qualidade de Energia Elétrica. Além de o inversor ter que fornecer energia de qualidade, ele deve apresentar algumas proteções em casos de anormalidade da rede, as quais se resumem em cessar o fornecimento de energia em casos atípicos de tensão e frequência e em casos de operação em ilha.

A finalidade deste ensaio é garantir que o inversor cesse de fornecer energia em casos de sobre e subtensão da rede. O procedimento a ser realizados para este teste é descrito abaixo:

- 1) Conectar o inversor aos emuladores de gerador fotovoltaico, rede elétrica e carga eletrônica, e em seguida, acoplar os instrumentos de medição.
- 2) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico para o inversor fornecer 100% da potência CA nominal. O fator de forma e a tensão são arbitrários.
- 3) Configurar o emulador de rede elétrica para operar na tensão nominal de ensaio a 60 Hz.
- 4) Configurar o emulador de carga eletrônica para absorver até 110% da potência CA máxima do inversor, a 60 Hz e a tensão nominal de ensaio.
- 5) Fechar os contatos dos relés pelo cDAQ, seguindo a ordem de conexão ao inversor sugerida pelo fabricante e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min.
- 6) Elevar a tensão do emulador de rede em passos de 1 V, a partir da tensão nominal, a cada 5 segundos, até que o inversor cesse de fornecer corrente à rede e registrar o valor de tensão que provocou o desligamento.
- 7) Reduzir a tensão do emulador de rede para a tensão nominal e esperar que o inversor reconecte.
- 8) Elevar a tensão do emulador de rede, através de um degrau, para um valor 10% superior ao que provocou a desconexão do inversor. Registrar a tensão e a corrente desde a aplicação do degrau até a desconexão do inversor.
- 9) Com os valores de tensão e corrente registrados, verificar qual foi o tempo de desconexão. A Fig. 47 ilustra o tempo de desconexão, o qual é medido a partir do degrau de tensão até o ponto em que a corrente injetada na rede foi interrompida.

Figura 47 – Representação gráfica do tempo de desconexão.



Fonte: NETO (2012), alterado pelo autor.

- 10) Reduzir a tensão do emulador de rede para a tensão nominal e esperar que o inversor reconecte.
- 11) Elevar a tensão do emulador de rede, através de um degrau, para 140% do valor nominal. Registrar a tensão e a corrente desde a aplicação do degrau até a desconexão do inversor.
- 12) Com os valores de tensão e corrente registrados, verificar qual foi o tempo de desconexão. Se o tempo de desconexão for o mesmo medido no passo 9), repetir 10), 11) e 12), mas com um degrau de tensão maior, por exemplo, de 150% da tensão nominal.
- 14) Reduzir a tensão do emulador de rede para a tensão nominal e esperar que o inversor reconecte.
- 15) Elevar a tensão do emulador de rede, através de um degrau, para 120% do valor nominal. Registrar a tensão e a corrente desde a aplicação do degrau até a desconexão do inversor.
- 16) Com os valores de tensão e corrente registrados, verificar qual foi o tempo de desconexão. Se o tempo de desconexão for o mesmo medido no passo 9), repetir 13), 14) e 15) mas com um degrau de tensão 1 V maior. Se o tempo de desconexão for o mesmo medido no passo 11), significa que a segunda tensão de desconexão foi achada.

- 17) Repetir do passo 6) ao 16), porém reduzindo, no lugar de elevar, a tensão, para obter os valores de tensão e os tempos de desconexão por subtensão. Para o ensaio de subtensão, onde se lê 140%, 150% e 120% substituir por 30%, 20% e 70%, respectivamente.

TESTE: O inversor deve cessar o fornecimento de energia para a rede dentro dos valores limites de tensão e de tempo máximo de desconexão estabelecidos na Tab. 3, com tolerância de $\pm 1\%$; caso contrário será reprovado.

Tabela 3 – Valores limites de tensão e tempo máximo de desconexão do inversor para distúrbios de tensão.

Tensão (% $V_{nominal}$)			Tempo de desconexão (s)
-	V	< 50%	0,1
50% \leq	V	< 85%	2
85% \leq	V	< 110%	Operação Normal
110% \leq	V	< 135%	2
135% \leq	V	-	0,05

Fonte: NETO (2012).

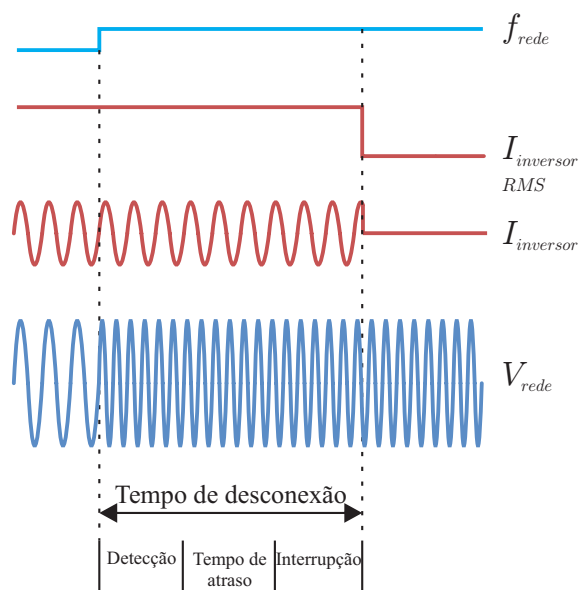
A.6 Condições anormais de frequência

A finalidade deste ensaio é garantir que o inversor cesse de injetar energia em casos de sobre e subfrequência da rede. O procedimento a ser realizados para este teste é descrito abaixo:

- 1) Conectar o inversor aos emuladores de gerador fotovoltaico, rede elétrica e carga eletrônica, e em seguida, acoplar os instrumentos de medição.
- 2) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico para o inversor fornecer 100% da potência CA nominal. O fator de forma e a tensão são arbitrários.
- 3) Configurar o emulador de rede elétrica para operar na tensão nominal de ensaio a 60 Hz.
- 4) Configurar o emulador de carga eletrônica para absorver até 110% da potência CA máxima do inversor, a 60 Hz e a tensão nominal de ensaio.
- 5) Fechar os contatos dos relés pelo cDAQ, seguindo a ordem de conexão ao inversor sugerida pelo fabricante e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min.
- 6) Elevar a frequência do emulador de rede em passos de 0,1 Hz a cada 5 segundos até que o inversor cesse de fornecer energia, e registrar a frequência que provoca o desligamento por sobrefrequência.
- 7) Reduzir a frequência do emulador de rede para o valor nominal e esperar que o inversor reconecte.
- 8) Elevar a frequência do emulador de rede, através de um degrau, para um valor 20% superior ao que provocou a desconexão do inversor. Registrar a frequência e a corrente desde a aplicação do degrau até a desconexão do inversor.
- 9) Com os valores de frequência e corrente registrados, verificar qual foi o tempo de desconexão. A Fig. 48 ilustra o tempo de desconexão, o qual é medido a partir do degrau de frequência até o ponto em que a corrente injetada na rede foi interrompida.
- 10) Reduzir a frequência do emulador de rede para o valor nominal e esperar que o inversor reconecte.
- 12) Repetir do passo 6) ao 9), porém reduzindo a frequência, para obter os valores de frequência e de tempo de desconexão por subfrequência.

TESTE: o inversor deve cessar o fornecimento de energia para a rede dentro dos valores limites de frequência e de tempo máximo de desconexão estabelecidos na Tab. 4, com tolerância de $\pm 1\%$; caso contrário será reprovado.

Figura 48 – Representação gráfica do tempo de resposta à condições anormais de frequência.



Fonte: NETO (2012), alterado pelo autor.

Tabela 4 – Valores limites de frequência e tempo máximo de desconexão do inversor para distúrbios de frequência.

Frequência (Hz)			Tempo de desconexão (s)
-	F	< 59,0	0,2
$57,5 \leq$	F	< 60,5	Operação Normal
$60,5 \leq$	F	-	0,2

Fonte: NETO (2012).

A.7 Controle da potência ativa em sobrefrequência

Quando a frequência da rede ultrapassar 60,5 Hz e permanecer abaixo de 62 Hz, o sistema fotovoltaico deve reduzir a potência ativa injetada na rede segundo a equação:

$$\Delta P = [f_{rede} - (f_{NOMINAL} - 0,5)] \times R$$

Onde: ΔP é a variação da potência ativa injetada, expressa em porcentagem, em relação à potência ativa injetada no momento em que a frequência excede 60,5 Hz; f_{rede} é a frequência da rede; $f_{NOMINAL}$ é a frequência nominal da rede; R é a taxa de redução desejada da potência ativa injetada, expressa em porcentagem por Hertz, ajustada em -40%/Hz. A resolução da redução de frequência deve ser $\leq 0,01$ Hz.

Os procedimentos são descritos a seguir:

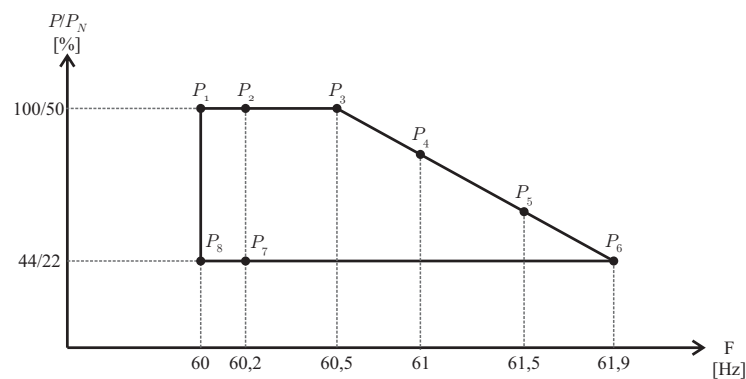
- 1) Conectar o inversor aos emuladores de gerador fotovoltaico, rede elétrica e carga eletrônica, e em seguida, acoplar os instrumentos de medição.
- 2) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico para o inversor fornecer 100% da potência CA nominal. O fator de forma e a tensão são arbitrários.
- 3) Configurar o emulador de rede elétrica para operar na tensão nominal de ensaio a 60 Hz.
- 4) Configurar o emulador de carga eletrônica para absorver até 110% da potência CA máxima do inversor, a 60 Hz e a tensão nominal de ensaio.
- 5) Fechar os contatos dos relés pelo cDAQ, seguindo a ordem de conexão ao inversor sugerida pelo fabricante e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min.

OBS : no monitor do computador é possível visualizar os espectros de frequências dos sinais de onda de tensão e corrente no LabVIEW medidos no emulador da rede elétrica ou na saída CA do inversor. Esses sinais são os mesmos, pois quando o relé K2 e o relé K3 estiverem acionados, o barramento entre eles será o mesmo.

- 6) Medir e registrar a frequência e a potência do inversor.
- 7) Elevar a frequência da rede para 60,2 Hz (P_2).
- 8) Medir e registrar a frequência e a potência de saída do inversor.
- 9) Elevar a frequência da rede para 60,5 Hz (P_3).

- 10) Medir e registrar a frequência e a potência de saída do inversor.
- 11) Elevar a frequência da rede para 61 Hz (P_4).
- 12) Medir e registrar a frequência e a potência de saída do inversor.
- 13) Elevar a frequência da rede para 61,5 Hz (P_5).
- 14) Medir e registrar a frequência e a potência de saída do inversor.
- 15) Elevar a frequência da rede para 61,9 Hz (P_6).
- 16) Medir e registrar a frequência e a potência de saída do inversor.
- 17) Reduzir a frequência da rede para 60,2 Hz (P_7).
- 18) Medir e registrar a frequência e a potência de saída do inversor a cada 30 s por um período de 300s.
- 19) Reduzir a frequência da rede para 60 Hz (P_8).
- 20) Medir e registrar a potência de saída do inversor a cada 30 s (começando no momento em que a frequência voltou para 60 Hz) até que a potência de saída do INVERSOR retorne para o valor medido no passo 5). A Fig. 49 ilustra os pontos de medição do passo 5) ao 17).

Figura 49 – Representação gráfica do controle da potência ativa em sobrefrequência.



Fonte: Pereira (2016), alterado pelo autor.

- 21) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico para o inversor fornecer 50% da sua potência CA nominal e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min. O fator de forma e a tensão de entrada são arbitrários.
- 22) Repetir do passo 5) ao 18.

TESTE: O inversor é considerado em conformidade se satisfazer as seguintes exigências:

- a) A diferença entre os valores de potência ativa medidos e os valores esperados está dentro da tolerância de $\pm 2,5\%$ da potência nominal do inversor.
- b) O tempo necessário para o inversor começar a aumentar a potência ativa injetada, após a redução da frequência da rede, é maior ou igual o limite estabelecido na ABNT NBR 16149. Segundo esta norma, o sistema fotovoltaico só deve aumentar a potência ativa injetada quando a frequência da rede retornar para a faixa $60 \text{ Hz} \pm 0,05 \text{ Hz}$, por mínimo 300 s.
- c) O gradiente de elevação da potência ativa injetada é inferior ao limite estabelecido na ABNT NBR 16149. Segundo esta norma, o gradiente de elevação da potência ativa injetada na rede deve ser de até 20% de P_M por minuto.

A.8 Religamento automático fora de fase

O sistema fotovoltaico deve ser capaz de suportar religamento automático fora de fase na pior condição possível (em oposição de fase).

O procedimento a ser realizados para este teste é descrito abaixo:

- 1) Conectar o inversor aos emuladores de gerador fotovoltaico, rede elétrica e carga eletrônica, e em seguida, acoplar os instrumentos de medição.
- 2) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico para o inversor fornecer 100% da potência CA nominal. O fator de forma e a tensão são arbitrários.
- 3) Configurar o emulador de rede elétrica para operar na tensão nominal de ensaio a 60 Hz.
- 4) Configurar o emulador de carga eletrônica para absorver até 110% da potência CA máxima do inversor, a 60 Hz e a tensão nominal de ensaio.
- 5) Fechar os contatos dos relés pelo cDAQ, seguindo a ordem de conexão ao inversor sugerida pelo fabricante e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min.
- 6) Deixar o sistema operar por pelo menos 5 min ou o tempo necessário para estabilizar a temperatura interna do inversor.

OBS : na interface do labVIEW existe uma representação gráfica indicando a temperatura no inversor.

- 7) Aplicar um deslocamento no ângulo de fase da tensão igual a 90° e esperar o tempo de reconexão, caso o inversor desconecte-se.
- 8) Medir e registrar a corrente de saída do inversor.

OBS : no monitor do computador é possível visualizar os espectros de frequências dos sinais de onda de tensão e corrente no LabVIEW medidos no emulador da rede elétrica ou na saída CA do inversor. Esses sinais são os mesmos, pois quando o relé K2 e o relé K3 estiverem acionados, o barramento entre eles será o mesmo. A partir desses sinais pode-se medir a corrente de saída do inversor após um deslocamento no ângulo de fase.

- 9) Aplicar um deslocamento no ângulo de fase da tensão igual a 180° .
- 10) Medir e registrar a corrente de saída do inversor.

NOTA: Pode ser que as proteções do inversor atuem após a aplicação do deslocamento do ângulo de fase e que seja necessária a troca de fusíveis.

TESTE: o inversor é considerado em conformidade se a corrente de saída estiver dentro dos parâmetros normais de funcionamento.

A.9 Modulação de potência ativa

A potência ativa limitada pelo comando externo deve ser atingida no máximo dentro de 1 min após o recebimento do sinal, com tolerância de $\pm 2,5\%$ da potência nominal do sistema, respeitando as limitações da potência de entrada do sistema fotovoltaico.

A limitação de potência ativa injetada na rede, por meio de sinal de corrente externo, deve ser ensaiada conforme as especificações de recepção e processamento de sinal fornecidas pelo fabricante do inversor. É de inteira responsabilidade do fabricante do inversor fornecer uma forma de envio, recepção e processamento do sinal de controle externo, para realização de ensaio.

O procedimento a ser realizados para este teste é descrito abaixo:

- 1) Conectar o inversor aos emuladores de gerador fotovoltaico, rede elétrica e carga eletrônica, e em seguida, acoplar os instrumentos de medição.
- 2) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico para o inversor fornecer 100% da potência CA nominal. O fator de forma e a tensão são arbitrários.
- 3) Configurar o emulador de rede elétrica para operar na tensão nominal de ensaio a 60 Hz.
- 4) Configurar o emulador de carga eletrônica para absorver até 110% da potência CA máxima do inversor, a 60 Hz e a tensão nominal de ensaio.
- 5) Fechar os contatos dos relés pelo cDAQ, seguindo a ordem de conexão ao inversor sugerida pelo fabricante e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min.
- 6) Após 1 min de operação, enviar um comando externo para o inversor reduzir 10% da potência ativa de saída.
- 7) Esperar 1 min, medir e registrar a potência ativa de saída do inversor.

OBS : no monitor do computador é possível visualizar os espectros de frequências dos sinais de onda de tensão e corrente no LabVIEW medidos no emulador da rede elétrica ou na saída CA do inversor. Esses sinais são os mesmos, pois quando o relé K2 e o relé K3 estiverem acionados, o barramento entre eles será o mesmo. A partir desses sinais pode-se medir a potência ativa de saída multiplicando-se os valores eficazes dos sinais de tensão e corrente pelo cosseno da diferença de fase entre eles.

- 8) Repetir do passo 5) ao 6) 8 vezes.

TESTE: o inversor é considerado em conformidade se a diferença entre os valores de potência medidos e os valores esperados estiver dentro da tolerância de $\pm 2,5\%$ da potência nominal do inversor.

A.10 Modulação de potência reativa

A potência reativa exigida pelo telecomando deve ser atingida no máximo dentro de 10 s após o recebimento do sinal, com tolerância de $\pm 2,5\%$ da potência nominal do sistema.

O comando de potência reativa por meio de sinal controle externo deve ser ensaiada conforme as especificações de recepção e processamento de sinal fornecidas pelo fabricante do inversor. É de inteira responsabilidade do fabricante do inversor fornecer uma forma de envio, recepção e processamento do sinal de controle externo, para realização de ensaio.

O procedimento a ser realizados para este teste é descrito abaixo:

- 1) Conectar o inversor aos emuladores de gerador fotovoltaico, rede elétrica e carga eletrônica, e em seguida, acoplar os instrumentos de medição.
- 2) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico para o inversor fornecer 50% da potência CA nominal. O fator de forma e a tensão são arbitrários.
- 3) Configurar o emulador de rede elétrica para operar na tensão nominal de ensaio a 60 Hz.
- 4) Configurar o emulador de carga eletrônica para absorver até 110% da potência CA máxima do inversor, a 60 Hz e a tensão nominal de ensaio.
- 5) Fechar os contatos dos relés pelo cDAQ, seguindo a ordem de conexão ao inversor sugerida pelo fabricante e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min.
- 6) Após 1 min de operação, enviar um comando externo para o inversor operar com potência reativa indutiva igual a 0,4358 (para inversor com potência superior a 6 kW) vez a potência ativa nominal.
- 7) Esperar 10 seg, medir e registrar a potência reativa de saída do inversor.

OBS : no monitor do computador é possível visualizar os espectros de frequências dos sinais de onda de tensão e corrente no LabVIEW medidos no emulador da rede elétrica ou na saída CA do inversor. Esses sinais são os mesmos, pois quando o relé K2 e o relé K3 estiverem acionados, o barramento entre eles será o mesmo. A partir desses sinais pode-se medir a potência reativa de saída multiplicando-se os valores eficazes dos sinais de tensão e corrente pelo seno da diferença de fase entre eles.

- 8) Enviar um comando externo para o inversor operar com potência reativa nula.
- 9) Esperar 10 s, medir e registrar a potência reativa de saída do inversor.

- 10) Enviar um comando externo para o inversor operar com potência reativa capacitiva igual a 0,4358 (para inversor com potência superior a 6 kW) vez a potência ativa nominal.
- 11) Esperar 10 s, medir e registrar a potência reativa de saída do inversor.

TESTE: o inversor é considerado em conformidade se a diferença entre os valores de potência medidos e os valores esperados estiver dentro da tolerância de $\pm 2,5\%$ da potência nominal do inversor.

A.11 Desconexão do sistema fotovoltaico da rede

O sistema fotovoltaico deve ser capaz de desconectar-se/reconectar-se da rede elétrica por meio de telecomandos.

É de inteira responsabilidade do fabricante do inversor fornecer uma forma de envio, recepção e processamento do sinal de controle externo, para realização de ensaio.

O procedimento a ser realizados para este teste é descrito abaixo:

- 1) Conectar o inversor aos emuladores de gerador fotovoltaico, rede elétrica e carga eletrônica, e em seguida, acoplar os instrumentos de medição.
- 2) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico para o inversor fornecer 100% da potência CA nominal. O fator de forma e a tensão são arbitrários.
- 3) Configurar o emulador de rede elétrica para operar na tensão nominal de ensaio a 60 Hz.
- 4) Configurar o emulador de carga eletrônica para absorver até 110% da potência CA máxima do inversor, a 60 Hz e a tensão nominal de ensaio.
- 5) Fechar os contatos dos relés pelo cDAQ, seguindo a ordem de conexão ao inversor sugerida pelo fabricante e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min.
- 6) Após 1 min de operação, enviar um comando externo para o inversor desconectar da rede elétrica.
- 7) Esperar 1 min, medir e registrar a potência ativa de saída do inversor.

OBS : no monitor do computador é possível visualizar os espectros de frequências dos sinais de onda de tensão e corrente no LabVIEW medidos no emulador da rede elétrica ou na saída CA do inversor. Esses sinais são os mesmos, pois quando o relé K2 e o relé K3 estiverem acionados, o barramento entre eles será o mesmo. A partir desses sinais pode-se medir a potência ativa de saída multiplicando-se os valores eficazes dos sinais de tensão e corrente pelo cosseno da diferença de fase entre eles.

- 8) Após 1 min do evento de desconexão do inversor, enviar um comando externo para o inversor reconectar à rede elétrica.
- 9) Esperar 1 min, medir e registrar a potência ativa de saída do inversor.

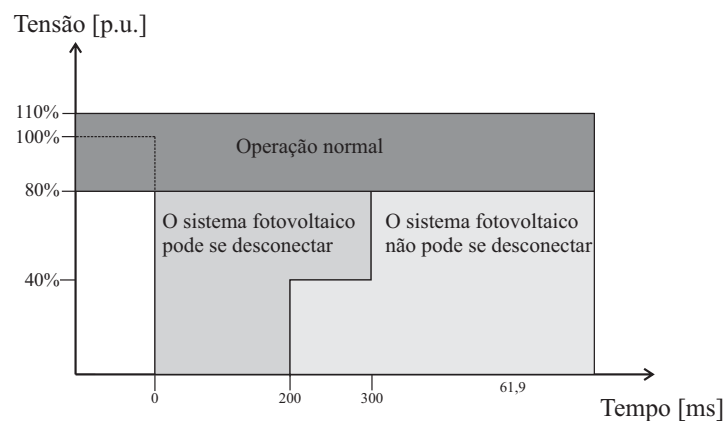
TESTE: o inversor é considerado em conformidade se desconectar-se e reconectar-se da rede após o comando externo correspondente.

A desconexão/reconexão deve ser realizada em no máximo 1 min após o recebimento do telecomando.

A.12 Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede (*fault ride through-FRT*)

Para evitar desconexão indevida da rede casos de afundamento de tensão, o sistema fotovoltaico com potência nominal maior ou igual a 6 kW deve continuar satisfazendo os requisitos representados graficamente na Fig. 50.

Figura 50 – Requisitos de suportabilidade a subtensões decorrentes de faltas na rede (*fault ride through-FRT*).



Fonte: Pereira (2016), alterado pelo autor.

Na área cinza à direita, o sistema fotovoltaico não pode se desconectar da rede, porém é permitido cessar o fornecimento de energia.

Se a tensão retornar para a faixa de operação normal (-20% a +10% da tensão nominal), o sistema fotovoltaico deve retornar a injetar a potência ativa e reativa de antes da falta, com tolerância de $\pm 10\%$ da potência nominal do sistema fotovoltaico, dentro de 200 ms.

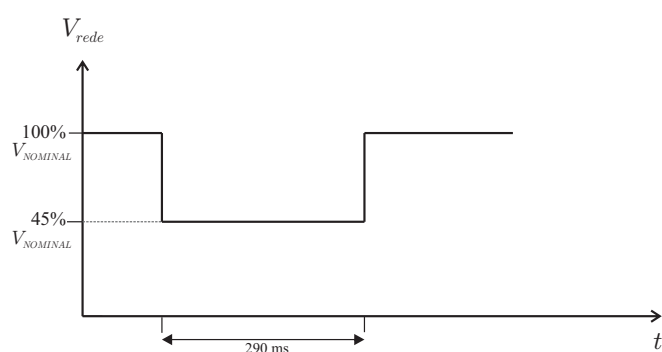
Se a tensão for restaurada, mas permanecer na faixa de 80% e 90% da tensão nominal, é permitida uma redução da potência injetada com base na corrente máxima do inversor.

O procedimento a ser realizados para este teste é descrito abaixo:

- 1) Conectar o inversor aos emuladores de gerador fotovoltaico, rede elétrica e carga eletrônica, e em seguida, acoplar os instrumentos de medição.
- 2) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico para o inversor fornecer 100% da potência CA nominal. O fator de forma e a tensão são arbitrários.
- 3) Configurar o emulador de rede elétrica para operar na tensão nominal de ensaio a 60 Hz.

- 4) Configurar o emulador de carga eletrônica para absorver até 110% da potência CA máxima do inversor, a 60 Hz e a tensão nominal de ensaio.
- 5) Fechar os contatos dos relés pelo cDAQ, seguindo a ordem de conexão ao inversor sugerida pelo fabricante e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min.
- 6) Após 5 min de operação, simular uma falta trifásica simétrica na rede, de forma que a tensão caia para 5% do valor original de ensaio por um tempo de 190 ms e depois retorne à tensão para o valor nominal, conforme mostrado na Fig. 51.

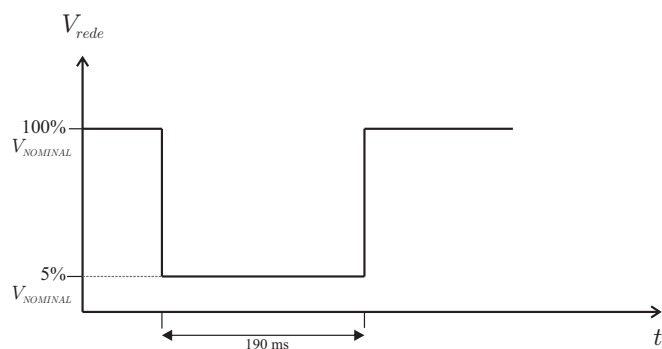
Figura 51 – Falta trifásica simétrica (5%).



Fonte: Pereira (2016), alterado pelo autor.

- 7) Medir e registrar de cada fase, a tensão da rede (fase neutro), a corrente e as potências ativa e reativa de saída do inversor durante todo o período de aplicação da falta.
- 8) Simular uma falta trifásica simétrica na rede, de forma que a tensão caia 45% do valor nominal de ensaio por um tempo de 290 ms e depois retorne à tensão para o valor nominal de ensaio, conforme mostrado na Fig. 52.

Figura 52 – Falta trifásica simétrica (45%).



Fonte: Pereira (2016), alterado pelo autor.

- 9) Medir e registrar de cada fase, a tensão da rede (fase neutro), a corrente e as potências ativa e reativa de saída do inversor durante todo o período de aplicação da falta.
- 10) Simular uma falta bifásica assimétrica na rede, de forma que a tensão caia 5% do valor nominal de ensaio por um tempo de 190 ms e depois retorne à tensão para o valor nominal de ensaio, conforme mostrado na Fig. 51.
- 11) Medir e registrar de cada fase, a tensão da rede (fase neutro), a corrente e as potências ativa e reativa de saída do inversor durante todo o período de aplicação da falta.
- 12) Simular uma falta bifásica assimétrica na rede, de forma que a tensão caia 45% do valor nominal de ensaio por um tempo de 290 ms e depois retorne à tensão para o valor nominal de ensaio, conforme mostrado na Fig. 52.
- 14) Medir e registrar de cada fase, a tensão da rede (fase neutro), a corrente e as potências ativa e reativa de saída do inversor durante todo o período de aplicação da falta.

Durante a falta assimétrica bifásica, a tensão residual e os ângulos de fase das três fases devem atender aos valores mostrados na Tab. 5.

Tabela 5 – Especificações de falta assimétrica.

Falta	Tensão fase neutro (% da tensão nominal)			Ângulo de fase		
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
5%	87% \pm 5%	87% \pm 5%	5% \pm 5%	27°	-147°	123°
45%	90% \pm 5%	90% \pm 5%	45% \pm 5%	15°	-135°	115°

Fonte: Pereira (2016).

TESTE: o inversor é considerado em conformidade se atender aos requisitos de suportabilidade a sobtensões decorrentes de faltas na rede (*fault ride through-FRT*) especificados na ABNT NBR 16149.

A.13 Proteção contra inversão de polaridade

O propósito deste ensaio é garantir que o inversor não causará danos ao instalador e não será avariado em caso de inversão de polaridade do gerador fotovoltaico.

O procedimento a ser realizados para este teste é descrito abaixo:

- 1) Conectar o inversor aos emuladores de gerador fotovoltaico, rede elétrica e carga eletrônica, e em seguida, acoplar os instrumentos de medição.
- 2) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico para o inversor fornecer 100% da potência CA nominal. O fator de forma e a tensão são arbitrários.
- 3) Configurar o emulador de rede elétrica para operar na tensão nominal de ensaio a 60 Hz.
- 4) Configurar o emulador de carga eletrônica para absorver até 110% da potência CA máxima do inversor, a 60 Hz e a tensão nominal de ensaio.
- 5) Comutar os contatos do relé K5, para realizar a inversão das polaridades.
- 6) Fechar os contatos dos relés pelo cDAQ, seguindo a ordem de conexão ao inversor sugerida pelo fabricante e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min.
- 7) Abrir os contatos dos relés pelo cDAQ, trocar fusíveis se necessário.
- 8) Reconectar o gerador fotovoltaico na polaridade correta, retirar o comando dado para o relé K5 no passo 5). Aguarde 30 s para continuar.
- 9) Verificar se o inversor não foi danificado.

TESTE: o inversor é considerado em conformidade se operar por 5 minutos e for constatado, através de inspeção visual e da verificação do fluxo de potência para rede, que o mesmo está operando de forma correta.

A.14 Sobrecarga do Inversor

O propósito deste ensaio é garantir que o inversor não será avariado em caso de sobrecarga, e que o mesmo continue fornecendo energia mesmo com limitação da potência de saída.

O procedimento a ser realizados para este teste é descrito abaixo:

- 1) Conectar o inversor aos emuladores de gerador fotovoltaico, rede elétrica e carga eletrônica, e em seguida, acoplar os instrumentos de medição.
- 2) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico para o inversor fornecer 120% da potência CA nominal. O fator de forma e a tensão são arbitrários.
- 3) Configurar o emulador de rede elétrica para operar na tensão nominal de ensaio a 60 Hz.
- 4) Configurar o emulador de carga eletrônica para absorver até 130% da potência CA máxima do inversor, a 60 Hz e a tensão nominal de ensaio.
- 5) Fechar os contatos dos relés pelo cDAQ, seguindo a ordem de conexão ao inversor sugerida pelo fabricante e esperar a estabilização do SPMP. Se a estabilização do SPMP não for observada, esperar pelo menos 5 min.
- 6) Operar o INVERSOR por 15 minutos, mesmo que ele limite a potência de saída ou desconecte.

OBS : no monitor do computador é possível visualizar os espectros de frequências dos sinais de onda de tensão e corrente no LabVIEW medidos no emulador da rede elétrica ou na saída CA do inversor. Esses sinais são os mesmos, pois quando o relé K2 e o relé K3 estiverem acionados, o barramento entre eles será o mesmo.

- 7) Configurar o emulador de gerador fotovoltaico para o inversor fornecer a potência nominal de saída.
- 8) Verificar se o inversor continua operando normalmente.

TESTE: o inversor é considerado em conformidade se for constatado, através de inspeção visual e da verificação do fluxo de potência para rede, que o mesmo está operando normalmente.