UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Ricardo Jochann Franceschi Bortolini

ENSAIO AUTOMATIZADO DE MEDIÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

Santa Maria, RS
2018

Ricardo Jochann Franceschi Bortolini

ENSAIO AUTOMATIZADO DE MEDIÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Michels

Santa Maria, RS
2018

Bortolini, Ricardo Jochann Franceschi
ENSAIO AUTOMATIZADO DE MEDIÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE / Ricardo Jochann Franceschi Bortolini.- 2018.
145 p.; 30 cm

Orientador: Leandro Michels
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2018

1. Inversor fotovoltaico 2. eficiência de inversores 3. ensaio automatizado I. Michels, Leandro II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2018

Todos os direitos autorais reservados a Ricardo Jochann Franceschi Bortolini. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.
E-mail: rjochann@gmail.com.br

Ricardo Jochann Franceschi Bortolini

ENSAIO AUTOMATIZADO DE MEDIÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 16 de julho de 2018:

_____

Prof. Leandro Michels, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

_____

Prof. Lucas Vizzotto Bellinaso, Dr. (UFSM)

_____

Prof. Marcelo Pinho Almeida, Dr. (IEE-USP)

Santa Maria, RS
2018

Dedico esse trabalho à minha família, em especial à minha mãe Clea e ao meu pai Anilton, por todo o apoio que sempre deram durante toda a minha jornada. Também dedico à minha namorada, Ana Paula, pelo amor e companheirismo em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho só foi possível graças colaboração de diversas pessoas, as quais eu gostaria de agradecer.

A Deus, por ser a força maior do universo e sem o qual nada seria possível.

À família, que é a base de tudo em minha vida, em especial aos meus pais, Anilton e Clea, que sempre me apoiaram e acompanharam em toda a minha trajetória, o meu muito obrigado.

À minha namorada, Ana Paula, por sempre ter se mostrado atenciosa e companheira, mesmo nos momentos difíceis, quando as coisas pareciam não funcionar ou os resultados não eram alcançados.

A todos os amigos pelos momentos de lazer e descontração, que servem para recarregar nossas forças e seguir em frente.

Ao também amigo e orientador, Prof. Leandro Michels, pelas oportunidades disponibilizadas, pela excelente orientação, desde os tempos da graduação, e pela amizade mantida ao longo desses anos.

Aos outros professores que participaram de forma direta ou indireta desse trabalho. Professores Lucas V. Bellinaso, Hélio L. Heys, Cassiano Rech, Morgana Pizzolato, Rafael Beltrame, José R. Pinheiro, Jorge R. Massing e demais professores e pesquisadores do GEPOC.

Aos companheiros e amigos do laboratório pelo auxilio no desenvolvimento do projeto, e por todo suporte prestado durante todo esse tempo, que tornaram esse projeto realidade. Henrique H. Figueira, Débora Steinhorst, Lucas G. Gularte, Igor Bitencourt, Mateus Pires, Alexandre Ruschel, Nícolas Basquera, Rodrigo Oliveira, Ana Paula Marchesan, Manuella Farias, Élen Brodt, Paulo Roberto, Paulo do Carmo, Ellen Debastiani, Alisson Mazzorani, Raul Fröhlich, Charles Haab, entre outros.

O autor agradece ao INCTGD, CAPES, CNPq e FAPERGS pelo apoio financeiro recebido para o desenvolvimento desse trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio do INCT e suas agências financiadoras (CNPq processo 465640/2014-1, CAPES processo No. 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001.

“Não confunda derrotas com fracasso nem vitórias com sucesso. Na vida de um campeão sempre haverá algumas derrotas, assim como na vida de um perdedor sempre haverá vitórias. A diferença é que, enquanto os campeões crescem nas derrotas, os perdedores se acomodam nas vitórias”.

Roberto Shinyashiki

RESUMO

ENSAIO AUTOMATIZADO DE MEDIÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

AUTOR: Ricardo Jochann Franceschi Bortolini
ORIENTADOR: Prof. Dr. Leandro Michels

O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de uma bancada de ensaios automatizada para mensuração da eficiência de inversores fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Foi realizado um estudo detalhado das normas de medição de eficiência energética de inversores fotovoltaicos de abrangência mundial, sendo elas a norma de eficiência CEC (*California Energy Commission)*, a EN 50530 e a IEC 61683, onde as normas foram detalhadas e comparadas entre si, com relação as restrições apresentadas para os ensaios e os equipamentos utilizados por cada uma delas, como simuladores de painéis fotovoltaicos, fontes simuladoras de rede c.a., e equipamentos de medida. Também foi desenvolvido um software para automação dos ensaios em ambiente LabView® para realização dos ensaios, aquisição dos dados, cálculos das incertezas de medição e geração do relatório de ensaio.

Palavras-chave: Inversor fotovoltaico. Eficiência de inversores. Ensaio automatizado

ABSTRACT

AUTOMATED ENERGY EFFICIENCY MEASUREMENT TEST OF GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC INVERTERS

AUTHOR: Ricardo Jochann Franceschi Bortolini
ADVISOR: Prof. Dr. Leandro Michels

The objective of this work is the development of an automated test bench to measure the energy efficiency of grid connected photovoltaic inverters. A detailed study of the energy efficiency measurements standards for photovoltaic inverters with worldwide coverage was carried out, the standards are CEC (California Energy Commission), EN 50530 and IEC 61683. The standards were detailed and compared with each other, regarding the restrictions presented for the tests and equipment used by each of them, such as photovoltaic array simulators, AC grid simulators and measurement equipment. Also, a software for the automation of the tests was developed in LabView® environment to carry out the tests, data acquisition, measurement uncertainties calculation and test report generation.

Keywords: Photovoltaic inverter. Inverter efficiency. Automated test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Histórico da evolução da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos no mundo 27
Figura 2 - Sistemas fotovoltaicos isolados e conectados à rede. 29
Figura 3 - Consumo de energia real e consumo de energia hipotético sem a adoção de políticas de eficiência energética no período de 1973 - 1998 nos 11 maiores membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) 40
Figura 4- Esquemático da bancada de ensaios recomendada pela norma IEC 61683:1999 45
Figura 5 - Exemplo de carga reativa 47
Figura 6 - Exemplo de carga não linear 47
Figura 7 - Exemplo de carga complexa 48
Figura 8 - Ponto ideal de medida da temperatura ambiente 59
Figura 9 - Exemplo de relatório de ensaio CEC com dados de inversor hipotético 67
Figura 10 – Exemplo de conjuntos de dados registrados e apresentação no relatório CEC do mesmo inversor hipotético 67
Figura 11- Bancada de ensaios 70
Figura 12 - Exemplo de uma sequência de ensaio entre média e alta irradiação. 80
Figura 13 - Fonte CA trifásica modelo FCATQ 10000-60-40-PFC55450 86
Figura 14 - Fonte Keysight N8957APM: (A) Vista frontal; (B) Vista traseira 88
Figura 15 - Característica da curva de saída da fonte N8957APV 89
Figura 16 - ZIMMER LMG 670: (A) Vista frontal; (B) Vista traseira, mostrando os canais 91
Figura 17 - Sensor de corrente PTC-200 para LMG 670 91
Figura 18 - Câmara térmica desenvolvida, equipamento omitido devido ao contrato de confidencialidade 93
Figura 19 - Imagem panorâmica da entrada da área de ensaios 94
Figura 20 - Imagem panorâmica da área de ensaios 94
Figura 21 - Bancada de ensaios para 2 inversores. 95
Figura 22 - Área de equipamentos 95
Figura 23 - Tela inicial do programa: Dados do Inversor 96
Figura 24 – Tela de calibração dos equipamentos 98
Figura 25 - Tela da norma EN 50530, ensaio de SPMP em condição estática 99
Figura 26 - Tela da norma EN 50530 relativo ao ensaio de SPMP em condição dinâmica 101
Figura 27 - Tela da norma IEC 61683 103

Figura 28 – Tela para realização dos ensaios da eficiência CEC 105
Figura 29 - Diagrama simplificado da máquina de estados do programa desenvolvido 108
Figura 30 - Análise das contribuições de incerteza para potência CA e CC 118
Figura 31 - Análise das contribuições de incerteza para a medida de eficiência 119
Figura 32 – Resultados dos valores de eficiência e incerteza para cada ponto de potência medido durante o ensaio 120
Figura 33 - Resultado do valor de incerteza para eficiência Euro 120
Figura 34 - Resultados do ensaio de eficiência de conversão e de SPMP em condição estática 122
Figura 35 - Resultados do ensaio de eficiência de SPMP em condição dinâmica 122
Figura 36 – Relatório do ensaio de eficiência de conversão e SPMP em condição estática . 123
Figura 37 - Relatório do ensaio de eficiência de SPMP em condição dinâmica 124
Figura 38 - Resultados dos ensaios de eficiência CEC 126
Figura 39 - Relatório dos ensaios de eficiência CEC 127
Figura 40 - Dados do ensaio de eficiência CEC 128
Figura 41 - Temperatura mínima do dissipador durante os ensaios de eficiência CEC 129
Figura 42 - Temperatura máxima do dissipador durante os ensaios de eficiência CEC 129
Figura 43 - Temperatura ambiente máxima e mínima durante o ensaio de eficiência CEC.. 129
Figura 44 - Resultados dos ensaios da norma IEC 61683 130
Figura 45 - Relatório dos ensaios da norma IEC 61683 131
Figura 46 - Primeiro estado, Inicialização 133
Figura 47 - Segundo estado, Curva PV Sandia 134
Figura 48 - Terceiro estado, Estabilização 135
Figura 49 - Quarto estado, Conexão 135
Figura 50 - Quinto estado, Cálculo Máxima Potência Contínua (Sandia) 136
Figura 51 - Sexto estado, cálculo da eficiência CEC 137
Figura 52 - Sétimo estado, Cálculo do autoconsumo noturno 138
Figura 53 - Oitavo estado, emissão do relatório 138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições de ensaios de eficiência IEC 61683-1999 50
Tabela 2 - Tolerâncias de eficiência para conversores estáticos segundo a norma IEC 61683:1999 51
Na versão 2005 do *CEC guidelines*, atualmente em vigor, os requisitos de incerteza apresentados na Tabela 3 são necessários para os equipamentos de medida.Tabela 3 - Requisitos de máxima incerteza para equipamentos de medida - CEC Guidelines 2005 54
Tabela 4 - Requisitos de máxima incerteza para equipamentos de medida - Sandia Test Protocol 2015 58
Tabela 5 - Dados de placa inversor hipotético 1 62
Tabela 6 - Dados de placa inversor hipotético 2 62
Tabela 7 - Condições de ensaio para medição de eficiência de conversão 64
Tabela 8 - Tolerâncias para os pontos de potência no ensaio de eficiência de conversão 64
Tabela 9 - Fatores de ponderação para cálculo da eficiência ponderada 68
Tabela 10 - Requisitos gerais da curva I/V característica do simulador FV 71
Tabela 11- Parâmetros para simulação de arranjos fotovoltaicos 71
Tabela 12 – Condições de ensaio para avaliação da eficiência do algoritmo de SPMP em condição estática 76
Tabela 13 - Fatores de ponderação para cálculo das eficiências Europeia e Californiana (CEC) 78
Tabela 14 - Sequência de testes de flutuação de baixa irradiação para média irradiação (100 W/m² - 500 W/m²) 81
Tabela 15 - Sequência de testes de flutuação de média irradiação para alta irradiação (300 W/m² - 1000 W/m²) 81
Tabela 16 - Sequência de testes de partida e parada do inversor com rampas lerdas (10 W/m² - 100 W/m²) 82
Tabela 17 - Comparativo de ensaios realizados por cada norma de medição da eficiência energética de inversores fotovoltaicos 83
Tabela 18 - Comparativo de requisitos mínimos da fonte simuladora de rede c.a. para os ensaios de eficiência 85
Tabela 19 - Especificações fonte simuladora c.a. trifásica 86

Tabela 20 - Comparativo de requisitos mínimos da fonte simuladores FV para os ensaios de eficiência 87
Tabela 21 - Especificações resumidas da fonte Keysight N8957APV 89
Tabela 22 - Requisitos mínimos dos equipamentos de medição para realização de ensaios de inversores fotovoltaicos conectados à rede elétrica. 90
Tabela 23 - Especificações resumidas de exatidão do LMG 670 92
Tabela 24 - Resultados das medidas para faixa de 100 % de potência c.a. 117
Tabela 25 - Dados do analisador de energia LMG 670 e escalas utilizadas 117
Tabela 26 - Características do inversor utilizado nos ensaios 121

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 27

1.1 MOTIVAÇÃO 31

1.2 OBJETIVOS 33

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 34

2 NORMATIZAÇÃO DE EFICIÊNCIA EM INVERSORES FOTOVOLTAICOS 35

2.1 EVOLUÇÃO DA NORMATIZAÇÃO DE MEDIÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM INVERSORES FOTOVOLTAICOS 35

2.2 NORMATIZAÇÃO INTERNACIONAL: IEC 61683:1999 44

2.2.1 Base conceitual 44

2.2.2 Requisitos dos equipamentos 45

2.2.2.1 Bancada de ensaios 45

2.2.2.2 Fontes de alimentação c.c. 46

2.2.2.3 Fonte simuladora de rede c.a. 46

2.2.2.4 Cargas resistivas 46

2.2.2.5 Cargas reativas 47

2.2.2.6 Carga não linear 47

2.2.2.7 Carga complexa 48

2.2.3 Requisitos ambientais 48

2.2.4 Procedimento de ensaio 48

2.2.4.1 Ensaios de medida de eficiência energética 48

2.2.4.2 Perdas a vazio 52

2.2.4.3 Perdas em espera 52

2.3 NORMATIZAÇÃO CALIFÓRNIA: EFICIÊNCIA CEC 53

2.3.1 Base conceitual 53

2.3.2 Requisitos dos equipamentos 54

2.3.2.1 Equipamentos de medida 54

2.3.2.2 Fontes de potência c.c., simuladores fotovoltaicos e arranjos fotovoltaicos. 56

2.3.2.3 Fonte simuladora de rede c.a. 56

2.3.2.4 Requisitos dos equipamentos – Performance Test Protocol for Evaluating Inverters Used in Grid-Connected Photovoltaic Systems, versão 2015 57

2.3.3 Requisitos ambientais 58

2.3.3.1 Equipamentos de medida 58

2.3.3.2 Equipamento sob ensaios 58

2.3.4 Procedimento de ensaio 60

2.3.4.1 Máxima potência de saída contínua 61

2.3.4.2 Eficiência de conversão 64

2.3.4.3 Autoconsumo noturno 68

2.4 NORMATIZAÇÃO EUROPEIA: EN 50530:2010/A1:2013 69

2.4.1 Base conceitual 69

2.4.2 Requisitos dos equipamentos 70

2.4.2.1 Bancada de ensaio 70

2.4.2.2 Simulador de arranjo fotovoltaico (simulador FV) 71

2.4.2.3 Fonte de alimentação c.a. 74

2.4.3 Requisitos ambientais 74

2.4.4 Procedimento de ensaio 74

2.4.4.1 Eficiência do SPMP em condição estática e eficiência de conversão 74

2.4.4.2 Eficiência do SPMP em condição dinâmica 78

2.5 ANÁLISE COMPARATIVA DAS NORMAS IEC 61683, EN 50530 E CEC 83

3 BANCADA DESENVOLVIDA PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS AUTOMATIZADOS DE MEDIÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE 84

3.1 FONTE SIMULADORA DE REDE C.A. 84

3.1.1 Requisitos mínimos 84

3.1.2 Equipamento adotado 85

3.2 SIMULADOR DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS 87

3.2.1 Requisitos mínimos 87

3.2.2 Equipamento adotado 88

3.3 ANALISADOR DE ENERGIA 89

3.3.1 Requisitos mínimos 90
3.3.2 Equipamento adotado 91
3.4 CÂMARA TÉRMICA 92
3.4.1 Requisitos mínimos 92
3.4.2 Equipamento adotado 92
3.5 BANCADA DE ENSAIOS 93
4 PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA A AUTOMAÇÃO DOS ENSAIOS 96
4.1 VISÃO GERAL E PRINCIPAIS TELAS 96
4.1.1 Tela inicial: *EUT Data* 96
4.1.1.1 Campo A 97
4.1.1.2 Campo B 97
4.1.1.3 Campo C 97
4.1.1.4 Campo D 97
4.1.1.5 Campo E 98
4.1.2 Calibration Data 98
4.1.2.1 Campo A 99
4.1.2.2 Campo B 99
4.1.3 Test EN 50530: Static MPPT and Conversion Efficiency 99
4.1.3.1 Campo A 100
4.1.3.2 Campo B 100
4.1.3.3 Campo C 100
4.1.3.4 Campo D 100
4.1.4 Test EN 50530: Dynamic MPPT Efficiency 101
4.1.4.1 Campo A 102
4.1.4.2 Campo B 102
4.1.4.3 Campo C 102
4.1.5 Test IEC 61683 103
4.1.5.1 Campo A 103
4.1.5.2 Campo B 104

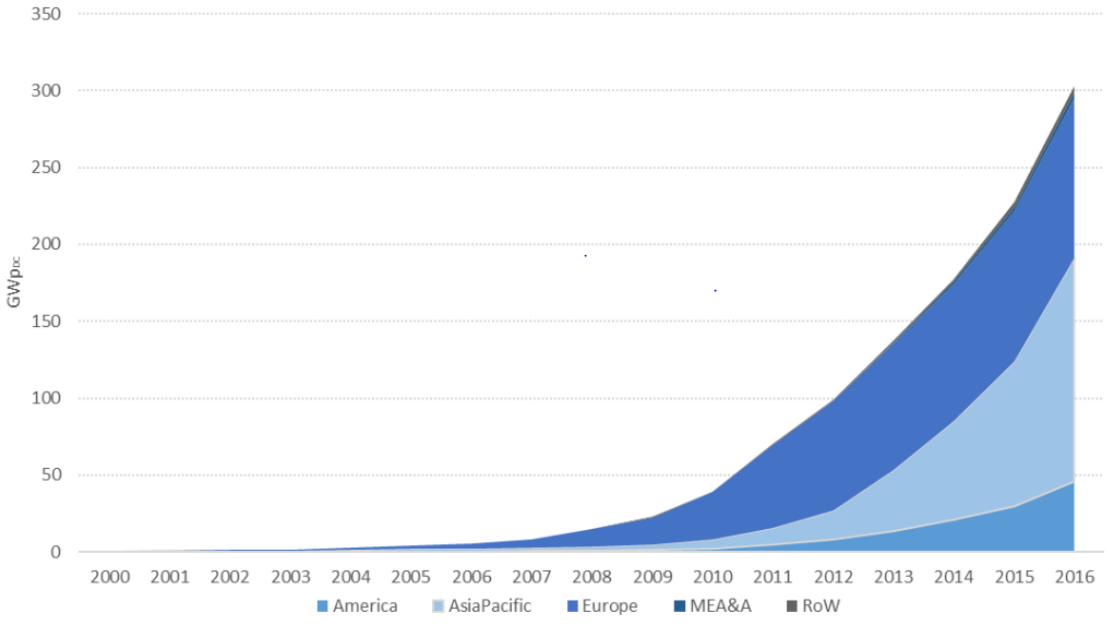
4.1.5.3 Campo C 104
4.1.6 Test CEC Guidelines 2005 104
4.1.6.1 Campo A 105
4.1.6.2 Campo B 105
4.1.6.3 Campo C 106
4.2 ESTRUTURA DO SOFTWARE 107
4.2.1 Estado: Inicialização 109
4.2.2 Estado: Curva Estático 109
4.2.3 Estado: Curva Dinâmico 109
4.2.4 Estado: Curva Sandia 109
4.2.5 Estado: Estabilização 109
4.2.6 Estado: Conexão 110
4.2.7 Estado: Cálculo eficiência IEC 61683 110
4.2.8 Estado: Cálculo perdas em espera 110
4.2.9 Estado: Cálculo perdas vazio 111
4.2.10 Estado: Relatório IEC 61683 111
4.2.11 Estado: Cálculo SPMP estático 111
4.2.12 Estado: Cálculo SPMP Dinâmico 112
4.2.13 Estado: Relatório EN 50530 113
4.2.14 Estado: Cálculo máxima potência 113
4.2.15 Estado: Cálculo eficiência CEC 114
4.2.16 Estado: Autoconsumo noturno 114
4.2.17 Estado: Relatório CEC 115
4.3 ANÁLISE DAS INCERTEZAS 115
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS 121
5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS SEGUINDO A NORMA EN 50530 121
5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE EFICIÊNCIA CEC 125
5.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DA NORMA IEC 61683 130
6 CONCLUSÃO 132
APÊNDICE A – ROTINA DE REALIZAÇÃO DE ENSAIOS 133
Primeiro estado 133

Segundo estado.....133
Terceiro estado.....134
Quarto estado.....135
Quinto estado 136
Sexto estado.....137
Sétimo estado 137
Oitavo estado.....138
REFERÊNCIAS 139

1 INTRODUÇÃO

Desde a primeira célula solar fotovoltaica, desenvolvida pela Bell Laboratories em 1954 (CHAPIN; FULLER; PEARSON, 1954), a tecnologia tem se desenvolvido e se tornado cada vez mais importante para o cenário energético mundial, que pode ser observado através do crescimento exponencial da capacidade instalada, entre os anos de 2006 e 2016, conforme demonstrado na Figura 1. Em 2016, com uma capacidade instalada total de 303 GW_{pcc}, os sistemas fotovoltaicos supriram cerca de 1,8% de toda eletricidade consumida no mundo, sendo que em alguns países, como Honduras, esse percentual chegou a 12,5% da demanda total de energia em 2016, segundo dados do relatório S*napshot of Global Photovoltaic Markets* da Agência de Energia Internacional (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2017).

Figura 1 – Histórico da evolução da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos no mundo



Fonte: (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2017)

Inicialmente, os maiores incentivos para produção de energias renováveis eram a redução do impacto ambiental causado pela geração de energia através de combustíveis fósseis (redução das emissões de CO_2) e a redução da dependência de combustíveis fósseis por parte das grandes potências, como resposta as crises de energia de 1970 e 1980. Porém, o custo desse tipo de geração, ainda era alto se comparado com a geração de energia através de combustíveis

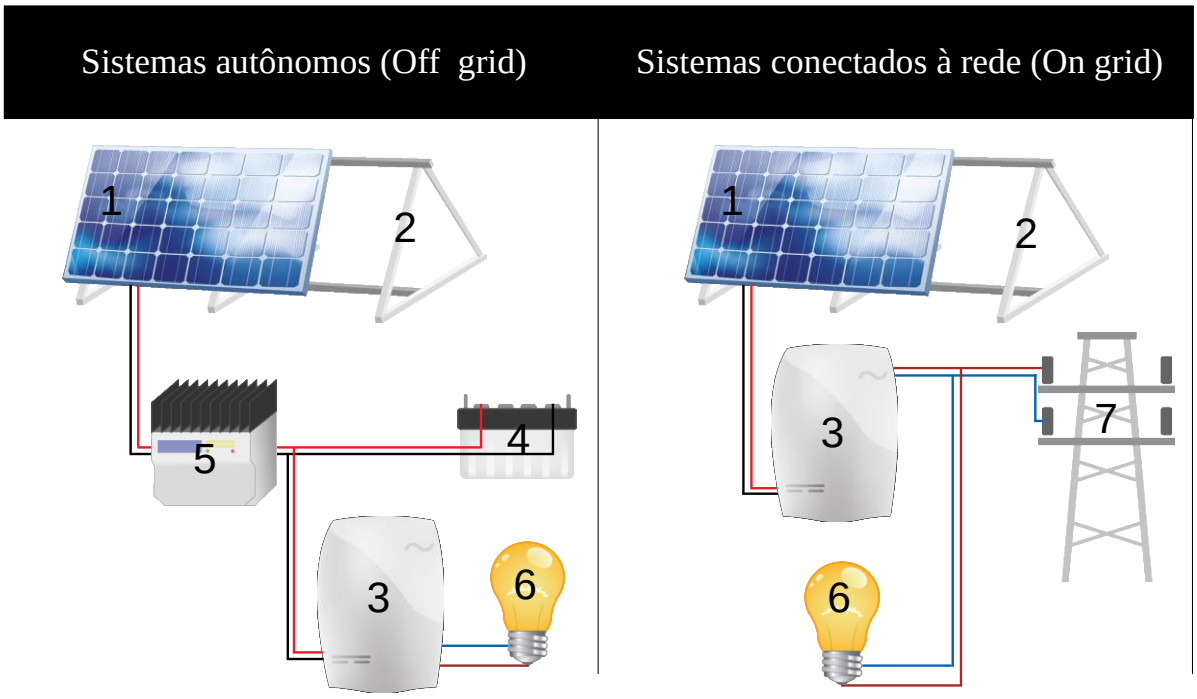
fósseis. Segundo dados da Agência Internacional de Energias Renováveis (*International Renewable Energy Agency* – IRENA), o custo de produção de energia através de combustíveis fósseis variou, em 2017, entre $U\$_{2016}$ 0,05/kWh até $U\$_{2016}$ 0,17/kWh, normalizando o valor do dólar para o valor equivalente ao ano de 2016. O custo médio de geração a partir de fontes fotovoltaicas no mesmo ano (2017) foi de $U\$_{2016}$ 0,10/kWh e estima-se que até 2020 esse custo caia para $U\$_{2016}$ 0,06/kWh. O que demonstra que a geração de energia fotovoltaica já é um investimento financeiramente atraente, e tende a se tornar cada vez mais rentável, o que impulsiona ainda mais a utilização dessa tecnologia (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA), 2018).

Sistemas fotovoltaicos são classificados em dois grandes grupos; sistemas conectados à rede elétrica (*on-grid*) e sistemas isolados (*off-grid*). Os dois sistemas possuem algumas diferenças estruturais, demonstradas na Figura 2, e são constituídos pelos seguintes itens:

- **Módulos fotovoltaicos (1)**: Coletam a luz do sol e a transformam em energia elétrica de corrente contínua através do efeito fotovoltaico.
- **Estrutura de fixação (2)**: Dispositivos para suporte mecânico dos módulos e que possibilitam o direcionamento dos mesmos para uma melhor orientação em relação ao sol. Podem ser estruturas fixas, que direcionam os módulos sempre na mesma orientação, ou estruturas móveis, que possibilitam o rastreamento solar.
- **Inversores fotovoltaicos (3)**: Convertem e condicionam a energia elétrica em corrente contínua, gerada pelos módulos fotovoltaicos, em corrente alternada. Podem operar como fontes de tensão no caso de inversores isolados ou como fontes de corrente para inversores conectados à rede elétrica. Adicionalmente, eles possuem dispositivos para garantir a segurança dos usuários, assim como realizam a compatibilização da operação fotovoltaica com a rede elétrica (em sistema conectados à rede).
- **Baterias (4)**: Em sistemas isolados normalmente são utilizadas baterias para garantir um suprimento constante de energia elétrica durante os períodos em que não há luz solar. Sistemas conectados à rede elétrica não precisam de baterias pois utilizam a própria rede elétrica como sistema de armazenamento, injetando na rede a energia excedente e absorvendo da rede a energia necessária nos períodos em que não há luz solar. Apesar de não serem necessárias, sistemas conectados à rede podem utilizar baterias para desenvolver funções extras como, por exemplo, permitir que o inversor opere como uma fonte ininterrupta de energia (UPS), alimentando cargas críticas durante uma falha da rede elétrica

- **Controlador de carga (5)**: Tem a função de realizar as operações de carga e descarga das baterias, controlando os níveis de tensão e corrente aplicados e o estado de carga das baterias, garantindo assim o correto funcionamento e o aumento da vida útil das mesmas. Essa função pode ser implementada dentro do próprio inversor ou ser realizada por um equipamento específico.
- **Cargas c.a. (6)**: São os equipamentos eletroeletrônicos que consomem energia elétrica em corrente alternada, como televisores, geladeiras e chuveiros, por exemplo.
- **Rede elétrica (7)**: É a rede elétrica convencional fornecida pela concessionaria de energia. Nos sistemas *On grid* ela fornece a energia necessária para as cargas quando o inversor não fornece potência suficiente, e absorve a energia excedente quando a potência fornecida pelo inversor é maior do que a consumida pelas cargas.

Figura 2 – Componentes dos sistemas fotovoltaicos isolados e conectados à rede.



Fonte: Próprio autor

A indústria fotovoltaica já atingiu um estágio de maturidade técnica. Isso fica evidenciado através de uma das formas mais adequadas para mensuração da maturidade técnica de uma determinada indústria, que é a definição de procedimentos de ensaios padronizados, para estabelecer e verificar níveis mínimos de segurança, confiabilidade, qualidade e desempenho (BOWER et al., 2004).

Em Figueira (2016) são apresentadas diversas normas que tratam de segurança, confiabilidade e compatibilidade dos sistemas fotovoltaicos com a rede elétrica. O atendimento de normas de compatibilidade com a rede pelos inversores fotovoltaicos são compulsórias em praticamente todos os países, devido aos riscos envolvidos na conexão de equipamentos geradores de energia à rede elétrica. No caso de normas de desempenho e eficiência, aplicáveis aos módulos e inversores, normalmente estas não são compulsórias, mas são muito importantes para que o mercado possa realizar a qualificação técnica de produtos e para suporte em projeto. São exemplos de normas vigentes relacionadas à eficiência e ao desempenho de elementos de sistemas fotovoltaicos:

Módulos fotovoltaicos:

- UL 1703 – *Standard for Flat-Plate Photovoltaic Modules and Panels.*
- IEC 61215 – *Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules Design Qualification and Type Approval.*

Inversores fotovoltaicos:

- IEC 61683 – *Photovoltaic systems – Power conditioners – Procedure for measuring efficiency.*
- EN 50530 – *Overall efficiency of grid connected photovoltaic inverters*
- *Sandia National Laboratories – Performance Test Protocol for Evaluating Inverters Used in Grid-Connected Photovoltaic Systems*

Países como Estados Unidos e alguns membros da União Europeia, tornaram obrigatória a realização de testes de eficiência e desempenho em elementos dos sistemas fotovoltaicos. Esses resultados servem para análise comparativa entre equipamentos, auxiliando na escolha dos consumidores, sendo obrigatória a divulgação dos resultados de eficiência na etiqueta ou manual dos equipamentos. Sites, como o *gosolarcalifornia.ca.gov,* fornecem uma lista detalhada de todos os inversores registrados para serem comercializados no estado da Califórnia, EUA, onde é possível encontrar inversores que vão de 89 % até 99 % de eficiência (CALIFORNIA ENERGY COMISSION, 2018). Testes de eficiência também são usados como pré-requisitos para programas de incentivo a energia solar. Nesses programas, os sistemas fotovoltaicos compostos por equipamentos mais eficientes têm direito a incentivos maiores.

A eficiência de conversores fotovoltaicos depende de diversos fatores, como tensão de entrada, irradiância, temperatura, topologia, por exemplo. Conforme demonstrado por (PRIEB, 2012), que faz um estudo da eficiência de conversores sob diferentes condições de ensaio, para

um inversor especifico, a eficiência pode variar de 78 % até 94 % com a mudança da irradiância, e de 91 % até 94 % com a alteração da tensão de entrada. O programa *Energy Star*, programa de eficiência dos EUA, em seu relatório "*Market and Industry Scoping Report, Solar Inverters*", mostra também os efeitos da topologia dos conversores, dividida em 4 grandes grupos; inversores sem transformador (*Transformerless)*, entre 97,5% e 98,5 % de eficiência, inversores com transformadores de alta frequência com até 96 % de eficiência, inversores com transformadores em baixa frequência com até 90 % de eficiência, e micro inversores com eficiência de 89 % até 96,5 % (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), 2013).

Devido aos fatores que impactam na eficiência dos conversores, alguns países têm adotado normas de eficiência que tentam simular as condições climáticas e ambientais encontrados em seu território como, por exemplo, irradiância e temperatura, dando pesos diferentes para cada faixa de irradiância. Essa metodologia é denominada de eficiência ponderada, sendo as principais delas as medidas de eficiência CEC, da Califórnia, e a Euro, da Europa. Os ensaios podem ser realizados em temperaturas diferentes das condições padrão de testes, como é o caso da CEC, que realiza ensaios em temperaturas de até 40ºC.

O Brasil, apesar de possuir normas de compatibilidade de inversores fotovoltaicos com a rede elétrica, ainda não dispõe de normas estabelecidas para medição da eficiência energética de inversores fotovoltaicos adequadas às características locais (FIGUEIRA, 2016). Uma proposta de ponderação, considerando-se as características do Brasil, foi proposta em (NETO, 2012), que apresentou um levantamento das condições de irradiância encontradas no Brasil e sugeriu fatores de ponderação calculados a partir dessas condições.

1.1 MOTIVAÇÃO

Fabricantes nacionais, que comercializam seus equipamentos apenas no Brasil, muitas vezes acabam declarando em seus catálogos o valor da eficiência de pico do conversor, medida em um laboratório não certificado, como o valor de eficiência do mesmo. Fabricantes internacionais ou até mesmo importadores costumam trazer os dados de eficiência CEC ou Euro no catálogo de seus produtos, muito embora esses valores não sejam os mais representativos para o Brasil. Consequentemente, não há uma forma adequada de comparar os diferentes equipamentos.

Os ensaios segundo as normas CEC, IEC 61683 e EN 50530 são realizados em diferentes condições de operação do equipamento. Esses ensaios demandam monitoramento constante e, apesar de permitirem que os ensaios sejam realizados sem a utilização de sistemas

automatizados com coleta de dados em tempo real, todas as normas recomendam a utilização dos mesmos. Se realizados manualmente, por um operador, cada um dos ensaios pode levar dias (apenas a sequência de curvas do ensaio de eficiência do algoritmo de seguimento do ponto de máxima potência (SPMP) em condição dinâmica, da norma EN 50530, demora 7 horas, sem considerar o tempo de *setup)*, sendo que tais ensaios não podem ser interrompidos, o que obrigaria o laboratório a trabalhar com dois ou até três turnos de metrologistas e com pelo menos dois metrologistas a cada turno, visto que qualquer erro na coleta de dados poderia alterar o resultado de todo o ensaio.

Além disso, para que sejam implementadas normas de medição de eficiência energética de inversores fotovoltaicos no Brasil, é necessário que haja laboratórios com o conhecimento e os equipamentos necessários para realização desses ensaios, e que esses laboratórios tenham capacidade de atender a demanda de clientes que irá surgir com a implementação das normas de eficiência, com um custo e um prazo para realização dos ensaios dentro de um limite factível para todas as empresas. Considerando que o Laboratório de Ensaios da Universidade Federal de Santa Maria (Instituto de Redes Inteligentes - INRI) passa por um momento de expansão, obtendo acreditação junto ao INMETRO para realizar ensaios de inversores fotovoltaicos conectados à rede, surge a oportunidade de expandir sua atuação para realizar novos ensaios nesses equipamentos, como a medição da eficiência energética de inversores fotovoltaicos. Adicionalmente, esses ensaios permitem ao laboratório realizar não apenas os ensaios solicitados pelo mercado, mas também auxiliar a comunidade acadêmica com ensaios para projetos de pesquisa e desenvolvimento, em projetos como o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída.

Com isso, fica evidente a necessidade de se automatizar os ensaios e mostrar que o laboratório tem capacidade de realizar tais ensaios, reduzindo os custos e o tempo de realização dos mesmos e já preparando o INRI para uma expansão do escopo de acreditação, quando normas de medição de eficiência energética de inversores fotovoltaicos forem adotadas no Brasil.

A justificativa para a realização desse trabalho é que os ensaios solicitados pelas normas requerem um tempo muito grande para sua realização, além de atenção constante durante todo o tempo, tornando quase inviável a realização não automatizada dos mesmos. Além disso, o cálculo das incertezas de cada medida também é um processo trabalhoso, normalmente sendo realizada uma única vez, para o pior caso possível, o que aumenta muito a incerteza das medidas do laboratório. Através do sistema automatizado, a incerteza pode ser calculada para cada caso, resultando em um valor preciso da incerteza para cada medida.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é desenvolver um sistema automatizado completo para a realização de ensaios de eficiência em inversores fotovoltaicos conectados à rede elétrica, com base nas normas CEC, EN 50530 e IEC 61683, que são as mais empregadas atualmente no mundo.

São objetivos específicos do trabalho:

1 - Desenvolvimento de uma câmara térmica com controle de temperatura interna, empregada nos ensaios de inversores fotovoltaicos sob temperaturas especificas;

2 - Desenvolvimento de uma metodologia para cálculo *online* de incertezas do ensaio de eficiência, com base nos dados dos catálogos dos equipamentos, dos relatórios de calibração dos mesmos e das configurações e parâmetros utilizados durante cada parte do teste

3 - Desenvolvimento de um software automatizado em ambiente LabView para controle dos equipamentos da bancada de ensaios e programação automatizada dos ensaios, incluindo a determinação da incertezas e relatório de ensaios;

4 - Desenvolvimento de módulo do software preparado para implementação futura de norma de eficiência brasileira;

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 1 são mostrados os objetivos e a motivação para a realização desse trabalho, além de uma introdução sobre o tema. No capítulo 2 são apresentadas as principais normas vigentes para medição da eficiência energética de inversores fotovoltaicos: IEC 61683, CEC e EN 50530, bem como a evolução da normatização de eficiência ao longo do tempo. Nesse capítulo também são discutidos e apresentados todos os pontos a serem ensaiados para atender cada norma, bem como seus respectivos procedimentos de ensaio. Para as normas que não apresentam um procedimento de ensaio, o autor descreve o procedimento realizado pelo software automatizado, sendo esse procedimento uma alternativa, mas não o único possível. O capítulo 3 contém as especificações mínimas dos equipamentos para realização dos ensaios segundo as normas. Também apresenta as especificações e descrição dos equipamentos utilizados pelo laboratório, bem como a bancada de ensaios desenvolvida. No capítulo 4 é apresentado o software de ensaios desenvolvido para a automação do laboratório. São apresentadas as interfaces gráficas, bem como a forma de configuração e operação do programa. O capitulo 5 apresenta os resultados obtidos com a realização dos ensaios, das três normas, em um inversor de testes, utilizando o sistema automatizado. Por fim, no capitulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas nesse trabalho.

2 NORMATIZAÇÃO DE EFICIÊNCIA EM INVERSORES FOTOVOLTAICOS

Nesta seção serão apresentadas as três principais normas a nível mundial para medição da eficiência energética de inversores fotovoltaicos, além de um histórico da evolução das normatizações de eficiência no mundo.

2.1 EVOLUÇÃO DA NORMATIZAÇÃO DE MEDIÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM INVERSORES FOTOVOLTAICOS

Normas são documentos que apresentam requisitos, especificações, diretrizes ou características que podem ser usadas de forma consistente para garantir que materiais, produtos, processos e serviços sejam adequados ao seu propósito (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2018a).

As normas técnicas são documentos técnicos que não possuem força de lei. Contudo, quando a legislação de um determinado país cria leis ou atos normativos técnicos, normalmente esses atos são baseados nas normas técnicas vigentes. Um exemplo é a Portaria nº 357, de 01 de agosto de 2014 do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO, que dispõe que os inversores fotovoltaicos conectados à rede elétrica comercializados no Brasil devem atender as normas ABNT NBR IEC 62116:2012, ABNT NBR 16149:2013 e ABNT NBR 16150:2013 (INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA, 2014).

Os principais órgãos desenvolvedores de normas técnicas no mundo, e mencionados nesse trabalho, são:

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, é o Foro Nacional de Normalização por reconhecimento da sociedade brasileira, fundado em 28 de setembro de 1940 e confirmado pelo governo federal por meio de diversos instrumentos legais. É uma entidade privada e sem fins lucrativos. É membro fundador da ISO, e desde a sua fundação, também é membro da IEC. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018)
- ISO – *International Organization for Standardization,* é um órgão independente e não governamental, fundado em 1947 por uma delegação de 25 países, e hoje conta com 161 países membros e 779 comitês e subcomitês técnicos. É a maior organização para normatização no mundo, abrangendo praticamente todas as áreas da indústria e servindo de referência para os corpos técnicos específicos de

cada país, que fazem parte da ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2018b). Trabalham em parceria com outros órgãos ou comitês de áreas específicas, como a IEC.

- IEC - International *Electrotechnical Commission,* fundada em 1906, desde então é a organização mais importante a nível mundial no desenvolvimento de normas para o setor eletroeletrônico. Conta hoje com 85 países membros (62 Membros Completos e 23 Membros associados), que juntos representam cerca de 97% da população mundial (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC), 2018a).
- CEN – *European Committee for Standardisation,* é o comitê responsável por reunir os órgãos normativos nacionais de 34 países Europeus. O comitê disponibiliza uma plataforma para o desenvolvimento de normas europeias, entre outros documentos técnicos para os mais variados tipos de produtos, materiais, serviços e processos, incluindo os setores aeroespacial, químico, construção civil entre outros (CEN/CENELEC, 2017).
- CENELEC – *European Committee for Electrotechnical Standardization,* é responsável pela normatização do setor eletrotécnico da União Europeia. Possui uma relação muito próxima, inclusive com áreas afins, com o CEN, além de acordos cooperativos com a *IEC e ISSO.* Desde o acordo de Viena, normas desenvolvidas pelo CENELEC podem ser incorporadas pela ISO ou IEC e vice-versa (AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE (ANSI), 2005).
- ETSI – *European Telecommunications Standards Institute*, desenvolve normas europeias para o setor de informação e telecomunicações, incluindo serviços como telefonia fixa e móvel, internet, cobertura de rádio, entre outras (EU INTERNAL MARKET INDUSTRY ENTREPRENEURSHIP & SMES, 2018).

As primeiras normas de eficiência energética surgiram na Europa na década de 1960. Há relatórios não confirmados de que a Polônia pode ter adotado normas de eficiência mínima em diversos produtos elétricos ainda em 1962. A primeira norma confirmada foi em 1966, quando a França adotou normas de eficiência mínima para refrigeradores, seguida de normas para congeladores em 1978. A Rússia introduziu normas de eficiência mínima em 1976. (NADEL, 2002). Em 1997, porém, uma revisão do trabalho *Appliance Energy Standards in*

Europe (WAIDE; LEBOT; HINNELLS, 1997) concluiu que essas primeiras normas eram fracas, mal implementadas e tiveram impacto mínimo no consumo de energia.

O interesse por normas de eficiência energética, por parte dos governantes, surgiu nas décadas de 1960 e 1970, logo após um apagão em diversos estados americanos, ocorrido em 1965 (NADEL, 2002). Em 1973, após o então presidente dos EUA, Richard Nixon, solicitar US$ 2,2 bilhões para o congresso em suporte militar emergencial para apoiar Israel contra o Egito durante a guerra de Yom Kippur, os membros árabes da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) responderam com um embargo, interrompendo a exportação de petróleo para os EUA e outros aliados de Israel, dando início a primeira crise do petróleo (THE BALANCE, 2018). Durante a crise, o preço do barril aumentou em mais de 350%, o que se refletiu em um aumento geral dos preços da energia, causando um colapso na economia de diversos países, em especial a economia norte americana. Mesmo com o governo pedindo a população para que economizassem energia, e diversos setores trabalhando para tentar contornar o problema, a crise se intensificou, gerando um grande aumento da inflação, além de causar estagnação econômica. Diversas empresas perderam cerca de 50% de seu valor de mercado e só vieram a se recuperar dos efeitos da crise durante a década de 1990. (NATIONAL MUSEUM OF AMERICAN HISTORY, 2018)

Devido à crise, diversos países passaram a desenvolver e aplicar políticas de eficiência energética baseadas em três pilares:

- Pesquisa de novas fontes de energia renováveis a fim de reduzir a dependência do petróleo;
- Aumento da eficiência de geração e transmissão de energia, para aumentar a quantidade de energia primaria (carvão, óleo, vento, sol, etc) convertida em energia final;
- Aumento da eficiência do consumo de energia, fazendo com que equipamentos de uso doméstico ou industrial consumam menos energia durante o seu funcionamento.

Essas políticas culminaram na adoção, em 1974, do *Warren-Alquist Act* no estado da Califórnia, que estabeleceu a Comissão de Energia da Califórnia (*California Energy Commision – CEC)* como a autoridade para definição de normas de eficiência no estado. A Califórnia logo passou a adotar normas regulamentárias, com as primeiras entrando em vigor em 1976. O estado de Nova York também começou a adotar algumas normas no começo de 1976 (NADEL, 2002). A nível federal norte-americano, as primeiras políticas de eficiência energética eram voluntárias, e foram estabelecidas em 1975 com a adoção do *Energy Policy*

and Conservation Act (UNITED STATES CONGRESS, 1975). Com isso, o governo federal americano adotou um grande número de leis, entre 1975 e 1980, que estabeleceram esforços educacionais, incentivos financeiros e autorizou a criação de normas de eficiência energética (CLINTON; GELLER; HIRST, 1986), além de liberar bilhões de dólares nos últimos 40 anos para incentivar programas de desenvolvimento e implementação de energias renováveis. Após a mudança na presidência, a administração de Carter propôs normas federais mandatórias, implantadas em 1978, através do *National Energy Conservation and Policy Act*, que autorizou o Departamento de Energia (*Department of Energy – DOE)* a definir normas de eficiência mínima (DIXON et al., 2010). Após nova sucessão presidencial, em 1981, o então presidente Reagan, que era contrário à intervenção no mercado, implementou a política "sem normas", significando que nenhuma norma que intervisse no livre mercado (incluindo as de eficiência mínima) seria aplicada. Essa ação só seria revertida em 1985 pelas cortes federais (NADEL, 2002).

Durante o mesmo período, no Japão, apenas em 1978 começou o projeto *Moonlight*, em parceria com a indústria, para desenvolvimento de turbinas de gás de alta eficiência, tecnologias de reaproveitamento de calor e as primeiras células de combustível. Em 1979 foi criada a lei sobre o uso racional de energia, focada nas fábricas, construções e equipamentos (GELLER et al., 2006).

Os países da Europa Ocidental também adotaram diversas políticas e programas de eficiência energética após a crise do petróleo de 1973, a maioria dos países adotaram programas de pesquisa e desenvolvimento, informação e esforços educacionais para conscientizar a população. O financiamento federal para esses programas por parte dos países europeus foi igual ou superior ao dos Estados Unidos. A União Europeia atual só viria a ser fundada em 1993 (COMMUNICATION DEPARTMENT OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2018), logo, até então, a grande maioria dos programas de eficiência energética da Europa Ocidental eram restritos a seus respectivos países, como, por exemplo, os programas de eficiência de isolação térmica adotados pela Alemanha, e os programas de eficiência mínima para novas construções adotados pela Dinamarca, França, Suécia e Reino Unido. Os programas a nível multinacional começariam apenas em 1991 com o programa *SAVE*, que financiava projetos pilotos de eficiência energética por toda a Europa e deu início a cooperação multinacional na área de políticas de eficiência energética na região (GELLER et al., 2006).

Nos Estados Unidos, na contramão da inatividade do governo federal em relação a normatização, os estados americanos aumentaram suas regulamentações, sendo que 6 estados já contavam com programas de eficiência energética em 1986. O crescente número de estados

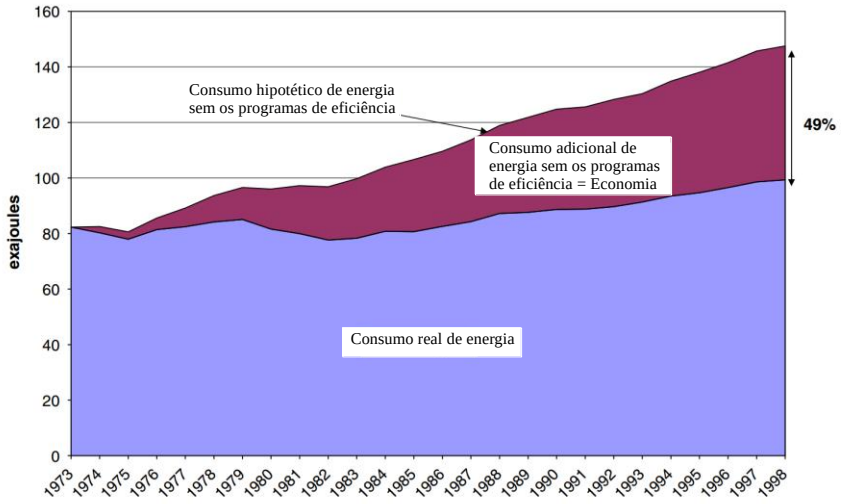
criando suas próprias normas levou, em 1987, as indústrias a negociarem com os órgãos responsáveis para criação de normas federais especificas, com o intuito de unificar as normas no país e acabar com os conflitos entre os diferentes estados que criava barreiras econômicas, levando o presidente Reagan a assinar o *National Appliance Energy Conservation Act.* (NADEL, 2002). Até então esses programas eram focados na redução do consumo de combustível pela crescente frota de veículos americana. Apenas em 1987, quando essas políticas passaram a ser leis, foram expandidas para outros produtos e levaram a um grande aumento da eficiência de refrigeradores, condicionadores de ar, máquinas de lavar, entre outros equipamentos vendidos nos Estados Unidos. Por fim, em 1992 esses programas foram expandidos para motores, equipamentos de refrigeração e aquecimento utilizados em prédios comerciais, além de sistemas de iluminação, e, desde então, programas de eficiência energética tem sido criados e adotados para os mais diversos tipos de produtos (GELLER et al., 2006).

Assim como nos Estados Unidos, os países europeus também passaram por um momento de redução das normatizações de eficiência energética durante o final da década de 1970 e início de 1980. Esse processo se deu em grande parte devido a pressões da indústria e consumidores para harmonizar as condições de comércio na região, fortemente afetada pelas diferentes normatizações existentes em cada país, o que, assim como nos estados americanos, criava barreiras comerciais e aumentava o custo dos produtos com diversas certificações diferentes. Também como nos Estados Unidos, houve um esforço para criação de normas unificadas entre todos os países europeus, e, em 1986, foram estabelecidas as agências de regulamentação CEN e CENELEC, através do tratado que estabelece a Comunidade Econômica Europeia e mais tarde, no mesmo ano, o *Single European Act* (WAIDE; LEBOT; HINNELLS, 1997).

Nenhuma norma ou protocolo de testes desenvolvido pelo CEN ou CENELEC eram obrigatórios na Europa, a não ser que fossem incorporados pela legislação própria de cada país. Contudo, os órgãos normativos de praticamente todos os países europeus eram parte do CEN e CENELEC, e adotavam as normas. Por fim, em 1993 foi criado o *European Organization of Testing and Certification – EOTC* para garantir a implementação uniforme das normas e protocolos de testes em toda a Europa, e garantir um reconhecimento mútuo entre todos os laboratórios e corpos normativos de diferentes países (WAIDE; LEBOT; HINNELLS, 1997), simplificando assim o processo de certificação e abrindo caminho para melhoria das normas. Através do acordo de Viena, os órgãos CEN e CENELEC passaram a cooperar com os órgãos internacionais IEC e ISO, sendo que os protocolos de testes e normas desenvolvidos por qualquer um desses pode ser livremente utilizado pelos demais.

Os efeitos dessas políticas podem ser observados comparando-se o PIB dos membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD), que teve crescimento real de 123% durante o período de 1973 a 1998 (OECD, 2018), enquanto o consumo energético aumentou cerca de 25%(GELLER et al., 2006). Isso significa que esses países reduziram drasticamente a necessidade de energia para alimentar seu crescimento econômico. O fornecimento total de energia primária (*Total Primary Energy Supply – TPES*) para cada unidade do produto interno bruto (PIB) desses países caiu rapidamente após a primeira crise do petróleo, e em 2006, esse valor já era um terço menor do que em 1973 (GELLER et al., 2006). Conforme apresentado na Figura 3, graças a adoção dessas medidas, esses países deixaram de gastar uma quantidade de energia equivalente a 49 % do valor total gasto, apenas no ano de 1998.

Figura 3 - Consumo de energia real e consumo de energia hipotético sem a adoção de políticas de eficiência energética no período de 1973 - 1998 nos 11 maiores membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD)



Fonte: (GELLER et al., 2006)

Em 1999 a IEC lançou a primeira norma a nível mundial de eficiência de inversores fotovoltaicos, a *IEC 61683:1999 – Photovoltaic systems – Power conditioners – Procedure for measuring efficiency*, que versa tanto sobre a eficiência de conversão de inversores conectados à rede como de inversores autônomos. A norma tem sido renovada sem edição, sendo que sua próxima avaliação para renovação, edição ou suspensão está prevista para maio de 2019, onde a IEC pretende atualizá-la para uma edição 2, conforme o site oficial de acompanhamento de normas da IEC (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC), 2018).

No ano de 1996, o governador da Califórnia, Pete Wilson, assinou a *Assembly Bill 1890*, que desregulamentou as companhias elétricas estatais e criou incentivos para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, através do Programa de Energias Renováveis da *California Energy Commission* (CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2018a). Esse programa foi organizado em cinco categorias, e apenas entre 1998 e 2002 alocou 540 milhões de dólares distribuídos entre elas (CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 1999):

- Recursos renováveis existentes (US$ 243 milhões) – Estimula o mercado de recursos renováveis já existente através de incentivos variáveis;
- Recursos renováveis emergentes (US$ 54 milhões) – Estimula o mercado de tecnologia em energias renováveis, através de abatimento de custos aos consumidores para instalação dos sistemas, impulsionando a expansão do mercado;
- Educação dos consumidores (US$ 5,4 milhões) – Informa o público sobre os benefícios da energia renovável e os diferentes tipos de tecnologia através de projetos e demonstrações;
- Novos recursos renováveis (US$ 162 milhões) – Descontinuado em 2008, encorajava a prospecção de novas fontes renováveis de energia elétrica através de incentivos pagos durante um período de 5 anos, assim que um projeto baseado em novas fontes de energia começasse a gerar eletricidade;
- Crédito ao consumidor (US$ 75,6 milhões) – Descontinuado em 2004, fornecia incentivos aos fornecedores de serviços de eletricidade de energia renovável para reduzir o custo da eletricidade renovável para clientes elegíveis.

Junto com a criação do programa, a CEC estipulou normas para aprovação dos financiamentos e abatimentos, entre elas, normas de medição de eficiência energética das diversas partes do sistema. Essas normas não impuseram um valor de eficiência mínima para os inversores fotovoltaicos, mas o valor de eficiência medido é necessário para o registro junto a CEC que autoriza a instalação dos equipamentos, além de ser publicamente informado, permitindo a comparação de equipamentos pelos consumidores. Em 1998, no primeiro *guidebook* lançado pela CEC para participação no programa, apenas a eficiência de pico dos inversores fotovoltaicos era avaliada (CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 1998). Em 2003, a CEC muda a medida de eficiência dos inversores fotovoltaicos para potência de 75 % da carga nominal (CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2003). Destaca-se que, mesmo após a norma IEC 61683:1999 estar em vigor a pelo menos 3 anos, a CEC optou por não adotar

o método de medição da mesma, por ser um método complexo (analise de eficiência em 21 pontos diferentes de operação do inversor), sendo difícil a comparação de equipamentos por consumidores leigos.

Em 2005, a CEC alterou o método de avaliação de inversores fotovoltaicos para a sua versão final. O método empregado (com algumas adaptações) é o *Perforance Test Protocol for Evaluating Inverters Used in Grid-Connected Photovoltaic Systems,* desenvolvido por *Sandia National Laboratories, Endecon Engineering, BEW Engineering* e *Institute for Sustainable Technology* (CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2005). Nesse procedimento é avaliada a eficiência de conversão do inversor fotovoltaico, em 21 pontos diferentes, de forma semelhante ao definido pela IEC 61683:1999, porém, cada um dos 21 pontos recebe um peso diferente, resultando no que ficou conhecida como eficiência CEC (BROOKS; WHITAKER, 2005). Esse é um dos procedimentos mais utilizados para comparação de inversores desde então, conforme apresentado pelo relatório da *Energy Star* (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), 2013) e diversos outros trabalhos (CACCIATO; CONSOLI; CRISAFULLI, 2010; CHEN et al., 2013; GU et al., 2013; KRAUTER; BENDFELD, 2015; LEFEVRE et al., 2016; TRUBITSYN et al., 2010).

Na Europa foi assinado em 1993 o tratado de Maastricht, que estabeleceu a União Europeia (*European Union – EU).* Em suas premissas foi criado o mercado único através das "Quatro liberdades", que permitia a livre circulação de mercadorias, serviços, pessoas e moeda. Durante os anos seguintes, diversos outros tratados de cooperação e consolidação da União Europeia foram estabelecidos (COMMUNICATION DEPARTMENT OF THE EUROPEAN COMMISSION, 2018). No ano de 2002 a comissão europeia propôs um novo programa denominado *Intelligent Energy for Europe,* visando acelerar a adoção de programas de eficiência energética e a adoção de energias renováveis. Uma das metas do programa era aumentar a eficiência energética em 1% ao ano. Desde então, esses programas tornaram-se políticas e passaram a ser atualizados e modificados constantemente, tornando as metas de eficiência cada vez mais elevadas e aumentando os recursos alocados. Por exemplo, foi criado em 2006 o *Energy Services Directive,* substituído em 2012 pelo *Energy Efficiency Directive,* com objetivo de aumentar a eficiência energética dos países em 20% até 2020, sendo atualizado novamente em 2016 com uma meta de 50% de aumento de eficiência até 2030 (EUROPEAN COMMISSION FOR ENERGY, 2018).

Auxiliando na execução desses programas, em 2010 a CENELEC lançou a norma *EN 50530:2010 – Overall efficiency of grid connected photovoltaic inverters* para mensurar a eficiência energética de inversores fotovoltaicos na Europa. Essa norma é similar a adotada pela

CEC da Califórnia, testando o inversor em 21 pontos diferentes. Contudo, para refletir as condições de baixa irradiância da Europa, adotou-se ponderações diferentes para os pontos de medição. Adicionalmente, a norma europeia prevê testes de desempenho estático e dinâmico do algoritmo seguidor do ponto e máxima potência (SPMP) dos inversores, que definem a eficiência Euro.

Em 2012 as Organizações Europeias de Normalização (*European Standardisation Organisations – ESO),* compostas pela CEN, CENELEC e ETSI, foram oficialmente reconhecidas a partir da regulação Nº 1025/2012 da União Europeia como responsáveis pela elaboração das normas europeias (EN) (THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL, 2012). As normas europeias (EN) tem alcance em toda a União Europeia. Embora cada país possa possuir seu próprio órgão de normatização para elaborar normas internas, esses devem adotar as normas EN quando as mesmas existirem. No caso de existir normas internas conflitantes com as normas EN, as mesmas devem ser revogadas dentro de um prazo estabelecido (THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL, 2012). Em 2013, após essa mudança na legislação, que alterou a forma como as normas são aplicadas na Europa, a CENELEC atualizou a EN 50530 para EN 50530:2010+A1:2013, que passou, então, a ser a referência em medição da eficiência energética de inversores fotovoltaicos na União Europeia. Essa norma incluiu uma metodologia para medição da eficiência do algoritmo de SPMP, sendo a única norma a definir desempenho dinâmico de conversores. Essa norma têm sido utilizada pela academia para comparação dos algoritmos de SPMP, conforme apresentado nos trabalhos de (ANDREJAŠIČ; JANKOVEC; TOPIČ, 2011; BELKAID; COLAK; ISIK, 2016; BELKAID; GAUBERT; GHERBI, 2017; ISHAQUE; SALAM; LAUSS, 2014; LI; WEN; HU, 2016; LOUKRIZ; HADDADI; MESSALTI, 2016).

No Brasil, até o final do ano de 2018, ainda não existe normatização de mensuração da eficiência energética de inversores fotovoltaicos. Em 2018, o Comitê Brasileiro de Eletricidade (CB-03), através do comitê CE-003:082.001 - Sistemas de Conversão Fotovoltaica de Energia Solar, aprovou a criação do projeto de norma 003:082.001-007 - Sistemas fotovoltaicos (FV) - Condicionadores de potência - Procedimento para medir a eficiência. O escopo dessa norma é descrever os procedimentos de ensaio para medição da eficiência dos condicionadores de potência utilizados em sistemas fotovoltaicos.

2.2 NORMATIZAÇÃO INTERNACIONAL: IEC 61683:1999

A norma IEC 61683:1999 foi a primeira norma elaborada para avaliar a eficiência energética de inversores fotovoltaicos, elaborada em 1999 pela International *Electrotechnical Commission.*

2.2.1 Base conceitual

Essa norma foi escrita em um período onde a tecnologia estava apenas começando a se popularizar para o público em geral. Até então, a maioria das aplicações dos sistemas fotovoltaicos eram em sistemas isolados, para uso militar, alimentando satélites e estações de transmissão, por exemplo, representando cerca de 70 % do mercado em 1998; para uso civil, em casos específicos para gerar energia em locais de difícil acesso; ou ainda em sua maioria em produtos como calculadoras, relógios, e outros pequenos equipamentos (HARMON, 2000). Este é o único dentre os três protocolos de medição de eficiência a descrever um procedimento de medida de eficiência para inversores para operação isolada (*stand-alone* ou *off-grid).* Até o ano de sua publicação, a medida de eficiência utilizada em inversores fotovoltaicos era a eficiência de pico, conforme demonstrado na revisão bibliográfica desse trabalho. Porém, como a eficiência de inversores fotovoltaicos depende de uma série de fatores, como tensão de entrada, tensão de saída, nível de potência, temperatura, entre outros, essa norma considerou direta ou indiretamente essas questões (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC), 1999).

A norma IEC mensura a eficiência energética do inversor fotovoltaico em diferentes pontos de operação, variado a tensão de entrada, o nível de potência e o tipo de cargas ligadas a saída do equipamento, mapeando, assim, a eficiência do conversor em toda a sua possível faixa de operação, fornecendo dados mais concretos quanto a eficiência do equipamento nas mais diversas aplicações. A norma descreve diretrizes para a medição da eficiência energética de conversores estáticos de potência, utilizados em sistemas fotovoltaicos isolados (*off-grid)* e conectados à rede (*on-grid),* onde a saída do conversor é uma tensão c.a. estável de frequência constante ou uma tensão c.c. estável. A eficiência é calculada a partir de uma medida direta das potências de entrada e de saída do conversor. Um transformador isolador pode ser incluído no ensaio, se necessário.

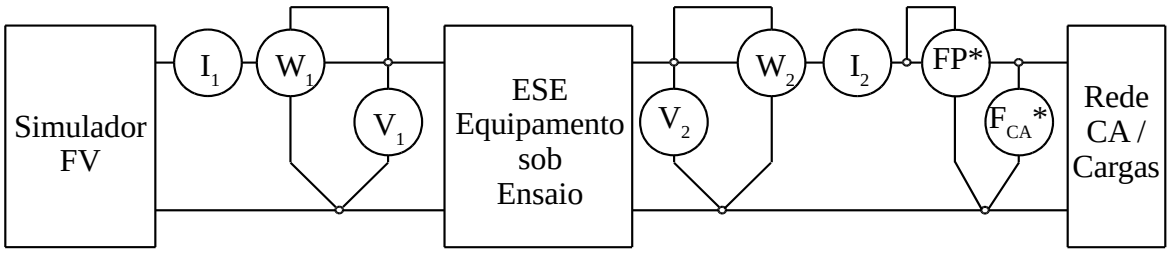
2.2.2 Requisitos dos equipamentos

Nessa seção serão apresentados os requisitos impostos pela norma IEC 61683 para cada equipamento utilizado durante o ensaio.

2.2.2.1 Bancada de ensaios

A Figura 4 mostra um esquemático da bancada de ensaios, proposta pela norma, contendo uma saída c.a. monofásica ou uma saída c.c. O esquemático também pode ser considerado como uma representação monofásica de uma bancada de ensaios para sistemas multifásicos.

Figura 4- Esquemático da bancada de ensaios recomendada pela norma IEC 61683:1999



Fonte: (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC), 1999)

Onde:

V_1 Voltímetro c.c.

I_1 Amperímetro c.c.

W_1 Wattímetro c.c.

V_2 Voltímetro c.a. ou c.c. (carga c.c.)

I_2 Amperímetro c.a. ou c.c. (carga c.c.)

P_2 Wattímetro c.a. ou c.c. (carga c.c.)

FP Medidor de fator de potência

F_{CA} Medidor de frequência

Nota 1: A tensão de entrada c.c. ou a oscilação de corrente variam de acordo com a impedância interna da fonte de alimentação c.c., e devem ser definidos por concordância mutua entre o laboratório e o fabricante. Por exemplo, a impedância pode ser selecionada como taxa de corrente-tensão $\Delta I/\Delta v$ no ponto de operação da curva I-V do painel fotovoltaico. Quando o

conversor incluir um algoritmo SPMP, um simulador de painel FV é recomendado como fonte de alimentação.

Nota 2: O medidor de frequência F_{CA}* e o medidor de fator de potência FP* devem ser desconsiderados no caso de a saída do conversor ser tensão c.c.

As medidas podem ser realizadas por equipamentos específicos para cada variável (voltímetro, amperímetro, etc.) ou por equipamentos capazes de realizar todas as medidas simultaneamente (analisadores de energia). No caso de analisadores de energia, a sincronia de tempo entre as variáveis é garantida, porém, quando utilizados equipamentos independentes, é necessário garantir que as medidas de tensão e corrente sejam realizadas no mesmo instante de tempo. A precisão dos equipamentos empregados deve ser melhor do que 0,5 % do fundo de escala para medidas de potência.

2.2.2.2 Fontes de alimentação c.c.

Para conversores operando com tensão de entrada fixa, deve-se utilizar uma bateria ou fonte c.c. de tensão constante. Para equipamentos que utilizam algoritmos seguidores do ponto de máxima potência (SPMP), deve-se utilizar um arranjo fotovoltaico ou um simulador de arranjo fotovoltaico (simulador FV).

2.2.2.3 Fonte simuladora de rede c.a.

Para conversores conectados à rede deve-se utilizar um simulador de rede c.a. capaz de manter a tensão e a frequência de saída dentro dos valores nominais determinados pelo fabricante do equipamento sob ensaio. O simulador de rede c.a. deve suportar uma potência equivalente a 120 % da potência c.a. nominal do equipamento sob ensaio (ESE), mantendo a forma de onda dentro dos limites definidos pelo fabricante do ESE para tensão, frequência e distorção harmônica.

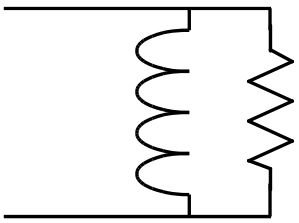
2.2.2.4 Cargas resistivas

Para conversores não conectados à rede elétrica (*off-grid)*, a eficiência precisa ser medida quando o equipamento estiver alimentando uma carga puramente resistiva, a mesma deve ser ajustável para os diferentes níveis de potência a serem testados, 5 %, 10 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 % e 120 % da potência c.a. nominal do ESE.

2.2.2.5 Cargas reativas

Para inversores não conectados à rede elétrica, a eficiência precisa ser medida quando o mesmo estiver alimentando uma carga reativa (Figura 5), capaz de gerar um fator de potência igual ao mínimo definido pelo fabricante do ESE ou 0,25, aquele que for maior, para potências equivalentes a 25 %, 50 % e 100 % da potência aparente nominal de saída do ESE. A carga também deve ser configurável para FP igual a 0,5 e 0,75 nos mesmos níveis de potência.

Figura 5 - Exemplo de carga reativa

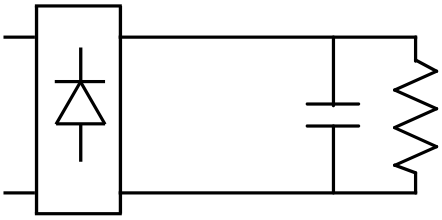


Fonte: Próprio autor

2.2.2.6 Carga não linear

Para inversores não conectados à rede elétrica, a eficiência precisa ser medida quando o mesmo estiver alimentando uma carga não linear (Figura 6) com distorção harmônica total (DHT) de 80 % ± 5 %, equivalente a 25 % ± 5 % e 50 % ± 5 % da potência aparente nominal de saída do ESE, mais uma carga resistiva em paralelo suficiente para alcançar 25 %, 50 % e 100 % da potência aparente nominal de saída do ESE. O tipo da carga não linear deve ser claramente registrado em toda documentação.

Figura 6 - Exemplo de carga não linear

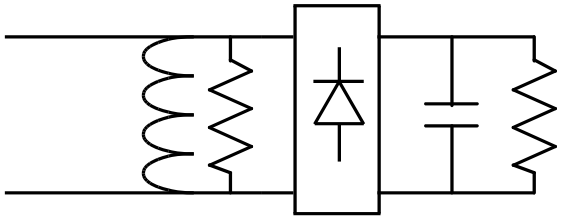


Fonte: Próprio autor

2.2.2.7 Carga complexa

Para inversores não conectados à rede elétrica, a eficiência precisa ser medida quando o mesmo estiver alimentando uma carga complexa (Figura 7), composta de uma carga não linear somada a uma carga reativa. A carga não linear deve ser ajustável para operar com DHT de 80% ± 5%, e potência equivalente a 50% ± 5% da potência aparente nominal de saída do ESE. A carga reativa deve ser configurada para operar com FP de 0,5 em paralelo com potência suficiente para alcançar uma carga total equivalente a 50% e 100% da potência aparente nominal de saída do ESE.

Figura 7 - Exemplo de carga complexa



Fonte: Próprio autor

2.2.3 Requisitos ambientais

Os equipamentos de medida devem respeitar as condições ambientais definidas pelos seus respectivos fabricantes, no manual dos equipamentos.

Todas as medidas devem ser realizadas com o equipamento sob ensaio em temperatura ambiente de 25ºC ± 2ºC. Valores diferentes podem ser mutuamente acordados, porém, nesse caso, a temperatura precisa estar claramente registrada em todos os documentos.

2.2.4 Procedimento de ensaio

2.2.4.1 Ensaios de medida de eficiência energética

A Tabela 1 descreve os pontos em que cada tipo de conversor deve ser testado. Conversores conectados à rede (*on-grid)* precisam ser testados com uma fonte simuladora de rede c.a. Conversores não conectados à rede (*off-grid)* devem ser testados com carga resistiva, reativa, não linear e complexa (não linear + reativa). Cada um dos pontos apresentados na

Tabela 1 deve ser testado em três condições, variando-se a tensão de entrada dos equipamentos, exceto para conversores alimentados por baterias, nesse caso, apenas a condição b) se aplica:

a) Tensão de entrada mínima definida pelo fabricante;

b) Tensão de entrada nominal ou a média da faixa de tensão de entrada;

c) Tensão de entrada equivalente a 90% da tensão máxima;

Condições especificas podem ser removidas através de concordância mútua, entre o laboratório e o fabricante, quando essas condições estão fora dos limites de operação definidos pelo fabricante. Por exemplo, conversores *off-grid* normalmente são projetados para suportar sobrecargas de curta duração com potência significativamente superior a potência nominal do equipamento. O teste em 120 % da capacidade nominal é incluído para avaliar o conversor nessas condições. Alguns conversores não são projetados para fornecer mais do que sua potência nominal e podem sofrer danos se operados em 120 % de sua capacidade. Nesses casos, o relatório deve apresentar o motivo da exclusão de determinado ponto (ex. devido a limitação técnica do conversor).

Um algoritmo de SPMP ajusta de forma dinâmica a tensão de entrada a fim de maximizar a potência de saída. Em princípio, deve-se fazer a aquisição de todas as variáveis com uma taxa de aquisição superior a velocidade de perturbação do SPMP. Caso os distúrbios gerados pelo SPMP sejam inferiores a 5% da tensão de entrada, uma média das leituras é aceitável. O tempo de medida deve ser de, no mínimo, 30 segundos.

Procedimento de ensaio:

1 - Ajustar a temperatura ambiente para 25 ºC ± 2 ºC.
2 - Instalar o ESE conforme instruções do fabricante para simular as condições reais de operação (ex. posição de operação, espaço livre em torno do equipamento, suporte fornecido pelo fabricante).
3 - Conectar o ESE, de acordo com as instruções e especificações fornecidas pelo fabricante às fontes de alimentação c.c. e a fonte simuladora de rede c.a. ou à carga a ser utilizada (resistiva, reativa, não linear ou complexa), começando pela resistiva.
4 - Ajustar a tensão c.c. de entrada do ESE, para o valor mínimo indicado pelo fabricante e fornecer potência suficiente para que o ESE atinja o maior nível de potência a ser testado.

5 - Configurar a fonte simuladora de rede c.a. para a tensão nominal de ensaio e a potência a ser testada, definida no passo 4. No caso de uso de alguma carga, configurar a carga para o nível de potência definido no passo 4.

6 - Aguardar a estabilização do SPMP. Caso não seja observada a estabilização, aguardar no mínimo 5 minutos.

7 - Medir e registrar os valores das potências de entrada e saída por, no mínimo, 30 segundos.

8 - Repetir os passos 4 até o 7, alterando o nível de potência para os outros valores da Tabela 1, em ordem decrescente (de 120 % para 100 %, de 100 % para 75 %...), até realizar todos os pontos de potência. Quando não houver alteração da tensão de entrada, o tempo de estabilização do SPMP pode ser reduzido para 2 minutos.

9 - Repetir os passos 4 até o 8, alterando a tensão de entrada c.c. para os demais valores de ensaio (tensão c.c. nominal e 90 % da máxima, fornecidos pelo fabricante) até completar todas as condições de ensaio.

10 - Para conversores *off-grid*, repetir os passos 3 até 9, alterando a carga conectada na saída do conversor até concluir o ensaio em todas as condições.

Tabela 1 - Condições de ensaios de eficiência IEC 61683-1999

Carga total, % da potência aparente nominal		**5**	**10**	**25**	**50**	**75**	**100**	**120**
Conectado à rede	Carga resistiva	-	X	X	X	X	X	X
Não conectado à rede	Carga resistiva	X	X	X	X	X	X	X
	Carga reativa							
	FP = 0,25 ou mínimo	-	-	X	X	-	X	-
	FP = 0,5 (> mínimo)	-	-	X	X	-	X	-
	FP = 0,75 (> mínimo)	-	-	X	X	-	X	-
	Carga não linear							
	NL = 25% da potência nominal	-	-	X	X	-	X	-
	NL = 50% da potência nominal	-	-	-	X	-	X	-
	Carga complexa	-	-	-	X	-	X	-

Fonte: (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC), 1999).

2.2.4.1.1 Cálculo da eficiência energética.

A eficiência energética, para cada condição de ensaio, pode ser calculada de duas formas, através da média da eficiência instantânea em cada amostragem, conforme Equação 1 ou através da eficiência energética, conforme a Equação 2.

$$\eta_E = \left(\frac{P_o}{P_i}\right) \times 100 \quad (1)$$

Onde:

η_E é eficiência energética (%);

P_o é a média da potência de saída (W)

P_i é a média da potência de entrada (W)

$$\eta_E = \left(\frac{W_o}{W_i}\right) \times 100 \quad (2)$$

Onde:

η_E é eficiência energética (%);

W_o é a energia medida na saída do ESE durante o período de amostragem (Wh)

W_i é a energia medida na entrada do ESE durante o período de amostragem (Wh)

2.2.4.1.2 Tolerância da eficiência

Quando um valor de eficiência é garantido pelo fabricante, a tolerância para esse valor, nas condições nominais, é indicada na Tabela 2.

Exemplo:

Um conversor que garanta 90% de eficiência pode ter uma eficiência mínima de 88,2 %

Tabela 2 - Tolerâncias de eficiência para conversores estáticos segundo a norma IEC 61683:1999

Item	**Tolerância**	**Observação**
Eficiência do conversor	- 0,2(1 – η) η (%)	η: Eficiência garantida
Nota: A tolerância de eficiência é derivada no anexo D da norma IEC 60146-1-1. A tolerância corresponde a + 0,2 para cada unidade de perdas, com uma tolerância mínima de – 0,002 por unidade		

Fonte: (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC), 1999)

2.2.4.2 Perdas a vazio

Para conversores não conectados à rede elétrica as perdas a vazio representam a potência c.c., medida na entrada do conversor, consumida para que o mesmo opere com seus valores nominais na saída (tensão e frequência), porém sem nenhuma carga conectada ao conversor.

Para conversores conectados à rede elétrica esse valor é a medida da potência c.c. de entrada do conversor, quando o mesmo está desconectado da rede elétrica. Para essa medida, deve-se aguardar até que o conversor entre no modo de operação sem carga, caso esse estado exista.

Procedimento de ensaio:

1 - Ajustar a temperatura ambiente para 25 ºC ± 2 ºC.
2 - Instalar o ESE conforme instruções do fabricante para simular as condições reais de operação (ex. Posição de operação, espaço livre em torno do equipamento, suporte fornecido pelo fabricante).
3 - Conectar o ESE de acordo com as instruções e especificações fornecidas pelo fabricante às fontes de alimentação c.c. e deixando sua saída desconectada da fonte simuladora c.a. ou das cargas.
4 - Configurar o equipamento para operar em seu estado “Sem carga”, se aplicável.
5 - Ajustar a tensão c.c. de entrada do ESE para o valor nominal indicado pelo fabricante e corrente suficiente para que o ESE possa atingir o nível de 100 % de potência c.a. nominal conforme a Tabela 1.
6 - Medir e registrar o valor da potência c.c. consumida na entrada do equipamento.

2.2.4.3 Perdas em espera

Para conversores não conectados à rede elétrica, as perdas em espera são definidas como a potência c.c., medida na entrada do conversor, consumida quando o mesmo não está operando, mas encontra-se no modo “em espera”.

Para conversores conectados à rede elétrica esse valor é a medida da potência c.a., medida na saída do conversor, quando o mesmo está conectado à rede elétrica, mas não há potência do lado c.c.

Procedimento de ensaio:

1 - Ajustar a temperatura ambiente para 25 ºC ± 2 ºC.
2 - Instalar o ESE conforme instruções do fabricante para simular as condições reais de operação (ex. Posição de operação, espaço livre em torno do equipamento, suporte fornecido pelo fabricante).
3 - Conectar o ESE de acordo com as instruções e especificações fornecidas pelo fabricante às fontes de alimentação c.c. e, para inversores conectados à rede elétrica, à fonte simuladora de rede c.a..
4 - Configurar o equipamento para entrar em seu modo de espera, se aplicável.
5 - Para inversores *off-grid*, *a*justar a tensão c.c. de entrada do ESE para o valor nominal, e corrente suficiente para que o ESE possa atingir o nível de 100 % de potência c.a. nominal conforme a Tabela 1. Para conversores *on-grid*, ajustar a tensão da fonte simuladora de rede c.a. para seu valor nominal de ensaio.
6 - Medir e registrar o valor da potência c.c. (para conversores *off*-grid) ou c.a. (para inversores *on-grid*) consumida pelo equipamento.

2.3 NORMATIZAÇÃO CALIFÓRNIA: EFICIÊNCIA CEC

Esse protocolo de testes foi definido pela *California Energy Comission* (CEC) como requisito para obtenção do registro e liberação da venda de inversores fotovoltaicos dentro do estado da Califórnia. Inicialmente o protocolo de testes foi elaborado pelo *Sandia National Laboratories, Endecon Engineering, BEW Engineering* e *Institute for Sustainable Technology*. Devido as alterações propostas pela CEC para utilizar o protocolo desenvolvido pelo *Sandia*, em 2005 foi realizada uma reunião com a CEC e todos os laboratórios acreditados dos EUA, aptos a realizar os ensaios. Nessa reunião foram definidos os ensaios a serem adotados do protocolo original, como os ensaios seriam realizados e algumas modificações nos ensaios adotados, gerando um novo documento chamado *"Guideline for the use of the Performance Test Protocol for Evaluating Inverters Used in Grid-Connected Photovoltaic Systems"*, que é o documento oficial que deve ser seguido para realização dos ensaios segundo a CEC.

2.3.1 Base conceitual

A norma de eficiência CEC tem como base o protocolo de testes desenvolvido pelo laboratório Sandia, intitulado "*Performance Test Protocol for Evaluating Inverters Used in*

Grid-Connected Photovoltaic Systems", versão 2004, que por sua vez utiliza a norma IEC 61683 como base para as medidas de eficiência de conversão, realizando as medidas em 21 pontos diferentes.

A CEC não adotou todos os ensaios descritos no protocolo, alguns por considerar que não eram necessários, como, por exemplo, os ensaios de determinação da tensão/corrente c.c. mínima e máxima de operação do equipamento, que são dados de placa. Também não adotou alguns ensaios que não estavam devidamente concluídos no protocolo do Sandia, como, por exemplo, os ensaios de algoritmos de SPMP, que estão marcados no protocolo como esboço e com a seguinte indicação "Esta seção não atende aos critérios definidos e precisa ser revisada e modificada no futuro". Esses ensaios foram removidos na versão 2015 do protocolo escrito pelo *Sandia*, que após as alterações propostas pela CEC, adaptou o protocolo para que ficasse igual ao utilizado pela CEC. (NEWMILLER; BLODGETT; GONZALEZ, 2015). Além disso, alterou algumas condições dos ensaios adotados, reduzindo, por exemplo, o número de faixas das medidas de eficiência de 5 para 3, e padronizou a temperatura ambiente dos ensaios de máxima potência em 40 ºC ao invés da "máxima temperatura definida pelo fabricante". Todas as alterações realizadas pela CEC foram posteriormente adotadas pelo Sandia na versão 2015 do protocolo, que ainda adicionou a necessidade de realizar os ensaios 3 vezes, quando aplicável, uma com fator de potência unitário, uma com fator de potência indutivo e outro com fator de potência capacitivo.

O principal foco do protocolo definido pela CEC é simular as condições de alta irradiância e alta temperatura, encontrados no estado da Califórnia, considerando, por exemplo, valores fora das condições padrão de temperatura (realizados em 40 ºC ao invés de 25 ºC).

Também focou em implementar a eficiência ponderada, resumindo os 21 pontos de eficiência medidos em apenas 1 valor, facilitando a comparação dos equipamentos.

2.3.2 Requisitos dos equipamentos

Nessa seção serão apresentados os requisitos impostos pela norma CEC para cada equipamento utilizado durante o ensaio.

2.3.2.1 Equipamentos de medida

Na versão 2005 do *CEC guidelines*, atualmente em vigor, os requisitos de incerteza apresentados na Tabela 3 são necessários para os equipamentos de medida.

Tabela 3 - Requisitos de máxima incerteza para equipamentos de medida - CEC Guidelines 2005

Parâmetro ***True RMS*** **(U, I, P)**	**Máxima Incerteza Aceitável**	**Máxima Incerteza Preferível**
Tensão c.c.*	± 1 % da leitura	± 0,25 % da leitura
Tensão c.a.	± 1 % da leitura	± 0,25 % da leitura
Corrente c.c.*	± 1 % da leitura	± 0,5 % da leitura
Corrente c.a.	± 1 % da leitura	± 0,5 % da leitura
Potência c.c.*	± 1 % da leitura	± 0,5 % da leitura
Potência c.a.**	± 1 % da leitura	± 0,5 % da leitura
Frequência	± 0,05 Hz	± 0,01 Hz
Temperatura	± 1 ºC	± 0,5 ºC
Ondulação de corrente c.c.	± 5 % da leitura	± 1 % da leitura
* Nota: Medidas de tensão e corrente devem ser "*True RMS*". Instrumentos *"True RMS"* incluem a contribuição da ondulação c.a. no valor c.c. da medida. A ondulação c.a. no valor c.c. deve ser considerada quando a magnitude da ondulação for superior a 2 % do valor c.c.. Medidas de potência realizadas através de amostragem eletrônica e integração matemática devem considerar a diferença de fase entre a ondulação de tensão e corrente quando a magnitude de um for superior a 2% do valor c.c..		
** Nota: A medida de potência c.a. deve incluir apenas a potência útil em 60 Hz		

Fonte: (BROOKS; WHITAKER, 2005)

A incerteza declarada do equipamento, para os ensaios da CEC, deve estar dentro da faixa de incerteza preferível. Deve-se observar que para atingir uma incerteza na medida de eficiência energética abaixo de ± 1 % as medidas individuais de potência c.c. e c.a. devem estar abaixo da incerteza máxima preferida apresentada na Tabela 3. Uma análise de incerteza detalhada não é necessária para os testes CEC, mas a incerteza dos equipamentos de medida deve ser verificada, através de calibração, por exemplo (BROOKS; WHITAKER, 2005).

Tensões e correntes de entrada devem ser medidas nos terminais de entrada do equipamento sob ensaio, ou entre a fonte de entrada (ex. arranjo fotovoltaico) e o ponto de conexão de qualquer equipamento ancilar ou opcional externo ao ESE. Tensões e correntes de saída devem ser medidas nos terminais de saída do ESE ou nos terminais de saída do transformador de saída, quando o mesmo se fizer necessário.

2.3.2.2 Fontes de potência c.c., simuladores fotovoltaicos e arranjos fotovoltaicos.

Para os ensaios CEC não é necessário que a fonte c.c. apresente curva característica FV de tensão e corrente. Independente da fonte de alimentação ser uma fonte c.c., um simulador fotovoltaico ou um arranjo fotovoltaico de tamanho apropriado, os seguintes requisitos mínimos devem ser seguidos.

- Ondulação de tensão máxima de 1 % em toda a faixa esperada de operação.
- Potência suficiente para que limitações da fonte de alimentação não afetem os resultados.
- Tensão de saída ajustável com faixa igual a no mínimo a faixa de entrada do inversor.

Quando a fonte de alimentação tiver pouca ou nenhuma proteção contra surtos de saída, uma impedância RL série deve ser colocada entre a fonte de alimentação e o equipamento sob ensaio para garantir as seguintes condições.

- Limitar surtos de correntes para o inversor.
- Isolar a saída da fonte de alimentação da entrada do equipamento sob ensaio para eliminar iterações indesejadas (ex. o regulador de tensão da fonte c.c. controlando o ponto de operação do inversor ou vice-versa).
- Isolar os capacitores de saída da fonte de alimentação para limitar a mudança em valor de magnitude da ondulação de tensão para não menos que 90 % do valor medido, usando um arranjo FV de tamanho adequado.

Os valores de resistência e indutância devem permanecer dentro de ± 5 % do valor medido durante todo o ensaio. Os componentes devem ser dimensionados para, no mínimo, 150 % do valor de potência dissipada, tensão e corrente.

Quando um arranjo fotovoltaico real é utilizado como fonte de alimentação, os cabos devem ser dimensionados de forma que a queda de tensão seja inferior a 2 % da tensão c.c. nominal. O arranjo deve ser configurado para minimizar *loops* indutivos e deve ser protegido segundo os requisitos do NEC.

2.3.2.3 Fonte simuladora de rede c.a..

A fonte simuladora de rede c.a. utilizada para os ensaios CEC deve atender às seguintes especificações mínimas (uma combinação de fonte c.a. e banco de cargas pode ser usado para satisfazer os requisitos).

- Distorção harmônica total máxima de 2,5 % e não influenciável pela corrente de saída do inversor.
- Impedância máxima em 60 Hz menor do que 5 % da impedância de saída do inversor, onde a impedância de saída do inversor é definida como a tensão nominal dividida pela corrente nominal do inversor, operando em fator de potência unitário. A impedância pode ser um arranjo série ou paralelo de resistores, indutores e capacitores externos caso seja necessário.
- Potência nominal de ao menos 150 % da potência nominal do inversor em 60 Hz.
- Capacidade de absorver a potência total fornecida pelo inversor, em toda a faixa de operação de tensão do mesmo.
- Tensão e frequência ajustáveis, e no mínimo iguais as nominais do inversor, com variação continua ou incrementos de até ± 5 % do valor nominal.
- Estabilidade de frequência – a frequência não deve oscilar mais do que 0,1 Hz durante qualquer ensaio.
- Resposta a uma alteração em passo de ± 50 % da potência nominal sem causar uma alteração maior do que 5 % da tensão de saída
- Constantes de tempo associadas a forma de onda de referência consistentes com mudanças esperadas da potência associadas com os testes.
- Taxa de variação de tensão de no mínimo 10 Volts/ciclo.
- Taxa de variação de frequência de no mínimo 1 Hz/ciclo.
- Capacidade de suportar desconexão de carga instantânea (circuito aberto) na saída.

2.3.2.4 Requisitos dos equipamentos – Performance Test Protocol for Evaluating Inverters Used in Grid-Connected Photovoltaic Systems, versão 2015.

No protocolo de testes versão 2015, ainda não implementado pela CEC, permanecem todos os requisitos já descritos anteriormente, com exceção dos limites de incerteza dos equipamentos, que deixam de ter um limite preferível e passam a ter apenas um limite absoluto, apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Requisitos de máxima incerteza para equipamentos de medida - Sandia Test Protocol 2015

Parâmetro ***True RMS*** **(U, I, P)**	**Máxima Incerteza Aceitável**	**Máxima Incerteza Preferível**
Tensão c.c.*	± 0,25 % da leitura	Removido
Tensão c.a.	± 0,25 % da leitura	Removido
Corrente c.c.*	± 0,5 % da leitura	Removido
Corrente c.a.	± 0,5 % da leitura	Removido
Potência c.c.*	± 0,5 % da leitura	Removido
Potência c.a.**	± 0,5 % da leitura	Removido
Frequência	± 0,01 Hz	Removido
Temperatura	± 0,5 ºC	Removido
Ondulação de corrente c.c.	± 1 % da leitura	Removido
* Nota: Medidas de tensão e corrente devem ser "*True RMS*". Instrumentos *"True RMS"* incluem a contribuição da ondulação c.a. no valor c.c. da medida. A ondulação c.a. no valor c.c. deve ser considerado quando a magnitude da ondulação for superior a 2 % do valor c.c.. Medidas de potência realizadas através de amostragem eletrônica e integração matemática devem considerar a diferença de fase entre a ondulação de tensão e corrente quando a magnitude de um for superior a 2% do valor c.c..		
** Nota: A medida de potência c.a. deve incluir apenas a potência útil em 60 Hz		

Fonte: (NEWMILLER; BLODGETT; GONZALEZ, 2015)

2.3.3 Requisitos ambientais

A norma CEC impões condições ambientais diferentes para os equipamentos de medida e o equipamento sob ensaio e serão apresentadas nessa seção.

2.3.3.1 Equipamentos de medida

Os instrumentos e equipamentos de medida devem seguir os requisitos ambientais descritos em seus respectivos manuais.

2.3.3.2 Equipamento sob ensaios

Para colocar o inversor em equilíbrio térmico mais rapidamente e garantir a estabilização de elementos massivos para inversores grandes, antes da realização dos ensaios,

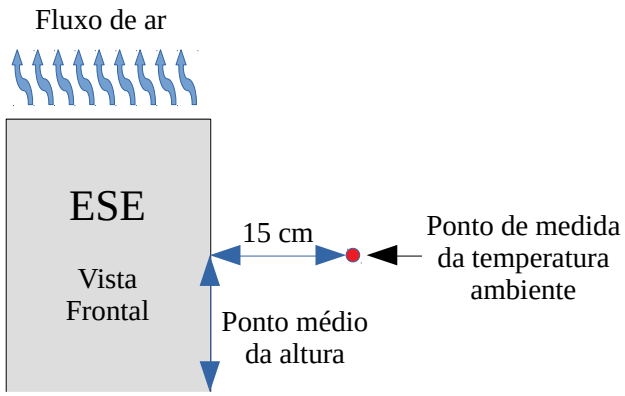
o mesmo deve ser armazenado em temperatura de 45ºC ± 5ºC por, no mínimo, 24 horas imediatamente precedendo o ensaio. Caso os ensaios sejam realizados fora do laboratório (ex. sede do fabricante) e o metrologista não testemunhar o procedimento, deverá ser fornecido dados de acompanhamento da temperatura do dissipador de calor do inversor, mostrando que o mesmo foi exposto a temperatura de 45ºC pelo tempo necessário. Cabe ao metrologista a decisão de aceitar esses dados ou reiniciar o procedimento de aquecimento sob seu controle.

Define-se, para esse protocolo de ensaios, que a estabilidade térmica do equipamento sob ensaio é atingida quando três medidas sucessivas, realizadas com intervalos não inferiores a 30 minutos, após um tempo de operação inicial de 150 minutos, não tiverem variação superior a 1 ºC entre duas delas. Durações menores podem ser utilizadas, se for possível demonstrar que a unidade atingiu o equilíbrio térmico.

Alguns inversores podem ter uma temperatura de operação oscilatória, baseada no ciclo dos ventiladores utilizados em sistemas de resfriamento ativos. Nesse caso, a estabilização térmica é considerada como o ponto de temperatura mais alto atingido pelo equipamento. Inversores muito grandes podem ter magnéticos que demoram mais de 10 horas para atingir o equilíbrio térmico. Esse protocolo requer apenas a estabilização térmica do dissipador, como uma consideração prática.

A medida da temperatura ambiente, quando necessária, deve ser realizada a, no mínimo, 15 cm de distância horizontal do corpo do equipamento, no ponto médio da altura e fora da convecção ou fluxo forçado de ar, conforme demonstrado na Figura 8. O movimento do ar ambiente deve ser minimizado para o mínimo necessário para se manter a temperatura ambiente no valor especificado.

Figura 8 - Ponto ideal de medida da temperatura ambiente



Fonte: Próprio autor

Quando uma câmara térmica é utilizada para controlar a temperatura, tapumes ou isolações secundarias podem ser necessários para atingir esse requerimento. A medida da temperatura ambiente não pode ser impactada diretamente pela temperatura de operação do ar que passa pelo inversor (convecção ou fluxo forçado). Salas são preferíveis a câmaras térmicas devido a menor necessidade de movimento do ar para manter a temperatura. O motivo para se limitar o movimento de ar é para evitar a interferência em sistemas de resfriamento passivos, onde até mesmo o menor fluxo de ar pode afetar drasticamente o desempenho da unidade.

A umidade relativa do ar não é considerada nesse procedimento de ensaios, porém, quando se aumenta a temperatura de um ambiente fechado para 40 ºC, a umidade relativa normalmente cai para valores abaixo de 50 %. Se a umidade relativa da área de ensaios é superior a 50 % em temperatura ambiente de 40 ºC, é provável que umidade esteja sendo adicionada ao ar para alterar os resultados do ensaio. A umidade da área de testes deve ser registrada e não se deve adicionar umidade ao ar para melhorar a transferência de calor do equipamento.

2.3.4 Procedimento de ensaio

A medida de potência c.a. de saída deve ser realizada nos terminais de saída do inversor ou nos terminais de saída do transformador, quando o mesmo for necessário. Se o transformador não for fornecido pelo fabricante, um transformador com características iguais ou superiores as mínimas especificadas pelo fabricante deve ser utilizado. O relatório de ensaios deve descrever qualquer transformador utilizado durante os ensaios, e salientar se o mesmo foi fornecido ou não pelo fabricante.

Equipamentos opcionais e ancilares, incluindo ventiladores, luzes, telas, equipamentos de comunicação externos, etc., devem ser incluídos nas medidas, adicionando-se o consumo desses equipamentos na medida de potência de entrada do ESE, ou reduzindo-se da potência de saída. Tais equipamentos devem ser operados em sua potência máxima durante os ensaios. Os ensaios podem ser repetidos sem o uso dos equipamentos opcionais, mas os resultados devem ser claramente distinguidos como “Sem Equipamento Opcional”.

No caso de múltiplos inversores compartilharem o mesmo transformador, os inversores serão individualmente medidos na sua saída. As perdas do transformador serão medidas isoladamente nos diferentes níveis de potência e quando múltiplos inversores estiverem conectados no mesmo transformador, as perdas devem ser divididas pelo número mínimo de inversores normalmente conectados. A fração resultante das perdas deve então ser utilizada

para o cálculo da eficiência de cada inversor, reduzindo-se esse valor da potência de saída do inversor.

Inversores que forem capazes de operar em mais de uma faixa de operação (ex. 127 V e 220 V) devem ser testados em cada faixa de tensão, como se fossem modelos diferentes. Inversores com múltiplas entradas devem ser testados com todas as entradas ativas. Os ensaios podem ser repetidos com combinações diferentes de entrada (ex. utilizando-se apenas uma entrada para um inversor com duas), nesse caso, porém, deve constar no relatório de ensaios o número de entradas que foi utilizado.

2.3.4.1 Máxima potência de saída contínua

Esse ensaio estabelece a potência máxima que o equipamento pode sustentar por um período de, no mínimo, 180 minutos, em uma temperatura ambiente de 40ºC, após atingir o equilíbrio térmico.

Para esse ensaio é necessário se definir as seguintes variáveis:

- **Tensão c.c. mínima (V_{CCmin}) –** Tensão de entrada mínima, especificada pelo fabricante, para operação do equipamento sob ensaio. Pode ser uma função da tensão c.a. de operação do mesmo.
- **Tensão c.c. máxima (V_{CCmax}) –** Tensão máxima de entrada, especificada pelo fabricante, para operação do equipamento sob ensaio. Pode ser uma função da tensão c.a. de operação do mesmo.
- **Tensão c.c. nominal (V_{CCnom})** – Tensão nominal de entrada do equipamento. Pode ser fornecida pelo fabricante, sendo um valor entre $V_{CCmin}+0,25*(V_{CCmax} - V_{Ccmin})$ e $V_{CCmin}+0,75*(V_{CCmax} - V_{Ccmin})$. Caso não seja fornecido ou o valor informado esteja fora dessa faixa, utiliza-se a média de V_{CCmin} e V_{CCmax}.
- **Tensão c.a. (V_{CA}) –** Tensão nominal de saída do equipamento, especificada pelo fabricante como ponto de operação do inversor.
- **Potência c.a. (P_{CA}) –** Potência nominal de saída, definida pelo fabricante.

O ensaio deve ser realizado nas condições nominais de entrada e saída do ESE.

Exemplo 1: Tensão c.c. nominal não fornecida pelo fabricante ou fora dos limites da norma.

Tabela 5 - Dados de placa inversor hipotético 1

Modelo	Inversor 1
Potência Nominal de saída c.a.	3000 W
Tensão nominal de operação c.a.	220 V
Tensão mínima de entrada do SPMP	250 V
Tensão máxima de entrada do SPMP	450 V
Tensão máxima de entrada	500 V

Fonte: Próprio autor

O ensaio no equipamento “Inversor 1” deve ser realizado com as seguintes condições:

$$\mathbf{V_{CA} = 220\ V}$$

$$\mathbf{Vcc = \frac{V_{CCmin} + V_{CCmax}}{2} = 350\ V}$$

$$\mathbf{P_{CA} = 3000\ W}$$

Exemplo 2: Tensão c.c. nominal fornecida pelo fabricante.

Tabela 6 - Dados de placa inversor hipotético 2

Modelo	Inversor 2
Potência Nominal de saída c.a.	3000 W
Tensão nominal de operação c.a.	220 V
Tensão mínima de entrada do SPMP	250 V
Tensão nominal de entrada do SPMP	300 V
Tensão máxima de entrada do SPMP	450 V
Tensão máxima de entrada	500 V

Fonte: Próprio autor

O ensaio no equipamento “Inversor 2” deve ser realizado com as seguintes condições:

Limite mínimo de $V_{CC} = V_{CCmin}.\ 0{,}25.\ (V_{CCmax} - V_{CCmin}) = 300$ V

Limite máximo de $V_{CC} = V_{CCmin}.\ 0{,}75.\ (V_{CCmax} - V_{CCmin}) = 400$ V

A tensão c.c. nominal fornecida pelo fabricante encontra-se dentro da faixa delimitada pela norma, logo, as condições para o ensaio são:

$$\mathbf{V_{CA} = 220\ V}$$

$$\mathbf{Vcc = 300\ V}$$

$$\mathbf{P_{CA} = 3000\ W}$$

Procedimento de ensaio:

1 - Manter o equipamento sob ensaio em temperatura ambiente de, no mínimo 45ºC, por um tempo não inferior a 24 horas antes de iniciar o ensaio.

2 - Ajustar a temperatura ambiente para 40ºC ± 3 ºC.

3 - Instalar o ESE conforme instruções do fabricante para simular as condições reais de operação (ex. Posição de operação, espaço livre em torno do equipamento, suporte fornecido pelo fabricante).

4 - Conectar o ESE de acordo com as instruções e especificações fornecidas pelo fabricante às fontes de alimentação e ao simulador de rede c.a..

5 - Definir os parâmetros da fonte de alimentação c.c. e fonte simuladora de rede c.a. para os valores nominais de operação do ESE.

6 - Verificar e, se necessário, definir os parâmetros do ESE para as condições nominais do ensaio (ex. Escolha da tensão de saída, número de entradas c.c.).

7 - Ajustar o ESE (e as fontes de entrada conforme o necessário) para que o mesmo forneça 100 % de sua potência c.a. nominal.

8 - Registrar todas as configurações do equipamento.

9 - Ajustar o ESE (e as fontes de entrada conforme o necessário) para que o mesmo forneça sua potência c.a. máxima definida pelo fabricante.

10 - Deixar o ESE funcionando por, no mínimo, 150 minutos e até que a temperatura do dissipador se estabilize.

11 - Após a estabilização da temperatura do dissipador, medir e registrar os seguintes valores, em intervalos de 5 minutos por, no mínimo, 180 minutos (amostragem contínua a taxas maiores calculando a média a cada 5 minutos é preferível):

- Tensão de entrada (c.c. e c.a.).
- Corrente de entrada (c.c. e c.a.).
- Potência de entrada (média c.c. + c.a. *RMS*).
- Tensão de saída (c.a.).
- Potência de saída (c.a.).
- Temperatura ambiente (ºC).
- Temperatura do dissipador do ESE (ºC).

12 - Caso o ESE se desligue, reduzir a potência de entrada em um valor definido pelo fabricante e reiniciar o ensaio. Se o teste for reiniciado imediatamente, não é necessário repetir o passo 10, pois o equipamento já está aquecido.

O valor a ser reportado no relatório de ensaios como “Máxima potência de saída contínua” é a menor média registrada durante o ensaio e medida em kW.

Para ensaios realizados com temperatura ambiente inferior a 40 ºC, o valor deve ser reportado como “Máxima potência de saída continua com temperatura reduzida (XXºC)”

2.3.4.2 Eficiência de conversão

Esse ensaio mede a eficiência de conversão entre a fonte c.c. (painel FV) e a saída c.a.. A série de ensaios descrita nessa seção irá caracterizar a eficiência de conversão do ESE como uma função da potência do arranjo FV, tensão do arranjo FV, tensão da rede elétrica e temperatura ambiente.

As condições de tensão c.c. mínima, nominal e máxima são as mesmas adotadas para o teste de máxima potência de saída contínua. Os pontos de operação para realização do ensaio são apresentados na Tabela 7, a tolerância para cada ponto é apresentada na Tabela 8.

Tabela 7 - Condições de ensaio para medição de eficiência de conversão

Teste	**V_{CC}**	**V_{CA}**	**Fração da potência de saída nominal do inversor**						
			100 %	**75 %**	**50 %**	**30 %**	**20 %**	**10 %**	**5 %**
A	V_{CCmin}	V_{CAnom}							
B	V_{CCnom}	V_{CAnom}							
C	V_{CCmax}	V_{CAnom}							

Fonte: (BROOKS; WHITAKER, 2005)

Tabela 8 - Tolerâncias para os pontos de potência no ensaio de eficiência de conversão

Potência	**100 %**	**75 %**	**50 %**	**30 %**	**20 %**	**10 %**	**5 %**
Tolerância	± 5 %	± 5 %	± 5 %	± 2,5 %	± 2 %	± 2 %	± 2 %

Fonte: (BROOKS; WHITAKER, 2005)

Procedimento de ensaio:

1 - Manter o equipamento sob ensaio em temperatura ambiente de, no mínimo 45ºC, por um período não inferior a 24 horas antes de iniciar o ensaio. Se esse ensaio for realizado dentro de um intervalo inferior a 1 hora após o teste de máxima

potência de saída contínua, e o ESE não tiver sido exposto a temperatura ambiente inferior a 22ºC, não é necessário realizar esse passo.

2 - Ajustar a temperatura ambiente para 25ºC ± 3 ºC.

3 - Instalar o ESE conforme instruções do fabricante para simular as condições reais de operação (ex. posição de operação, espaço livre em torno do equipamento, suporte fornecido pelo fabricante).

4 - Conectar o ESE de acordo com as instruções e especificações fornecidas pelo fabricante às fontes de alimentação e ao simulador de rede c.a..

5 - Ajustar as fontes de entrada e saída para os valores nominais de operação do ESE a 100 % da potência nominal de saída e operar o ESE por, no mínimo, 150 minutos para colocar os circuitos eletrônicos e componentes em temperatura estável de operação. Caso esse ensaio seja realizado imediatamente após o ensaio de máxima potência de saída continua, não é necessário realizar esse passo.

6 - Ajustar a tensão c.c. de entrada do ESE para a condição “A”, da Tabela 7.

7 - Aguardar a estabilização do SPMP. Caso não seja observada a estabilização, aguardar no mínimo 5 minutos.

8 - Medir e registrar os seguintes valores, em intervalos de 30 segundos, por no mínimo 3 minutos (amostragem contínua a taxas maiores, calculando a média a cada 30 segundos é preferível):

- Tensão de entrada (c.c. e c.a.).
- Corrente de entrada (c.c. e c.a.).
- Potência de entrada (média c.c. + c.a. *RMS*).
- Tensão de saída (c.a.).
- Potência de saída (c.a.).
- Temperatura ambiente (ºC).
- Temperatura do dissipador do ESE (ºC).

9 - Repetir os passos 5 a 8 para as demais condições de tensão de entrada (“B” e “C”), mantendo-se o nível de potência constante. Caso os ensaios sejam realizados consecutivamente não é necessário se realizar o passo 5 (estabilização térmica).

10 - Repetir os passos 5 a 9 alterando-se o nível de potência de forma que todos os níveis sejam ensaiados. Se os ensaios forem realizados consecutivamente não é necessário se realizar o passo 5 (estabilização térmica).

11 - Deve-se obter, no mínimo, 5 conjuntos de resultados para cada ponto do ensaio, (cada média de 30 segundos equivale a 1 conjunto). Os pontos que apresentarem desvio maior do que 3 vezes o desvio padrão, para cada ponto de ensaio, devem ser desconsiderados do resultado final. Executando-se o ensaio com o tempo mínimo de duração (3 minutos por ponto) obtêm-se 7 conjuntos, sendo possível descartar até 2 deles sem prejuízo ao resultado. Caso após as exclusões sobrarem menos do que 5 conjuntos, o ensaio deve ser realizado novamente.

Para cada ponto de ensaio, os valores a serem registrados no relatório de ensaio, conforme exemplo da Figura 9, são:

- Média da potência c.c. de entrada (média dos conjuntos)
- Média da potência c.a. de saída (média dos conjuntos)
- Eficiência (Média da potência c.a. de saída/ Média da potência c.c. de entrada. Esses são os valores a serem preenchidos na Tabela 7.

Além disso, os valores a serem registrados em cada conjunto de dados, para anexo ao relatório de ensaios, conforme exemplo da Figura 10, são:

- Potência de saída
- Tensão de entrada
- Eficiência

A eficiência de pico do equipamento é definida como o maior valor de eficiência medido entre todos os pontos de ensaio da Tabela 7.

A eficiência média nominal do equipamento é definida como a média dos 9 valores de eficiência medidos para as condições “A”, “B” e “C” e os pontos de potência de 50 %, 75 % e 100 %, conforme a área sombreada da Tabela 7.

A eficiência ponderada do equipamento é uma ferramenta comparativa útil para projetistas e consumidores, pois os equipamentos são instalados nos mais variados regimes de irradiância e temperatura. O valor da eficiência ponderada é estimado de acordo com os padrões climáticos de diferentes lugares (eficiência CEC = Sudoeste dos EUA, eficiência Euro = Europa média), em função do tempo em que o inversor opera em uma determinada faixa de potência, ao longo de um ano. As eficiências ponderadas CEC e Euro são calculadas utilizando a equação 3 e os fatores apresentados na Tabela 9:

$$\eta_{ponderada} = F_1\eta_5 + F_2\eta_{10} + F_3\eta_{20} + F_4\eta_{25} + F_5\eta_{30} + F_6\eta_{50} + F_7\eta_{75} + F_8\eta_{100} \qquad (3)$$

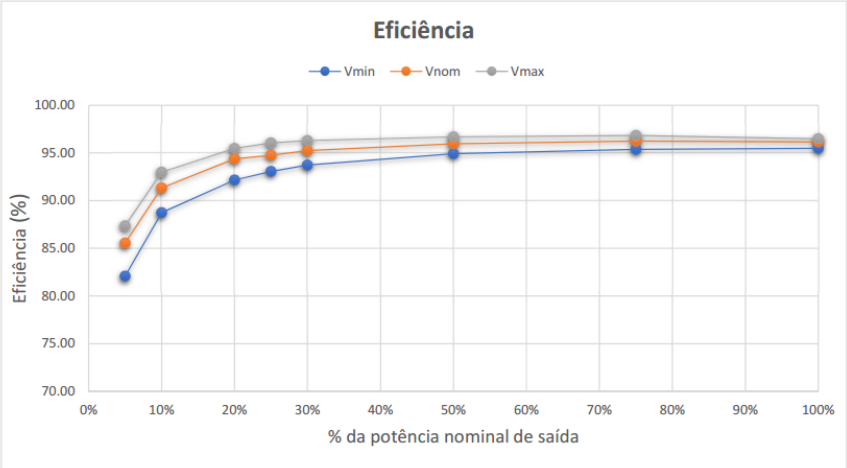
Figura 9 - Exemplo de relatório de ensaio CEC com dados de inversor hipotético

Fabricante:
Modelo:

Máxima potência contínua de saída: 1.502 kW **Consumo noturno:** 0 W
Vmin: 200 Vdc **Vnom:** 300 Vdc **Vmax:** 400 Vdc

Tensão	Nível de potência (% da nominal)								Eficiência	
Entrada	5%	10%	20%	25%	30%	50%	75%	100%	CEC	Euro
Vmin	82.07	88.73	92.15	93.07	93.72	94.91	95.37	95.48	94.65	93.79
Vnom	85.55	91.33	94.38	94.75	95.25	95.97	96.24	96.14	95.77	95.13
Vmax	87.36	92.97	95.47	96.05	96.29	96.69	96.82	96.48	96.49	95.95

Eficiência CEC = 95.64 % Eficiência Euro = 94.96 %



Fonte: (CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2018b)

Figura 10 – Exemplo de conjuntos de dados registrados e apresentação no relatório CEC do mesmo inversor hipotético

Especificado		Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			Amostra 4			Amostra 5		
Potência de saída	Tensão de entrada	Potência de saída	Tensão de entrada	Eficiência	Potência de saída	Tensão de entrada	Eficiência	Potência de saída	Tensão de entrada	Eficiência	Potência de saída	Tensão de entrada	Eficiência	Potência de saída	Tensão de entrada	Eficiência
(% nominal)	(Vdc)	(W)	(Vdc)	(%)	(W)	(Vdc)	(%)	(W)	(Vdc)	(%)	(W)	(Vdc)	(%)	(W)	(Vdc)	(%)
5%	Vmin	64.03	201.32	82.09	64.04	200.53	82.05	64.04	201.22	82.08	64.04	200.57	82.06	64.03	201.53	82.09
10%	Vmin	141.53	201.54	88.78	141.52	202.66	88.83	141.5	202.72	88.81	141.44	198.97	88.71	141.23	197.5	88.6
20%	Vmin	292.23	202.42	92.15	292.11	202.8	92.14	291.97	203.11	92.16	292.3	20.9	92.11	291.89	202.05	92.13
25%	Vmin	368.81	199.68	93.05	369.09	199.18	93.03	369.07	201.55	93.09	369.04	200.3	93.09	368.91	198.63	93.07
30%	Vmin	445.63	199.07	93.68	445.53	199.55	93.73	445.56	199.61	93.73	445.3	199.73	93.72	445.7	198.94	93.72
50%	Vmin	750.7	201.52	94.92	750.96	201.08	94.9	750.86	201.57	94.92	751.16	200.53	94.9	749.88	203.11	94.92
75%	Vmin	1131.18	199.27	95.37	1131.12	199.52	95.37	1130.37	197.82	95.35	1131.04	200.19	95.38	1130.99	199.14	95.36
100%	Vmin	1508.09	199.07	95.48	1508.05	199.09	95.48	1508.05	199.1	95.48	1508.08	199.08	95.48	1508.07	199.07	95.48
5%	Vnom	66.7	302.51	85.51	66.73	301.32	85.55	66.75	301.3	85.59	66.73	300.02	85.55	66.73	300.05	85.56
10%	Vnom	142.49	297.38	91.34	142.49	302.04	91.34	142.42	298.48	91.3	142.5	298.5	91.35	142.49	301.53	91.34
20%	Vnom	300.08	302.97	94.4	300.09	303.34	94.42	299.85	296.55	94.18	301.14	299.52	94.31	300.11	302.87	94.4
25%	Vnom	376.06	294.72	94.86	376.32	295.76	94.82	375.07	291.57	94.73	375.32	292.15	94.7	375.23	291.79	94.7
30%	Vnom	453.42	96.26	95.24	453.26	295.78	95.24	453.6	297.1	95.22	453.64	297.52	95.26	453.68	297.63	95.24
50%	Vnom	760.67	299.39	96	760.52	299.94	96	754.7	287.46	95.83	756.78	291.39	95.9	760.84	30.87	96.02
75%	Vnom	1142.37	302.81	96.27	1142.39	300.06	96.25	1142.26	297.44	96.24	1141.83	296.02	96.22	1142.52	298.64	96.25
100%	Vnom	1496.82	279.75	96.15	1498.01	280.2	96.14	1496.93	279.77	96.14	1501.27	291.63	96.15	1497.8	280.12	96.13
5%	Vmax	68.14	351.38	87.36	68.13	345.61	87.35	68.14	351.85	87.37	68.13	345.56	87.35	68.14	350.02	87.37
10%	Vmax	144.98	348.23	92.94	145	351.93	92.96	144.03	352.21	93	144.04	342.51	93.01	145	351.45	92.97
20%	Vmax	304.44	344.11	95.71	304.29	342.63	95.71	302.4	338.48	95.5	300.21	336.2	95.05	299.23	333.71	95
25%	Vmax	382.25	352.86	96.04	382.29	350.95	96.04	382.28	353.01	96.05	382.36	347.02	96.09	381.97	354.49	96.03
30%	Vmax	459.25	353.5	96.3	459.29	352.94	96.31	459.27	354.15	96.31	459.32	353.98	96.29	459.16	354.01	96.27
50%	Vmax	766.8	355.38	96.7	767.27	352.05	96.71	767.53	351.33	96.72	767.6	353.38	96.69	766.54	356.06	96.67
75%	Vmax	1151.51	350.51	96.81	1151.25	352.76	96.83	1151.4	352.46	96.83	1151.49	351.49	96.82	1150.82	346.46	96.82
100%	Vmax	1501.51	328.51	96.49	1500.71	328.16	96.49	1496.05	326.12	96.47	1499.25	327.49	96.48	1498.91	327.36	96.47

Fonte: (CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2018b)

Tabela 9 - Fatores de ponderação para cálculo da eficiência ponderada

Fator	Nível de potência do inversor	Fator de ponderação	
		Alta irradiação[1]	Baixa irradiação[2]
F_1	5 %	0,00	0,03
F_2	10 %	0,04	0,06
F_3	20 %	0,05	0,13
F_4	25 %[3]	0,00	0,00
F_5	30 %	0,12	0,10
F_6	50 %	0,21	0,48
F_7	75 %	0,53	0,00
F_8	100 %	0,05	0,20

[1] - Baseado no padrão de irradiação e temperatura representativo do Sudoeste dos EUA

[2] - Também conhecido como Eficiência Europeia

[3] - O ponto de 25 % recebe peso 0 em ambos os fatores e, portanto, é opcional, sendo apresentado apenas para manter a consistência com outras normas.

Fonte: (BROOKS; WHITAKER, 2005)

2.3.4.3 Autoconsumo noturno

Esse ensaio determina a potência c.a. necessária para operar o equipamento em modo de espera, quando não há energia proveniente dos painéis FV.

Procedimento de ensaio:

1 - Ajustar a temperatura ambiente para 25 ºC ± 3 ºC.

2 - Instalar o ESE conforme instruções do fabricante para simular as condições reais de operação (ex. posição de operação, espaço livre em torno do equipamento, suporte fornecido pelo fabricante).

3 - Conectar o ESE de acordo com as instruções e especificações fornecidas pelo fabricante às fontes de alimentação e ao simulador de rede c.a..

4 - Configurar a tensão da fonte c.c. de entrada para zero, configurar a fonte simuladora de rede c.a. para a tensão nominal de operação do ESE.

5 - Medir e registrar a potência c.a. na saída do equipamento.

A potência que flui no sentido da rede para o equipamento deve ser registrada como potência positiva. O resultado do teste deve ser expresso como “Autoconsumo noturno: XX W”, conforme modelo da Figura 9.

2.4 NORMATIZAÇÃO EUROPEIA: EN 50530:2010/A1:2013

A norma EN 50530:2010 foi a terceira das normas de medição de eficiência energética de inversores fotovoltaicos, sendo a primeira a contemplar testes de algoritmos de SPMP. Essa norma incluiu uma emenda em 2013, passando a se chamar EN 50530:2010+A1:2013.

2.4.1 Base conceitual

Com a medida de eficiência de conversão já consolidada pelas outras normas, não há diferenças significativa dela para as outras duas. Os pontos a serem medidos, tanto de tensão de entrada quanto de potência, e os fatores de ponderação utilizados para calcular as eficiências Euro e CEC são os mesmos.

O foco da EN 50530 foi para medida de eficiência dos algoritmos de SPMP, implementando protocolos para medição da eficiência para condições estática, onde os painéis ficam expostos a mesma irradiação durante um longo período (ex. dia de céu claro, sem nuvens) e dinâmica, simulando condições de variação da irradiação com a passagem de nuvens.

Também implementou o conceito de eficiência total, realizando a medida da eficiência de conversão junto com a eficiência do algoritmo de SPMP em condição estática, multiplicando os dois resultados. Devido a isso, e ao fato de a norma EN 50530 considerar os mesmos pesos para as eficiências ponderadas Euro e CEC, a medida realizada segundo a EN 50530 gera resultados de eficiência ligeiramente inferiores aos medidos pela norma CEC ou IEC 61683, que não consideram a eficiência do SPMP.

Essa é a primeira das normas a considerar medidas apenas com módulos fotovoltaicos ou simuladores de painéis FV, não sendo permitida a realização dos ensaios com fonte c.c. fixa. Também estabelece um modelo bem específico de comportamento do sistema fotovoltaico, baseado na tecnologia dos módulos aos quais o inversor se destina. Por padrão, os ensaios são realizados utilizando-se um modelo equivalente aos painéis de silício cristalino (cSi). Caso o inversor seja utilizado para outras tecnologias, como filmes finos ou células multijunção o mesmo deve ser testado para tais tecnologias, alterando-se os parâmetros do modelo FV.

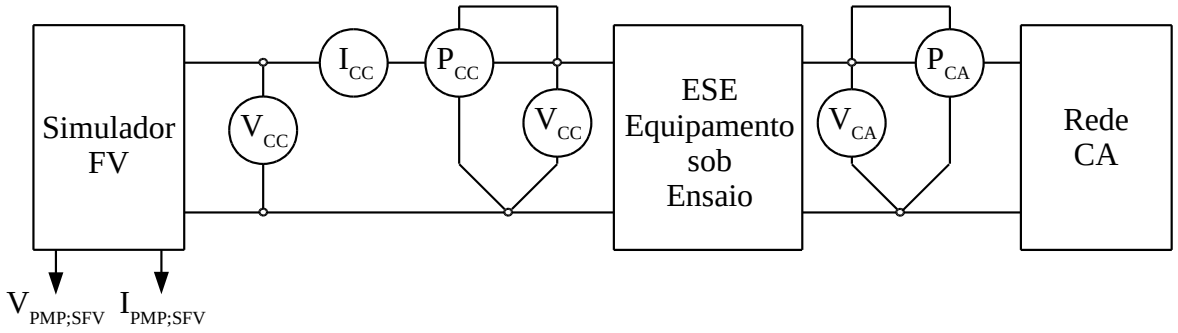
2.4.2 Requisitos dos equipamentos

2.4.2.1 Bancada de ensaio

A Figura 11 mostra o arranjo dos equipamentos para a realização dos ensaios segundo a norma EN 50530. As medidas necessárias durante a realização dos testes são:

- Tensão do PMP, definido no simulador FV: $V_{PMP;SFV}$
- Corrente do PMP, definido no simulador FV: $I_{PMP;SFV}$
- Potência do PMP, definido no simulador FV: $P_{PMP;SFV}$
- Tensão c.c., medida na entrada do ESE: V_{CC}
- Corrente c.c., medida na entrada do ESE: I_{CC}
- Potência c.c., medida na entrada do ESE: P_{CC}
- Potência c.a., medida na saída do ESE: P_{CA}

Figura 11- Bancada de ensaios



Fonte: (EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION (CENELEC), 2013)

As medidas podem ser realizadas por equipamentos específicos para cada variável (voltímetro, amperímetro, etc) ou por equipamentos capazes de realizar todas as medidas simultaneamente (analisadores de energia). No caso de analisadores de energia, a sincronia de tempo entre as variáveis é garantida, porém, quando utilizados equipamentos independentes, é necessário se garantir que as medidas de tensão e corrente sejam realizadas no mesmo instante de tempo, para garantir a precisão dos resultados.

Tanto a taxa de amostragem quanto a taxa de armazenamento dos dados não são definidas pela norma. Contudo, essas devem ser suficientemente altas para mapear o comportamento específico do SPMP do ESE, em particular a flutuação da tensão de entrada que aparece nos terminais de entrada do ESE como um múltiplo da frequência da rede c.a..

2.4.2.2 Simulador de arranjo fotovoltaico (simulador FV)

Para que seja possível determinar a eficiência do algoritmo de SPMP, de acordo com os ensaios previstos na norma, o simulador FV deve ser apropriado para simular as características estáticas e dinâmicas de um arranjo FV. Os requisitos mínimos de precisão a serem cumpridos pelo simulador de painéis FV são descritos na Tabela 10.

Tabela 10 - Requisitos gerais da curva I/V característica do simulador FV

Parâmetro	**Tecnologia cSi**	**Tecnologia de filmes finos**	**Tolerância**
$\frac{V_{MPP}\vert_{G=200\,W/m^2}}{V_{MPP}\vert_{G=1000\,W/m^2}}$	0,95	0,98	± 1%
$\frac{V_{MPP:STC}}{V_{OC:STC}}$	0,8	0,72	< 1 %
$\frac{I_{MPP:STC}}{I_{SC:STC}}$	0,9	0,80	< 1 %

Fonte: (EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION (CENELEC), 2013)

Além disso, o simulador FV deve gerar uma curva I-V que se comporte tal como ao modelo de painéis FV definido a seguir, para as diferentes tecnologias (cSi, filmes finos, etc.), levando em consideração os parâmetros da Tabela 11.

Tabela 11- Parâmetros para simulação de arranjos fotovoltaicos

Parâmetro	**Painel cSi**	**Painel Filmes finos**	**Tolerância**
FF_U	0,8	0,72	< 1%
FF_I	0,9	0,8	< 1%
C_G [W/m²]	2,514E-03	1,252E-03	-
C_V	8,593E-02	8,419E-0,2	-
C_R [m²/W]	1,088E-04	1,476E-04	-
V_{L2H}	0,95	0,98	± 1%
α [%/ºC]	0,04	0,02	-
β [%/ºC]	-0,4	-0,2	-

Fonte: (EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION (CENELEC), 2013)

2.4.2.2.1 Modelo de painel fotovoltaico.

a) Fator de forma de tensão (FF_U), fator de forma de corrente (FF_I), e relação entre a tensão de PMP com irradiação de 200 W/m² e 1000 W/m² (V_{L2H}), dados respectivamente por:

$$FF_U = \frac{V_{PMP;STC}}{V_{OC;STC}} \tag{4}$$

$$FF_I = \frac{I_{PMP;STC}}{I_{SC:STC}} \tag{5}$$

$$V_{L2H} = \frac{V_{PMP}|_{G=200\frac{W}{m^2}}}{V_{PMP}|_{G=1000\frac{W}{m^2}}} \tag{6}$$

b) Corrente de curto circuito (I_{SC}) em função da irradiação (G) e temperatura (T):

$$I_{SC} = I_{SC;STC}\frac{G}{G_{STC}} . \left(1 + \alpha . (T_{FV} - T_{STC})\right) \tag{7}$$

c) Tensão de circuito aberto (V_{OC}) em função da irradiação (G) e temperatura (T):

$$V_{OC} = V_{OC;STC} . \left(1 + \beta . (T_{FV} - T_{STC})\right)\left(\ln\left(\frac{G}{C_G} + 1\right) . C_V - C_R . G\right) \tag{8}$$

As variáveis que incluem STC em seu nome consideram as condições de teste padrão:

- Temperatura de célula de 25 ºC (T_{STC}).
- Irradiação de 1000 W/m² (G_{STC}).

2.4.2.2.2 Especificações para características estáticas

A curva característica I-V deve satisfazer o modelo apresentado na saída do simulador de módulos fotovoltaicos. O valor dos parâmetros a serem definidos para cada curva (V_{OC}, V_{PMP}, P_{PMP}, FF_U e FF_I) é decisivo para o resultado dos ensaios. A curva gerada pelo simulador

FV deve estar dentro de uma tolerância de 1 % do valor de potência da curva que foi programada no mesmo, dentro da faixa de operação de 0,9*$V_{PMP:SFV}$ até 1,1*$V_{PMP:SFV}$ (caso o equipamento sob ensaio trabalhe em tensões menores do que 0,9*$V_{PMP:SFV}$, o simulador deve manter a precisão dentro da faixa de operação do ESE).

O simulador de painéis FV deve simular a curva característica I-V do modelo apresentado, mesmo para variações transitórias dos parâmetros V_{OC}, V_{PMP}, P_{PMP}, etc. Qualquer passo de variação desses parâmetros (ex. durante as rampas do ensaio dinâmico) deve ser o menor possível, e pelo menos inferior a 1 % do valor nominal de saída.

2.4.2.2.3 Especificações de estabilidade

Durante o tempo de realização das medidas do ensaio, a potência do PMP não deve oscilar mais do que 0,1 % do valor definido, desconsiderando-se as variações causadas pelo algoritmo de SPMP.

2.4.2.2.4 Especificações para características dinâmicas.

O simulador de painéis FV deve permitir uma operação apropriada do equipamento sob ensaio com respeito ao algoritmo de SPMP. Isso requer uma dinâmica suficiente do simulador FV para seguir as mudanças dinâmicas que ocorrem na tensão (ex. a oscilação de tensão de entrada no dobro da frequência da rede inversores monofásicos).

As especificações das características dinâmicas do simulador FV podem variar bastante dependendo das propriedades do ESE. Portanto, há a possibilidade do simulador FV precisar de requisitos maiores. Uma dinâmica insuficiente por parte do simulador FV pode afetar o algoritmo de SPMP do ESE. Isso se aplica especialmente para métodos que são baseados na correlação da tensão e da corrente de entrada. Por isso recomenda-se que, antes da realização dos ensaios, verifique-se a compatibilidade do simulador FV com o equipamento a ser testado, preferencialmente comparando-se o comportamento do ESE quando conectado ao simulador FV e a um arranjo FV real.

2.4.2.2.5 Calibração

Diferenças entre a curva I-V definida no simulador FV e a curva gerada podem afetar consideravelmente os resultados. Portanto, antes da realização dos ensaios, deve-se garantir: i)

que os parâmetros resultantes da configuração do simulador FV (V_{OC}, V_{PMP}, P_{PMP}, etc.) sejam adequados e ii) que o simulador FV funcione de forma correta quando conectado ao ESE.

2.4.2.3 Fonte de alimentação c.a.

Segundo a norma EN 50160, a forma preferível para uso junto à entrada c.a. é o uso de uma fonte simuladora de rede c.a., que forneça uma tensão estável e livre de interferência. Caso um simulador de rede c.a. não seja utilizado, é necessário garantir que o comportamento do equipamento sob ensaio não seja afetado pela rede, através de níveis de tensão ou distorções harmônicas.

Todas as medidas devem ser realizadas na tensão c.a. especificada, com tolerância de ± 3 %, e na frequência especificada, com tolerância de ± 0,1 Hz.

2.4.3 Requisitos ambientais

Os requisitos ambientais a serem seguidos durante a realização dos ensaios, para a norma EN 50530, são referentes apenas a temperatura ambiente. As medidas devem ser realizadas com uma temperatura ambiente de 25ºC ± 5ºC. Entretanto, valores diferentes dessa faixa podem ser mutuamente acordados entre o laboratório e o fabricante do equipamento. Esses requisitos se aplicam a temperatura a que o ESE é submetido e, a faixa de operação dos demais equipamentos (simuladores FV, equipamentos de medida, etc.) também deve ser respeitada conforme especificação dos mesmos. A temperatura ambiente no momento dos testes deve constar no relatório de ensaio.

2.4.4 Procedimento de ensaio

2.4.4.1 Eficiência do SPMP em condição estática e eficiência de conversão

Os ensaios de eficiência de conversão e eficiência do SPMP em condição estática, devem ser realizados ao mesmo tempo. Para cada condição especificada na Tabela 12, uma curva I-V deve ser gerada e simulada pelo simulador FV. Para equipamentos com diversas entradas c.c. independentes, os ensaios devem ser realizados para todas as configurações de entrada, conforme solicitado pelo fabricante (ex. inversores com 2 entradas c.c. e que podem operar com apenas 1 devem realizar dois ensaios). Somente caso seja especificado de forma contrária pelo fabricante, a potência total deve ser igualmente dividida entre as entradas c.c.. A

norma EN 50530 apresenta apenas as condições com que o ensaio deve ser realizado (tempo de medida, tempo de espera, forma de cálculo, etc.) mas não especifica um procedimento de ensaio. Por exemplo, não há especificação na norma sobre iniciar o ensaio pela tensão mínima ou máxima ou ainda pelo nível de potência de 5 % ou 100 %. Uma das formas possíveis de realizar o ensaio, atendendo à norma, é descrita a seguir:

Procedimento de ensaio:

1 - Ajustar a temperatura ambiente para 25 ºC ± 5 ºC.

2 - Instalar o ESE conforme instruções do fabricante para simular as condições reais de operação (ex. posição de operação, espaço livre em torno do equipamento, suporte fornecido pelo fabricante).

3 - Conectar o ESE de acordo com as instruções e especificações fornecidas pelo fabricante ao simulador de painéis FV e à fonte simuladora de rede c.a..

4 - Definir os parâmetros da fonte simuladora de rede c.a. para as condições nominais de ensaio (ex. tensão, frequência, potência, etc).

5 - Configurar a curva FV para os parâmetros equivalentes a tensão mínima de entrada c.c., nível de potência de 100 % e modelo de módulos FV de cSi.

6 - Aguardar 5 minutos para a estabilização do algoritmo de SPMP (dados eventualmente coletados durante o período de estabilização não devem ser considerados para o cálculo da eficiência).

7 - Medir e registrar, durante 10 minutos, os valores de:

- Tensão do PMP, definido no simulador FV: $V_{PMP;SFV}$
- Corrente do PMP, definido no simulador FV: $I_{PMP;SFV}$
- Potência do PMP, definido no simulador FV: $P_{PMP;SFV}$
- Tensão c.c., medida na entrada do ESE: V_{CC}
- Corrente c.c., medida na entrada do ESE: I_{CC}
- Potência c.c., medida na entrada do ESE: P_{CC}
- Potência c.a., medida na saída do ESE: P_{CA}

8 - Repetir os passos 5 a 7, para os outros 7 níveis de potência do inversor, mantendo a entrada c.c. e o tipo de módulos FV inalterados. Alterando-se apenas a potência, o tempo de estabilização do SPMP pode ser reduzido para 2 minutos.

9 - Repetir os passos 5 a 8, para os outros 2 valores de tensão de entrada, tensão c.c. nominal (ou a média entre o valor mínimo e máximo, caso o fabricante não informe um valor nominal) e máxima (caso a tensão máxima de SPMP seja

superior a 80 % da tensão c.c. máxima, suportada pelo conversor, utilizar 0,8*V_{CCmax} para garantir que a tensão de circuito aberto não seja superior ao valor máximo suportado pelo equipamento).

10 - Repetir os passos 5 até 9, alterando a tecnologia dos módulos FV para os demais tipos a serem utilizados pelo inversor (ex. filmes finos). Caso o equipamento seja destinado apenas ao uso de painéis de cSi, não é necessário realizar esse passo.

Tabela 12 – Condições de ensaio para avaliação da eficiência do algoritmo de SPMP em condição estática

Tensão do PMP da curva I/V característica simulada pelo emulador FV	**Característica da curva I/V simulada**	**Potência do PMP da curva I/V simulada normalizada para a potência c.c., $P_{PMP,PVS}/P_{CC,n}$**							
		0,05	**0,10**	**0,20**	**0,25**	**0,30**	**0,50**	**0,75**	**1,00**
V_{PMPmax} (0,8. V_{CCmax}[a,c])	c-Si								
V_{PMPnom}	c-Si								
V_{PMPmin}	c-Si								
U_{PMPmax} (0,7 . V_{CCmax}[a,c])	TF[b]								
V_{CCnom}	TF[b]								
V_{PMPmin}	TF[b]								

A tensão do PMP em diferentes condições de ensaio (V_{PMPmax}, V_{MPnom}, U_{PMPmin}) deve ser mantida constante durante o ensaio, em todos os níveis de potência.

[a] O menor valor deve ser utilizado. As tensões de PMP especificadas garantem que a correta operação do SPMP não seja afetada pelos limites de tensão

[b] Para ESE que não se destina a operação com tecnologia de módulos FV de filmes-finos, esses pontos podem ser omitidos

[c] Para outras tecnologias de célula FV o valor $V_{PMPmax} = n.V_{DCmax}$ deve ser configurado de acordo

Fonte: (EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION (CENELEC), 2013)

2.4.4.1.1 Cálculo das eficiências de conversão e de SPMP em condição estática

A partir dos dados levantados durante o ensaio, a eficiência do algoritmo de SPMP deve ser calculada através da eficiência energética do sistema através da Equação 9:

$$\eta_{SPMP} = \frac{\int_0^{T_M} P_{CC}(t).dt}{\int_0^{T_M} P_{PMP}(t).dt} \quad (9)$$

Onde:

P_{CC} é a potência c.c. na entrada do ESE

P_{PMP} é a potência máxima do PMP, definida no simulador fotovoltaico

O valor de P_{DC} pode ser diretamente medido, ou calculado a partir de V_{CC} e I_{CC}, o valor de P_{PMP} é o valor definido no simulador fotovoltaico e deve ser devidamente conhecido, através de calibração, conforme mencionado nas especificações do equipamento, diferenças entre o valor definido e o valor real impactam diretamente o resultado do ensaio.

A Equação 10 também pode ser reescrita para sistemas digitais de aquisição de dados que realizam integração discreta por:

$$\eta_{SPMP} = \frac{1}{P_{PMP;SFV} \,.\, T_M} \cdot \sum_i V_{CC,i} \,.\, I_{CC,i} \,.\, \Delta T \quad (10)$$

Onde:

$V_{CC,i}$ é o valor de tensão amostrado na entrada do ESE.

$I_{CC,i}$ é o valor de corrente amostrado na entrada do ESE.

T_M é o tempo total de ensaio

ΔT = Intervalo entre duas amostragens

A eficiência de conversão também deve ser calculada como eficiência energética, considerando-se que os valores de entrada e saída devem ser medidos no mesmo instante de tempo, é possível simplificar os termos ΔT da equação:

$$\eta_{Conv} = \frac{1}{\sum_i V_{CC,i} \,.\, I_{CC,i} \,.\, \Delta T_e} \cdot \sum_i V_{CA,i} \,.\, I_{CA,i} \,.\, \Delta T_s \quad (11)$$

Onde:

$V_{CC,i}$ é o valor de tensão amostrado na entrada do ESE.

$I_{CC,i}$ é o valor de corrente amostrado na entrada do ESE.

$V_{CA,i}$ é o valor de tensão amostrado na saída do ESE.

$I_{CA,i}$ é o valor de corrente amostrado na saída do ESE.

ΔT_e = Intervalo entre duas amostragens dos valores de entrada

ΔT_s = Intervalo entre duas amostragens dos valores de saída

2.4.4.1.2 Cálculo da eficiência total e eficiência ponderada

A eficiência total de cada ponto do conversor (Tabela 12) considera a eficiência de conversão e a eficiência do SPMP em condição estática, são dadas por:

$$\eta_{total} = \eta_{SPMP} \cdot \eta_{conv} = \frac{P_{CA}}{P_{PMP,SFV}} \quad (12)$$

Assim, as eficiências Europeia e Californiana (CEC) são calculadas a partir dos resultados de η_{total}, em cada condição de ensaio da Tabela 12, aplicando-se os fatores de ponderação apresentados na Tabela 13:

$$\eta_{ponderada} = \eta_{total_5} \cdot p_1 + \eta_{total_10} \cdot p_2 + \cdots + \eta_{total_100} \cdot p_8 \quad (13)$$

Tabela 13 - Fatores de ponderação para cálculo das eficiências Europeia e Californiana (CEC)

Fatores de ponderação para cálculo de eficiência Europeia e CEC								
Fator	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8
Potência relativa	5 %	10 %	20 %	25 %	30 %	50 %	75 %	100 %
Peso Euro	0,03	0,06	0,13	0,00	0,10	0,48	0,00	0,20
Peso CEC	0,00	0,04	0,05	0,00	0,12	0,21	0,53	0,05

Fonte: (EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION (CENELEC), 2013)

2.4.4.2 Eficiência do SPMP em condição dinâmica

A medida da eficiência do SPMP em condição dinâmica deve ser realizada submetendo o inversor FV ao perfil dinâmico de variação na irradiação solar que é apresentado na Figura 12, onde o número de repetições e os tempos em cada condição são apresentados nas Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16. Observa-se que uma sequência de ensaios é gerada através de um simulador fotovoltaico seguindo um padrão pré-determinado e estritamente definido.

O ensaio considera módulos FV de cSi por padrão, assim como com outras tecnologias de módulos quando aplicável ao ESE. A tecnologia dos módulos utilizada deve constar no relatório de ensaio.

Os ensaios devem ser realizados na tensão c.c. nominal do ESE. Para equipamentos com diversas entradas c.c. independentes, as medidas devem ser realizadas para todas as possíveis configurações de entrada, conforme indicado pelo o fabricante. A potência total deve ser igualmente dividida entre as entradas c.c., podendo ser empregada uma outra forma de divisão quando essa for especificada pelo fabricante.

Três diferentes sequências de ensaio são realizadas:

- Sequência 1: Simulação de ciclos de variação entre irradiância baixa (100 W/m²) e irradiância média (300 W/m²), segundo as características apresentadas na Tabela 14.

- Sequência 2: Simulação de ciclos de variação entre irradiância média (500 W/m²) e irradiância alta (1000 W/m²), segundo as características apresentadas na Tabela 15.

- Sequência 3: Simulação de partida e parada do ESE com irradiação baixa (10 – 100 Wm²), segundo as características apresentadas na Tabela 16.

Para cada uma das condições apresentadas, deve ser gerada e simulada pelo simulador FV uma curva I-V onde assume-se que a intensidade de radiação de 1000 W/m² corresponde a potência c.c. nominal do ESE.

Procedimento de ensaio:

1 - Ajustar a temperatura ambiente para 25 ºC ± 5 ºC e garantir a sua permanência durante todo o ensaio.
2 - Instalar o ESE conforme instruções do fabricante para simular as condições reais de operação (ex. posição de operação, espaço livre em torno do equipamento, suporte fornecido pelo fabricante).
3 - Conectar o ESE de acordo com as instruções e especificações fornecidas pelo fabricante ao simulador de painéis FV e à fonte simuladora de rede c.a..
4 - Definir os parâmetros da fonte simuladora de rede c.a. para as condições nominais de ensaio (ex. tensão, frequência e potência).
5 - Configurar a curva FV para a tensão nominal de entrada c.c. e potência de 100 % na entrada c.c. para a irradiância de 1000 W/m^2, assumindo-se a tecnologia de módulos de cSi.
6 - Alterar a irradiação da curva simulada para o menor valor da condição a ser ensaiada (300 W/m²)

7 - Aguardar 5 minutos para a estabilização do algoritmo de SPMP. Os dados eventualmente coletados durante o período de estabilização não devem ser considerados para o cálculo da eficiência.

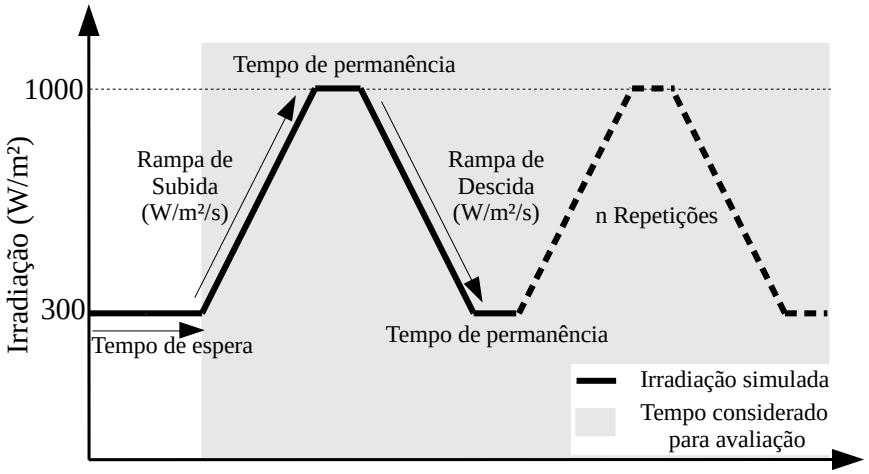
8 - Realizar a variação dinâmica conforme o padrão apresentado na Figura 12, medindo e registrando as variáveis $V_{PMP;SFV}$, $I_{PMP;SFV}$, $P_{PMP;SFV}$, V_{CC}, I_{CC}, P_{CC}, P_{CA}, na seguinte ordem:

- Incrementar a irradiação em rampa até atingir 1000 W/m², com uma inclinação de 10 W/m²/s.
- Aguardar o tempo de permanência de 10 s.
- Decrementar a irradiação em rampa até 300 W/m², com uma inclinação de 10 W/m²/s.
- Aguardar o tempo de permanência de 10 s.
- Repetir até concluir o número de repetições.

9 - Repetir os passos 6 a 8, até todas as condições da Tabela 16 terem sido realizadas (Sequência 2).

10 - Repetir os passos 6 a 9, realizando as condições da Tabela 14 (Sequência 1) e da Tabela 15(Sequência 3).

Figura 12 - Exemplo de uma sequência de ensaio entre média e alta irradiação.



Fonte: (EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION (CENELEC), 2013)

Tabela 14 - Sequência de testes de flutuação de baixa irradiação para média irradiação (100 W/m² - 500 W/m²)

Repetições (n)	**Inclinação (W/m²/s)**	**Rampa de subida (s)**	**Permanência (s)**	**Rampa de descida (s)**	**Permanência (s)**	**Duração (s)**
2	0,5	800	10	800	10	3540
2	1	400	10	400	10	1940
3	2	200	10	200	10	1560
4	3	133	10	133	10	1444
6	5	80	10	80	10	1380
8	7	57	10	57	10	1372
10	10	40	10	40	10	1300
10	14	29	10	29	10	1080
10	20	20	10	20	10	900
10	30	13	10	13	10	760
10	50	8	10	8	10	660
					Total	15936
						04:25:36

Fonte: (EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION (CENELEC), 2013)

Tabela 15 - Sequência de testes de flutuação de média irradiação para alta irradiação (300 W/m² - 1000 W/m²)

Repetições (n)	**Inclinação (W/m²/s)**	**Rampa de subida (s)**	**Permanência (s)**	**Rampa de descida (s)**	**Permanência (s)**	**Duração (s)**
10	10	70	10	70	10	1900
10	14	50	10	50	10	1500
10	20	35	10	35	10	1200
10	30	23	10	23	10	960
10	50	14	10	14	10	780
10	100	7	10	7	10	640
					Total	6980
						01:56:20

Fonte: (EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION (CENELEC), 2013)

Tabela 16 - Sequência de testes de partida e parada do inversor com rampas lerdas (10 W/m² - 100 W/m²)

Repetições (n)	**Inclinação (W/m²/s)**	**Rampa de subida (s)**	**Permanência (s)**	**Rampa de descida (s)**	**Permanência (s)**	**Duração (s)**
1	0,1	900	30	900	30	2160
					Total	2160
						00:38:40

Fonte: (EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION (CENELEC), 2013)

O cálculo da eficiência do SPMP em condição dinâmica (η_{din}), para cada uma das condições de ensaio da Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16 deve ser realizado de forma independente, através da seguinte relação:

$$\eta_{din} = \frac{\sum_i V_{CC} \,.\, I_{CC} \,.\, \Delta T_i}{\sum_j P_{PMP;SFV} \,.\, \Delta T_j} \tag{14}$$

Onde:

V_{CC} é a tensão c.c. na saída do simulador FV.

I_{CC} é a corrente c.c. na saída do simulador FV.

$P_{PMP;SFV}$ é a potência do ponto de máxima potência configurado no simulador FV.

ΔT_j é o período em que a potência $P_{PMP;SFV}$ está disponível no simulador FV.

ΔT_i é o período em que V_{CC} e I_{CC} são amostrados.

A eficiência total do SPMP em condição dinâmica do inversor é calculada por:

$$\eta_{din_total} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} a_i \,.\, \eta_{din,i} \tag{15}$$

Onde:

η_{din_total} é a média da eficiência do SPMP em condição dinâmica.

$\eta_{din_total,i}$ é a eficiência do SPMP em condição dinâmica de cada condição testada.

N é o número de condições testadas

a_i é o fator de ponderação (padrão é 1 para todas as condições)

2.5 ANÁLISE COMPARATIVA DAS NORMAS IEC 61683, EN 50530 E CEC

A Tabela 17 sumariza todos os ensaios realizados pelas normas. Apesar das normas mais recentes (CEC e EN 50530) serem evoluções da IEC 61683, observa-se que elas se especializaram em objetivos diferentes.

Tabela 17 - Comparativo de ensaios realizados por cada norma de medição da eficiência energética de inversores fotovoltaicos

Ensaio	**IEC 61683**	**CEC**	**EN 50530**
Eficiência de conversão	Sim	Sim	Sim
Eficiência de SPMP em condição estática	Não	Não	Sim
Eficiência total	Não	Não	Sim
Eficiência de SPMP em condição dinâmica	Não	Não	Sim
Autoconsumo noturno	Sim	Sim	Não
Consumo sem carga	Sim	Não	Não
Máxima potência de saída contínua	Não	Sim	Não
Eficiência de inversores *off-grid*	Sim	Não	Não

Fonte: Próprio autor

A IEC 61683 foi a primeira norma de eficiência de inversores fotovoltaicos com abrangência mundial, e estabeleceu o conceito de medição de eficiência de conversão em diferentes pontos de operação do conversor. Também é a única das três normas a definir uma metodologia para medida da eficiência de conversores FV autônomos, sendo a base para as outras normas.

A norma de eficiência CEC foi desenvolvida poucos anos após a IEC 61683, como pré-requisito para participação nos programas de incentivo a energia solar no estado da Califórnia – EUA. Seu principal objetivo foi a implementação do cálculo de eficiência ponderada, resumindo os 21 pontos de eficiência medidos de forma semelhante a IEC 61683 em apenas 1 valor ponderado, o que facilitava a comparação dos equipamentos por parte dos consumidores. Também é muito focada em condições ambientais de operação dos equipamentos.

A EN 50530 calcula a eficiência de conversão da mesma forma apresentada pela IEC 61683, porém inclui o conceito de eficiência total, que avalia a relação entre a potência máxima disponível no painel FV e a potência c.a. de saída, e não apenas a eficiência do conversor. O principal foco da norma EN 50530 está na medida de eficiência dos algoritmos de SPMP, tanto de forma estática quanto dinâmica, uma vez que esses podem ter grande influência na eficiência total do conversor. Também utiliza o conceito de eficiência ponderada, com os mesmos valores da norma CEC.

3 BANCADA DESENVOLVIDA PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS AUTOMATIZADOS DE MEDIÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

Neste capitulo é apresentado um resumo dos requisitos mínimos definidos pelas normas de eficiência e pelas normas brasileiras para avaliação de inversores fotovoltaicos conectados à rede elétrica. O laboratório INRI é acreditado pelo INMETRO para realização de ensaios segundo a portaria nº 357, de 01 de agosto de 2014 (INMETRO, 2018). Portanto, os equipamentos especificados e adquiridos devem satisfazer tanto as especificações mencionadas no Capítulo 2 deste trabalho, relativas as normas de eficiência, quanto as especificações das normas ABNT NBR 16150 e ABNT NBR 62116, relativas aos ensaios já realizados pelo laboratório. As especificações completas das normas brasileiras para ensaio de inversores fotovoltaicos conectados à rede são apresentadas em (FIGUEIRA, 2016).

3.1 FONTE SIMULADORA DE REDE C.A.

A fonte simuladora de rede c.a. é responsável por simular as condições encontradas em uma rede c.a. convencional (nível de tensão, frequência, etc.), permitindo a realização de ensaios em diversas condições diferentes, como, por exemplo, em tensões de 127 V, 220 V, etc. Além disso, deve ser capaz de simular falhas ou condições anormais, como variações de tensão e frequência, afundamentos de tensão, entre outros.

3.1.1 Requisitos mínimos

Todos os ensaios das normas IEC 61686, EN 50530 e CEC são realizados em tensão e frequência nominais e praticamente todos os requisitos, para a fonte simuladora de rede c.a., visam garantir a não interferência da mesma no funcionamento do equipamento sob ensaio, mantendo as condições da rede dentro dos parâmetros definidos pelo fabricante do inversor (limitação de potência, oscilação de tensão e THD, por exemplo).

Cada uma das normas possui especificidades diferentes quanto ao simulador de rede c.a., bem como a norma brasileira de ensaios de inversores fotovoltaicos conectados à rede ABNT NBR 16150. A Tabela 18 apresenta um comparativo desses requisitos.

Tabela 18 - Comparativo de requisitos mínimos da fonte simuladora de rede c.a. para os ensaios de eficiência

Requisito	IEC 61683	CEC	EN 50530	NBR 16150
Passo mínimo do ajuste de tensão	Não define	5 % da tensão de ensaio	Não define	0,4 % da tensão de ensaio
Estabilidade da tensão	Não define	Não informa	3 %	Não define
Passo de frequência	Não define	5 % da frequência de ensaio	Não define	0,1 Hz
Estabilidade de frequência	Não define	0,1 Hz	0,1 Hz	Não define
Erro de defasagem	Não define	Não informa	Não define	1,5 º
THD	Não define	< 2,5 %	< 2,5 %	< 2,5 %
Potência nominal	120 % da potência do ESE	150 % da potência do ESE	Não define	120 % da potência do ESE
Taxa de variação da tensão (degrau)	Não define	10 V/ciclo	Não define	100 % da tensão nominal / ciclo
Taxa de variação da frequência (degrau)	Não define	1 Hz/ciclo	Não define	100 % da frequência nominal / ciclo

Fonte: Próprio autor

3.1.2 Equipamento adotado

O equipamento adotado é uma fonte c.a. trifásica modelo FCATQ 10000-60-40-PFC55450 (Figura 13), da empresa Supplier, cujas especificações do equipamento são apresentadas na Tabela 19. Observa-se que as características dessa fonte atendem à todos os requisitos apresentados na Tabela 18.

Destaca-se que uma fonte especial foi desenvolvida para o INRI pela empresa Supplier para que fossem disponibilizados três transformadores isoladores na saída do equipamento. Cada transformador conta com 1 enrolamento primário e dois enrolamentos secundários, com razão de transformação de 2:1 possibilitando, assim, a conexão série dos enrolamentos secundários, para ensaios em 220 V ou conexão paralela dos mesmos para ensaio em 127 V, mantendo a corrente máxima e, consequentemente, a potência máxima do equipamento, tanto para 220 V quanto para 127 V, ampliando a capacidade de ensaios do laboratório.

Figura 13 - Fonte c.a. trifásica modelo FCATQ 10000-60-40-PFC55450

Fonte: http://www.supplier.ind.br//produto/fontes-ca-trifasicas/8/fonte-ca-trifasica/213

Tabela 19 - Especificações fonte simuladora c.a. trifásica

Modelo	**FCATQ 10000-60-40-PFC55450**
Tensão Nominal de Alimentação	380 Vac ± 10 % (3F+N+T)
Corrente Nominal de Entrada	179 A
Frequência de alimentação	50/60 Hz
Fator de potência	0,99
Potência Nominal de Saída	100 kVA
Tensão de saída	0 a 600 V (tensão de linha)
Corrente nominal de saída	152 A @ 220 V (fase) 96,6 A @ 345 V (fase)
Proteção de sobrecorrente de saída	215 A pico (ajustável)
Proteção de sobrecarga	Corrente eficaz de saída > 152 A Potência de saída > Potência nominal
Tempo máximo de sobrecarga	1 segundo
Frequência de saída	40 a 400 Hz
Comunicação	RS232C Ethernet
Módulo de testes para inversores	Afundamentos de tensão Degraus de tensão/frequência/fase Fluxo de potência bidirecional Programação de rotina de ensaios
Resolução de tensão	0,1 V (fase)
Precisão de tensão	True RMS ± 0,5 V @ 25 ºC
Resolução de frequência	0,1 Hz
Precisão de frequência	± 0,2 %
THD	< 1 %

Fonte: Próprio autor

3.2 SIMULADOR DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Os simuladores de painéis fotovoltaicos fornecem energia para os inversores, simulando a curva I-V com o comportamento similar ao dos módulos FV, permitindo, assim, a realização de ensaios em qualquer ponto de operação do inversor apenas alterando os parâmetros. O uso de simuladores elimina a dependência do sol e possibilita a repetibilidade dos ensaios, o que seria inviável de outra forma.

3.2.1 Requisitos mínimos

Os requisitos para a fonte simuladora fotovoltaica, das três normas de eficiência em comparação com os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 16150, são mostrados na Tabela 20.

Entre as especificações de todas as normas, as mais restritivas são da norma EN 50530, que impõe desde modelos matemáticos pré-definidos para a geração das curvas com, base nos diferentes tipos de tecnologia de painéis, até restrições quanto ao comportamento estático, dinâmico e a iteração entre as fontes e o ESE. Desta forma, foram adotados os requisitos da norma EN 50530 como base para a escolha do equipamento a ser adquirido.

Tabela 20 - Comparativo de requisitos mínimos da fonte simuladores FV para os ensaios de eficiência

Requisito	**IEC 61683**	**CEC**	**EN 50530**	**NBR 16150**
Passo mínimo do ajuste de tensão	Não define	2 %	1 %	Não define
Estabilidade da tensão	Não define	1 %	1 %	1%
Passo mínimo do ajuste de corrente	Não define	2 %	1 %	Não define
Estabilidade da corrente	Não define	1 %	1 %	1 %
Potência nominal	120 % da potência do ESE	100 % da potência do ESE	100 % da potência do ESE	120 % da potência do ESE
Estabilidade da potência	Não define	Não define	0,1 %	1 %

Fonte: Próprio autor

3.2.2 Equipamento adotado

Os equipamentos adotados para realização dos ensaios são seis fontes simuladoras fotovoltaicos modelo N8957APV, da empresa Keysight, mostrados na Figura 14, cujas especificações resumidas são apresentadas na Tabela 21. A fonte N8957APV é uma fonte c.c. convencional da empresa, com tecnologia já consolidada, que recebeu um módulo de configuração, possibilitando o comportamento como simulador FV. Uma outra vantagem é a possibilidade de ligação em paralelo das mesmas, possibilitando até 90 kW em uma única entrada c.c., ou qualquer combinação de entradas desejada. Também possui função de *autoranging*, que permite a operação em máxima potência com diversas configurações de tensão e corrente, conforme demonstrado na Figura 15.

Destaca-se que a fonte foi desenvolvida para atender aos requisitos da norma EN 50530, sendo um dos opcionais o software para realização dos ensaios dessa norma relativos a eficiência de SPMP. Contudo, esse software não realiza todos os ensaios dessa norma e demanda a calibração de cada uma das seis fontes para uma medição apropriada.

Com o objetivo de realizar o ensaio completo em uma única plataforma e eliminar a necessidade de calibração das fontes, foi desenvolvido um software automatizado. Destaca-se que, apesar de possuir uma boa precisão da instrumentação, a classe de exatidão de medida das fontes é muito menor do que a dos analisadores de energia, o que por si só justifica a forma de ensaio desenvolvida. Optou-se, então, pela utilização básica da fonte, enviando a ela apenas os pontos de tensão e corrente que formam a curva I/V a ser simulada, realizando todos os cálculos dos pontos no software automatizado desenvolvido nesse trabalho.

Figura 14 - Fonte Keysight N8957APM: (A) Vista frontal; (B) Vista traseira

(A) (B)

Fonte: www.keysight.com/en/pd-2588133-pn-N8957APV/photovoltaic-array-simulator-1500-vdc-400-vac

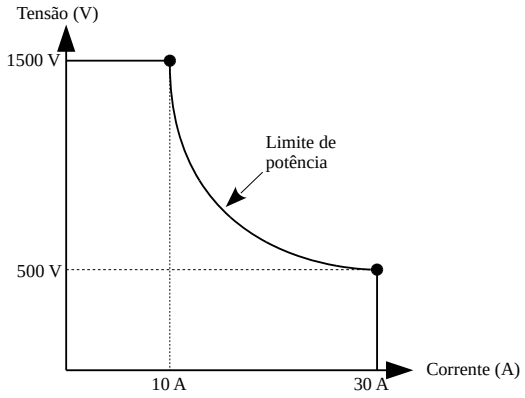
Tabela 21 - Especificações resumidas da fonte Keysight N8957APV

Especificação	**Valores**
Tensão	0 – 1500 V
Corrente	0 – 30 A
Potência	15 kW
Ripple de saída (pico a pico)	2400 mV
Ripple de saída *(RMS)*	400 mV
Precisão da medida de tensão[1]	≤ 1,5 V
Precisão da medida de corrente[1]	≤ 60 mA
Tempo de recuperação[2]	≤ 1,5 ms
Tempo de resposta da saída[3]:	
Subida, carga total	≤ 30 ms
Descida, carga total	≤ 80 ms
Descida, sem carga	≤ 10 s
Regulação de carga:	
Tensão	750 mV
Corrente	45 mA

[1] Especificações de precisão válidas para temperatura ambiente de 23 ºC ± 5 ºC
[2] Tempo de recuperação para o valor de tensão definido, após mudança de 10 % para 90 % da potência máxima
[3] Resposta a uma variação de 10 % para 90 % (subida) ou de 90 % para 10 % (descida) da tensão máxima de saída do equipamento

Fonte: Manual do equipamento

Figura 15 - Característica da curva de saída da fonte N8957APV



Fonte: Manual do equipamento

3.3 ANALISADOR DE ENERGIA

O analisador de energia é o equipamento que realiza as medidas de todas as variáveis de interesse e transmite-as ao software de gerenciamento dos ensaios. Portanto, a incerteza de

todas as medidas de eficiência está diretamente ligada à exatidão e à incerteza de calibração desse equipamento.

3.3.1 Requisitos mínimos

Para os requisitos de exatidão nas medidas de tensão, corrente e potência, a versão 2015 do protocolo de testes do *Sandia Laboratories (*eficiência CEC*),* apresentados no Capítulo 2, e os requisitos das normas brasileiras de ensaio de inversores fotovoltaicos conectados à rede, ABNT NBR 16150, são os mais restritivos entre todas as normas, conforme demonstrado na Tabela 22. Verifica-se que a norma EN 50530, apesar de bastante restritiva quanto aos requisitos dos equipamentos utilizados durante o ensaio, principalmente quanto ao simulador de painéis fotovoltaicos, não apresenta requisitos para os equipamentos de medição.

Tabela 22 - Requisitos mínimos dos equipamentos de medição para realização de ensaios de inversores fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Requisito	**IEC 61683**	**CEC**	**EN 50530**	**NBR 16150**
Tensão c.c.	Não define	0,25 % da leitura	Não define	1 %
Tensão c.a.	Não define	0,25 % da leitura	Não define	1 %
Corrente c.c.	Não define	0,5 % da leitura	Não define	0,5 %
Corrente c.a.	Não define	0,5 % da leitura	Não define	1 %
Potência c.c.	0,5 % do fundo de escala	0,5 % da leitura	Não define	0,5 %
Potência c.a.	0,5 % do fundo de escala	0,5 % da leitura	Não define	0,5 %
Frequência	Não define	0,01 Hz	Não define	0,01 Hz

Fonte: Próprio autor

3.3.2 Equipamento adotado

O equipamento adquirido para a realização dos ensaios é um LMG 670 da empresa ZIMMER (Figura 16). O mesmo dispõe de 7 elementos para leitura de tensão e corrente e possui diversos módulos para realização de todos os ensaios solicitados pela norma ABNT NBR 16150, como módulo de *flicker*, distorção harmônicas e oscilografia. Em conjunto com esse equipamento foram acoplados sete ponteiras de corrente, modelo PTC-200 (Figura 17), capazes de realizar medidas em faixas de 2,5 A_{RMS} até 200 A_{RMS}, permitindo, assim, a realização de ensaios em alta potência. Para ensaios de baixa potência (micro inversores), pode-se utilizar o sensor interno do equipamento, que possui uma faixa de medida de 5 mA_{RMS} até 32 A_{RMS}.

Quanto aos níveis de exatidão, tanto o canal tipo A (disponível em 3 elementos) quanto o tipo B (disponível em 4 elementos) conseguem suprir todos os requisitos impostos pelas normas, conforme resumo das especificações apresentadas na Tabela 23.

Figura 16 - ZIMMER LMG 670: (A) Vista frontal; (B) Vista traseira, mostrando os canais

(A) (B)

Fonte: https://www.zes.com/en/Products/Precision-Power-Analyzers/LMG670

Figura 17 - Sensor de corrente PTC-200 para LMG 670

Fonte: https://www.zes.com/en/Products/Sensors/PCT

Tabela 23 - Especificações resumidas de exatidão do LMG 670

Canal	A		B	
Frequência	**c.c.**	**45 Hz ... 65 Hz**	**c.c.**	**45 Hz ... 65 Hz**
Tensão	0,02 + 0,08	0,01 + 0,02	0,1 + 0,1	0,05 + 0,05
Corrente (sensor interno)	0,02 + 0,01	0,01 + 0,02	0,1 + 0,1	0,05 + 0,05
Corrente (ponteira hall)	0,02 + 0,08	0,01 + 0,02	0,1 + 0,1	0,05 + 0,05
Potência (sensor interno)	0,032 + 0,09	0,015 + 0,01	0,16 + 0,1	0,07 + 0,04
Potência (ponteira hall)	0,032 + 0,08	0,015 + 0,01	0,16 + 0,1	0,07 + 0,04
Os valores devem ser interpretados como ± (% do valor lido + % do fundo de escala)				

Fonte: Manual equipamento LMG 670

3.4 CÂMARA TÉRMICA

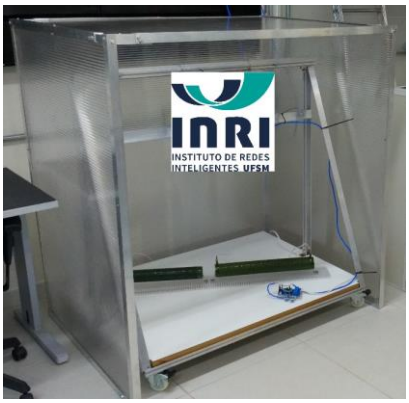
3.4.1 Requisitos mínimos

A câmara térmica é emprega pela norma CEC para elevação da temperatura do inversor. A câmara deve ter a capacidade de controlar a temperatura interna em 45 ºC para a realização do pré-aquecimento, mantendo essa temperatura por períodos superiores a 24 horas. Ela também deve ser programável para controlar a temperatura interna em 40 ºC para o ensaio de máxima potência contínua de saída. Deve ter uma estrutura que permita a colocação da bancada inteira dentro da câmara, com fácil movimentação, devido a necessidade de remoção do equipamento de dentro da câmara para os ensaios de eficiência que são realizados à temperatura ambiente de 25 ºC. Adicionalmente, a câmara não pode dispor de qualquer tipo de ventilador ou equipamento que force a movimentação de ar dentro da câmara, o que segundo a norma, atrapalha o fluxo de ar no dissipador, impactando nos resultados.

3.4.2 Equipamento adotado

Devido às restrições apontadas, optou-se por construir uma câmara térmica, cuja foto é apresentada na Figura 18, com o tamanho adequado para comportar a bancada de suporte do inversor. Como fonte de calor interna foram utilizadas resistências de 1000 W operando abaixo da potência nominal. Essa solução foi adotada para garantir uma melhor distribuição de calor, devido a área de transferência de calor, evitando assim pontos de temperatura muito alta e não necessitando de ventiladores. O sistema de controle e monitoramento de temperatura interna da câmara foi desenvolvido na plataforma Arduino® pela facilidade de implementação.

Figura 18 - Câmara térmica desenvolvida, equipamento omitido devido ao contrato de confidencialidade



Fonte: Próprio autor

3.5 BANCADA DE ENSAIOS

O laboratório está dividido em três áreas distintas. A Figura 19 ilustra parte do laboratório que é empregada para atividades de recebimento de amostra e suporte a ensaio. A Figura 20 apresenta uma foto da área de ensaios, onde estão dispostas duas bancadas com computadores e os equipamentos de medida, assim como os equipamentos sob ensaio. Conforme mostrado na Figura 21, os equipamentos sob ensaios foram omitidos devido a acordos de confidencialidade. Nessa sala chegam os terminais de todos os equipamentos utilizados durante os ensaios, fontes simuladoras de rede c.a., fontes simuladoras de PV e cargas, para serem conectados aos inversores. A terceira área é usada para armazenagem desses equipamentos, garantindo assim uma barreira física em torno dos equipamentos, conforme Figura 22.

As ligações de potência entre os equipamentos são realizadas dentro da área de equipamentos, organizados em quadros, e então disponibilizados para a área de ensaios. De dentro da área de ensaios, todos os equipamentos são controlados via *Ethernet* a partir dos computadores das bancadas, conectados através de uma rede interna, através do software desenvolvido nesse trabalho.

Devido a redundância dos equipamentos do laboratório, que conta com 6 fontes simuladoras fotovoltaicas, 2 equipamentos de medida, 2 fontes simuladoras de rede c.a., cargas, e etc., é possível a realização de ensaios em até dois equipamentos ao mesmo tempo, bastando para isso a configuração dos equipamentos a serem utilizados no software de gerenciamento, como descrito no Capítulo 4.

Figura 19 - Imagem panorâmica da entrada da área de ensaios

Fonte: Autoria de Rafael Concatto Beltrame

Figura 20 - Imagem panorâmica da área de ensaios

Fonte: Autoria de Rafael Concatto Beltrame

Figura 21 - Bancada de ensaios para 2 inversores.

Fonte: Próprio autor

Figura 22 - Área de equipamentos

Fonte: Próprio autor

4 PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA A AUTOMAÇÃO DOS ENSAIOS

Nesse capitulo é apresentado o programa desenvolvido para a automação da bancada e dos ensaios de medição da eficiência energética de inversores fotovoltaicos conectados à rede elétrica. O programa foi desenvolvido em ambiente LabVIEW®. Dentre as principais vantagens para utilização do LabVIEW® estão a facilidade de integração de diferentes tipos de protocolos de comunicação, a integração entre a parte funcional e visual do código, e a forma de programação baseada em fluxo de dados, que permite o paralelismo de funções de maneira muito simples e intuitiva.

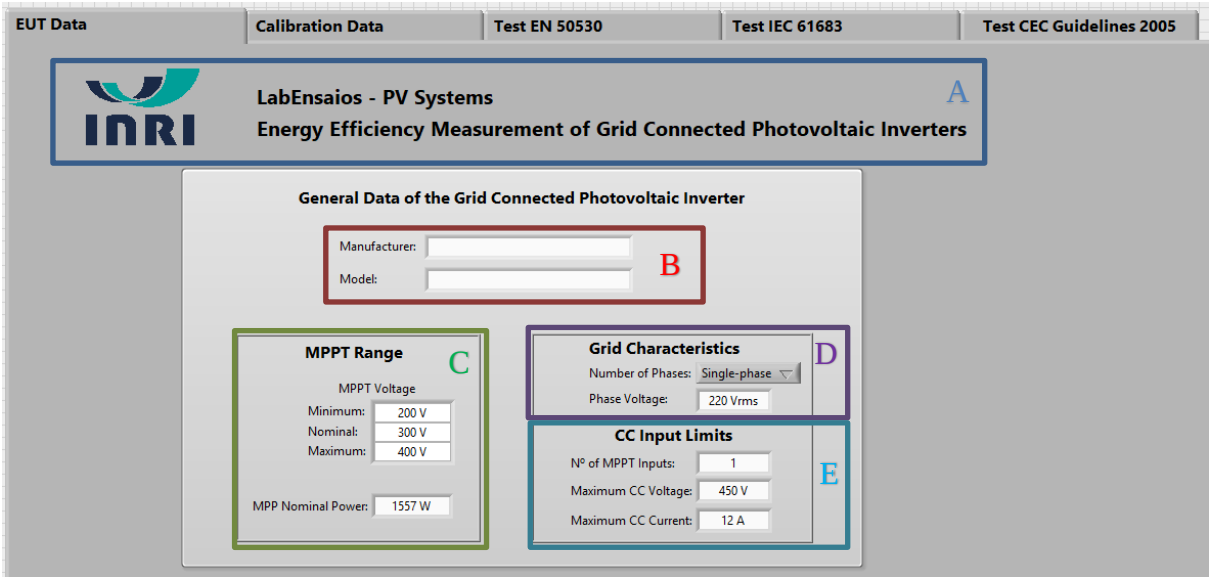
4.1 VISÃO GERAL E PRINCIPAIS TELAS

O software foi desenvolvido em 5 telas principais: i) *EUT Data*; ii) *Calibration Data*; iii) *Test EN 50530*; iv) *Test IEC* 61683; v) *Test CEC Guidelines 2005*.

4.1.1 Tela inicial: *EUT Data*

A primeira tela, ao se abrir o programa, é a tela de dados do inversor, dividida em 5 campos (A, B, C, D e E), conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 - Tela inicial do programa: Dados do Inversor



Fonte: Próprio Autor

4.1.1.1 Campo A

O campo A apresenta o cabeçalho padrão com o nome e o logotipo do laboratório e o título da tela.

4.1.1.2 Campo B

No campo B são apresentadas duas entradas de dados:

- *Manufacturer*: Registra o nome da empresa fabricante do inversor
- *Model*: Registra o modelo do inversor a ser ensaiado

4.1.1.3 Campo C

O campo C é composto por 4 entradas de dados, referentes aos pontos de operação do algoritmo de SPMP do equipamento:

- *Minimum*: Registra o valor de tensão c.c. mínimo da faixa de operação do SPMP
- *Nominal*: Registra o valor de tensão c.c. nominal, declarada pelo fabricante do equipamento, e caso essa não seja declarada pelo mesmo, é a média entre a tensão mínima e a máxima.
- *Maximum*: Registra o valor de tensão c.c. máximo da faixa de operação do SPMP, esse valor pode ser diferente da tensão c.c. máxima aceita pela porta de entrada.
- *MPP Nominal Power*: Registra o valor de potência c.c., informado pelo fabricante, para que o equipamento atinja 100 % de sua potência c.a. de operação.

4.1.1.4 Campo D

O campo D é relativo a forma de conexão do inversor com a rede elétrica c.a. e possui dois campos.

- *Number of Phases*: Determina o número de fases da rede c.a., deve-se escolher entre “Monofásico (*Single-Phase*)”, “Bifásico (*Two-Phase*)” ou “Trifásico (*Three Phase*)”.
- *Phase Voltage*: Registra o valor nominal de tensão c.a. de operação do inversor, o valor é definido como a tensão *RMS* de fase.

4.1.1.5 Campo E

No campo E constam os limites de operação da entrada c.c. do inversor.

- *Nº of MPPT Inputs*: Registra o número de entradas c.c.. Define-se entrada c.c. como entradas independentes, com algoritmos de SPMP próprios. No caso de cabos em paralelo, mas que compartilham o mesmo SPMP, estes são considerados como uma única entrada c.c..

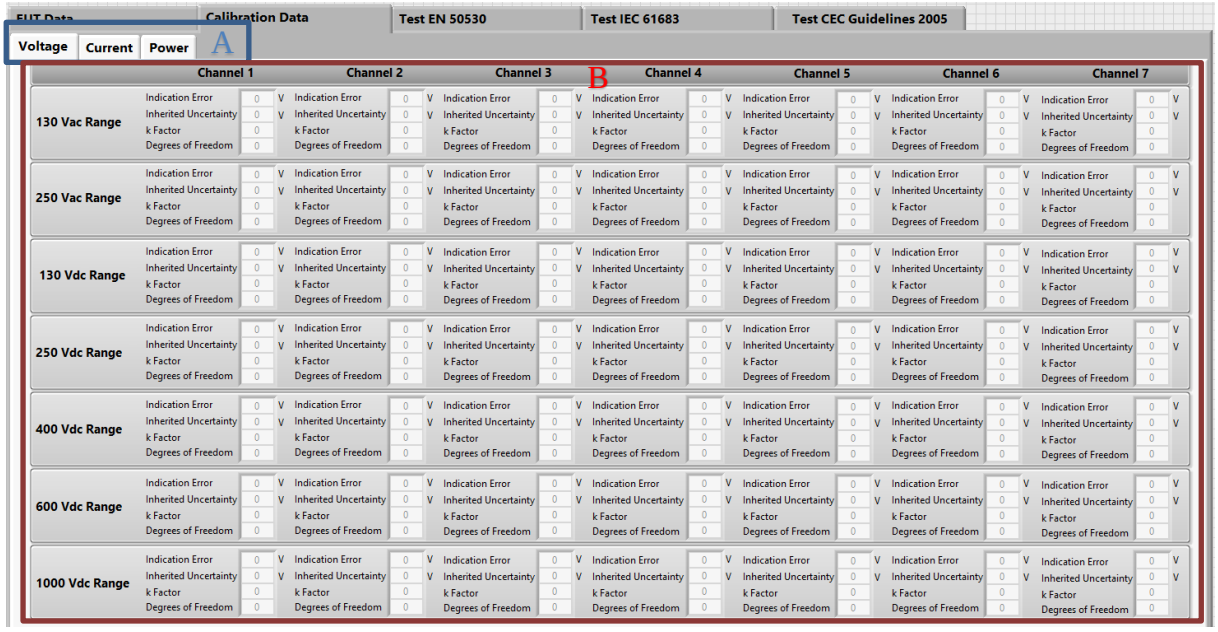
- *Maximum c.c. Voltage*: Registra o nível de tensão c.c. máxima admitida pela entrada c.c., acima do qual pode haver danos ao equipamento.

- *Maximum c.c. Current*: Registra o nível de corrente c.c. máxima suportada pela porta de entrada do equipamento, acima do qual pode haver danos ao inversor.

4.1.2 Calibration Data

Nessa tela são inseridos e salvos os dados referentes a calibração dos equipamentos de medida. O programa foi concebido para ser usado com dois equipamentos distintos, sendo possível configurar os dados do equipamento que está na bancada na aba de calibração. A tela é composta por 2 campos (A e B), conforme apresentado na Figura 24. Os dados inseridos nessa tela ficam salvos, sendo necessária à sua alteração apenas quando o equipamento é calibrado.

Figura 24 – Tela de calibração dos equipamentos



Fonte: Próprio autor

4.1.2.1 Campo A

No campo A constam 3 abas relativas as grandezas calibradas no equipamento, "*Voltage*", "*Current*" e "*Power*". Ao escolher uma delas, um novo campo (B) é exibido.

4.1.2.2 Campo B

O campo B aparece após a escolha da grandeza para edição dos dados de calibração, e é composto das seguintes entradas, para cada canal do equipamento e faixa de operação:

- *Indication Error*: Registra o valor do erro de indicação apontado no certificado de calibração

- *Inherited Uncertainty*: Registra o valor da incerteza herdada da calibração.

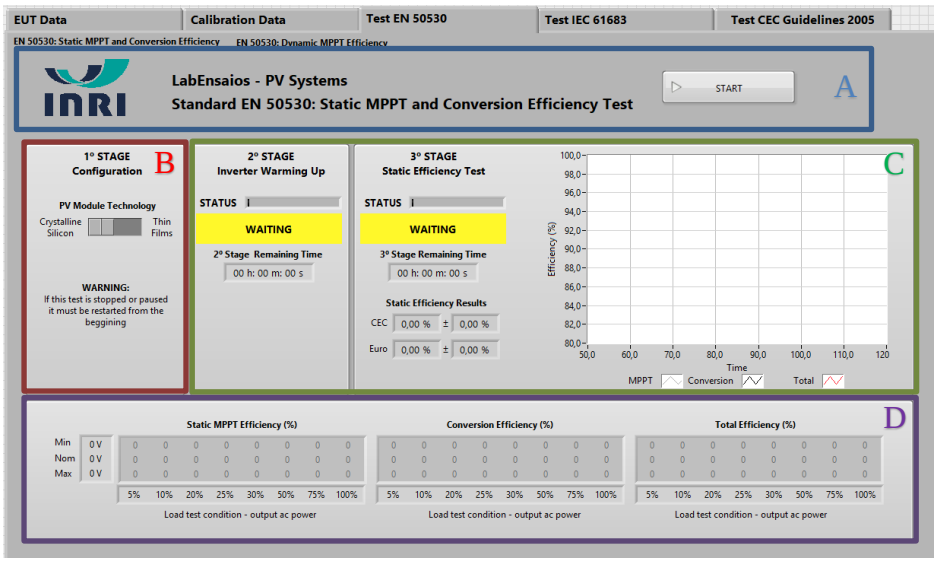
- *k Factor*: Registra o valor do fator de abrangência, representado pela letra k, utilizado no cálculo das incertezas do certificado.

- *Degrees of Freedom*: Registra o valor dos graus de liberdade da grandeza calibrada.

4.1.3 Test EN 50530: Static MPPT and Conversion Efficiency

A tela "*Test EN 50530*" apresenta os ensaios realizados pela respectiva norma europeia, dividida em duas partes: SPMP em condição estática e dinâmica. Na primeira tela é realizado o ensaio de SPMP estático, e a tela é dividida em 4 partes (A, B, C e D), conforme Figura 25.

Figura 25 - Tela da norma EN 50530, ensaio de SPMP em condição estática



Fonte: Próprio autor

4.1.3.1 Campo A

No campo A são mostrados o logotipo do laboratório e o título da tela selecionada. O botão "*START*", responsável por iniciar os ensaios da respectiva tela, também fica localizado no Campo A.

4.1.3.2 Campo B

O campo B apresenta a única entrada de dados para a realização do ensaio, *PV Module Techonology*, que permite selecionar o tipo de painel fotovoltaico a ser simulado: *Crystalline Silicon* ou *Thin Films*.

4.1.3.3 Campo C

No campo C é possível acompanhar o andamento do ensaio através da disponibilização das seguintes informações:

- *STAGE*: Informa o nome de cada estágio do ensaio; configuração (*Configuration*), aquecimento do inversor (*Inverter Warming Up*) e teste de eficiência em condição de SPMP estática (*Static Efficiency Test*)

- *STATUS*: Informa, através de uma barra de progresso e um indicador colorido, qual a situação do estágio atual; aguardando (*Waiting*), rodando (*Running*) ou concluído (*Concluded*).

- *Stage Remaining Time*: Informa o tempo restante para a conclusão do estágio.

- *Static Efficiency Results*: Informa o resultado final das eficiências CEC e Euro medidas durante o ensaio, como a média entre a eficiência medida em cada nível de tensão c.c., sendo esses valores as eficiências CEC e Euro do inversor, que devem ser registradas na documentação do mesmo. Também informa a incerteza das medidas.

- Gráfico de eficiência em tempo real: Informa, de forma gráfica, as eficiências (conversão, algoritmo de SPMP e total) calculadas em tempo real para acompanhamento do ensaio. O gráfico é resetado no início de cada curva de tensão/potência a ser ensaiada.

4.1.3.4 Campo D

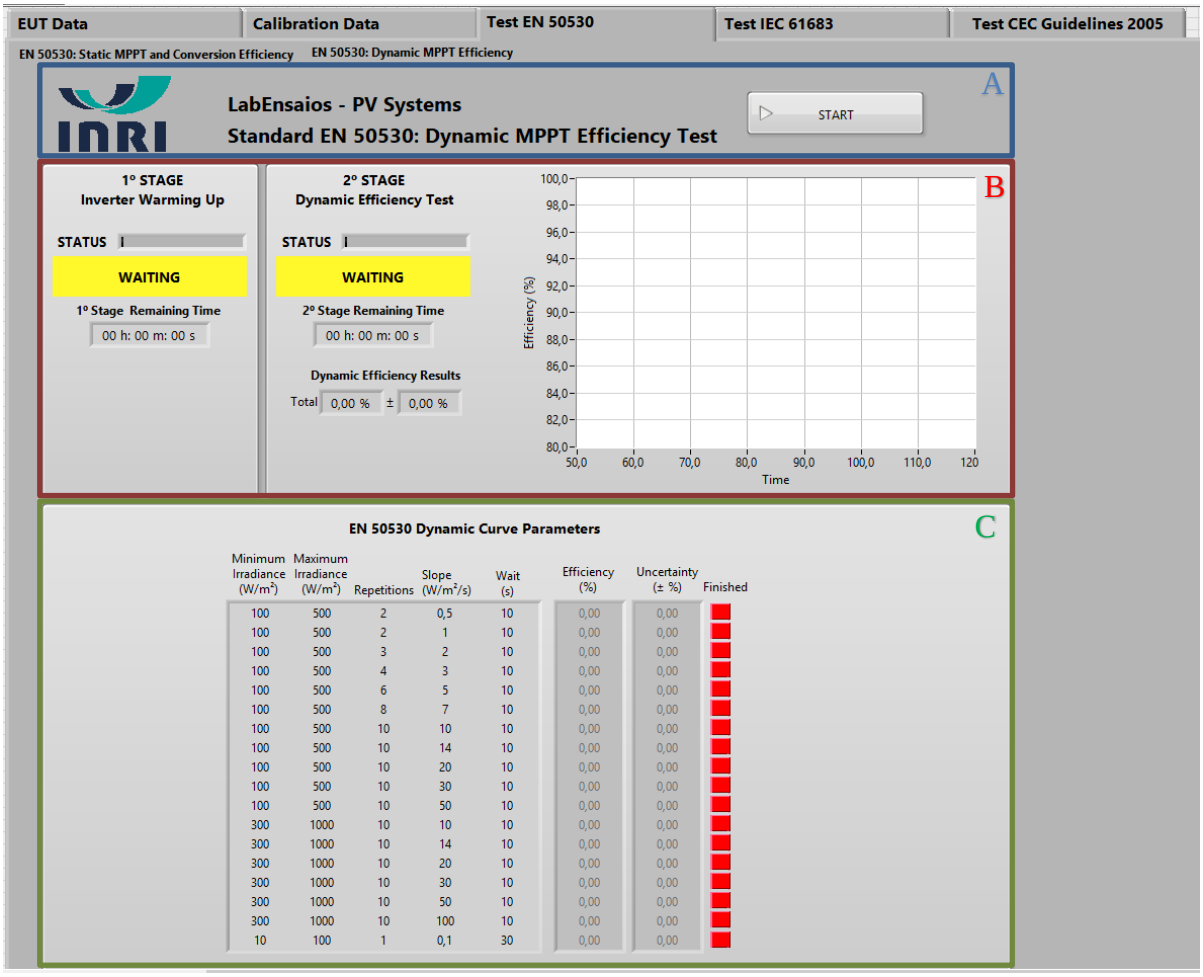
No campo D são apresentados os resultados detalhados da medição de eficiência em cada ponto de operação do inversor. Os resultados são divididos em eficiência de SPMP,

eficiência de conversão e eficiência total em cada uma das 8 condições de carregamento e 3 condições de tensão de entrada, totalizando 24 resultados.

4.1.4 Test EN 50530: Dynamic MPPT Efficiency

Essa tela apresenta o ensaio de SPMP em condição dinâmica, complementando a tela anterior nos ensaios referentes a norma EN 50530, e é composta por 3 campos (A, B e C), conforme mostrado na Figura 26.

Figura 26 - Tela da norma EN 50530 relativo ao ensaio de SPMP em condição dinâmica



Fonte: Próprio autor

4.1.4.1 Campo A

No campo A são mostrados o logotipo do laboratório e o título da tela selecionada. O botão "*START*", responsável por iniciar os ensaios da respectiva tela, também fica localizado no Campo A.

4.1.4.2 Campo B

No campo B é possível acompanhar o andamento do ensaio através da disponibilização das seguintes informações:

- *STAGE*: Informa o nome de cada estágio do ensaio; aquecimento do inversor (*Inverter Warming Up*) e teste de eficiência do SPMP em condição dinâmica (*Dynamic Efficiency Test*)

- *STATUS*: Informa, através de uma barra de progresso e um indicador colorido, qual a situação do estágio atual; aguardando (*Waiting*), rodando (*Running*) ou concluído (*Concluded*).

- *Stage Remaining Time*: Informa o tempo restante para a conclusão do estágio.

- *Dynamic Efficiency Results*: Informa o resultado final da eficiência do SPMP em condição dinâmica, medida durante o ensaio, como a média entre a eficiência medida em cada condição de variação de irradiância. Também informa a incerteza das medidas.

- Gráfico de eficiência em tempo real: Informa, de forma gráfica, a eficiência calculada em tempo real para acompanhamento do ensaio. O gráfico é resetado no início de cada condição de variação de irradiância a ser ensaiada.

4.1.4.3 Campo C

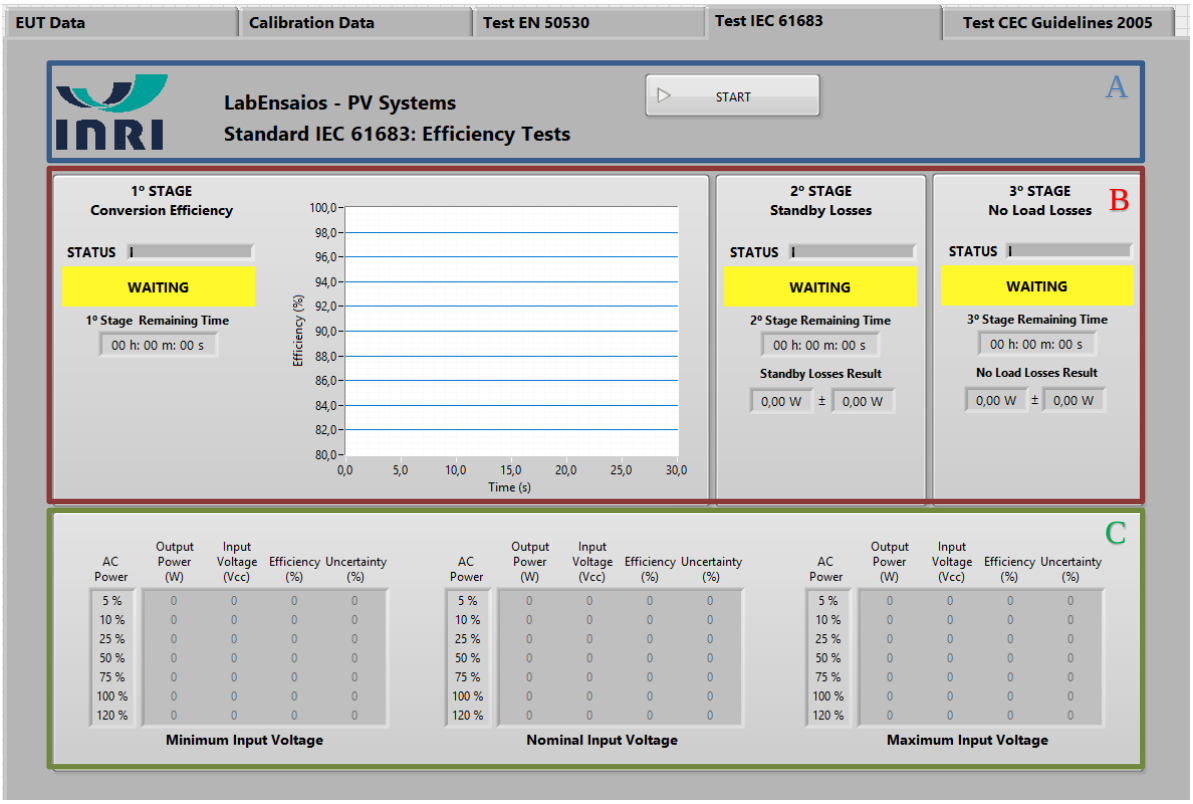
No campo C é possível acompanhar quais são os parâmetros de cada condição de variação de irradiância a ser testada e a situação de cada condição (concluído ou não). Também são apresentados os resultados detalhados da medição de eficiência e da incerteza de medida em cada condição de variação da irradiância. Os resultados são divididos em:

- curvas de variação de baixa para média irradiância (100 W/m² - 500 W/m²)
- curvas de variação de média para alta irradiância (300 W/m² - 1000 W/m²)
- curva de acionamento e desligamento do inversor (10 W/m² - 100 W/m²).

4.1.5 Test IEC 61683

Nessa tela são realizados os ensaios segundo a norma IEC 61683, considerando apenas os ensaios realizados em inversores conectados à rede elétrica. Três ensaios são necessários: i) eficiência de conversão (*Conversion Efficiency*), ii) perdas em espera (*Standby Losses*) e iii) perdas sem carga (*No Load Losses*). Todos os ensaios são realizados em sequência e seu acompanhamento se dá através de 3 campos (A, B e C), mostrados na Figura 27.

Figura 27 - Tela da norma IEC 61683



Fonte: Próprio autor

4.1.5.1 Campo A

No campo A são mostrados o logotipo do laboratório e o título da tela selecionada. O botão "*START*", responsável por iniciar os ensaios da respectiva tela, também fica localizado no Campo A.

4.1.5.2 Campo B

No campo B é possível acompanhar o andamento do ensaio através da disponibilização das seguintes informações:

- *STAGE*: Informa o nome de cada estágio do ensaio; eficiência de conversão (*Conversion Efficiency*), perdas em espera (*Standby Losses*) e perdas sem carga (*No Load Losses*).

- *STATUS*: Informa, através de uma barra de progresso e um indicador colorido, qual a situação do estágio atual; aguardando (*Waiting*), rodando (*Running*) ou concluído (*Concluded*).

- *Stage Remaining Time*: Informa o tempo restante para a conclusão do estágio.

- *Standby Losses Results*: Informa o resultado final das perdas em espera. Também informa a incerteza da medida.

- *No Load Losses Results*: Informa o resultado final das perdas sem carga. Também informa a incerteza da medida.

- Gráfico de eficiência em tempo real: Informa, de forma gráfica, a eficiência calculada em tempo real para acompanhamento do ensaio. O gráfico é resetado no início de cada condição de varião de irradiância a ser ensaiada.

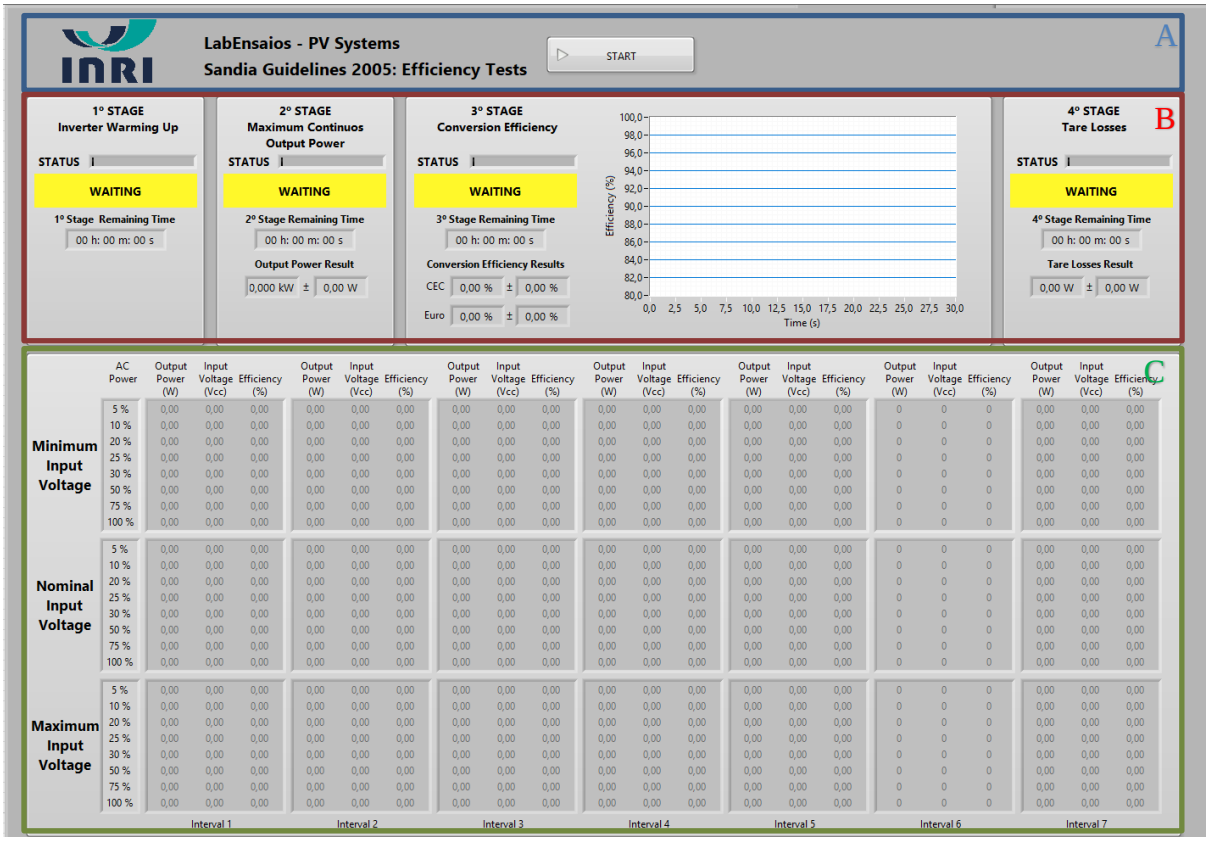
4.1.5.3 Campo C

No campo C são apresentados os resultados detalhados da medição de eficiência em cada ponto de operação do inversor em cada uma das 7 condições de carregamento e 3 condições de tensão de entrada, totalizando 21 resultados.

4.1.6 Test CEC Guidelines 2005

Nessa tela são realizados os ensaios do *CEC Guidelines 2005*, utilizados para o cálculo da eficiência CEC. A tela é dividida em 3 campos (A, B e C), utilizados para monitorar o andamento e os resultados dos 3 ensaios exigidos pela CEC, conforme Figura 28.

Figura 28 – Tela para realização dos ensaios da eficiência CEC



Fonte: Próprio autor

4.1.6.1 Campo A

No campo A são mostrados o logotipo do laboratório e o título da tela selecionada. O botão "*START*", responsável por iniciar os ensaios da respectiva tela, também fica localizado no Campo A.

4.1.6.2 Campo B

No campo B é possível acompanhar o andamento do ensaio através da disponibilização das seguintes informações:

- *STAGE*: Informa o nome de cada estágio do ensaio; Aquecimento do inversor (*Inverter Warming Up*), Máxima Potência de Saída Contínua (*Maximum Continuous Output Power*), Eficiência de conversão (*Conversion Efficiency*) e Perdas Noturnas (*Tare Losses*)

- *STATUS*: Informa, através de uma barra de progresso e um indicador colorido, qual a situação do estágio atual; aguardando (*Waiting*), rodando (*Running*) ou concluído (*Concluded*).

- *Stage Remaining Time*: Informa o tempo restante para a conclusão do estágio.

- *Maximum Continuous Output Power Results*: Informa o resultado final do ensaio de Máxima Potência de Saída Contínua. Também informa a incerteza da medida.

- *Conversion Effciency Results*: Informa o resultado final das eficiências CEC e Euro medidas durante o ensaio, como a média entre a eficiência medida em cada nível de tensão c.c., sendo esses valores as eficiências CEC e Euro do inversor, que devem ser registradas na documentação do mesmo. Também informa a incerteza das medidas.

- *Tare Losses Result*: Informa o resultado final do ensaio de perdas noturnas. Também informa a incerteza da medida.

- Gráfico de eficiência em tempo real: Informa, de forma gráfica, a eficiência calculada em tempo real para acompanhamento do ensaio. O gráfico é resetado no início de cada condição de varião de irradiância a ser ensaiada.

4.1.6.3 Campo C

Nesse campo são detalhados os valores parciais de potência de saída c.a., tensão de entrada c.c. e eficiência, em cada uma das 24 curvas, realizando-se 7 medidas (amostras) em cada curva, conforme especificado na norma.

4.2 ESTRUTURA DO SOFTWARE

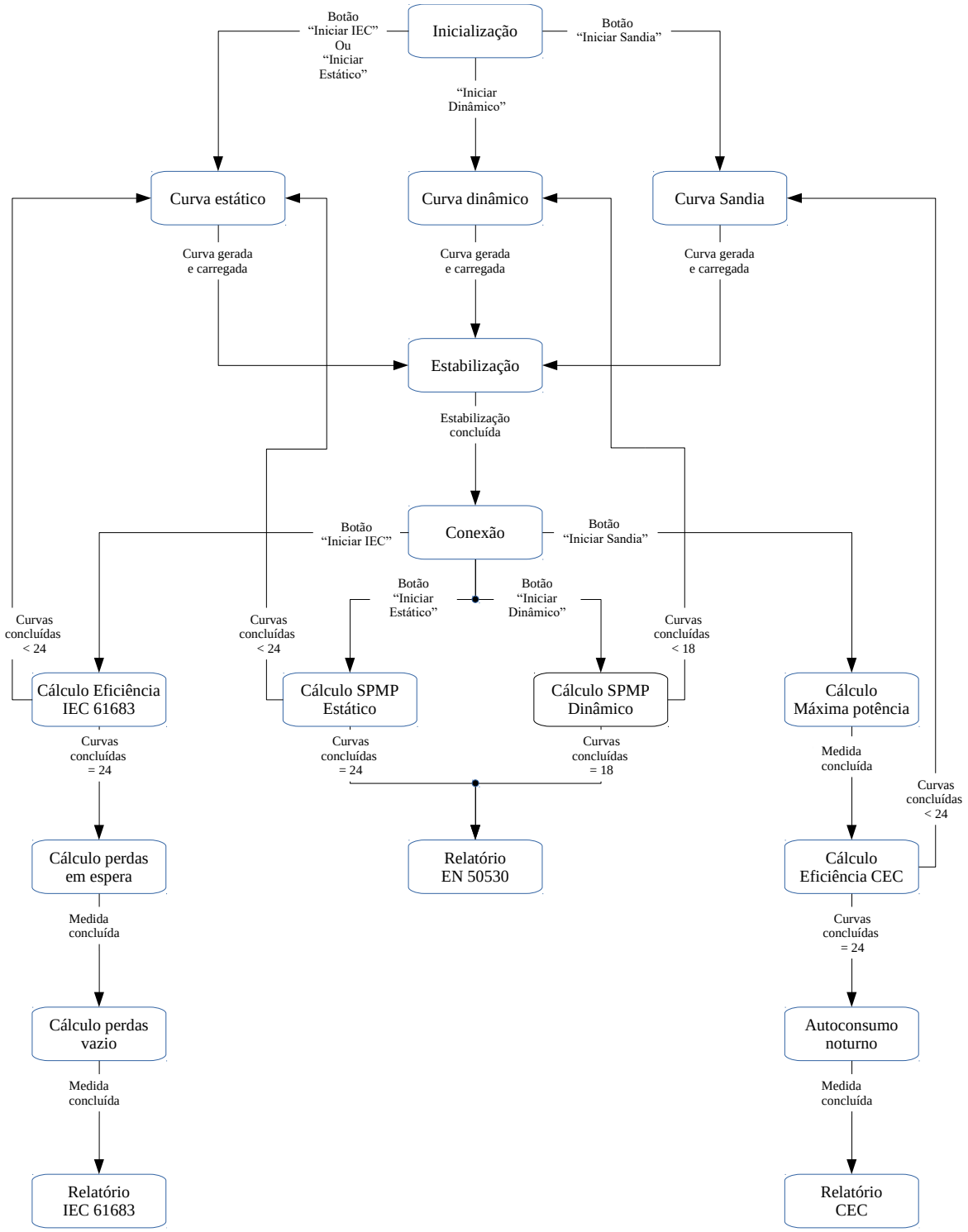
O software foi desenvolvido como uma máquina de estados, composta de 17 estados, cuja ordem de transição é apresentada, de forma simplificada, no diagrama da Figura 29. A apresentação das transições foi simplificada para uma melhor compreensão da sequência de operação do software, visto que se todas as variáveis e *flags* utilizadas nos cálculos das transições fossem apresentadas, o diagrama ficaria muito complexo e difícil de compreender.

Para otimizar o programa e reduzir o número de estados, alguns foram adaptados para funcionar como blocos genéricos, como é o caso dos estados de “estabilização” e “conexão”, onde, considerando que todos os ensaios contam com períodos de estabilização antes do início das medições, é mais eficiente desenvolver uma função de estabilização genérica e que se adapte a todos os estados, baseado nas entradas recebidas, do que repetir funções equivalentes em cada estado. O mesmo vale para o estado de “conexão” que tem a função de conectar, testar a conexão e programar os equipamentos de medida antes do início de algum ensaio.

Destaca-se que não existe a possibilidade de pausa durante a realização dos ensaios no programa. O motivo é se garantir a estabilização térmica do equipamento em todas as condições de ensaio, garantindo a repetibilidade. Os ensaios são iniciados pela potência nominal, e os tempos de estabilização garantem que o equipamento opere na temperatura adequada, que é mantida durante todos os testes conforme a potência decresce. Em especial, a norma CEC (*Sandia Test Protocol)* exige um longo tempo de estabilização térmica.

A seguir é apresentado uma descrição das ações realizadas por cada um dos estados mostrado no diagrama da Figura 29. No Apêndice A são apresentados mais detalhes sobre o código desenvolvido para cada estado.

Figura 29 - Diagrama simplificado da máquina de estados do programa desenvolvido



Fonte: Próprio autor

4.2.1 Estado: Inicialização

Nesse estado o software permanece “em espera”, para que os dados gerais do equipamento que será ensaiado sejam preenchidos. O sistema permanece nesse estado até que um dos botões “Iniciar Ensaio” seja pressionado.

4.2.2 Estado: Curva Estático

Após pressionar o botão “Iniciar Ensaio” na aba IEC 61683 ou na aba EN 50530, ensaio de SPMP estático, o sistema muda para esse estado para os cálculos de curvas fotovoltaicas conforme o modelo matemático apresentado na norma EN 50530. Como a norma IEC 61683 não apresenta um modelo matemático específico para a simulação de painéis FV, o software considera o mesmo modelo na norma EN 50530.

4.2.3 Estado: Curva Dinâmico

Esse estado gera uma curva fotovoltaica também com o modelo da norma EN 50530. Contudo, devido a particularidades das rotinas de variação da irradiância que são necessárias para o ensaio de SPMP em condição dinâmica, criou-se um estado dedicado a essa função.

4.2.4 Estado: Curva Sandia

O *“Sandia Test Protocol”* especifica que, caso seja utilizado um simulador fotovoltaico, deve ser usado o modelo matemático específico para simulação de módulos fotovoltaicos. Esse estado gera curvas a partir do modelo apresentado no protocolo, cujos parâmetros são diferentes do utilizado pela norma EN 50530.

4.2.5 Estado: Estabilização

Nesse estado o equipamento sob ensaio permanece operando com uma curva FV e por um tempo específicos de cada parte do ensaio, permitindo que o algoritmo de SPMP possa entrar em regime permanente. O sistema entra nesse estado sempre que há uma alteração na curva FV simulada, sendo comum a todas as normas e ensaios. Durante o tempo de estabilização nenhuma medição é realizada.

4.2.6 Estado: Conexão

Antes de iniciar qualquer ensaio, o sistema verifica os níveis de tensão e corrente que serão medidos, com base na curva gerada em algum dos estados “Curva Estático”, “Curva Dinâmico” ou “Curva Sandia”, e com isso programa adequadamente as escalas dos canais de aquisição de corrente e tensão. Esses valores de escalas precisam ser definidos pelo programa, pois são utilizadas no cálculo das incertezas e impactam no valor da mesma, sendo uma das funções desse estado encontrar a escala que consiga realizar a medida com a menor incerteza. Após a definição das escalas, o sistema inicia a conexão com os equipamentos de medida, testa, e, caso tudo esteja funcionando, programa os equipamentos e inicia a realização das medidas.

4.2.7 Estado: Cálculo eficiência IEC 61683

Nesse estado é realizado o cálculo da eficiência de conversão conforme a norma IEC 61683. Cada uma das 24 curvas é calculada a partir da média da potência instantânea de saída dividida pela média da potência instantânea de entrada, conforme a Equação 16, ao longo de um período de 5 minutos.

$$\eta = \left(\frac{P_o}{P_i}\right) \times 100 \tag{16}$$

Onde:

η é eficiência nominal (%);

P_o é a média da potência de saída (W)

P_i é a média da potência de entrada (W)

O tempo de estabilização antes da medição de cada curva é de 2 minutos. A taxa de aquisição dos dados empregada é de 20 Hz.

4.2.8 Estado: Cálculo perdas em espera

Após a conclusão das medidas de eficiência, é realizada a medida da potência consumida pelo inversor enquanto o mesmo não possui tensão em sua entrada (Vcc = 0) mas continua conectado à rede elétrica, simulando o consumo do equipamento durante a noite, por exemplo. Para tanto, a tensão do simulador fotovoltaico é reduzida para 0 V enquanto a tensão do

simulador de rede c.a. permanece na tensão nominal, e mede-se a potência média consumida da rede c.a. por um intervalo de 30 s empregando a frequência de amostragem de 20 Hz.

4.2.9 Estado: Cálculo perdas vazio

Para inversores conectados à rede elétrica, a potência consumida a vazio é realizada medindo-se a potência de entrada junto ao simulador FV quando a potência de saída do equipamento é 0 W. Para isso, desconecta-se a rede c.a., e mantem-se o simulador FV na curva de potência nominal, medindo a potência c.c. consumida pelo inversor por um intervalo de 30 s empregando a frequência de amostragem de 20 Hz.

4.2.10 Estado: Relatório IEC 61683

Após a conclusão dos ensaios da norma IEC 61683, o sistema entra nesse estado, que tem a função de coletar todos os resultados gerados pelos outros estados e compilar tudo em um relatório de ensaio, com modelo específico para a norma IEC 61683.

4.2.11 Estado: Cálculo SPMP estático

Esse estado realiza o cálculo das eficiências de conversão, de SPMP estático e total, conforme a norma EN 50530, utilizando a medição da energia durante um período de 10 min com as equações 17 a 19.

$$\eta_{SPMP} = \frac{1}{P_{PMP;SFV} \,.\, T_M} \cdot \sum_i V_{CC,i} \,.\, I_{CC,i} \,.\, \Delta T \tag{17}$$

Onde:

$V_{CC,i}$ é o valor de tensão amostrado na entrada do ESE.

$I_{CC,i}$ é o valor de corrente amostrado na entrada do ESE.

T_M é o tempo total de ensaio

ΔT = Intervalo entre duas amostragens

$$\eta_{Conv} = \frac{1}{\sum_i V_{CC,i} \,.\, I_{CC,i} \,.\, \Delta T_e} \cdot \sum_i V_{CA,i} \,.\, I_{CA,i} \,.\, \Delta T_s \tag{18}$$

Onde:

$V_{CC,i}$ é o valor de tensão amostrado na entrada do ESE.

$I_{CC,i}$ é o valor de corrente amostrado na entrada do ESE.

$V_{CA,i}$ é o valor de tensão amostrado na saída do ESE.

$I_{CA,i}$ é o valor de corrente amostrado na saída do ESE.

ΔT_e = Intervalo entre duas amostragens dos valores de entrada

ΔT_s = Intervalo entre duas amostragens dos valores de saída

$$\eta_{total} = \eta_{SPMP} . \eta_{conv} \quad (19)$$

Os tempos de estabilização são de 2 min quando se altera apenas a potência da curva FV, mantendo a tensão do ponto de máxima potência constante, e de 5 min quando se altera a tensão.

4.2.12 Estado: Cálculo SPMP Dinâmico

Para o cálculo da eficiência do SPMP em condição dinâmica o sistema primeiro calcula uma curva FV para potência nominal do equipamento, para cada uma das condições (baixa irradiância, alta irradiância e partida do conversor). Nesse estado, pontos de tensão e de corrente que compõe a curva são multiplicados por um fator de redução, para redução da tensão e corrente, conforme modelo apresentado pela norma EN 50530, dados pelas equações 20 e 21

$$I_{sc} = I_{sc} \frac{G}{G_{STC}} . (1 + \alpha . (T_{PV} - T_{STC})) \quad (20)$$

$$V_{OC} = V_{Oc} . (1 + \beta . (T_{PV} - T_{STC})) . \left(\ln \left(\frac{G}{C_G} + 1 \right) . C_V - C_R . G \right) \quad (21)$$

Onde:

I_{SC} é a corrente de curto circuito.

V_{OC} é a tensão de circuito aberto.

G é a irradiância atual.

G_{STC} é a irradiancia na *Standard Test Conditions* (1000 W/m²).

α é o coeficiente de variação da corrente em função da temperatura (depende do modelo de painéis FV adotado).

β é o coeficiente de variação da tensão em função da temperatura (depende do modelo de painéis FV adotado).

T_{PV} é a temperatura do painel FV.

T_{STC} é a temperatura do painel na *Standard Test Conditions* (25 ºC).

C_R, C_V, e C_G são fatores de correção do modelo que dependem da tecnologia de painéis FV escolhida.

Esses fatores são calculados em tempo real a partir das curvas de variação da irradiância, gerando, assim, a característica dinâmica utilizada no ensaio. A eficiência é calculada a partir da energia potencial disponível no simulador de sistemas fotovoltaicos e da energia extraída pelo inversor do simulador com a equação 22.

$$\eta_{din} = \frac{\sum_i V_{CC} \,.\, I_{CC} \,.\, \Delta T_i}{\sum_j P_{PMP;SFV} \,.\, \Delta T_j} \tag{22}$$

Onde:

V_{CC} é a tensão c.c. na saída do simulador FV.

I_{CC} é a corrente c.c. na saída do simulador FV.

$P_{PMP;SFV}$ é a potência do ponto de máxima potência configurado no simulador FV.

ΔT_j é o período em que a potência $P_{PMP;SFV}$ está disponível no simulador FV.

ΔT_i é o período em que V_{CC} e I_{CC} são amostrados.

4.2.13 Estado: Relatório EN 50530

Esse estado registra os resultados obtidos durante os ensaios da norma EN 50530 e gera um relatório de ensaios conforme será apresentado no capítulo 5.

4.2.14 Estado: Cálculo máxima potência

Esse estado inicia a sequência de ensaios do *Sandia Test Protocol*. Primeiro o equipamento permanece operando em 100 % de sua potência c.a. nominal, a uma temperatura de 45 ºC e por um período de 150 minutos, para garantir que todos os elementos do equipamento estejam em temperatura operacional.

Após o período de estabilização térmica, o equipamento permanece operando em 100 % de sua potência nominal, enquanto um aviso sonoro e uma janela aparecem na tela,

indicando a necessidade de alteração da temperatura da câmara térmica de 45 ºC para 40 ºC. O metrologista, então, deve alterar o controle da câmara térmica e aguardar alguns minutos até a mesma estabilizar na nova temperatura.

Após o usuário confirmar a alteração, o equipamento opera por mais 3 horas em potência c.a. nominal, tendo a potência de saída registrada a uma taxa de 20 Hz. Calcula-se, então, a média da potência de saída a cada intervalo de 5 minutos, totalizando 36 amostras.

O resultado do ensaio é o menor valor entre as 36 amostras.

4.2.15 Estado: Cálculo eficiência CEC

Após a conclusão do ensaio de máxima potência, o equipamento continua operando em 100 % de sua potência nominal, a fim de não afetar a estabilidade térmica. Enquanto isso, um aviso na tela indica que o equipamento deve ser removido de dentro da câmara térmica (que é realizado abrindo-se a tampa frontal e deslizando o carrinho para fora, sem necessidade de desconexão do inversor).

Inicia-se o ensaio de eficiência de conversão, com base no *Sandia Test Protocol*, calculando-se a média da eficiência instantânea, conforme a Equação 23, com uma taxa de aquisição de 20 Hz por períodos de 30 segundos, até que 7 amostras sejam registradas para cada curva (totalizando 3 minutos e meio de tempo de medida para cada curva). Também são registrados os valores da tensão média de entrada e da potência média de saída. O tempo de estabilização entre cada curva é de 2 minutos.

$$\eta = \left(\frac{P_o}{P_i}\right) \times 100 \tag{23}$$

Onde:

η é eficiência de conversão (%);

P_o é a média da potência de saída (W)

P_i é a média da potência de entrada (W)

4.2.16 Estado: Autoconsumo noturno

O ensaio de autoconsumo noturno é realizado após a conclusão do ensaio de eficiência, e é realizado desligando-se o simulador fotovoltaico, mantendo-se o simulador de rede c.a. em tensão nominal e registrando-se durante um período de 30 segundos a potência média no lado c.a.. O tempo de estabilização antes do início da medição é de 30 segundos.

4.2.17 Estado: Relatório CEC

Assim como nos outros casos, ao final da realização dos ensaios do *Sandia Test Protocol* esse estado registra os resultados obtidos em um relatório, com modelo para a norma de eficiência CEC, conforme será apresentado no capítulo 5.

4.3 ANÁLISE DAS INCERTEZAS

A análise de incertezas das medidas de eficiência foi realizada tendo como base os guias metrológicos para expressão da incerteza de medição (JCGM, 2008). A metodologia é a mesma para qualquer um dos cálculos de eficiência realizados, sendo nessa seção apresentado o cálculo para a Eficiência Europeia.

Primeiramente foi realizado o levantamento das fontes de incerteza presentes na medida, sua distribuição de probabilidade e seu coeficiente de sensibilidade.

As fontes de incerteza são analisadas como segue:

A) Incertezas do tipo A: Emprega-se uma análise estatística de uma série de observações repetidas no momento do ensaio/calibração para sua determinação. As incertezas do tipo A podem ser expressas pelo desvio padrão experimental das medidas realizadas.

B) Incertezas do tipo B: Empregam-se outros meios que não a análise estatística de uma série de observações repetidas no momento do ensaio/calibração para sua determinação. Nesse caso, a avaliação de incerteza é baseada em outros conhecimentos, tais como: dados históricos de desempenho do método de medição, incertezas herdadas da calibração dos equipamentos e padrões, classe de exatidão dos equipamentos e padrões, faixa de condições ambientais, entre outros.

Observa-se que, para as medidas apresentadas, existe uma incerteza do tipo A, associada à repetição de edição, e uma incertezas do tipo B, associados aos demais fatores. A distribuição de probabilidade (DDP) utilizada no cálculo para determinação do divisor de cada incerteza depende do tipo de informação que se tem disponível a respeito da respectiva componente de incerteza. Nesse trabalho consideram-se as seguintes distribuições de probabilidade:

- Distribuição Retangular: É aquela onde se considera que todos os pontos em um intervalo finito são igualmente prováveis. É empregada quando se conhecem apenas os valores máximos e mínimos de uma variação (±): por exemplo, o erro máximo admissível para um determinado equipamento (que geralmente consta

no manual). O divisor para uma distribuição Retangular é $\sqrt{3}$. É empregada quando de desconhece a distribuição de probabilidade real, por apresentar resultados conservadores.

- Distribuição normal: É aquela onde se considera que a probabilidade se dá através de uma distribuição estatística simétrica e campaniforme, que é típica dos fenômenos naturais. O divisor para uma distribuição normal é igual a k, informado no certificado de calibração. É empregada quando se obtém a repetição de medições de uma dada grandeza.
- Distribuição t-student: É aquela onde se considera uma distribuição de probabilidade estatística simétrica, campaniforme, e similar à curva normal, porém com caudas mais largas. O seu formato depende de um parâmetro *n* que caracteriza a sua forma, chamado de número de graus de liberdade, que é igual ao número de medições repetidas. O divisor para uma distribuição t-student é $\sqrt{n}$. Essa distribuição é usada para representar as incertezas herdadas da calibração de equipamentos e padrões.

O grau de liberdade (GDL) de uma medida quantifica o número de determinações independentes, ou a dimensão da amostra, empregado para representar a credibilidade sobre cada componente de incerteza. Assim, um alto grau de credibilidade implica em um alto grau de liberdade. Para distribuições normal e t-student, o grau de liberdade é igual a *n*-1 (número total de medições menos um). Por outro lado, para a distribuição retangular, considera-se graus de liberdade infinitos, pois assume-se que distribuição é fechada dentro de um intervalo (tem-se 100% de certeza de que o valor da variável estará contido no intervalo de ± a).

O grau de liberdade efetivo para a distribuição t-student pode ser calculado através da equação de Welch-Satterthwaite:

$$V_{eff} = \frac{u_c^4\,(y)}{\sum_{i=1}^{n} \frac{(c_i u(x_i))^4}{V_i}} = \frac{u_c^4\,(y)}{\sum_{i=1}^{n} \frac{u_i^4\,(y)}{V_i}} \tag{24}$$

Onde:

u_i é a incerteza padrão da medida

v_i é o número de graus de liberdade associados a cada fonte de incerteza

Esse valor é utilizado para calcular a probabilidade de abrangência (fator k). Tipicamente considera-se uma probabilidade de 95,45 % do valor medido estar dentro da faixa de ± a.

Depois da análise teórica, foram levantados 4 valores de incertezas presentes nas medidas de potência c.c. e c.a., necessárias para o cálculo de eficiência:

- Desvio padrão das repetições, incerteza tipo A com DDP tipo Normal
- Incerteza da classe de exatidão, incerteza do tipo B com DDP tipo Retangular
- Incerteza herdada da calibração, incerteza do tipo B com DDP tipo *Student*
- Erro de indicação, incerteza do tipo B com DDP tipo Retangular.

Portanto, para a determinação das incertezas é necessário saber os dados levantados durante o ensaio, apresentados na Tabela 24, e dos dados de incerteza e da escala do equipamento utilizados durante o ensaio, mostrados na Tabela 25. Os outros dados, incerteza de calibração e erro de indicação, constam no relatório de calibração. Como o equipamento ainda não foi calibrado em rede RBC, foi utilizado os dados de calibração de fábrica do equipamento. A partir dessas informações, foi construída a planilha apresentada na Figura 30 para cálculo das incertezas da potência c.c. e c.a. do ensaio realizado.

Tabela 24 - Resultados das medidas para faixa de 100 % de potência c.a.

Medidas Potência c.a.		**Medidas Potência c.c.**	
Valor médio	1557,052 W	Valor médio	1502,038 W
Desvio padrão	4,300 W	Desvio padrão	4,300 W
Número de amostras	10000	Número de amostras	10000

Fonte: Próprio autor

Tabela 25 - Dados do analisador de energia LMG 670 e escalas utilizadas

Incerteza de medição c.c.		**Incerteza de medição c.a.**	
Incerteza da medida	0,032 %	Incerteza da medida	0,015 %
Incerteza do fundo de escala	0,080 %	Incerteza do fundo de escala	0,010 %
Escala utilizada	2800 W	Escala utilizada	2800 W

Fonte: Próprio autor

Figura 30 - Análise das contribuições de incerteza para potência c.a. e c.c.

Modelo matemático de medição:	*Soma das fontes de incerteza* *Potência CC faixa de 100%*							
Descrição da fonte de incerteza	**Valor de entrada**	**Unidade medida**	**DDP**	**Divisor**	**Incerteza padrão**	**Coef. de sensib.**	**Contribuição de incerteza**	**GDL**
Desvio padrão das repetições	4,30000	W	Normal	100,0000	0,04300	1	0,04300	9999
Incerteza de classe de exatidão	2,73824	W	Retangular	1,7321	1,58092	1	1,58092	inf
Incerteza herdada da calibração	0,30000	W	Student	2,0100	0,14925	1	0,14925	318
Erro de indicação	0,00000	W	Retangular	1,7321	0,00000	1	0,00000	inf
						Incerteza-padrão combinada	1,58854	
						Graus de liberdade efetivos	4079612	
						k	1,69015	
						Incerteza expandida	**2,68486**	**W**

Modelo matemático de medição:	*Soma das fontes de incerteza* *Potência CA faixa de 100%*							
Descrição da fonte de incerteza	**Valor de entrada**	**Unidade medida**	**DDP**	**Divisor**	**Incerteza padrão**	**Coef. de sensib.**	**Contribuição de incerteza**	**GDL**
Desvio padrão das repetições	4,30000	W	Normal	100,0000	0,04300	1	0,04300	9999
Incerteza de classe de exatidão	0,50531	W	Retangular	1,7321	0,29174	1	0,29174	inf
Incerteza herdada da calibração	0,30000	W	Student	2,6500	0,11321	1	0,11321	119
Erro de indicação	0,00000	W	Retangular	1,7321	0,00000	1	0,00000	inf
						Incerteza-padrão combinada	0,31587	
						Graus de liberdade efetivos	7211	
						k	1,69037	
						Incerteza expandida	**0,53394**	**W**

Fonte: Próprio autor usando modelo disponibilizado pelo SGLab

A seguir, calcula-se a incerteza relativa da potência c.c. e c.a. e a eficiência, para cada faixa de potência, sendo para a faixa de 100% dada por:

$$\frac{\delta P_{CA}}{|P_{CA}|} = \frac{0{,}534}{1502} = 0{,}035\ \% \tag{25}$$

$$\frac{\delta P_{CC}}{|P_{CC}|} = \frac{2{,}685}{1557} = 0{,}172\ \% \tag{26}$$

$$\eta_{100} = \frac{|P_{CA}|}{|P_{CC}|} = \frac{1502{,}038}{1557{,}052} = 0{,}96470 \tag{27}$$

Onde:

δP_{CA} é a incerteza absoluta da medida de potência c.a..

δP_{CC} é a incerteza absoluta da medida de potência c.c..

P_{CA} é o valor médio da potência c.a. medida durante o ensaio.

P_{CC} é o valor médio da potência c.c. medida durante o ensaio.

Como a eficiência é calculada por uma razão entre a potência c.a. e potência c.c., a incerteza relativa e a incerteza absoluta do cálculo da eficiência são dadas por:

$$\frac{\delta\eta_{100}}{|\eta_{100}|} = \sqrt{\left(\frac{\delta P_{CA}}{|P_{CA}|}\right)^2 + \left(\frac{\delta P_{CC}}{|P_{CC}|}\right)^2} = 0{,}00035^2 + 0{,}00172^2 = 0{,}176\ \% \qquad (28)$$

$$\delta\eta_{100} = \frac{\delta\eta_{100}}{|\eta_{100}|} \,.\, |\eta_{100}| = \ 0{,}00176\,.\,0{,}96470 = 0{,}00017 \qquad (29)$$

Os resultados dos cálculos apresentados na Equação 27 e Equação 29 representam que a eficiência medida na faixa de 100 % de potência é de 0,96470 ou 96,470% com uma incerteza absoluta de ± 0,00170 ou 0,170 %

Dessa forma, tendo como base os valores mostrados na Figura 30, chega-se à incerteza mostrada na Figura 31.

Figura 31 - Análise das contribuições de incerteza para a medida de eficiência

Modelo matemático de medição:	*Soma das fontes de incerteza Eficiência faixa de 100%*							
Descrição da fonte de incerteza	**Valor de entrada**	**Unidade medida**	**DDP**	**Divisor**	**Incerteza padrão**	**Coef. de sensib.**	**Contribuição de incerteza**	**GDL**
Incerteza relativa da potência CC	0,00172	%	Student	1,6901	0,00102	1	0,00102	4E+06
Incerteza relativa da potência CA	0,00036	%	Student	1,6904	0,00021	1	0,00021	7211
						Incerteza-padrão combinada	0,10417%	
						Graus de liberdade efetivos	2193530	
						k	1,69015	
						Incerteza expandida relativa	0,17606%	
						Incerteza expandida Absoluta	**0,00170**	

Fonte: Próprio autor usando modelo disponibilizado pelo SGLab

Para a determinação da incerteza da eficiência ponderada, realiza-se a avaliação de incertezas, conforme demonstrado, para todos os pontos de potência c.a. (relativo a potência c.a. nominal) do inversor (5 %, 10 %, 20 %, 25 %, 30 %, 50 %, 75 % e 100 %). A Figura 32 apresenta os resultados obtidos durante o cálculo da eficiência Euro, que utiliza 6 das 8 faixas apresentadas.

Figura 32 – Resultados dos valores de eficiência e incerteza para cada ponto de potência medido durante o ensaio

P/Pnom	Peso	Eficiência	Incerteza
5%	0,03	85,511%	2,485%
10%	0,06	91,360%	1,340%
20%	0,13	94,440%	0,707%
30%	0,1	95,410%	0,487%
50%	0,48	96,190%	0,307%
100%	0,2	96,470%	0,170%

Fonte: Próprio autor.

Por fim, para o cálculo da eficiência ponderada cada valor de eficiência e incerteza é multiplicado pelo seu respectivo peso, apresentado na Figura 32, e então os valores de eficiência e incertezas resultantes são somados utilizando soma normal para os valores de eficiência e soma quadrática para os valores de incerteza (JCGM, 2008), conforme apresentado na Figura 33Figura 34, chegando a um valor final de eficiência Euro de 95,330 % ± 0,21 %.

Figura 33 - Resultado do valor de incerteza para eficiência Euro

Modelo matemático de medição:	*Soma das fontes de incerteza Eficiência Euro*							
Descrição da fonte de incerteza	**Valor de entrada**	**Unidade medida**	**DDP**	**Divisor**	**Incerteza padrão**	**Coef. de sensib.**	**Contribuição de incerteza**	**GDL**
Incerteza da eficiencia faixa 100%	0,00034		Student	1,6901	0,00020	1,00	0,00020	2,2E+06
Incerteza da eficiencia faixa 50%	0,00147		Student	1,6901	0,00087	1,00	0,00087	1,5E+06
Incerteza da eficiencia faixa 30%	0,00049		Student	1,6901	0,00029	1,00	0,00029	1,2E+06
Incerteza da eficiencia faixa 20%	0,00092		Student	1,6901	0,00054	1,00	0,00054	1,5E+06
Incerteza da eficiencia faixa 10%	0,00080		Student	1,6901	0,00048	1,00	0,00048	9,4E+05
Incerteza da eficiencia faixa 5%	0,00075		Student	1,6901	0,00044	1,00	0,00044	7,8E+05
						Incerteza-padrão combinada	0,00127	
						Graus de liberdade efetivos	24797228	
						k	1,69015	
						Incerteza expandida	**0,00214**	

Fonte: Próprio autor usando modelo disponibilizado pelo SGLab

Destaca-se que, apesar das incertezas ficarem grandes para as faixas de baixa potência, para esse caso em específico, a contribuição delas no valor final da incerteza da eficiência ponderada é baixo, devido ao baixo fator de ponderação utilizado nessas faixas.

Todo o procedimento descrito acima é implementado de forma automática pelo software de ensaios. O valor das incertezas relativas ao desvio padrão das medidas realizadas e ao fundo de escala são calculadas durante o ensaio, e as incertezas relativas ao certificado de calibração do equipamento precisam ser inseridas pelo metrologista no momento da calibração do equipamento e permanecem salvas, conforme descrito no começo do capítulo.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesse capitulo são apresentados os resultados de um ensaio completo de eficiência com a aplicação das três normas descritas nesse trabalho, empregando o programa em LabVIEW desenvolvido. As características do inversor utilizado são apresentadas na Tabela 26.

Tabela 26 - Características do inversor utilizado nos ensaios

Parâmetro	Valor
Potência c.a.	1500 W
Tensão c.a.	220 V
Corrente c.a.	6,81 A
Tensão c.c. máxima	450 V
Corrente c.c. máxima	12 A
Tensão de operação do SPMP	200 – 400 V
Número de entradas c.c.	1

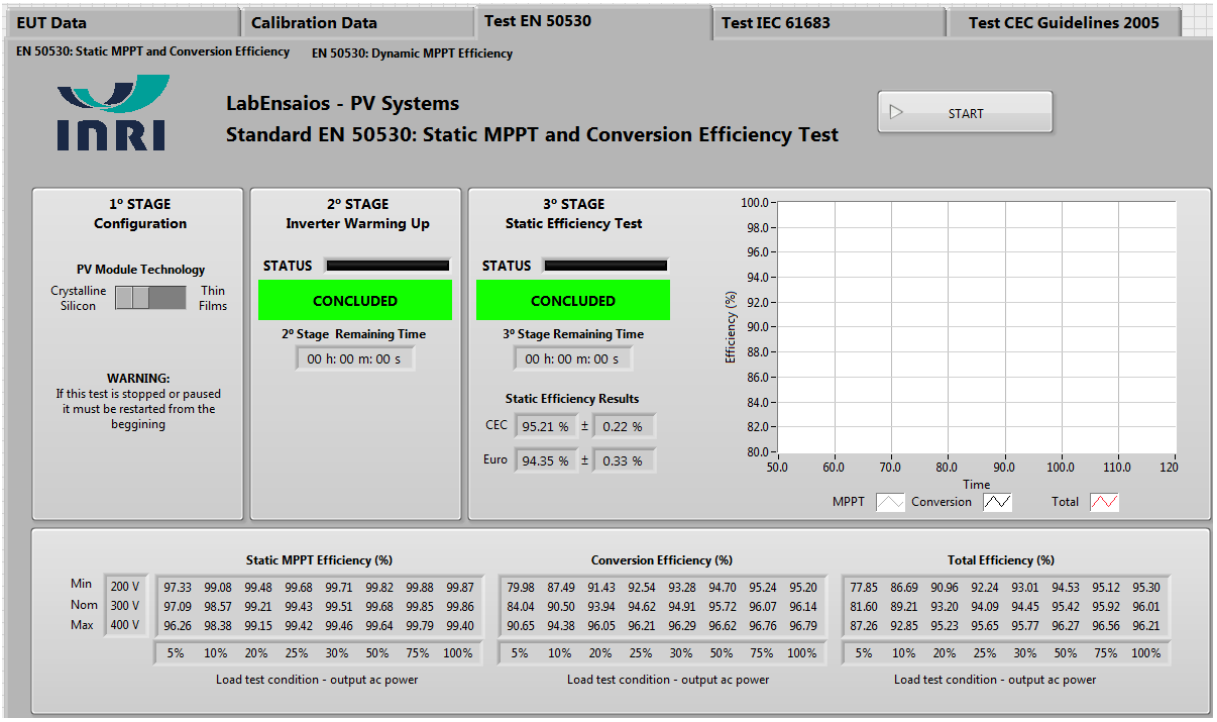
Fonte: Próprio autor

5.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS SEGUINDO A NORMA EN 50530

As Figura 34 e Figura 35 apresentam as telas do programa desenvolvido após a conclusão do ensaio de eficiência de conversão e eficiência do SPMP em condição estática, e do ensaio de SPMP em condição dinâmica, respetivamente. O relatório gerado é mostrado nas Figura 36 e Figura 37, respectivamente. Destaca-se que esses relatórios são extraíveis do software através de um arquivo de saída em formato XLSX (software Excel®).

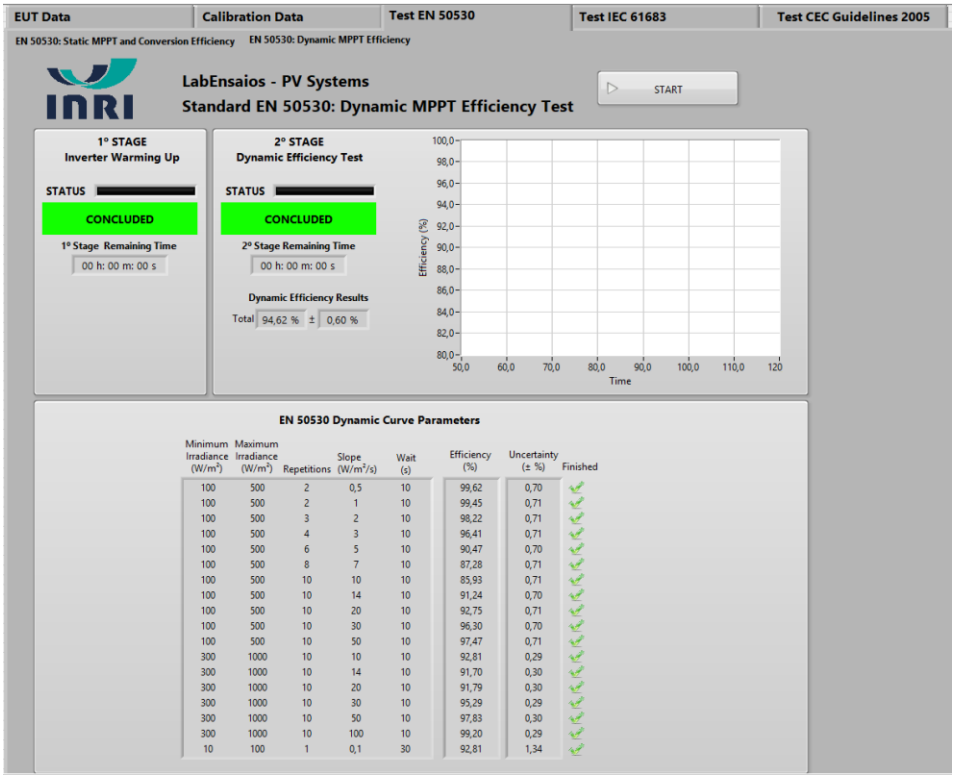
Observa-se que o valor das incertezas varia entre os ensaios, sendo mais significativo nos ensaios de SPMP dinâmico. Isso decorre das escalas de medição utilizadas durante esse ensaio, pois o sensor utilizado possui escala mínima de 2,5 A, o que torna o erro de fundo de escala significativo durante as medições de correntes baixas. Nesse ensaio a incerteza poderia ser reduzida se fosse possível ser realizada a troca da escala durante a medida da potência do equipamento. Contudo, isso não é possível porque a aquisição de dados é ininterrupta. Destaca-se que mesmo nos piores casos a incerteza ainda está em valores considerados satisfatórios.

Figura 34 - Resultados do ensaio de eficiência de conversão e de SPMP em condição estática



Fonte: Próprio autor

Figura 35 - Resultados do ensaio de eficiência de SPMP em condição dinâmica



Fonte: Próprio autor

Figura 36 – Relatório do ensaio de eficiência de conversão e SPMP em condição estática

Fabricante:
Modelo:
Vmin (V): 200 **Vnom (V):** 300 **Vmax (V):** 400

Eficiência de Conversão

Tensão	Nível de potência (% da nominal)								Eficiência	
Entrada	5%	10%	20%	25%	30%	50%	75%	100%	CEC	Euro
Vmin	79.98	87.49	91.43	92.54	93.28	94.70	95.24	95.42	94.40	93.40
Vnom	84.04	90.50	93.94	94.62	94.91	95.72	96.07	96.14	95.53	94.83
Vmax	90.65	94.38	96.05	96.21	96.29	96.62	96.76	96.79	96.55	96.23

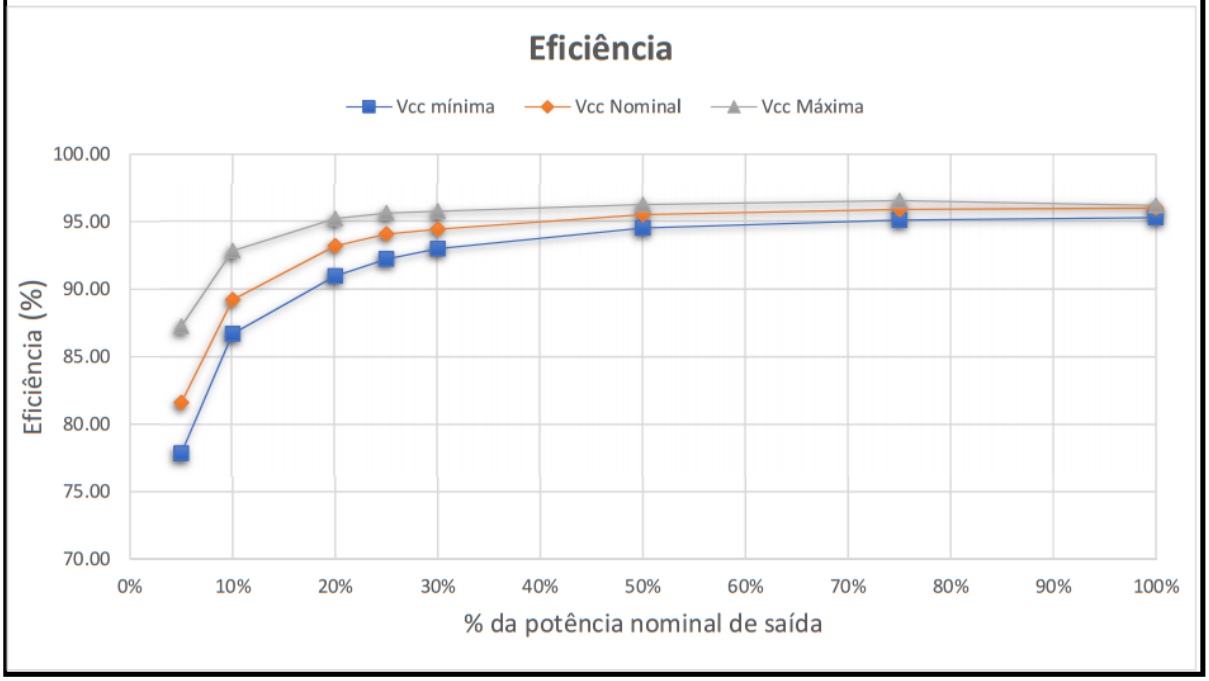
Eficiência de MPPT Estático

Tensão	Nível de potência (% da nominal)								Eficiência	
Entrada	5%	10%	20%	25%	30%	50%	75%	100%	CEC	Euro
Vmin	97.33	99.08	99.48	99.68	99.71	99.82	99.88	99.87	99.79	99.66
Vnom	97.09	98.57	99.21	99.43	99.51	99.68	99.85	99.86	99.69	99.49
Vmax	96.26	98.38	99.15	99.42	99.46	99.64	99.79	99.40	99.61	99.33

Eficiência Total

Tensão	Nível de potência (% da nominal)								Eficiência	
Entrada	5%	10%	20%	25%	30%	50%	75%	100%	CEC	Euro
Vmin	77.85	86.69	90.96	92.24	93.01	94.53	95.12	95.30	94.21	93.10
Vnom	81.60	89.21	93.20	94.09	94.45	95.52	95.92	96.01	95.24	94.36
Vmax	87.26	92.85	95.23	95.65	95.77	96.27	96.56	96.21	96.17	95.60

Eficiência CEC: 95.21% Eficiência Euro: 94.35%
Incerteza: 0.22% Incerteza: 0.33%



Fonte: Próprio autor

Figura 37 - Relatório do ensaio de eficiência de SPMP em condição dinâmica

Sequencia de testes com rampa de irradiação de 100 W/m² - 500 W/m²								
Repetições	Inclinação (W/m²/s)	Rampa Subida (s)	Permanencia (s)	Rampa Descida (s)	Permanencia (s)	Duração (s)	Eficiência (%)	Incerteza ± %
2	0.5	800	10	800	10	3540	99.62	0.70
2	1	400	10	400	10	1940	99.45	0.71
3	2	200	10	200	10	1560	98.22	0.71
4	3	133	10	133	10	1444	96.41	0.71
6	5	80	10	80	10	1380	90.47	0.70
8	7	57	10	57	10	1372	87.28	0.71
10	10	40	10	40	10	1300	85.93	0.71
10	14	29	10	29	10	1080	91.24	0.70
10	20	20	10	20	10	900	92.75	0.71
10	30	13	10	13	10	760	96.30	0.70
10	50	8	10	8	10	660	97.47	0.71

Sequencia de testes com rampa de irradiação de 300 W/m² - 1000 W/²								
Repetições	Inclinação (W/m²/s)	Rampa Subida (s)	Permanencia (s)	Rampa Descida (s)	Permanencia (s)	Duração (s)	Eficiência (%)	Incerteza ± %
10	10	70	10	70	10	1900	92.81	0.29
10	14	50	10	50	10	1500	91.70	0.30
10	20	35	10	35	10	1200	91.79	0.30
10	30	23	10	23	10	960	95.29	0.29
10	50	14	10	14	10	780	97.83	0.30
8	100	7	10	7	10	640	99.20	0.29

Sequencia de testes com rampa de irradiação de 10 W/m² - 100 W/m²								
Repetições	Inclinação (W/m²/s)	Rampa Subida (s)	Permanencia (s)	Rampa Descida (s)	Permanencia (s)	Duração (s)	Eficiência (%)	Incerteza ± %
10	10	70	10	70	10	1900	92.81	1.34

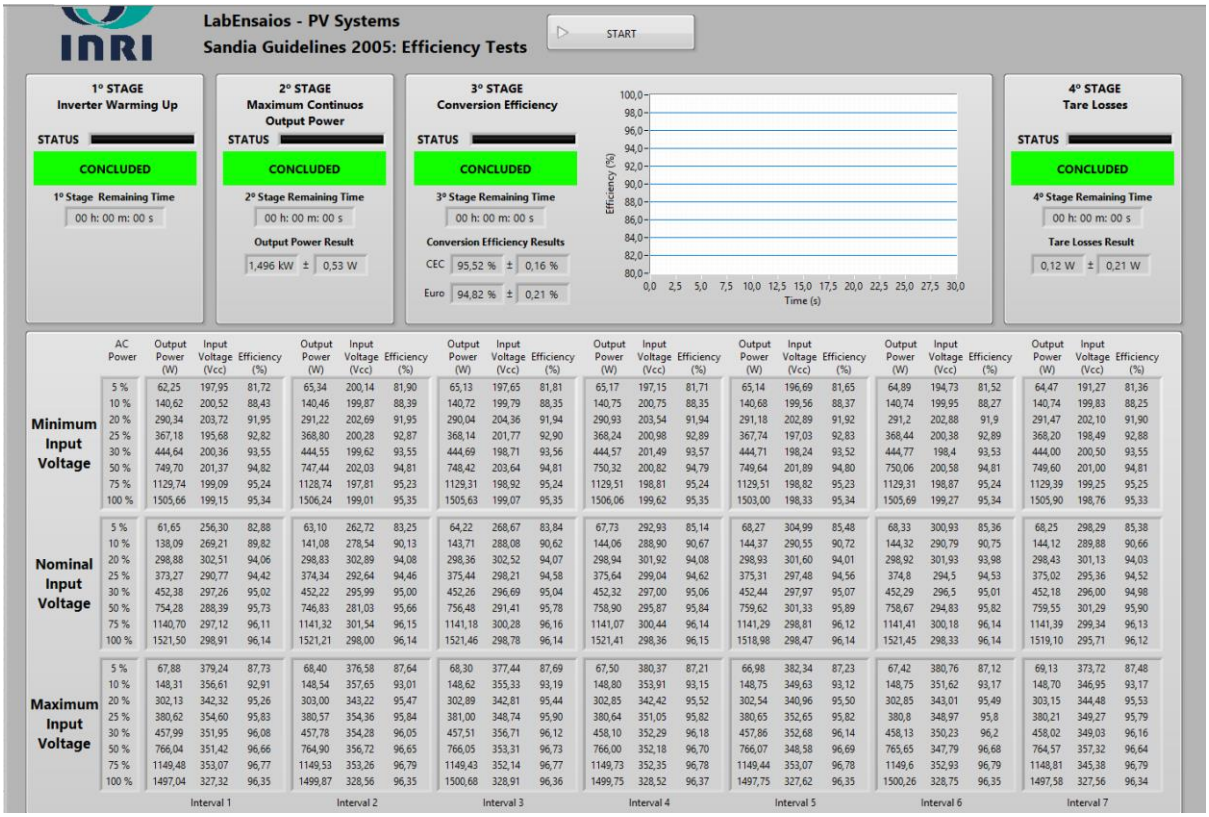
Fonte: Próprio autor

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE EFICIÊNCIA CEC

Os resultados dos ensaios de eficiência CEC (*Sandia Test Protocol)* do inversor apresentado na Tabela 26 são apresentados na Figura 38. Os resultados parciais para inserção no relatório de ensaios são apresentados nas Figura 39 e Figura 40. Nesse ensaio, é necessário medir a temperatura mínima e máxima do dissipador durante os ensaios de eficiência (após o período de estabilização térmica), cujos valores são mostrados na Figura 41 e Figura 42, respectivamente. A variação da temperatura ambiente durante o ensaio é mostrada na Figura 43.

Observa-se que as eficiências do inversor, tanto na medida CEC quanto na Euro, ficaram ligeiramente superiores às medidas seguindo a norma EN 50530, pelo fato da norma europeia considerar a eficiência do algoritmo de SPMP no cálculo. Diferentemente do esperado, não ocorreu uma eficiência menor do inversor testado pela norma CEC ante a norma EN 50530, apesar do primeiro ensaio se dar com uma temperatura maior que a segunda. O motivo para essa pequena diferença é que se observou que o dissipador está superdimensionado, apresentando uma diferença de temperatura no dissipador de apenas 10ºC entre ambos os casos, mesmo funcionando a plena carga durante horas. Analisando-se os produtos da empresa, observou-se que todos os produtos até a potência de 5 kW utilizam o mesmo chassi. Logo, o dissipador do equipamento de 1,5 kW é muito sobre dimensionado, confirmando a hipótese realizada.

Figura 38 - Resultados dos ensaios de eficiência CEC



	AC Power	Interval 1 Output Power (W)	Interval 1 Input Voltage (Vcc)	Interval 1 Efficiency (%)	Interval 2 Output Power (W)	Interval 2 Input Voltage (Vcc)	Interval 2 Efficiency (%)	Interval 3 Output Power (W)	Interval 3 Input Voltage (Vcc)	Interval 3 Efficiency (%)	Interval 4 Output Power (W)	Interval 4 Input Voltage (Vcc)	Interval 4 Efficiency (%)	Interval 5 Output Power (W)	Interval 5 Input Voltage (Vcc)	Interval 5 Efficiency (%)	Interval 6 Output Power (W)	Interval 6 Input Voltage (Vcc)	Interval 6 Efficiency (%)	Interval 7 Output Power (W)	Interval 7 Input Voltage (Vcc)	Interval 7 Efficiency (%)
Minimum Input Voltage	5 %	62,25	197,95	81,72	65,34	200,14	81,90	65,13	197,65	81,81	65,17	197,15	81,71	65,14	196,69	81,65	64,89	194,73	81,52	64,47	191,27	81,36
	10 %	140,62	200,52	88,43	140,46	199,87	88,39	140,72	199,79	88,35	140,75	200,75	88,35	140,68	199,56	88,37	140,74	199,95	88,27	140,74	199,83	88,25
	20 %	290,34	203,72	91,95	291,22	202,69	91,95	290,04	204,36	91,94	290,93	203,54	91,94	291,18	202,89	91,92	291,2	202,88	91,9	291,47	202,10	91,90
	25 %	367,18	195,68	92,82	368,80	200,28	92,87	368,14	201,77	92,90	368,24	200,98	92,89	367,74	197,03	92,83	368,44	200,38	92,89	368,20	198,49	92,88
	30 %	444,64	200,36	93,55	444,55	199,62	93,55	444,69	198,71	93,56	444,57	201,49	93,57	444,71	198,24	93,52	444,77	198,4	93,53	444,00	200,50	93,55
	50 %	749,70	201,37	94,82	747,44	202,03	94,81	748,42	203,64	94,81	750,32	200,82	94,79	749,64	201,89	94,80	750,06	200,58	94,81	749,60	201,00	94,81
	75 %	1129,74	199,09	95,24	1128,74	197,81	95,23	1129,31	198,92	95,24	1129,51	198,81	95,24	1129,51	198,82	95,23	1129,31	198,87	95,24	1129,39	199,25	95,25
	100 %	1505,66	199,15	95,34	1506,24	199,01	95,35	1505,63	199,07	95,35	1506,06	199,62	95,35	1503,00	198,33	95,34	1505,69	199,27	95,34	1505,90	198,76	95,33
Nominal Input Voltage	5 %	61,65	256,30	82,88	63,10	262,72	83,25	64,22	268,67	83,84	67,73	292,93	85,14	68,27	304,99	85,48	68,33	300,93	85,36	68,25	298,29	85,38
	10 %	138,09	269,21	89,82	141,08	278,54	90,13	143,71	288,08	90,62	144,06	288,90	90,67	144,37	290,55	90,72	144,32	290,79	90,75	144,12	289,88	90,66
	20 %	298,88	302,51	94,06	298,83	302,89	94,08	298,36	302,52	94,07	298,94	301,92	94,08	298,93	301,60	94,01	298,92	301,93	93,98	298,43	301,13	94,03
	25 %	373,27	290,77	94,42	374,34	292,64	94,46	375,44	298,21	94,58	375,64	299,04	94,62	375,31	297,48	94,56	374,8	294,5	94,53	375,02	295,36	94,52
	30 %	452,38	297,26	95,02	452,22	295,99	95,00	452,26	296,69	95,04	452,32	297,00	95,06	452,44	297,97	95,07	452,29	296,5	95,01	452,18	296,00	94,98
	50 %	754,28	288,39	95,73	746,83	281,03	95,66	756,48	291,41	95,78	758,90	295,87	95,84	759,62	301,33	95,89	758,67	294,83	95,82	759,55	301,29	95,90
	75 %	1140,70	297,12	96,11	1141,32	301,54	96,15	1141,18	300,28	96,16	1141,07	300,44	96,14	1141,29	298,81	96,12	1141,41	300,18	96,14	1141,39	299,34	96,13
	100 %	1521,50	298,91	96,14	1521,21	298,00	96,14	1521,46	298,78	96,14	1521,41	298,36	96,15	1518,98	298,47	96,14	1521,45	298,33	96,14	1519,10	295,71	96,12
Maximum Input Voltage	5 %	67,88	379,24	87,73	68,40	376,58	87,64	68,30	377,44	87,69	67,50	380,37	87,21	66,98	382,34	87,23	67,42	380,76	87,12	69,13	373,72	87,48
	10 %	148,31	356,61	92,91	148,54	357,65	93,01	148,62	355,33	93,19	148,80	353,91	93,15	148,75	349,63	93,12	148,75	351,62	93,17	148,70	346,95	93,17
	20 %	302,13	342,32	95,26	303,00	343,22	95,47	302,89	342,81	95,44	302,85	342,42	95,52	302,54	340,96	95,50	302,85	343,01	95,49	303,15	344,48	95,53
	25 %	380,62	354,60	95,83	380,57	354,36	95,84	381,00	348,74	95,90	380,64	351,05	95,82	380,65	352,65	95,82	380,8	348,97	95,8	380,21	349,27	95,79
	30 %	457,99	351,95	96,08	457,78	354,28	96,05	457,51	356,71	96,12	458,10	352,29	96,18	457,86	352,68	96,14	458,13	350,23	96,2	458,02	349,03	96,16
	50 %	766,04	351,42	96,66	764,90	356,72	96,65	766,05	353,31	96,73	766,00	352,18	96,70	766,07	348,58	96,69	765,65	347,79	96,68	764,57	357,32	96,64
	75 %	1149,48	353,07	96,77	1149,53	353,26	96,79	1149,43	352,14	96,77	1149,73	352,35	96,78	1149,44	353,07	96,78	1149,6	352,93	96,79	1148,81	345,38	96,79
	100 %	1497,04	327,32	96,35	1499,87	328,56	96,35	1500,68	328,91	96,36	1499,75	328,52	96,37	1497,75	327,62	96,35	1500,26	328,75	96,35	1497,58	327,56	96,34

Fonte: Próprio autor

Figura 39 - Relatório dos ensaios de eficiência CEC

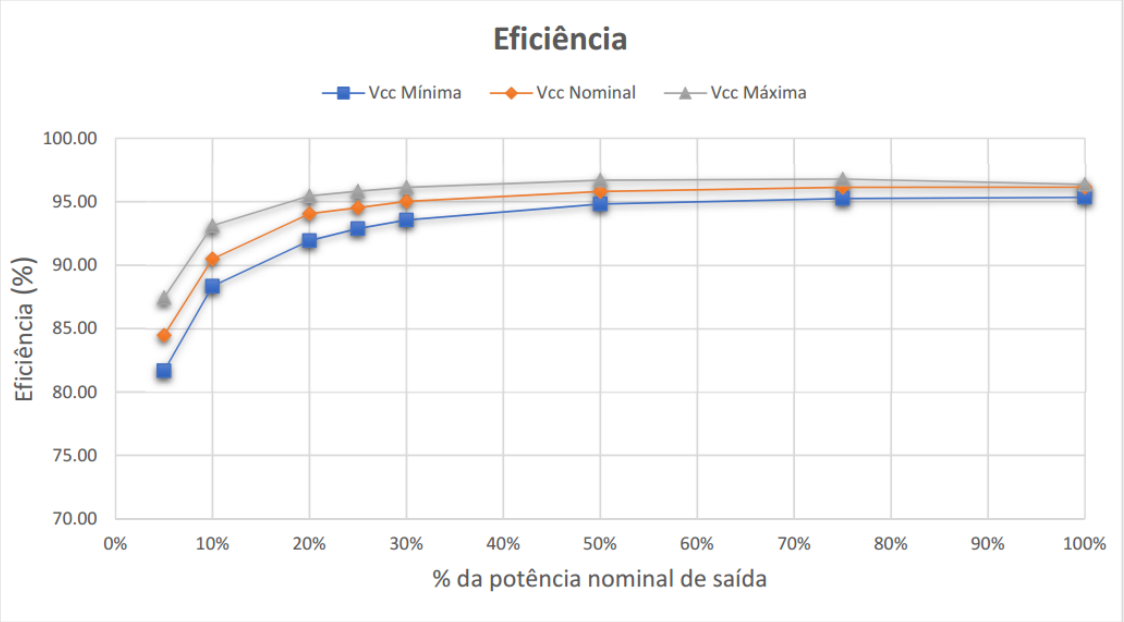
Fabricante:
Modelo:

Máxima potência contínua de saída: 1496 W **Perdas Noturnas:** 0.12 W
Incerteza: 0.53 W **Incerteza:** 0.21 W

Vmin: 200 Vdc **Vnom:** 300 Vdc **Vmax:** 400 Vdc

Tensão Entrada	Nível de potência (% da nominal)								Eficiência	
	5%	10%	20%	25%	30%	50%	75%	100%	CEC	Euro
Vmin	81.67	88.34	91.93	92.87	93.55	94.81	95.24	95.34	94.51	93.63
Vnom	84.48	90.48	94.04	94.53	95.03	95.80	96.14	96.14	95.60	94.90
Vmax	87.44	93.11	95.46	95.83	96.14	96.68	96.78	96.36	96.45	95.91

Eficiência CEC: 95.52% Eficiência Euro: 94.82%
Incerteza: 0.16% Incerteza: 0.21%



Fonte: Próprio autor

Figura 40 - Dados do ensaio de eficiência CEC

Especificado		Amostra 1			Amostra 2			Amostra 3			Amostra 4			Amostra 5			Amostra 6			Amostra 7		
Potência de saída (% nominal)	Tensão de entrada (Vcc)	Potência de saída (W)	Tensão de entrada (Vcc)	Eficiência (%)	Potência de saída (W)	Tensão de entrada (Vcc)	Eficiência (%)	Potência de saída (W)	Tensão de entrada (Vcc)	Eficiência (%)	Potência de saída (W)	Tensão de entrada (Vcc)	Eficiência (%)	Potência de saída (W)	Tensão de entrada (Vcc)	Eficiência (%)	Potência de saída (W)	Tensão de entrada (Vcc)	Eficiência (%)	Potência de saída (W)	Tensão de entrada (Vcc)	Eficiência (%)
5%	Vmin	65.25	197.95	81.72	65.34	200.14	81.9	65.13	197.65	81.81	65.17	197.15	81.71	65.14	196.69	81.65	64.89	194.73	81.52	64.47	191.27	81.36
10%	Vmin	140.62	200.52	88.43	140.46	199.87	88.39	140.72	199.79	88.35	140.75	200.75	88.35	140.68	199.56	88.37	140.74	199.95	88.27	140.74	199.83	88.25
20%	Vmin	290.34	203.72	91.95	291.22	202.69	91.95	290.04	204.36	91.94	290.93	203.54	91.94	291.18	202.89	91.92	291.2	202.88	91.9	291.47	202.1	91.9
25%	Vmin	367.18	195.68	92.82	368.28	200.28	92.87	368.14	201.77	92.9	368.24	200.98	92.89	367.74	197.03	92.83	368.44	200.38	92.89	368.2	198.49	92.88
30%	Vmin	444.64	200.36	93.55	444.55	199.62	93.55	444.69	198.71	93.56	444.57	201.49	93.57	444.71	198.24	93.52	444.77	198.4	93.53	444	200.5	93.55
50%	Vmin	749.7	201.37	94.82	747.44	202.03	94.81	748.42	203.64	94.81	750.32	200.82	94.79	749.64	201.89	94.8	750.06	200.58	94.81	749.6	201	94.81
75%	Vmin	1129.74	199.09	95.24	1128.74	197.81	95.23	1129.31	198.92	95.24	1129.51	198.81	95.24	1129.51	198.82	95.23	1129.31	198.87	95.24	1129.39	199.25	95.25
100%	Vmin	1505.66	199.15	95.34	1506.24	199.01	95.35	1505.63	199.07	95.35	1506.06	199.62	95.35	1503	198.33	95.34	1505.69	199.27	95.34	1505.9	198.76	95.33
5%	Vnom	61.65	256.3	82.88	63.1	262.72	83.25	64.22	268.67	83.84	67.73	292.93	85.14	68.27	304.99	85.48	68.33	300.93	85.36	68.25	298.29	85.38
10%	Vnom	138.09	269.21	89.82	141.08	278.54	90.13	143.71	288.08	90.62	144.06	288.9	90.67	144.37	290.55	90.72	144.32	290.79	90.75	144.12	289.88	90.66
20%	Vnom	298.88	302.51	94.06	298.83	302.89	94.08	298.36	302.52	94.07	298.94	301.92	94.08	298.93	301.6	94.01	298.92	301.93	93.98	298.43	301.13	94.03
25%	Vnom	373.27	290.77	94.42	374.34	292.64	94.46	375.44	298.21	94.58	375.64	299.04	94.62	375.31	297.48	94.56	374.8	294.5	94.53	375.02	295.36	94.52
30%	Vnom	452.38	297.26	95.02	452.22	295.99	95	452.26	296.69	95.04	452.32	297	95.06	452.44	297.97	95.07	452.28	296.5	95.01	452.18	296	94.98
50%	Vnom	754.28	288.39	95.73	746.83	281.03	95.66	756.48	291.41	95.78	758.9	295.87	95.84	759.62	301.33	95.89	758.67	294.83	95.82	759.55	301.29	95.9
75%	Vnom	1140.7	297.12	96.11	1141.32	301.54	96.15	1141.18	300.28	96.16	1141.07	300.44	96.14	1141.29	298.81	96.12	1141.41	300.18	96.14	1141.39	299.34	96.13
100%	Vnom	1521.5	298.91	96.14	1521.21	298	96.14	1521.46	298.78	96.14	1521.41	298.36	96.15	1518.98	298.47	96.14	1521.45	298.33	96.14	1519.1	295.71	96.12
5%	Vmax	67.88	379.24	87.73	68.4	376.58	87.64	68.3	377.44	87.69	67.5	380.37	87.21	67.5	380.37	87.21	67.42	380.76	87.12	69.13	373.72	87.48
10%	Vmax	148.31	356.61	92.91	148.54	357.65	93.01	148.62	355.33	93.19	148.8	353.91	93.15	148.8	353.91	93.15	148.75	351.62	93.17	148.7	346.95	93.17
20%	Vmax	302.13	342.32	95.26	303	343.22	95.47	302.89	342.81	95.44	302.85	342.42	95.52	302.85	342.42	95.52	302.85	343.01	95.49	303.15	344.48	95.53
25%	Vmax	380.62	354.6	95.83	380.57	354.36	95.84	381	348.74	95.9	380.64	351.05	95.82	380.64	351.05	95.82	380.8	348.97	95.8	380.21	349.27	95.79
30%	Vmax	457.99	351.95	96.08	457.78	354.28	96.05	457.51	356.71	96.12	458.1	352.29	96.18	458.1	352.29	96.18	458.13	350.23	96.2	458.02	349.03	96.16
50%	Vmax	766.04	351.42	96.66	764.9	356.72	96.65	766.05	353.31	96.73	766	352.18	96.7	766	352.18	96.7	765.65	347.79	96.68	764.57	357.32	96.64
75%	Vmax	1149.48	353.07	96.77	1149.53	353.26	96.79	1149.73	352.14	96.77	1149.73	352.35	96.78	1149.73	352.35	96.78	1149.6	352.93	96.79	1148.81	345.38	96.79
100%	Vmax	1497.07	327.32	96.35	1499.87	328.56	96.35	1500.68	328.91	96.36	1499.75	328.52	96.37	1499.75	328.52	96.37	1500.26	328.75	96.35	1497.58	327.56	96.34

Fonte: Próprio autor

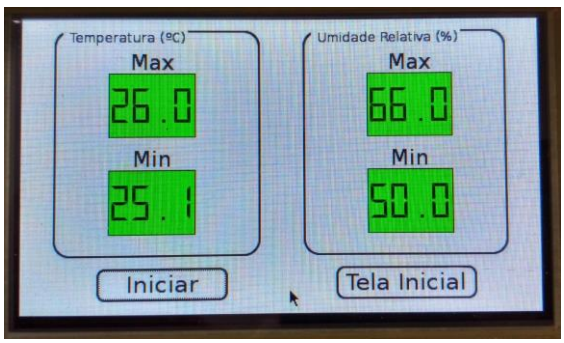
Figura 41 - Temperatura mínima do dissipador durante os ensaios de eficiência CEC

Fonte: Próprio autor

Figura 42 - Temperatura máxima do dissipador durante os ensaios de eficiência CEC

Fonte: Próprio autor

Figura 43 - Temperatura ambiente máxima e mínima durante o ensaio de eficiência CEC



Fonte: Próprio autor

5.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DA NORMA IEC 61683

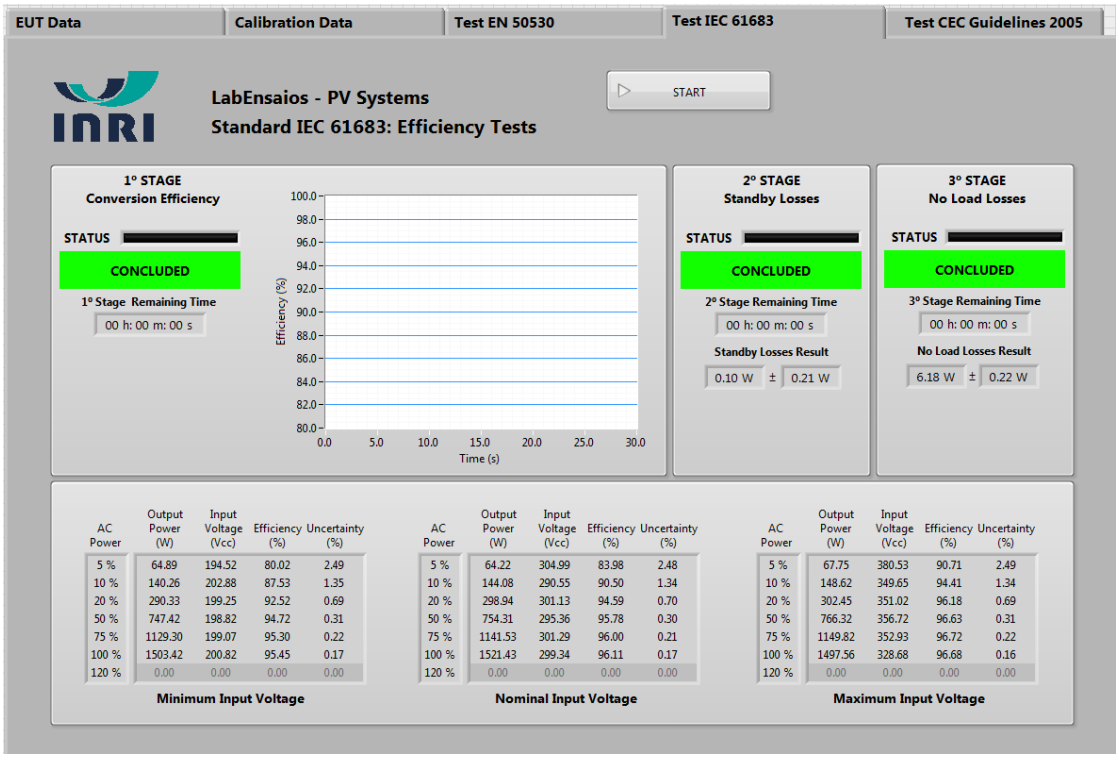
Os resultados dos ensaios da norma IEC 61683 são apresentados na Figura 44, enquanto o relatório de ensaios é apresentado na Figura 45. Não foram realizados ensaios na curva de 120 % de potência nominal, pois o equipamento sob ensaio não suporta operar em tal potência e, portanto, conforme a própria norma especifica, não precisa ser ensaiado com esse valor.

Conforme esperado, os valores de eficiência de conversão medidos através do método descrito na norma IEC 61683 ficaram muito próximos dos valores medidos pela norma EN 50530, por serem ensaios realizados em condições ambientes muito semelhantes.

Observou-se que o equipamento é alimentado pelo lado c.c., pois desliga-se quando não há energia nessa entrada. A medição do autoconsumo noturno do equipamento, denominado de perdas em espera pela norma IEC 61683, é 0,10 W. Esse é um valor inferior a própria incerteza de medida, provavelmente resultante apenas de ruído ou impedância dos cabos.

No ensaio de perdas sem carga, onde mede-se a potência consumida pelo equipamento no lado c.c. quando o mesmo não está operando, registrou-se 6,18 W, compatível com o consumo do sistema de instrumentação do mesmo.

Figura 44 - Resultados dos ensaios da norma IEC 61683



Fonte: Próprio autor

Figura 45 - Relatório dos ensaios da norma IEC 61683

Fabricante:
Modelo:
Vmin (V): 200 **Vnom (V):** 300 **Vmax (V):** 400

Perdas em espera: 0.10 W **Perdas sem carga:** 6.18 W
Incerteza: 0.21 W **Incerteza:** 0.22 W

Eficiência de Conversão

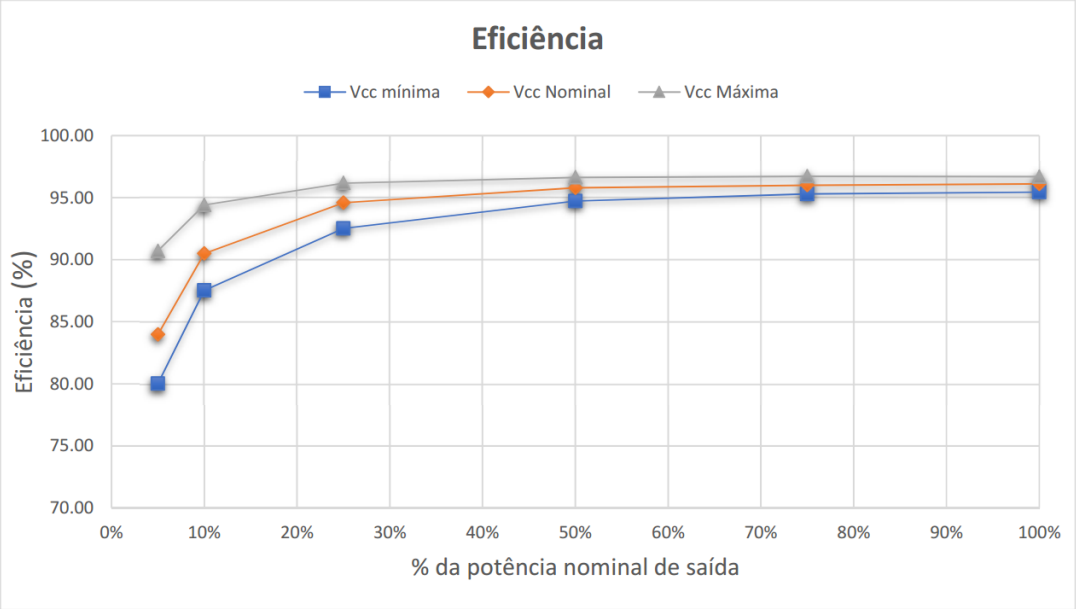
Tensão Entrada	Nível de potência (% da nominal)						
	5%	10%	25%	50%	75%	100%	120%
Vmin	80.02	87.53	92.52	94.72	95.30	95.45	NR
Vnom	83.98	90.50	94.59	95.78	96.00	96.11	NR
Vmax	90.71	94.41	96.18	96.63	96.72	96.68	NR

NR = Não realizado

Incertezas

Tensão Entrada	Nível de potência (% da nominal)						
	5%	10%	25%	50%	75%	100%	120%
Vmin	2.49	1.35	0.69	0.31	0.22	0.17	NR
Vnom	2.48	1.34	0.70	0.30	0.21	0.17	NR
Vmax	2.49	1.34	0.69	0.31	0.22	0.16	NR

NR = Não realizado



Fonte: Próprio autor

6 CONCLUSÃO

O principal objetivo desse trabalho foi o desenvolvimento de uma banca de ensaios completamente automatizada, capaz de realizar os ensaios de medição da eficiência energética de inversores fotovoltaicos conforme as três normas a nível mundial, a IEC 61683, a CEC e a EM 50530. Além da realização dos ensaios o software deveria realizar o cálculo das incertezas de medição em tempo real e apresentar os resultados em um relatório de ensaios.

Durante a análise das normas para verificação dos requisitos mínimos necessários para cada equipamento utilizado nos ensaios (analisadores de energia, fontes simuladoras de painéis fotovoltaico se fonte simuladora de rede c.a.), verificou-se que as normas possuíam requisitos diferentes entre si e que os requisitos de uma norma não eram suficientes para cumprir todos os requisitos das outras normas. Por isso foi realizado um estudo comparando-se o pior caso para cada equipamento a ser adquirido. Resultando na compra das fontes simuladoras de painéis FV seguindo as especificações da norma EN 50530, da fonte simuladora de rede c.a. seguindo as especificações da norma ABNT NBR 16150 e dos analisadores de energia seguindo algumas especificações da norma CEC e outras da norma ABNT NBR 16150.

Também se verificou que as normas EN 50530 e IEC 61683 não possuem procedimentos de ensaio, elas versam sobre o que deve ser medido, mas não como. Para a realização desse trabalho foram desenvolvidos procedimentos de ensaios para essas normas. Esses procedimentos são uma solução encontrada pelo autor entre os diversos procedimentos possíveis e podem apresentar diferenças com procedimentos utilizados por outros laboratórios.

O software desenvolvido nesse trabalho foi elaborado em ambiente LabView devido a facilidade de programação paralela e comunicação com diversos equipamentos simultaneamente. Durante a primeira fase do software apenas o conceito foi testado, utilizando-se apenas uma fonte simuladora FV, um analisador de energia e uma fonte simuladora de rede c.a.. Esse trabalho concluiu os testes de conceito e futuramente o software será expandido para operar com todos os equipamentos do laboratório simultaneamente, permitindo a análise de inversores de maior potência.

Como propostas para trabalhos futuros propõe-se:

1) expansão dos ensaios para uma futura norma de eficiência brasileira;
2) expansão da bancada para sistemas trifásicos e com diversas entradas c.c.;
3) Implementação de verificação automática das curvas geradas pelas fontes simuladoras FV antes da realização de cada ensaio de eficiência de SPMP.

APÊNDICE A – ROTINA DE REALIZAÇÃO DE ENSAIOS

Nessa seção é apresentado um exemplo da sequência de estados utilizados pelo programa durante a realização de um ensaio completo da eficiência CEC (*Sandia Test Protocol)*. Os demais ensaios possuem conceito parecido.

Primeiro estado

Ao iniciar o programa, o primeiro estado é o de inicialização, cuja função é apenas dar tempo ao operador para preencher os dados relativos ao inversor, e inicializar algumas variáveis com os valores padrão. A tela de inicialização é melhor explicada na seção 4.1.1. O bloco de programação responsável por esse estado é apresentado na Figura 46.

Figura 46 - Primeiro estado, Inicialização

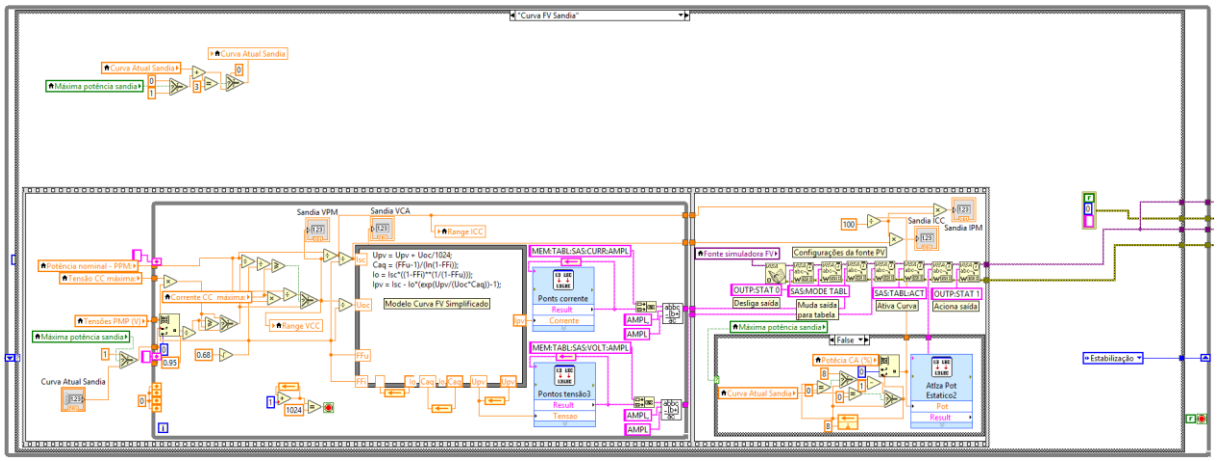
Fonte: Próprio autor

Segundo estado

Ao clicar no botão “Iniciar Ensaio”, na aba *Sandia Test Protocol*, após preencher os dados do equipamento, o sistema muda para o estado “Curva FV Sandia”, apresentado na Figura 47, que é responsável por gerar uma curva FV seguindo o modelo matemático para simulação de painéis fotovoltaicos apresentado na respectiva norma. Além de gerar a curva para a programação da fonte, é necessário dividir a curva gerada em 1024 pares de pontos, sendo um ponto para o valor de tensão e outro para o valor de corrente em cada ponto da curva. Esses pontos são carregados nas fontes simuladoras fotovoltaicas, e as mesmas configuradas para

operar como simulador fotovoltaico a partir da tabela de pontos e, por fim, acionar a saída das fontes.

Figura 47 - Segundo estado, Curva PV Sandia



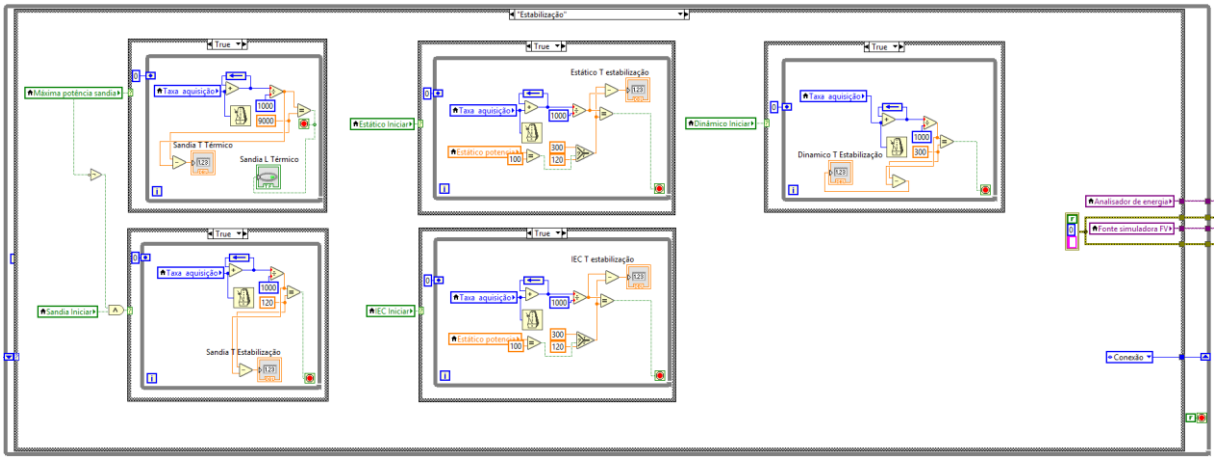
Fonte: Próprio autor

Uma vez iniciado o ensaio, a cada vez que o programa retornar a esse estado, ele irá gerar uma nova curva fotovoltaica, baseada nos parâmetros necessários para cada parte do ensaio, variando-se o nível de potência e/ou nível de tensão, e irá carregar a mesma nas fontes simuladoras.

Terceiro estado

Após a configuração e acionamento das fontes FV, o sistema dirige-se ao terceiro estado, “Estabilização”, apresentado na Figura 48. Nesse estado o sistema fica parado, mantendo a curva FV constante e dando tempo ao equipamento para se conectar com as fontes simuladoras fotovoltaicas e de rede c.a.. O tempo que o equipamento fica no modo estabilização depende de cada protocolo de ensaio realizado (CEC, EN 50530 ou IEC 61683) e de cada parte específica do ensaio. Para o ensaio demonstrado nesse exemplo, na primeira vez que o sistema entra nesse estado o tempo de estabilização é de 150 minutos, com uma curva FV capaz de fornecer 100% da potência nominal do equipamento, para garantir a estabilização térmica segundo o *Sandia Test Protocol*. Nas próximas vezes, o tempo de espera é de 2 minutos, apenas para garantir a estabilização do algoritmo de SPMP no novo ponto de operação. Durante o período de estabilização nenhum dado é registrado, pois não são utilizados para os cálculos.

Figura 48 - Terceiro estado, Estabilização

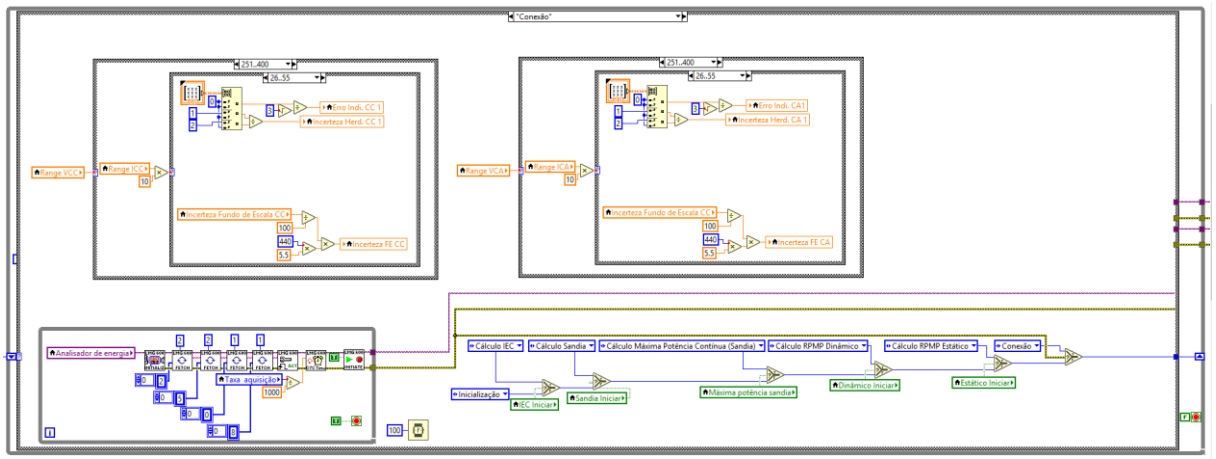


Fonte: Próprio autor

Quarto estado

Finalizado o período de estabilização, o sistema entra no quarto estado, “Conexão”, apresentado na Figura 49.

Figura 49 - Quarto estado, Conexão



Fonte: Próprio autor

No quarto estado a comunicação com os equipamentos de medida é configurada e testada. Havendo confirmação de comunicação, são ajustados os valores de escalas paras a medidas de tensão e corrente conforme os valores calculados para os pontos de máxima potência, curto circuito, e circuito aberto, calculados no segundo estado durante a geração da

curva FV. Por exemplo, caso a corrente c.c. do ponto de máxima potência seja calculada como 9 A, o sistema ajusta a escala de corrente c.c. do respectivo canal para o primeiro valor superior a 9 A, nesse caso, 10 A.

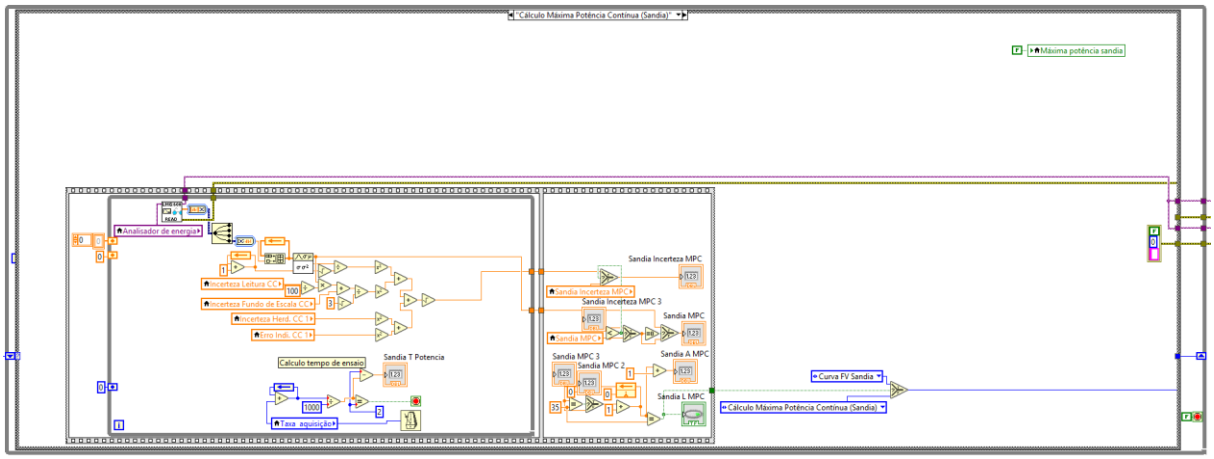
Também é nesse estado que são calculados os erros de fundo de escala, incerteza herdada e erro de indicação, que são valores fixos, dependentes apenas da calibração do equipamento (incerteza herdada e erro de indicação) ou faixa a ser utilizada (incerteza de fundo de escala). A cada vez que o sistema entra nesse estado, a configuração dos equipamentos é realizada novamente, atualizando os valores das escalas e do cálculo das incertezas.

Quinto estado

Após toda a preparação do inversor e da bancada de ensaios, o sistema inicia as medidas relativas à primeira parte do ensaio, cálculo da máxima potência de saída contínua, cujo estado é apresentado na Figura 50.

Nesse estado é realizada a medida da potência de saída c.a. do inversor, a uma taxa de amostragem de 20 Hz, realizando-se a média dos valores a cada 5 minutos, durante um tempo total de 180 minutos, registrando-se a menor média medida como o resultado do ensaio. Também é calculada a incerteza da medida, utilizando-se os valores definidos no estado de conexão, e os valores referentes a medida propriamente dita (incerteza da medida). O resultado final inclui a contribuição de todas as fontes de incerteza (incerteza da medida, incerteza do fundo de escala, incerteza herdada e erro de indicação). Após a realização do ensaio, o sistema retorna ao segundo estado para a atualização da curva FV e repete os estados dois, três e quatro.

Figura 50 - Quinto estado, Cálculo Máxima Potência Contínua (Sandia)

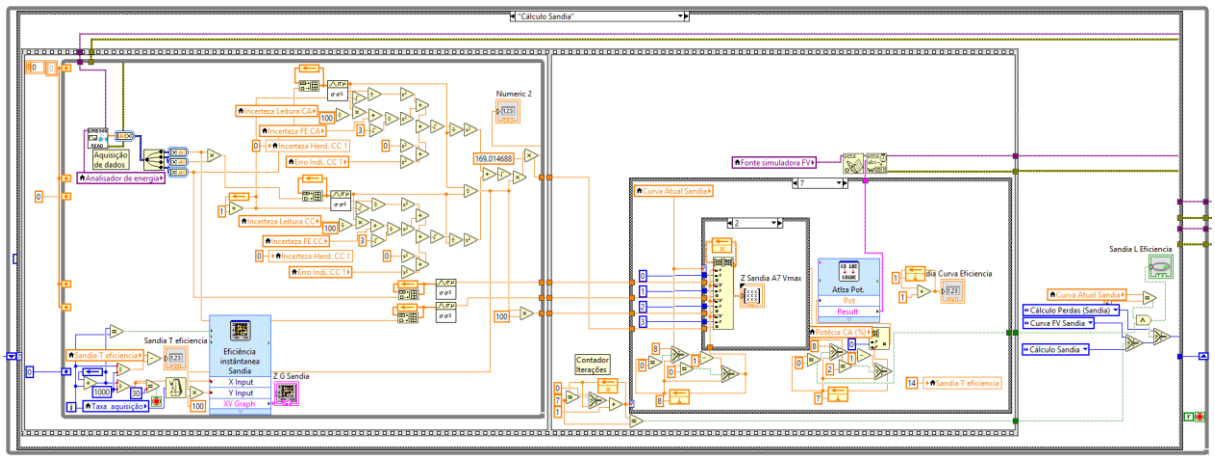


Fonte: Próprio autor

Sexto estado

No sexto estado, apresentado na Figura 51, é calculada a eficiência CEC, a partir das medidas da eficiência nas 24 diferentes curvas de tensão de entrada e potência, requeridas pela norma. Nesse estado as potências c.c. e c.a. são medidas e a eficiência, bem como as respectivas incertezas, são calculadas a partir desses valores. O sistema realiza a aquisição de dados com taxa de amostragem de 20 Hz, realiza uma média a cada 30 segundos e registra 7 médias para cada curva, conforme solicitado pela norma. A cada transição de curva o sistema retorna para o segundo estado e reinicia a configuração dos equipamentos, realizando os estados dois, três e quatro novamente.

Figura 51 - Sexto estado, cálculo da eficiência CEC

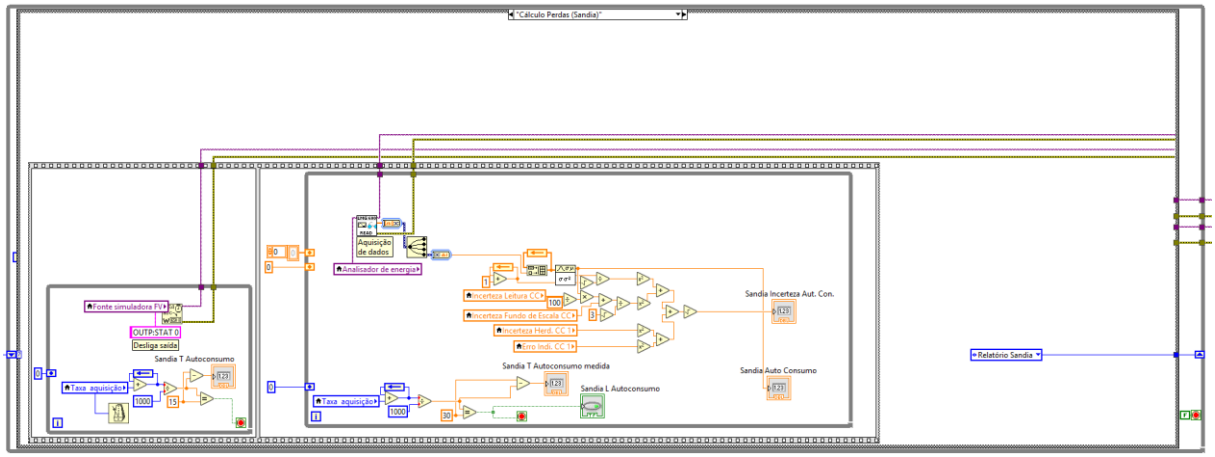


Fonte: Próprio autor

Sétimo estado

Após o cálculo da eficiência CEC, o sistema passa para o sétimo estado, onde realiza a medida do autoconsumo noturno, apresentado na Figura 52. Nesse estado a fonte simuladora fotovoltaica é desativada, reduzindo-se a tensão c.c. para 0 V, a tensão da fonte simuladora de rede c.a. é mantida no valor nominal e, após 30 segundos de estabilização do sistema, é registrado o valor consumido da rede c.a. pelo inversor. Assim como para todas as medidas, calcula-se em tempo real a incerteza total.

Figura 52 - Sétimo estado, Cálculo do autoconsumo noturno

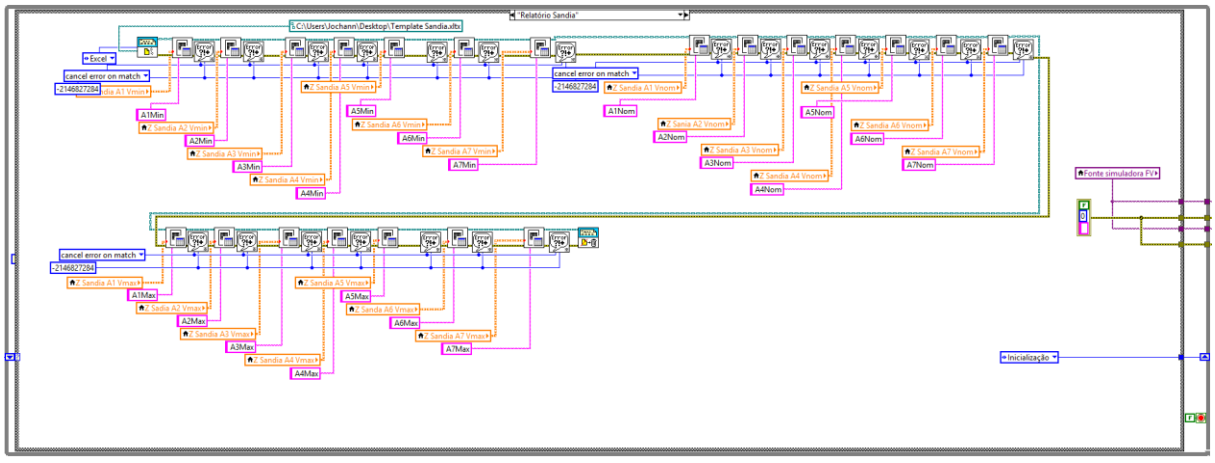


Fonte: Próprio autor

Oitavo estado

Por fim, após todas as medidas realizadas, no oitavo estado o relatório de ensaios é gerado, utilizando o código apresentado na Figura 53, a partir de um modelo desenvolvido no software Excel®. Os dados também são mostrados na tela principal do programa para visualização do operador. Após a geração do relatório, o sistema retorna ao primeiro estado, mantendo os dados registrados na tela até o programa ser encerrado ou um novo ensaio do mesmo protocolo ser iniciado.

Figura 53 - Oitavo estado, emissão do relatório



Fonte: Próprio autor

REFERÊNCIAS

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE (ANSI). **ISO, CEN and the Vienna Agreement**. [s.l: s.n.].

ANDREJAŠIČ, T.; JANKOVEC, M.; TOPIČ, M. Comparison of direct maximum power point tracking algorithms using EN 50530 dynamic test procedure. **IET Renewable Power Generation**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 281, 2011. Disponível em: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-rpg.2010.0175>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT - Conheça a ABNT**. 2018. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/abnt/conheca-a-abnt>. Acesso em: 14 set. 2018.

BELKAID, A.; COLAK, I.; ISIK, O. Photovoltaic maximum power point tracking under fast varying of solar radiation. **Applied Energy**, [s. l.], v. 179, p. 523–530, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.034>

BELKAID, A.; GAUBERT, J.-P.; GHERBI, A. Design and implementation of a high-performance technique for tracking PV peak power. **IET Renewable Power Generation**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 92–99, 2017. Disponível em: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-rpg.2016.0023>

BOWER, W. et al. Performance test protocol for evaluating inverters used in grid-connected photovoltaic systems. [s. l.], p. 41, 2004. Disponível em: <http://www.gosolarcalifornia.org/equipment/documents/2004-11-22_Test_Protocol.pdf>

BROOKS, B.; WHITAKER, C. Guideline for the use of the Performance Test Protocol for Evaluating Inverters Used in Grid-Connected Photovoltaic Systems. **Sandia**, [s. l.], 2005. Disponível em: <http://www.gosolarcalifornia.ca.gov/equipment/documents/Sandia_Guideline_2005.pdf%0Ahttps://web.archive.org/web/20161222171512/http://www.gosolarcalifornia.ca.gov/equipment/documents/Sandia_Guideline_2005.pdf%0Ahttps://web.archive.org/web/20161222171552/h>

CACCIATO, M.; CONSOLI, A.; CRISAFULLI, V. A high voltage gain DC/DC converter for energy harvesting in single module photovoltaic applications. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, [s. l.], p. 550–555, 2010.

CALIFORNIA ENERGY COMISSION. **Inverters**. 2018. Disponível em: <http://www.gosolarcalifornia.ca.gov/equipment/inverters.php>. Acesso em: 6 maio. 2018.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. Emerging Renewable Resources Account. [s. l.], 1998.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. **California Energy Commission's Quarterly Report Regarding the Renewables Funding Program (October 1 - December 31, 1998)**. Sacramento CA. Disponível em: <http://www.energy.ca.gov/renewables/documents/reports_to_legislature/1998_4th_quarter_report.html>.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. EMERGING RENEWABLES PROGRAM SECOND EDITION. [s. l.], n. December, 2003.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. EMERGING RENEWABLES PROGRAM FOURTH EDITION. [s. l.], n. June, 2005.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. **History of California's Renewable Energy Programs**. 2018a. Disponível em: <http://www.energy.ca.gov/renewables/history.html>. Acesso em: 16 abr. 2018.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. **Inverters**. 2018b. Disponível em: <http://www.gosolarcalifornia.ca.gov/equipment/inverters.php>. Acesso em: 21 abr. 2018.

CEN/CENELEC. Work Programme 2017. [s. l.], 2017. Disponível em: <http://www.cencenelec.eu/News/Publications/Publications/cen-cenelec-wp2017_en.pdf>

CHAPIN, D. M.; FULLER, C. S.; PEARSON, G. L. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power. **Journal of Applied Physics**, [s. l.], v. 25, n. 5, p. 676–677, 1954.

CHEN, B. et al. Design and optimization of 99% CEC efficiency soft-switching photovoltaic inverter. **Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC**, [s. l.], p. 946–951, 2013.

CLINTON, J.; GELLER, H.; HIRST, E. Review of government and utility energy conservation programs. **Annual Review of Energy**, [s. l.], v. 11, p. 95–142, 1986.

COMMUNICATION DEPARTMENT OF THE EUROPEAN COMMISSION. **The History of the European Union**. 2018. Disponível em: <https://europa.eu/european-union/about-eu/history_en>. Acesso em: 17 abr. 2018.

DIXON, R. K. et al. US energy conservation and efficiency policies: Challenges and opportunities. **Energy Policy**, [s. l.], v. 38, n. 11, p. 6398–6408, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.01.038>

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). ENERGY STAR Market and Industry Scoping Report Solar Inverters. [s. l.], p. 1–9, 2013.

EU INTERNAL MARKET INDUSTRY ENTREPRENEURSHIP & SMES. **Key Players in European Standardisation**. 2018. Disponível em: <https://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/key-players_en>. Acesso em: 12 abr. 2018.

EUROPEAN COMMISSION FOR ENERGY. **Energy Efficiency Directive**. 2018. Disponível em: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-directive>. Acesso em: 17 abr. 2018.

EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION (CENELEC). EN 50530:2010+A1:2013 Overall efficiency of grid connected photovoltaic inverters. [s. l.], 2013.

FIGUEIRA, H. H. **Sistema automatizado para ensaio de inversores fotovoltaicos conectados à rede em acordo com a normatização brasileira**. 2016. Universidade Federal de Santa Maria, [s. l.], 2016.

GELLER, H. et al. Polices for increasing energy efficiency: Thirty years of experience in OECD countries. **Energy Policy**, [s. l.], v. 34, n. 5, p. 556–573, 2006.

GU, B. et al. High reliability and efficiency single-phase transformerless inverter for grid-connected photovoltaic systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, [s. l.], v. 28, n. 5, p. 2235–2245, 2013.

HARMON, C. Experience Curves of Photovoltaic Technology. **Interim Report**, [s. l.], 2000. Disponível em: <http://webarchive.iiasa.ac.at/Admin/PUB/Documents/IR-00-014.pdf>

INMETRO. **Inmetro - Consulta ao Catálogo da RBLE**. 2018. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rble/detalhe_laboratorio.asp?nom_apelido=UFSM%2FINRI>. Acesso em: 10 maio. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria N.º 357. . 2014, p. 10.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). IEC 61683:1999 Photovoltaic Systems - Power conditioners - Procedure for measuring efficiency. [s. l.], p. 26, 1999.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). **Project: IEC 61683 ED2**. 2018. Disponível em: <http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:38:16200800931375::::FSP_ORG_ID,FSP_APEX_PAGE,FSP_PROJECT_ID:1276,23,23410>. Acesso em: 11 abr. 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Snapshot of global photovoltaic marketsPhotovoltaic power systems programme (PVPS)**. [s.l: s.n.].

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **We're ISO: we develop and publish International Standards**. 2018a. Disponível em: <https://www.iso.org/standards.html>. Acesso em: 17 abr. 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **About Us**. 2018b. Disponível em: <https://www.iso.org/about-us.html>. Acesso em: 6 maio. 2018.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable Power Generation Costs in 2017**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf%0Ahttp://www.springerreference.com/index/doi/10.1007/SpringerReference_7300>

ISHAQUE, K.; SALAM, Z.; LAUSS, G. The performance of perturb and observe and incremental conductance maximum power point tracking method under dynamic weather conditions. **Applied Energy**, [s. l.], v. 119, p. 228–236, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.054>

JCGM. Avaliação de dados de medição — Guia para a expressão de incerteza de medição. **Inmetro**, [s. l.], v. 1, p. 126, 2008.

KRAUTER, S.; BENDFELD, J. Cost, Performance, and Yield Comparison of eight different Micro-Inverters.pdf. **42nd iEEE PVSC, New Orleans**, [s. l.], 2015.

LEFEVRE, G. et al. A cost-controlled, 4.3kW/l 1-Φ Inverter with a 97.2% CEC efficiency. **CIPS 2016; 9th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, Nuremberg, Germany**, [s. l.], p. 1–8, 2016. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7736782/>

LI, X.; WEN, H.; HU, Y. Evaluation of different maximum power point tracking (MPPT) techniques based on practical meteorological data. **2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)**, [s. l.], p. 696–701, 2016. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7884423/>

LOUKRIZ, A.; HADDADI, M.; MESSALTI, S. Simulation and experimental design of a new advanced variable step size Incremental Conductance MPPT algorithm for PV systems. **ISA Transactions**, [s. l.], v. 62, p. 30–38, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2015.08.006>

NADEL, S. APPLIANCE AND EQUIPMENT EFFICIENCY STANDARDS. **Annual Review of Energy and the Environment**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 159–192, 2002. Disponível em: <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.energy.27.122001.083452>

NATIONAL MUSEUM OF AMERICAN HISTORY. **Energy Crisis**. 2018. Disponível em: <http://americanhistory.si.edu/american-enterprise-exhibition/consumer-era/energy-crisis>. Acesso em: 11 abr. 2018.

NETO, A. F. de C. P. **Qualificação e etiquetagem de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2012. Universidade de São Paulo, [s. l.], 2012.

NEWMILLER, J.; BLODGETT, D.; GONZALEZ, S. Performance test protocol for evaluating inverters used in grid-connected photovoltaic systems. [s. l.], p. 23, 2015.

OECD. **Real GDP forecast (indicator)**. 2018. Disponível em: <https://data.oecd.org/gdp/real-gdp-forecast.htm>. Acesso em: 16 abr. 2018.

PRIEB, C. W. M. **Determinação da Eficiência de Seguimento de Máxima Potência de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede de Distribuição**. 2012. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2012.

THE BALANCE. **OPEC Oil Embargo, Its Causes, and the Effects of the Crisis**. 2018. Disponível em: <https://www.thebalance.com/opec-oil-embargo-causes-and-effects-of-the-crisis-3305806>. Acesso em: 13 abr. 2018.

THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL. REGULATION (EU) No 1025/2012. [s. l.], n. 1025, p. 12–33, 2012.

TRUBITSYN, A. et al. High-efficiency inverter for photovoltaic applications. **2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2010 - Proceedings**, [s. l.], n. 1, p. 2803–2810, 2010.

UNITED STATES CONGRESS. Energy Policy and Conservation Act. [s. l.], p. 1023–1024, 1975.

WAIDE, P.; LEBOT, B.; HINNELLS, M. Appliance energy standards in Europe. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 45–67, 1997.