

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Especialização em Fontes Renováveis:
Geração, Operação e Integração

Ramon Albino de Oliveira

**ESTUDOS E MEDIÇÕES DA EFICIÊNCIA DE INVERSORES DE PEQUENO E
MÉDIO PORTE PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Belo Horizonte
2019

Ramon Albino de Oliveira

**ESTUDOS E MEDIÇÕES DA EFICIÊNCIA DE INVERSORES DE PEQUENO E
MÉDIO PORTE PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Versão final

Monografia submetida à Banca Examinadora designada pela Comissão Coordenadora da Especialização em Fontes Renováveis, como requisito parcial à obtenção do certificado de Especialista em Fontes Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Ribeiro de Oliveira

Belo Horizonte
2019

O48e	<p>Oliveira, Ramon Albino de. Estudos e medições da eficiência de inversores de pequeno e médio porte para aplicação em sistemas fotovoltaicos [recurso eletrônico] / Ramon Albino de Oliveira. – 2019. 1 recurso online (63 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Thiago Ribeiro de Oliveira.</p> <p>“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Fontes renováveis: geração, operação e integração da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.”</p> <p>Bibliografia: f. 62-63. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia elétrica. 2. Geração de energia fotovoltaica. 3. Inversores elétricos. I. Oliveira, Thiago Ribeiro de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3</p>
------	---



ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO RAMON ALBINO DE OLIVEIRA

Realizou-se, no dia 04 de dezembro de 2019, às 15:00 horas, Sala 4409, Bloco 1, Escola de Engenharia, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de monografia, intitulada *Estudos e Medições da eficiência de inversores de pequeno e médio porte para aplicação em sistemas fotovoltaicos*, apresentada por RAMON ALBINO DE OLIVEIRA, número de registro 2018707919, graduado no curso de ENGENHARIA ELÉTRICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em FONTES RENOVÁVEIS - GERAÇÃO, OPERAÇÃO E INTEGRAÇÃO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Thiago Ribeiro de Oliveira - Orientador (UFMG), Prof(a). Thales Alexandre Carvalho Maia (UFMG).

A Comissão considerou a monografia:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 04 de dezembro de 2019.

Prof(a). Thiago Ribeiro de Oliveira (Doutor)

Prof(a). Thales Alexandre Carvalho Maia (Doutor)

AGRADECIMENTOS

A Deus pelos dons concedidos.

Aos meus pais, Geraldo e Marly, pelo amor, confiança e dedicação de uma vida no estabelecimento de uma estrutura familiar harmoniosa.

Aos meus irmãos, Rômulo e Renato, pela amizade e apoio.

À Juliane pelo amor e carinho. Suas dicas foram valiosas.

Ao colega e amigo Henrique, pelo apoio e companheirismo durante o curso.

Ao professor Thiago, por aceitar o desafio de me orientar neste trabalho.

À equipe do Laboratório TESLA Engenharia de Potência da Universidade Federal de Minas Gerais pela disponibilização da usina experimental fotovoltaica para realização das coletas de dados.

RESUMO

O crescente número das fontes energéticas renováveis e suas conexões ao Sistema Interligado Nacional – SIN – trouxe, nos últimos anos, o aumento do uso de conversores de potência instalados no sistema elétrico brasileiro. Companhias de Engenharia têm sido requisitadas por grandes *players* do mercado de geração de energia eólica e fotovoltaica para a realização de trabalhos investigativos sobre a eficiência dos conversores de médio porte em equipamentos que já estão operando em campo. Neste trabalho, foram estudados os principais padrões internacionais que regem os ensaios para avaliação da eficiência de conversão aplicados em diferentes países, com o intuito de se definir uma metodologia de medição de eficiência de inversores já instalados. Além disso, foi feita a verificação de um sistema real com inversor de pequeno porte. Foram realizadas medições em um inversor fotovoltaico de 12 kW instalado em uma central geradora comercial, sendo que os dados de potência de entrada e saída foram coletados por meio de equipamento de medição portátil dedicado à medição de eficiência e por meio de sistema de monitoramento SCADA disponível na planta. Os dados obtidos foram processados e comparados entre os sistemas de medição e os dados fornecidos pelo fabricante em sua folha de dados. Os resultados obtidos a princípio corroboram os dados fornecidos pelos fabricantes, contudo, observou-se que pequenos erros na medição das variáveis de entrada/saída do conversor podem provocar grandes alterações na estimativa de eficiência, justificando um estudo mais profundo desses sistemas.

Palavras-chave: Inversores Fotovoltaicos. Eficiência de conversão. IEC 61683. CEC. EN 50530.

ABSTRACT

The recent increasing number of renewable energy sources connected to the national electrical system have increased the number of installed power converters in the country. Photovoltaic and wind power generation companies have been consulting Engineering firms in order to verify the efficiency of converters installed on field which have already started their operation. In this study were analyzed the main international standards that provide the procedures for measuring conversion efficiency in many different countries. Also, a real system with a small converter has been verified. There has been collected data from a 12 kW inverter in a commercial central power generation, being the power input and output metered by a portable power meter dedicated to efficiency analysis and by the monitoring SCADA system available in the plant. The obtained data were processed and compared between the measurement systems and the data provided by the manufacturers in equipment catalog. The result achieved were compliant with the manufacturer data. However, it has been observed that small deviation on the input and output converter variables may introduce significantly changes in the efficiency calculation, justifying a deeper study of these systems.

Keywords: Photovoltaic Inverters. Conversion Efficiency. IEC 61683. EN 50530. CEC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução do número de unidades geradoras instaladas.....	12
Figura 2 - Esquema de ligação dos instrumentos para medição da eficiência de inversores fotovoltaicos.	24
Figura 3 - Esquema de ligação dos instrumentos para medição da eficiência de inversores fotovoltaicos segundo a EN 50530.....	33
Figura 4 - Esquema de ligação dos instrumentos para medição da eficiência de inversores fotovoltaicos monofásicos.	46
Figura 5 - Esquema de ligação dos instrumentos para medição da eficiência de inversores fotovoltaicos trifásicos.....	46
Figura 6 – Fotos dos sensores e instrumentos instalados para amostragem dos dados do inversor SMA.	48
Figura 7 – Gráfico do valor eficaz médio da tensão na saída do inversor monitorado pelo equipamento Metrel.	51
Figura 8 – Gráfico do valor eficaz médio da corrente na saída do inversor monitorado.	52
Figura 9 – Gráfico do valor eficaz médio da potência na saída do inversor monitorado.....	53
Figura 10 – Gráfico da tensão contínua média na entrada do inversor monitorado.....	53
Figura 11 – Gráfico da corrente contínua média na entrada do inversor monitorado.	55
Figura 12 – Gráfico da potência na saída do inversor monitorado (SCADA x Metrel).....	56
Figura 13 – Gráfico da eficiência de conversão calculada com medições mistas (SCADA/Metrel).	57
Figura 14 – Comparação entre as Curvas de Eficiência x Carregamento fornecida pelo fabricante do inversor e os valores medidos.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos Mínimos de incertezas dos equipamentos a serem utilizados para medições de eficiência conforme a CEC.....	27
Tabela 2 - Tolerância para faixas de potência medidas.....	32
Tabela 3 - Fatores de ponderação para cálculo da eficiência energética ponderada de inversores fotovoltaicos.....	32
Tabela 4 - Comparativo entre os padrões da medição de eficiência de inversores fotovoltaicos.....	41
Tabela 5 - Dados da usina de geração à qual o inversor objeto do estudo faz parte.....	43
Tabela 6 - Dados do inversor selecionado para realização das medições.....	44
Tabela 7 – Informações técnicas do medidor aplicado no ensaio.....	45
Tabela 8 – Configurações dos parâmetros de conexão ajustados no instrumento previamente à realização das medições.....	48
Tabela 9 – Configurações ajustadas no medidor para registros dos dados.....	48
Tabela 10 – Dados de potência medidos na entrada e saída do inversor.....	57
Tabela 11 – Dados de potência medidos na entrada e saída do inversor.....	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS.....	15
3. HISTÓRICO E REFERÊNCIAS NORMATIVAS	16
3.1 IEC 61683.....	19
3.2 Eficiência CEC	26
3.3 EN 50530.....	33
4. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO ADOTADA.....	43
4.1 Características do sistema avaliado	43
4.2 Características do medidor utilizado	44
4.3 Esquemas e configurações aplicados.....	45
5. RESULTADOS	51
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
7. REFERÊNCIAS	62

1. INTRODUÇÃO

Questões econômicas, políticas e ambientais têm impulsionado a realização de diversos eventos nacionais e internacionais com o objetivo de se discutir e definir ações que visem a redução dos impactos ambientais e do esgotamento dos recursos naturais provocados pela geração de energia elétrica. Uma das possíveis formas de se reduzir esse problema é pela adaptação da matriz energética do país, especialmente com o estímulo ao uso de fontes de energia renováveis, tais como a energia hídrica, eólica, solar e biomassa em contraposição às fontes de energia não renováveis ou àquelas provindas de combustíveis fósseis ou combustíveis nucleares. Atualmente, aproximadamente 75% da eletricidade consumida no mundo tem como origem fontes não-renováveis de energia [EPE, 2018], em contraste, o Brasil possui uma matriz energética majoritariamente proveniente de fontes limpas ou renováveis, com destaque para a energia hidrelétrica, responsável por 65% da oferta de energia [EPE, 2018], mas isso não tem impedido que o país avance os trabalhos para a redução das taxas de emissão de gases poluentes e que intensifique a diversificação das fontes energéticas, uma vez que a alta dependência da fonte hidroelétrica induz problemas de segurança energética. Isso permite que a nação fique menos suscetível a ocorrências de racionamentos energéticos por escassez de recursos, mesmo em alguns casos, se tratando de fontes energéticas chamadas “não-despacháveis”, as quais normalmente possuem alta dependência de fatores não controláveis pelo ser humano, tais como fatores climáticos.

O despontamento da energia solar como uma das alternativas para se alcançar a redução de emissões de gases do efeito estufa e a busca por uma matriz energética mais limpa têm trazido impactos positivos tanto no desenvolvimento científico e tecnológico quanto em aspectos sociais. Do ponto de vista científico, isso tem impulsionado as universidades e centros de pesquisas a realizarem estudos a respeito das tecnologias utilizadas, dentre as quais se podem citar os módulos coletores fotovoltaicos, dispositivos de seguimento do sol (*solar tracking*), conversores de potência e conexão dessas fontes na rede elétrica, bem como os potenciais impactos ambientais e sociais trazidos pela inserção dessa matriz no contexto do Sistema Interligado Nacional (SIN). Do ponto de vista social, a crescente expansão da energia solar, especialmente no contexto da geração distribuída, tem proporcionado um aumento na empregabilidade do setor, o que é relevante diante de um cenário pós-recessão e com dificuldades de restabelecimento do crescimento presenciados no Brasil. Além disso, regiões

com baixo desenvolvimento econômico e social, como Norte e Nordeste do país, se tornaram alvos mais visados para a implantação de projetos de geração de energia solar por possuírem características climáticas favoráveis a esse tipo de empreendimento, levando assim, oportunidades de crescimento e desenvolvimento econômico e social àquelas regiões.

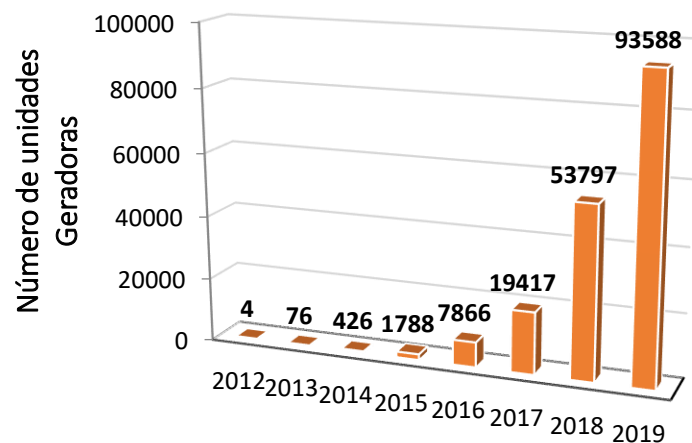
Segundo levantamento da Empresa de Pesquisa Energética, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, o Brasil tem um potencial técnico fotovoltaico relevante tanto para plantas de grande porte quanto para pequeno porte (geração distribuída). Além disso, o potencial técnico fotovoltaico para geração distribuída é mais de duas vezes superior ao consumo residencial. Segundo dados do Operador Nacional do Sistema elétrico brasileiro [ONS, 2019], a geração de energia a partir de usinas solares fotovoltaicas centrais foi de 36 MWmed em junho de 2017 a 488 MWmed em maio de 2019 e alcançou seu ápice em janeiro de 2019 quando chegou a 540 MWmed. Esses números mostram que os esforços para a inserção da geração de energia solar no Brasil estão só começando.

Embora o efeito fotovoltaico seja conhecido há mais de cem anos e a tecnologia de células solares tenha sido utilizada há pelo menos cinquenta, a aproximação do universo científico e do mercado acerca da geração de energia elétrica a partir da energia solar se acentuou nas últimas duas décadas [AAR, 2013]. Isso tem ocorrido graças, especialmente, à elaboração de políticas energéticas, tais como a adoção de compensação de energia gerada a partir de fontes renováveis (incluindo a energia solar), instaladas próximas às cargas consumidoras, o que configura a chamada geração distribuída. No Brasil, este cenário foi regulado pela Resolução Normativa 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e atualizado pela RN 687/2015, quando se instituiu a figura das mini e microgerações distribuídas, para sistemas de capacidade instalada de 75 kW a 3 MW e inferiores a 75 kW, respectivamente, além de estabelecer o sistema de crédito de energia, entre outras coisas. A partir desta regulamentação, o número de unidades geradoras tem crescido robustamente, conforme indica a Figura 1. O aumento dessa demanda trouxe consigo a necessidade do aumento da eficiência dos equipamentos, implicando na definição de métodos e técnicas de apuração do desempenho dos elementos e, em especial, dos conversores de energia.

Nesse contexto, se faz necessário entender que todos os elementos pertencentes aos conjuntos geradores de energia a partir de recursos solares, devem ser estudados e compreendidos,

especialmente aqueles que impactam a eficiência do processo de conversão de energia solar em energia elétrica. Como exemplos, citam-se a eficiência na captação da radiação solar e transformação em energia elétrica em corrente contínua por parte dos módulos fotovoltaicos e a eficiência na conversão de energia em corrente contínua para corrente alternada por parte dos conversores de potência, a qual pode alcançar índices de 99% de eficiência [AAR, 2013]. Nestes, graças a evoluções implementadas nos inversores solares, especialmente devido ao desenvolvimento dos sistemas fotovoltaicos modulares, melhorias nos algoritmos de seguimento de máxima potência (SMP), topologias multiníveis, chaveamentos suavizados, otimização dos filtros de saída, dentre outras tratativas, a eficiência desses equipamentos aumentou de 90% a até 99% em alguns casos [AAR, 2013].

Figura 1 - Evolução do número de unidades geradoras instaladas.



Adaptado de (ABGD, 2019)

Como boa parte das tecnologias utilizadas em sistemas de geração fotovoltaica no Brasil é importada, os equipamentos utilizados são testados em fábrica ou laboratório com acreditação para tal, segundo órgãos internacionais, garantindo, dentre outras características, que a eficiência do equipamento esteja dentro da faixa apresentada em sua folha de dados. Os critérios utilizados para esse tipo de medição são definidos por organismos de padronização internacionais, tais como IEC, EN ou ISO, sendo que, tradicionalmente, a eficiência de inversores é calculada em fatores ponderados, tais como o método europeu e o da Califórnia [IEC, 1999].

Uma vez que as condições de testes e operacionais normalmente são adversas às condições encontradas no Brasil, empresas de projetos, concessionárias de geração ou outros agentes têm solicitado a realização de medições em campo para constatação dos índices de eficiência dos equipamentos utilizados nos empreendimentos. Essa prática tem sido recorrente no país, especialmente no que diz respeito a medições de eficiência de inversores em geração centralizada, com inversores de porte maior, da ordem de 1 a 5 MW de potência nominal.

A tarefa de verificação da eficiência de inversores solares, porém, não é simples por envolver a comutação de dispositivos eletrônicos de potência. Como resultado do comportamento da modulação por largura de pulso dos inversores (*PWM-pulse width modulation*), os desafios aumentam devido ao amplo espectro de frequência da corrente e tensão [AAR, 2013]. Como principais formas de realizar essa análise, citam-se dois métodos: 1) utilização do método convencional de medição das potências na entrada (c.c.) e saída do inversor (c.a.); 2) utilização do método calorimétrico.

No primeiro método, são utilizados equipamentos eletrônicos de medição capazes de coletar as amostras de corrente e tensão na entrada e saída do inversor e digitalizar esses dados de forma que o próprio instrumento possa calcular as grandezas derivadas de tais medições (e.g. potência total de entrada no circuito c.c., valor eficaz da potência ativa total de saída monofásica ou trifásica no circuito c.a., etc.) pelas quais se pode calcular também as perdas e, conseqüentemente, a eficiência do equipamento. Na maior parte dos casos, além das incertezas inerentes ao próprio dispositivo de medição, esse método receberá um acréscimo de incerteza causado pela inserção de transdutores de corrente ou potencial necessários para abaixar os níveis de tensão e/ou corrente para níveis compatíveis com os de entrada dos equipamentos de medição disponíveis no mercado.

Já no método calorimétrico, as perdas são medidas diretamente pelo calor gerado, através de análises de processos termodinâmicos e a incerteza da medição é independente da eficiência. Além disso, esse método é completamente independente das formas de onda de tensões, correntes e suas defasagens e permite o cálculo da eficiência com precisão similar para dispositivos com diferentes métodos de modulação e frequências de chaveamento. No entanto, baseado nos objetivos desse trabalho, a metodologia de estudo será embasada apenas

no método de análise baseada nas medições dos parâmetros elétricos, uma vez que o método calorimétrico não seria aplicável para medições *in loco*.

2. OBJETIVOS

A avaliação e o conhecimento da eficiência de conversão dos elementos de um sistema de geração fotovoltaica são de fundamental importância tanto para a inserção dos equipamentos no mercado nacional quanto para avaliação, comparação e escolha desses equipamentos por partes dos consumidores.

O objetivo desse trabalho é estudar como são feitos os ensaios de eficiência normatizados de inversores utilizados em sistemas fotovoltaicos e como esse tipo de estudo/medição pode ser realizado em campo, em usinas que já estão em operação. A partir desse entendimento, pode-se determinar as especificações mínimas de equipamentos para a realização desse tipo de estudo, com possibilidade de coleta e análise de dados reais de inversores de pequeno ou médio porte e comparação com os dados de catálogo fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos. Além disso, podem ser analisadas as variáveis que impactam na eficiência dos inversores, tais como temperatura, umidade relativa, nível de radiação solar, dentre outros.

3. HISTÓRICO E REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Segundo a ABNT, a definição internacional de norma diz que é um “documento estabelecido por consenso e aprovado por um organismo reconhecido, que fornece, para uso comum e repetitivo, regras, diretrizes ou características para atividades ou seus resultados, visando à obtenção de um grau ótimo de ordenação em um dado contexto”.

Os principais órgãos desenvolvedores de normas técnicas 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, membro fundador da ISO e membro da IEC [ABNT, 2019].
- ISO – *International Organization for Standardization*, é um órgão independente e não governamental, fundado em 1947 por delegações de 25 países, e conta com 164 países membros e 780 comitês e subcomitês técnicos. Cria documentos que proveem requisitos, especificações, guias de instrução ou características que podem ser usados para garantir que materiais, produtos, processos e serviços estão adequados para seus propósitos [ISO, 2019].
- IEC - *International Electrotechnical Commission*, fundada em 1906, é uma organização sem fins lucrativos e importante órgão no desenvolvimento de normas internacionais para o setor eletroeletrônico. Os membros da IEC são os comitês nacionais, formados por especialistas e delegações vindas da indústria, órgãos governamentais, associações e academia para participar dos grupos de trabalho técnicos e de conformidade da IEC [IEC, 2019].
- CEN – *European Committee for Standardisation*, é uma associação responsável por reunir os órgãos normativos nacionais de 34 países Europeus. É um dos três órgãos de padronizações europeias (juntamente com CENELEC e ETSI) que são reconhecidas pela União Europeia e pela Associação Europeia do Livre Comércio (EFTA) como sendo responsável pelo desenvolvimento e definição voluntários de padrões em nível europeu [CEN, 2019].
- CENELEC – *European Committee for Electrotechnical Standardization*, é responsável

pela normatização do setor eletrotécnico da União Europeia. Possui estreita relação com o CEN, além de acordos cooperativos com a IEC e ISO [CENELEC, 2019].

- 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 [ETSI, 2019].

A acentuação do interesse governamental no desenvolvimento de políticas de eficiência energética, tanto do ponto de vista do consumo, quanto da geração de energia, se deu especialmente com a crise do petróleo de 1973, que pode ser considerado um divisor de águas. Naquela época, a matriz energética norte americana, pautada essencialmente no uso de combustíveis fósseis, sofreu forte impacto com as sanções aplicadas aos Estados Unidos por países árabes, com a interrupção da exportação de petróleo, que desencadeou graves consequências econômicas nos Estados Unidos e no restante do mundo. A partir de então, vários países começaram a desenvolver políticas de eficiência energética baseadas nos seguintes pilares [JOC, 2018]:

- Pesquisa de novas fontes de energia com o intuito de reduzir a dependência do petróleo;
- Aumento da eficiência nos processos de geração e transmissão de energia para melhorar o aproveitamento da conversão;
- Aumento da eficiência do consumo, com a fabricação de equipamentos domésticos ou industriais que consumam menos energia e entreguem o mesmo resultado.

Essas políticas culminaram na adoção, em 1974, do *Warren-Alquist Act* no estado da Califórnia, que estabeleceu a Comissão de Energia da Califórnia – CEC - como autoridade para definição de normas de eficiência no estado. Desde então, várias ações locais e globais ao redor do mundo foram definidas em âmbitos nacionais e internacionais com a finalidade de alavancar o tema “Eficiência Energética”. Essas peculiaridades e ações detalhadas, no entanto, fogem ao escopo deste estudo.

O primeiro organismo internacional de padronização a abordar a eficiência de inversores fotovoltaicos foi a IEC pelo lançamento da primeira revisão da IEC 61683:1999 – *Photovoltaic systems – Power Conditioners – Procedure for measuring efficiency*, que trata

tanto inversores conectados à rede (*on-grid* ou *grid tie*) quanto inversores desconectados da rede ou conectados direto à carga de forma isolada (*off-grid*).

No ano de 1998, a CEC definiu a elaboração de métricas de avaliação de desempenho de sistemas fotovoltaicos como parte de um plano de investimentos e incentivos iniciados no ano de 1996. Sem determinar limites inferiores de eficiência permitidos pelo órgão, para participação no programa, eram definidos apenas que os valores de eficiência medidos fossem apresentados e registrados pela CEC como parte do processo de homologação dos equipamentos. Além disso, apenas a eficiência de pico dos inversores era avaliada. Em 2005 a CEC alterou o método de avaliação da eficiência de inversores, adotando o *Performance Test Protocol for Evaluating Inverters Used in Grid-Connected Photovoltaic Systems*, desenvolvido pela *Sandia National Laboratories*, *Endecon Engineering*, *BEW Engineering* e *Institute for Sustainable Technology*. Nesse método, similarmente ao método descrito na IEC 61683, são avaliados 21 pontos de medição distintos, divididos em 3 níveis de tensão e 7 pontos de potência de saída. Porém, nesse caso, a cada ponto avaliado, é aplicado um fator de ponderação, originando a que é conhecida como eficiência CEC de inversores [JOC, 2018].

Como consequência do grande número de políticas de eficiência energética desenvolvidas nos países da União Europeia nos anos 2000, em 2010 a CENELEC lança a norma europeia EN 50530:2010 – *Overall Efficiency of grid connected photovoltaic inverters*, com o intuito principal de medir a eficiência dos inversores aplicados em sistemas fotovoltaicos na Europa. Da mesma forma que a eficiência CEC, na EN 50530 são recomendadas verificações em 21 pontos de análise. Nesse caso, os fatores de ponderação aplicados diferem em relação à CEC devido às características de baixas irradiâncias incidentes na Europa. Além disso, a EN 50530 orienta a avaliação das eficiências estática e dinâmica do ponto de seguimento de máxima potência (SPMP) enquanto a CEC orienta a avaliação da eficiência global de conversão.

Outro aspecto importante no cenário das padronizações foi o reconhecimento, em 2012, da CEN, CENELEC e ETSI como órgãos responsáveis pela elaboração das normas europeias (EN), as quais possuem alcance e aplicação em todos os países membros da União Europeia. Em 2013, a EN 50530 foi atualizada para EN 50530:2010+A1:2013, passando a ser a referência para medição de eficiência de inversores na União Europeia e a única norma a

definir metodologia para medição dinâmica do ponto de seguimento de máxima potência de inversores fotovoltaicos [JOC, 2018].

De maneira geral, a eficiência de inversores pode ser afetada por diferentes fatores, sendo eles [IEC, 1999]:

- Nível de potência;
- Tensão de entrada;
- Tensão de saída;
- Fator de potência;
- Conteúdo harmônico;
- Não-linearidade da carga;
- Temperatura.

Logo, para a devida validação da eficiência de inversores fotovoltaicos, cada um desses requisitos deve ser levado em consideração. Nas seções a seguir, são apresentadas breves descrições dos três principais padrões internacionais referentes a métodos de medição da eficiência de inversores fotovoltaicos, abordando as principais particularidades e diferenças entre eles.

3.1 IEC 61683

A primeira versão desse padrão foi lançada em 1999 e determinou os requisitos mínimos de medição da eficiência de conversores aplicados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede ou isolados, podendo ter em sua saída tensões estabilizadas em corrente alternada e frequência constante ou tensões contínuas estabilizadas [IEC, 1999]. Caso esta norma seja aplicada, alguns pré-requisitos de ensaios devem ser considerados e controlados, sendo eles:

- **Fonte de alimentação em corrente contínua**

Em casos de inversores com tensão de entrada fixa, deve ser utilizada uma fonte de tensão contínua ou uma bateria. Para equipamentos que possuam algoritmo de seguimento de máxima potência, deve ser utilizado um simulador de arranjo fotovoltaico ou um sistema

fotovoltaico real.

- **Temperatura**

As medições devem ser realizadas com o equipamento sob ensaio em temperatura ambiente de $25^{\circ} \text{C} \pm 2^{\circ} \text{C}$. Valores diferentes podem ser utilizados, mas nesses casos os valores medidos devem ser acompanhados de todos os registros de temperatura medidos.

- **Tensão e frequência de saída**

O valor da tensão e a frequência de saídas devem ser mantidos nos valores nominais indicados pelos fabricantes.

- **Tensão de entrada**

As medições realizadas, conforme esse padrão, devem ser repetidas para três níveis de tensão de entrada do inversor:

- Tensão de entrada mínima permitido pelo fabricante;
- Tensão nominal de entrada ou o valor médio do range de entrada;
- 90% da tensão de entrada máxima permitida pelo fabricante.

Em casos que o condicionador for conectado com bateria em seus terminais de entrada, somente o valor nominal é indicado.

- **Distorção harmônica e/ou fator *ripple***

Os valores de tensão de entrada e ondulação da tensão devem ser registrados para cada medição. Os valores de distorção harmônica, se corrente alternada na saída, ou ondulação, se corrente contínua na saída, também devem ser registrados, mesmo que em alguns casos não são estipulados limites de distorção harmônica e ondulação para inversores de baixo nível de potência.

- **Cargas resistivas ou sistema elétrico**

Em fator de potência unitário ou no fator de potência intrínseco do inversor conectado à rede sem ajuste de fator de potência, a eficiência deve ser medida e registrada nos níveis de potência de 10%, 25%, 50%, 75%, 100% e 120% em relação à nominal. Inversores *stand-alone* ou conectados diretamente à carga, também devem ter suas eficiências medidas e registradas em níveis de potência de 5%.

- **Cargas reativas**

Para inversores *off-grid*, a eficiência deve ser medida e registrada com uma carga que ofereça um fator de potência igual ao maior valor entre o mínimo especificado pelo fabricante do equipamento e 0,25 a níveis de potência de 25%, 50% e 100% da potência aparente nominal do inversor.

- **Cargas não-lineares**

Para inversores *off-grid*, a eficiência deve ser medida e registrada com uma carga não linear fixa igual a $25\% \pm 5\%$ da potência aparente nominal mais uma carga resistiva em paralelo suficiente para alcançar uma carga equivalente total de 25%, 50% e 100% da potência aparente nominal, com distorção harmônica total igual a $80\% \pm 5\%$. As medições devem ser repetidas para carga não linear fixa igual a $25\% \pm 5\%$ da potência aparente nominal mais uma carga resistiva em paralelo suficiente para alcançar uma carga equivalente total de 25%, 50% e 100% da potência aparente nominal.

- **Cargas complexas**

Quando uma condição de carga não linear mais uma carga reativa suficiente for especificada para inversores *off-grid*, a medição de eficiência deve ser realizada para uma condição fixa de carga não linear igual a $50\% \pm 5\%$ da potência aparente nominal do inversor mais uma carga reativa em paralelo ($FP = 0,5$) suficiente para alcançar uma carga total de 50% e 100% da potência aparente nominal, com DHT de $80\% \pm 5\%$.

A IEC 61683 define a medição da eficiência segundo diferentes critérios, conforme listados a seguir:

- **Eficiência Nominal de Saída**

A eficiência nominal de saída deve ser calculada com os dados medidos aplicados à seguinte equação:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100\% \quad (1)$$

Onde:

η é a eficiência nominal de saída (%);

P_o é a potência de saída nominal (kW);

P_i é a potência de entrada medida a potência de saída nominal (kW).

Nota: Qualquer serviço auxiliar do inversor deve ter sua potência somada à potência de entrada P_i .

- **Eficiência Parcial de Saída**

A eficiência parcial de saída deve ser calculada com os dados medidos aplicados à seguinte expressão:

$$\eta_{par} = \frac{P_{op}}{P_{ip}} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

η_{par} é a eficiência parcial de saída (%);

P_{op} é a potência de saída parcial (kW);

P_{ip} é a potência de entrada medida a potência de saída parcial (kW).

Notas:

1 - Assim como no cálculo da eficiência nominal, qualquer serviço auxiliar do inversor deve ter sua potência somada à potência de entrada P_{ip} .

2 – A eficiência parcial de saída é aquela medida quando o inversor está operando com potência de saída parcial, ou seja, com potência de valor inferior ao nominal.

- **Eficiência Energética**

A eficiência energética deve ser calculada com os dados medidos aplicados à seguinte expressão:

$$\eta E = \frac{W_o}{W_i} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

ηE é a eficiência energética (%);

W_o é a energia medida na saída durante um determinado período (kWh);

W_i é a energia medida na entrada durante um determinado período (kWh).

Notas:

- 1 - O período e o perfil de carga aplicados devem ser acordados entre o fabricante e o usuário.
- 2 - Assim como no cálculo das eficiências nominal e parcial, qualquer serviço auxiliar do inversor deve ter sua potência somada à parcela de energia na entrada W_i .
- 3 - O anexo C da norma determina o método de cálculo da eficiência ponderada η_{WT} que pode agregar melhoria no cálculo da eficiência energética.

- **Tolerância de Eficiência**

Quando um valor de eficiência é garantido, a norma determina que a margem de tolerância dessa eficiência deve ser um valor dentro dos limites calculados conforme a seguir:

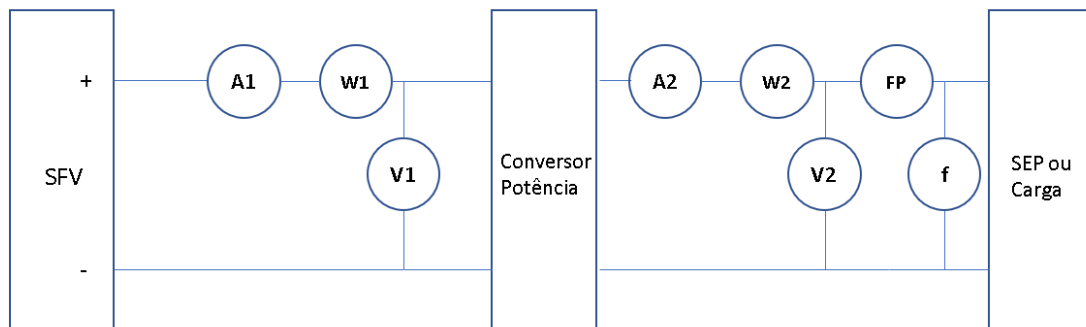
$$-0,2 \times (1 - \eta) \times \eta \quad (\%) \quad (4)$$

Onde: η é a eficiência a ser garantida.

- **Procedimentos de Medição**

A ligação dos instrumentos de medição deve ser realizada conforme padrão de conexão ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema de ligação dos instrumentos para medição da eficiência de inversores fotovoltaicos.



Os procedimentos para realização da medição da eficiência do conversor são apresentados a seguir:

- A eficiência do inversor pode ser determinada de acordo com as equações da eficiência nominal de saída ou eficiência parcial de saída, conforme apresentadas acima. A potência de entrada pode ser medida pelo uso do *wattímetro* *W1* instalado ou pela multiplicação da tensão medida da tensão *V1* pela medida da corrente *A1*, conforme ilustrado na Figura 2. A potência de saída é medida pelo *wattímetro* *W2*.
- A tensão de entrada, que é medida pelo voltímetro *V1*, deve ser variada no range definido para o qual a corrente de saída, que é medida pelo voltímetro *V2*, é variada do valor mínimo até o valor nominal.
- Instrumentos com indicador de valor médio devem ser utilizados para medições das tensões e correntes em corrente contínua. Instrumentos com indicador de valores r.m.s verdadeiros devem ser utilizados para medições da tensão e corrente na saída do inversor. O *wattímetro* *W1* deve ser adequado para medição em corrente contínua. O *wattímetro* *W2* deve ser para corrente contínua ou alternada de acordo com o tipo de saída do inversor.
- O fator de potência na saída do inversor pode ser medido por um medidor de fator de potência ou calculado a partir dos valores de potência, tensão e corrente medidos naquele lado do circuito.

- e) Cada medidor pode ser do tipo analógico ou digital, devendo garantir classe de exatidão igual ou melhor a 0,5% do valor em escala cheia para cada medição. Instrumentos digitais são recomendados para os *wattímetros* 1 e 2.
- f) Um algoritmo seguidor de máxima potência ajusta a tensão de entrada de forma a maximizar a potência de saída. Em princípio, os instrumentos de monitoramento devem amostrar todos os parâmetros elétricos, tais como tensão e corrente, potência e corrente de saída, dentro do período de atualização do ponto de máxima potência. Se o SPMP e a entrada (arranjo fotovoltaico ou simulador de arranjo fotovoltaico) interagem de tal forma que a tensão de entrada varie menos que 5%, então a média das leituras é aceitável. Nesse caso, o período para cálculo da média das amostras deve ser igual ou superior a 30 segundos.

- **Medição de Perdas a Vazio**

Se o conversor for do tipo *stand-alone* (ou *off-grid*), as leituras da tensão contínua de entrada, tensão e frequência de saída são dadas pelos medidores de V1, V2 e f, respectivamente, que devem ser ajustados para seus valores nominais. As perdas a vazio são dadas pelo *wattímetro* W1 quando a carga é desconectada do inversor. Se o conversor for do tipo *Utility Interactive* (ou *on-grid*), as leituras da tensão contínua de entrada, tensão e frequência de saída são dadas pelos medidores de V1, V2 e f, respectivamente, que devem ser ajustados para valores específicos de tensão e frequência. As perdas a vazio são indicadas pelo *wattímetro* W1 quando o *wattímetro* W2 indicar medição igual a zero.

- **Medição de Perdas Em Espera**

Se o conversor de potência for do tipo *stand-alone* (ou *off-grid*), as perdas em espera são definidas como o consumo medido na entrada da fonte contínua pelo *wattímetro* W1 quando o inversor não está operando, mas se encontra em modo de espera. Se o conversor de potência for do tipo *Utility Interactive* (ou *on-grid*), as perdas em espera são definidas como o consumo de potência do sistema medido na saída do inversor pelo *wattímetro* W2 quando o inversor não está operando, mas se encontra em modo de espera.

3.2 Eficiência CEC

O protocolo de testes de eficiência em inversores, inicialmente proposto pela *Sandia National Laboratories, Endecon Engineering e Institute for Sustainable Technology*, ficou definido pela Comissão de Energia da Califórnia (CEC) a partir de 2005 como o padrão de testes a ser atendido para comercialização de inversores fotovoltaicos no estado da Califórnia. A versão final oficial do documento é chamada “*Guideline for the use of the Performance Test Protocol for Evaluating Inverters in Grid-Connected Photovoltaic Systems*” [JOC, 2018].

A base de referência do protocolo de testes desenvolvido pela *Sandia National Laboratories, Endecon Engineering e Institute for Sustainable Technology* foi a norma IEC 61683. Alguns dos pontos definidos nessa norma foram retirados por serem considerados desnecessários, tais como a determinação das tensões e correntes cc mínimas e máximas. Alguns testes ainda não concluídos constantes na primeira versão do protocolo também foram desconsiderados da versão final, tais como ensaios dos algoritmos de seguimento de máxima potência, que estão marcados como esboço no protocolo. Na versão de 2015 do protocolo, esses itens foram retirados do documento para que o ele ficasse idêntico ao utilizado pela CEC. Algumas condições de ensaios também foram alteradas na versão final, reduzindo o número de faixas de eficiência de 5 para 3, a temperatura ambiente da máxima especificada pelo fabricante para 40° e a necessidade de realizar os ensaios em três condições de fator de potência: unitário, indutivo e capacitivo. O foco do protocolo é a medição da eficiência de inversores em condições de altas irradiâncias e temperaturas encontradas no estado da Califórnia e a redução de 21 pontos de eficiência medidos em apenas um ponto [JOC, 2018].

Considerando que esta norma abrange apenas inversores fotovoltaicos conectados à rede, como requisitos gerais, a versão de 2015 estabelece, para fins de padronização, o fluxo de potência do inversor para a rede como positivo e da rede para o inversor como negativo. Além disso, a temperatura é considerada estável quando três leituras consecutivas tomadas em intervalos maiores que ou iguais a 30 minutos, seguidos de um período de operação inicial de 150 minutos, não indicarem variação superior a 1° C entre quaisquer duas amostras.

A seguir, são apresentados os requisitos e objetos de avaliação determinados pelo protocolo de medição de eficiência da CEC.

▪ **Incerteza dos equipamentos**

Os requisitos determinados para as incertezas máximas dos equipamentos a serem utilizados são apresentados na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Requisitos Mínimos de incertezas dos equipamentos a serem utilizados para medições de eficiência conforme a CEC.

Parâmetro	Máxima Incerteza Permitida
Tensão c.c.*	$\pm 0,25\%$ da leitura
Tensão c.a.**	$\pm 0,25\%$ da leitura
Corrente c.c.*	$\pm 0,5\%$ da leitura
Corrente c.a.**	$\pm 0,5\%$ da leitura
Potência c.c.*	$\pm 0,5\%$ da leitura
Potência c.a.**	$\pm 0,5\%$ da leitura
Frequência	$\pm 0,01$ Hz
Temperatura	$\pm 0,5^\circ\text{C}$
Ondulação de corrente c.c.	$\pm 1\%$ da leitura

* A ondulação c.a. no sinal c.c. deve ser levada em consideração quando a magnitude da oscilação de corrente ou tensão for maior que 2% da magnitude c.c.

** A medição de potência/energia c.a. deve ser feita considerando somente a componente de 60 Hz.

▪ **Fonte de tensão c.c. de entrada**

A fonte de tensão a ser utilizada não precisa simular a curva I-V de um arranjo de módulos fotovoltaicos, embora um arranjo devidamente dimensionado possa ser utilizado. Os pré-requisitos para a fonte de tensão c.c. são:

- a) Ondulação de tensão máxima de 1% sobre o range de tensão esperado;
- b) Saída nominal suficiente de forma que as limitações da fonte de potência não afetem os resultados;
- c) Saída de tensão ajustável pelo menos na faixa do range de tensão de entrada no inversor;
- d) Regulação de tensão de +/- 2% para toda configuração de tensão c.c. e ao longo de toda a faixa de carga entre 10% e 100% da potência de saída nominal.

Quando a fonte de tensão c.c. tem pequena ou nenhuma limitação de surto, a inserção de impedâncias RL série entre a fonte e o inversor pode ser necessária para:

- i) Limitar surtos no inversor;
- ii) Isolar a saída da fonte e a entrada do inversor de forma a evitar interações não desejadas;
- iii) Isolar os capacitores da saída da fonte para limitar as variações das ondulações de tensão a pelo menos 90% dos valores medidos usando um arranjo fotovoltaico.

O protocolo descreve um simulador adequado de arranjo fotovoltaico que representa as curvas I-V características para uma série de módulos de mercado. Quando um arranjo fotovoltaico real for utilizado, o cabeamento de entrada deve ser bem dimensionado o suficiente para limitar uma queda de tensão menor que 2% da tensão c.c. nominal.

▪ Saída CA do inversor (rede simulada)

Para medições de eficiência, a fonte de potência de saída (rede simulada) deve atender às seguintes especificações mínimas (uma combinação de uma fonte de potência c.a. e um banco de cargas pode ser utilizada):

- a) Distorção harmônica total máxima de 2,5% e não influenciada pela saída de corrente do inversor;
- b) Impedância máxima a 60 Hz menor que 5% da impedância de saída do inversor, onde a impedância de saída do inversor é igual tensão nominal de saída do inversor dividida pela corrente nominal de saída a um fator de potência unitário na frequência fundamental;
- c) Dissipador de entrada de potência nominal igual a pelo menos 150% da saída nominal do inversor a 60Hz;
- d) Capacidade de dissipação de toda a potência gerada em todo o range de tensão de operação do inversor;
- e) Ranges de tensão e frequência ajustáveis pelo menos iguais aos valores nominais do inversor sob teste continuamente ou em incrementos de pelo menos $\pm 5\%$ das máximas;
- f) Estabilidade de frequência – frequência não deve variar mais que $\pm 0,1$ Hz durante qualquer teste simples;

- g) Responder a variações de passos de $\pm 50\%$ da máxima potência sem causar uma variação superior a 5% na tensão de saída;
- h) Constantes de tempo associadas às formas de onda consistentes com as variações esperadas na potência de saída;
- i) Taxa de variação para tensão de pelo menos 10 Volts por ciclo;
- j) Taxa de variação para frequência de pelo menos 1 Hz por ciclo;
- k) Capacidade de suportar chaveamentos para abertura de circuitos na saída.

▪ **Ensaio**

A CEC indica que os ensaios podem ser realizados em laboratório do fabricante ou em instalações dos equipamentos em campo.

▪ **Máxima potência ativa e aparente de saída**

Esse ensaio estabelece os níveis máximos de potência ativa e aparente que o inversor pode manter em sua saída por um período maior ou igual a 180 minutos e em temperaturas de 40° C após alcançar o equilíbrio térmico. Tanto o valor máximo de potência ativa quanto o valor máximo de potência aparente devem ser registrados antes de iniciar os testes. A potência nominal aparente máxima de saída e a potência ativa de saída do inversor corresponderão à classificação do fator de potência do inversor. Para inversores com fator de potência de deslocamento menores que um, os testes devem ser realizados primeiro com um fator de potência adiantado e, em seguida, com um fator de potência atrasado.

O fator de potência de deslocamento estabelecido para este teste será utilizado posteriormente como parte do ensaio de eficiência de conversão. Para um inversor que for testado para a máxima potência contínua na saída a um fator de potência unitário, o ensaio de eficiência de conversão deverá ser realizado apenas a um fator de potência de deslocamento unitário. Antes do início dos ensaios, a peça sob teste deve ser armazenada a $45\pm 5^{\circ}\text{C}$ por pelo menos 24 horas. No início do ensaio, o inversor deve operar a 100% do nível de potência aparente com uma temperatura ambiente de 40°C por pelo menos 2,5 horas e até que a temperatura de medição no dissipador de calor dos dispositivos de chaveamento seja estabilizada. As condições a seguir devem ser levadas em consideração:

- a) Testes realizados a frequência nominal (50 ou 60 Hz) que $\pm 0,1$ Hz;
- b) Tensões e correntes de entrada devem ser medidas nos terminais de entrada do inversor ou entre a fonte de entrada e os terminais de alimentação de equipamentos opcionais ou auxiliares quando eles existirem. As tensões e correntes de saída devem ser medidas nos terminais de saída ou nos terminais secundários de transformadores externos quando eles existirem. Nesses casos, as especificações do(s) transformador(es) devem ser registradas;
- c) Tensão nominal – para corrente alternada, esse é o valor especificado pelo fabricante como tensão nominal de operação. Para corrente contínua, a tensão nominal pode ser escolhida pelo fabricante um ponto entre $V_{min} + 0,25 \times (V_{max} - V_{min})$ e $V_{min} + 0,75 \times (V_{max} - V_{min})$;
- d) A unidade em teste deve ser mantida a 45° C por pelo menos 24 horas antes dos ensaios para garantir que ela esteja relativamente quente no início do ensaio e que o passo b) a trará para condições estáveis de operação em um período de tempo razoável;
- e) A temperatura ambiente deve ser ajustada para $40^{\circ} \pm 3^{\circ}$ C;
- f) A unidade em testes deve ter os terminais de entrada e saída conectados às fontes de entrada e saída conforme especificações do fabricante;
- g) Todos os parâmetros de entrada devem ser configurados para as condições nominais de operação;
- h) A unidade em teste deve ser configurada para prover 100% de sua potência aparente nominal e correspondente potência ativa nominal na saída. Caso essas configurações resultem em um fator de potência de deslocamento não unitário, a unidade deve ser ajustada para prover fator de potência adiantado ou atrasado;
- i) Todas as configurações aplicáveis devem ser registradas;
- j) A fonte de potência de entrada deve prover os níveis de potência necessários para alcançar o nível de potência de saída desejado à tensão de entrada nominal;
- k) O simulador de rede deve ser ajustado para prover a tensão c.a. nominal;
- l) A unidade deve operar por pelo menos 150 minutos até que a temperatura do dissipador de calor seja estabilizada;
- m) Após a estabilização da temperatura do dissipador de calor, os registros a seguir devem ser tomados em intervalos de 5 minutos por pelo menos 180 minutos, preferencialmente em valores médios no intervalo:

- i) Tensão de entrada (c.c. e c.a.);
 - ii) Corrente de entrada (c.c. e c.a.);
 - iii) Potência de entrada (média c.c. e RMS c.a.);
 - iv) Tensão de saída (c.a.);
 - v) Potência de saída (c.a.);
 - vi) Temperatura ambiente (°C);
 - vii) Temperatura no dissipador de calor do inversor (°C).
- n) Se o inversor for desligado, a potência de entrada deve ser reduzida a um valor especificado pelo fabricante e os ensaios reiniciados. Caso os testes sejam reiniciados sem atraso, alguma flexibilidade pode ser dada no passo l) para temperaturas que tenham ocorrido;
- o) Os ensaios devem ser repetidos para fatores de potência atrasado e unitário. Caso os testes sejam realizados consecutivamente, então o patamar de temperatura do passo l) pode ser pulado. Adicionalmente, o período de amostragem pode ser reduzido de 180 para 60 minutos nesses casos.

▪ **Eficiência de conversão**

Esse ensaio estabelece a eficiência de conversão do conversor entre a entrada na fonte c.c. (arranjo fotovoltaico) e a saída c.a. Esses testes caracterizam a eficiência do equipamento em função da potência aparente de saída, potência ativa, tensão do arranjo, tensão do sistema e temperatura ambiente.

As premissas de ensaio para este teste são praticamente as mesmas que aquelas descritas no ensaio da máxima potência ativa e aparente de saída com exceção para o fato de que, nesse caso, o PSMP deve ser desabilitado quando possível para redução dos erros enquanto ocorrerem mudanças nos pontos de operação. Caso isso não seja possível, os instrumentos de medição utilizados devem ter capacidade de amostragem de pelo menos cinco vezes a taxa de variação do ponto de seguimento de máxima potência. Além disso, a inclusão de uma bateria é indicada caso ela seja necessária durante a operação normal do inversor ou se a fonte for incapaz de manter o nível de tensão na entrada sem ocorrências de ondulações excessivas [NEW, 2015].

Caso seja utilizado um simulador de arranjo fotovoltaico, é considerado que ele esteja nas condições de referência, com fator de dimensionamento $FD=0,68$ e com a tensão e a potência ajustadas para proverem as condições prescritas. A faixa de potência tolerada para este ensaio é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Tolerância para faixas de potência medidas.

Potência	Tolerância	Potência	Tolerância
10%	8% - 12%	50%	45% - 55%
20%	18% - 22%	75%	70% - 80%
30%	27,5% - 32,5%	100%	95% - 105%

O roteiro de testes é, então, seguido, as condições necessárias ajustadas e os valores medidos de potência média na entrada e potência média na saída anotados. Com isso se calcula a eficiência de conversão. A CEC, através do protocolo de medição de eficiência para inversores fotovoltaicos, também indica a metodologia aplicada para a definição da eficiência ponderada, à qual aplicados fatores variados de acordo com o percentual da potência nominal o inversor está operando. A eficiência ponderada pode ser calculada conforme a seguinte equação:

$$\eta_{wtd} = F_1 x \eta_{10} + F_2 x \eta_{20} + F_3 x \eta_{30} + F_4 x \eta_{50} + F_5 x \eta_{75} + F_6 x \eta_{100} \quad (5)$$

onde, $\eta_{10}, \eta_{20}, \eta_{30}, \eta_{50}, \eta_{75}, \eta_{100}$, são as eficiências medidas a 10%, 20%, 30%, 50%, 75% e 100% da potência nominal do inversor e F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 e F_6 são os fatores definidos na Tabela 3, a seguir:

Tabela 3 - Fatores de ponderação para cálculo da eficiência energética ponderada de inversores fotovoltaicos.

Fator	Potência no inversor	Alta insolação [1]	Baixa insolação [2]
F ₁	10%	0,04	0,09
F ₂	20%	0,05	0,13
F ₃	30%	0,12	0,10
F ₄	50%	0,21	0,48
F ₅	75%	0,53	0,00
F ₆	100%	0,05	0,20

[1] Fator de ponderação da Califórnia.

[2] Fator de ponderação da Europa.

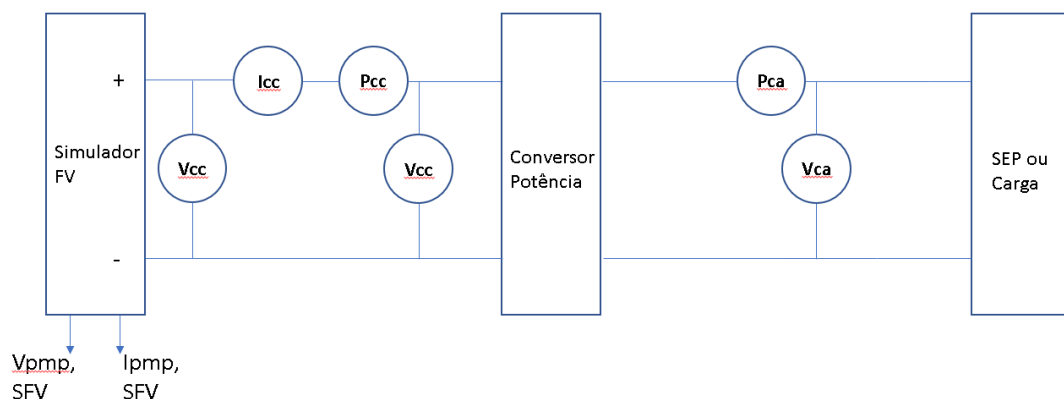
3.3 EN 50530

A norma EN 50530 foi a terceira norma de medição da eficiência de inversores fotovoltaicos, lançada em 2010, e a primeira que se propôs a realizar testes de algoritmos de PSMP. Foi incluída uma emenda em 2013, passando a se referenciar EN 505030:2010+A1:2013 [JOC, 2018].

Na Figura 3, é apresentado o esquema de ligação dos equipamentos para realização da medição de eficiência segundo as condições determinadas pela norma EN 50530, segundo a qual as grandezas a serem medidas são:

- Tensão do PMP - Ponto de Máxima Potência, definido no simulador FV – $V_{PMP, SFV}$;
- Corrente do PMP – Ponto de Máxima Potência, definido no simulador fotovoltaico – $I_{PMP, SFV}$;
- Potência do PMP – Ponto de Máxima Potência, definido no simulador fotovoltaico – $P_{PMP, SFV}$;
- Tensão c.c, medida na entrada do inversor em ensaio - V_{CC} ;
- Corrente c.c, medida na entrada do inversor sob ensaio - I_{CC} ;
- Potência c.c, medida na entrada do inversor sob ensaio – P_{CC} ;
- Potência c.a, medida na saída do inversor sob ensaio – P_{CA} .

Figura 3 - Esquema de ligação dos instrumentos para medição da eficiência de inversores fotovoltaicos segundo a EN 50530.



Onde:

- I_{cc} é a medição de corrente contínua na entrada do inversor;

- V_{cc} é a medição de tensão contínua na entrada do inversor;
- P_{cc} é a potência medida na entrada do inversor;
- P_{ca} é a potência medida na saída do inversor;
- V_{ca} é a tensão alternada medida na saída do inversor.

As medidas, apresentadas na Figura 3, podem ser realizadas tanto por equipamentos individuais quanto por equipamentos capazes de realizar as todas medidas de maneira simultânea, desde que haja o devido sincronismo nas medições para garantir maior precisão. Uma vez que as taxas de amostragem e de armazenamento não são definidas nessa norma, é esperado que elas sejam suficientemente altas para garantir que o comportamento dinâmico do SPMP – Seguimento do Ponto de Máxima Potência - seja observado durante variações na tensão e potência de entrada decorrentes de variações momentâneas na radiação do sistema fotovoltaico (simulado).

A EN 50530 não permite que fontes de corrente contínua sejam utilizadas para simular a potência fornecida pelo arranjo fotovoltaico e propõe que o simulador de arranjo fotovoltaico seja capaz de simular relações e grandezas compatíveis com módulos fotovoltaicos de mercado segundo determinados valores de tolerância [JOC, 2018].

O modelo de painel fotovoltaico proposto pela norma, determina que os valores de Fator de Forma de tensão (FF_U), Fator de Forma de corrente (FF_I) e a relação entre tensão de máxima potência com irradiação de 200 W/m^2 e tensão de máxima potência com irradiação de 1000 W/m^2 sejam dadas pelas equações a seguir:

$$FF_U = \frac{V_{pmp; stc}}{V_{oc; stc}} \quad (6)$$

$$FF_I = \frac{I_{pmp; stc}}{I_{sc; stc}} \quad (7)$$

$$V_{L2H} = \frac{V_{pmp; G = 200 \text{ W/m}^2}}{V_{pmp; G = 1000 \text{ W/m}^2}} \quad (8)$$

$$I_{sc} = I_{sc; stc} (1 + \beta (I_{FV} - T_{STC})) (\ln(G/C_G) + 1) C_V - C_R G \quad (9)$$

$$V_{oc} = V_{oc} (1 + \beta (T_{FV} - T_{STC})) (\ln\left(\frac{G}{C_G} + 1\right) C_V - C_R G) \quad (10)$$

Nas equações acima, a sigla STC indica que os valores considerados são em condições de teste padrão, sendo, nesse caso, a temperatura de 25° e irradiação de 1000 W/m².

- **Pré-requisitos**

A EN 50530 estabelece, além dos itens abordados anteriormente, que alguns requisitos mínimos, os quais serão brevemente descritos a seguir.

Para medição da eficiência estática, a curva característica I-V deve satisfazer o modelo apresentado na saída do simulador de arranjo fotovoltaico, sendo que a curva gerada deve estar dentro de uma tolerância de 1% dos valores ajustados no simulador [JOC, 2018].

Para as características dinâmicas, o simulador de arranjo fotovoltaico deve permitir uma operação adequada do inversor sob ensaio em relação a seu algoritmo de seguimento de máxima potência, o que requer um tempo de resposta suficientemente alto para acompanhar as variações na tensão de entrada [JOC, 2018].

Quanto à calibração, é esperado que, previamente à realização dos ensaios, seja verificado e garantido que os parâmetros resultantes da configuração do simulador fotovoltaico (V_{oc} , V_{pmp} , P_{pmp} , etc) estejam adequados e que o simulador fotovoltaico funcione corretamente quando conectado ao inversor sob ensaio [JOC, 2018].

A EN 50530 estabelece que a fonte de alimentação c.a. ideal para realização das medições seria uma fonte simuladora de rede c.a. que forneça tensão estável e livre de interferência. Em casos que isso não for possível, deve ser garantido que o inversor sob ensaio não tenha seu comportamento afetado pelos níveis de tensão e/ou harmônicos de tensão presentes na rede. Os valores de tolerância para tensão e frequência são de $\pm 3\%$ e $\pm 0,1\%$, respectivamente.

Em relação à temperatura ambiente durante a realização dos ensaios, a norma especifica que ela deve estar na faixa de $25 \pm 5^\circ\text{C}$, mas que valores diferentes podem ser mutuamente acordados entre o laboratório e o fabricante do equipamento.

- **Ensaio**

▪ **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 simultaneamente para as curvas I-V simuladas pelo simulador FV, de acordo com os valores de tensão mínima, nominal e máxima e as tecnologias de módulos fotovoltaicos simulados. Para equipamentos com mais de uma entrada nominal, os ensaios devem ser repetidos para cada valor possível. Segundo a norma orienta, os seguintes passos devem ser seguidos:

- a) A temperatura ambiente deve ser ajustada para $25^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$;
- b) O equipamento sob teste deve ser instalado conforme instruções do fabricante a fim de se ter condições similares àquelas de operação;
- c) As conexões do inversor ao simulador fotovoltaico e ao simulador de rede devem ser feitas em acordo com as especificações dos fabricantes;
- d) Os parâmetros da fonte simuladora de rede c.a. para condições nominais devem ser definidos;
- e) Ajustar a curva fotovoltaica equivalente aos valores equivalentes à tensão mínima de entrada c.c., nível de potência de 100% e modelo de módulos fotovoltaicos de cSi;
- f) Aguardar 5 minutos para a estabilização do algoritmo de SPMP;
- g) Devem ser medidos e registrados durante 10 minutos os valores de:

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

- h) Os passos e), f) e g) devem ser repetidos para os demais níveis de potência determinados para ensaio do inversor, mantendo a entrada c.c. e o tipo de módulos fotovoltaicos inalterados;

- i) Os passos e), f), g) e h) devem ser repetidos para os outros dois valores de tensão de entrada: V_{CC} nominal (ou a média entre o valor máximo e mínimo, caso o fabricante não especifique um valor nominal) e máxima (caso esse valor seja superior a 80% da tensão c.c. máxima suportada pelo conversor, deve ser utilizado o valor de $0,8 \times V_{CCMAX}$);
- j) Os passos e), f), g), h) e i) devem ser repetidos para os demais tipos de tecnologias para os quais o inversor se propõe a trabalhar.

Após realizadas as medições e coletados os dados, a eficiência do algoritmo de SPMP pode ser calculada conforme a equação a seguir [JOC, 2018]:

$$\eta_{SPMP} = \frac{\int_0^{TM} P_{CC}(t) dt}{\int_0^{TM} P_{PMP}(t) dt} \quad (11)$$

Onde:

P_{CC} é a potência CC na entrada do equipamento sob ensaio e;

P_{PMP} é a potência máxima do ponto de máxima potência, configurada no simulador de arranjo fotovoltaico.

Para sistemas digitais de aquisição, a equação abaixo também pode ser utilizada para realização do cálculo da eficiência estática do SPMP do inversor:

$$\eta_{SPMP} = \frac{1}{\sum_i^n V_{CC,i} I_{CC,i} \Delta T_e} \sum_i^n V_{CA,i} I_{CA,i} \Delta T_s \quad (12)$$

Onde:

V_{CC} é a tensão c.c. amostrada na entrada do equipamento sob ensaio;

I_{CC} é a corrente c.c. amostrada na entrada do equipamento sob ensaio;

V_{CA} é a tensão c.a. amostrada na saída do equipamento sob ensaio;

I_{CA} é a corrente c.a. amostrada na saída do equipamento sob ensaio;

ΔT_e é o intervalo entre duas amostragens dos valores de entrada do equipamento;

ΔT_s é o intervalo entre duas amostragens dos valores de saída do equipamento.

A eficiência total leva em consideração tanto a eficiência do ponto de seguimento de máxima potência quanto a eficiência de conversão, sendo calculada conforme a equação abaixo [JOC, 2018]:

$$\eta_{total} = \eta_{SPMP} \times \eta_{conv} = \frac{P_{ca}}{P_{PMP,SFV}} \quad (13)$$

A eficiência ponderada é calculada conforme os pontos de medição determinados pela EN 50530 aplicando na expressão abaixo os respectivos fatores de ponderação sugeridos pela norma:

$$\begin{aligned} \eta_{total} = & \eta_{total_5} \times p_5 + \eta_{total_10} \times p_{10} + \eta_{total_20} \times p_{20} + \eta_{total_25} \times p_{25} \\ & + \eta_{total_30} \times p_{30} + \eta_{total_50} \times p_{50} + \eta_{total_75} \times p_{75} \\ & + \eta_{total_100} \times p_{100} \end{aligned} \quad (14)$$

Onde:

η_{total} é a eficiência total calculada;

p_n é o fator de ponderação aplicável ao nível de potência n em relação à potência nominal do inversor;

η_{total_n} é a eficiência total medida/calculada no nível de potência n em relação à potência nominal do inversor.

▪ Eficiência do SPMP em condição dinâmica

A medição da eficiência do SPMP em condição dinâmica ocorre em condições de simulação específicas determinadas pela EN 50530, nas quais condições de irradiação baixas, médias e altas são emuladas em três etapas. O ensaio considera tanto módulos fotovoltaicos de cSi quanto demais tecnologias, sendo necessário, no entanto, a menção dela no relatório de medição. Os ensaios devem ser realizados na tensão nominal c.c. de entrada do equipamento sob ensaio e, caso o inversor tenha mais de uma tensão nominal, devem ser realizadas medições em todos os valores nominais possíveis. Segundo a norma orienta, os seguintes passos devem ser seguidos:

a) A temperatura ambiente deve ser ajustada para $25^{\circ} \pm 5^{\circ}C$;

- b) O equipamento sob teste deve ser instalado conforme instruções do fabricante a fim de se ter condições similares àquelas de operação;
- c) As conexões do inversor ao simulador fotovoltaico e ao simulador de rede devem ser feitas em acordo com as especificações dos fabricantes;
- d) Os parâmetros da fonte simuladora de rede c.a. para condições nominais devem ser definidos;
- e) Ajustar a curva fotovoltaica equivalente aos valores equivalentes à tensão mínima de entrada c.c., nível de potência de 100%, para irradiância de $1000 \frac{W}{m^2}$ e modelo de módulos fotovoltaicos de cSi;
- f) Alterar o valor da irradiação da curva simulada para o menor valor a ser simulado ($300 \frac{W}{m^2}$);
- g) Aguardar 5 minutos para a estabilização do algoritmo de SPMP;
- h) Realizar a variação dinâmica conforme padrão definido na norma, medindo e registrando os seguintes valores:

- 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 inversor em teste: V_{CC} ;
- Corrente c.c., medida na entrada do inversor em teste: I_{CC} ;
- Potência c.c., medida na entrada do inversor em teste: P_{CC} ;
- Potência c.a., medida na saída do inversor em teste: P_{CA} .

As variações devem ser realizadas na seguinte ordem:

- Aplicar uma irradiação incremental crescente em rampa até atingir $1000 \frac{W}{m^2}$, com inclinação de $10 \frac{W}{m^2}/s$;
- Aguardar tempo de 10 segundos;
- Aplicar uma irradiação incremental decrescente em rampa até atingir $300 \frac{W}{m^2}$, com inclinação de $10 \frac{W}{m^2}/s$;
- Aguardar tempo de 10 segundos;
- Repetir até concluir o número de repetições.

i) Os passos f), g), h) e i) devem ser repetidos até que todas as condições definidas na norma sejam simuladas.

Após realizadas as medições e coletados os dados, a eficiência do algoritmo de SPMP em condição dinâmica pode ser calculada conforme a equação a seguir [JOC, 2018]:

$$\eta_{din} = \frac{\sum_i^n V_{CC} \times I_{CC} \times \Delta T_i}{\sum_i^n P_{PMP;SFV} \times \Delta T_j} \quad (15)$$

Onde:

V_{CC} é a tensão CC na saída do simulador fotovoltaico;

I_{CC} é a corrente CC na saída do simulador fotovoltaico;

P_{PMP} é a potência do ponto de máxima potência, configurada no simulador de arranjo fotovoltaico.

ΔT_i é o período de amostragem das tensões e correntes c.c.;

ΔT_j é o período em que a $P_{PMP;SFV}$ está disponível no simulador de arranjo fotovoltaico.

A eficiência total do SPMP do inversor em condição dinâmica é calculada pela seguinte equação:

$$\eta_{din_total} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i \times \eta_{din,i} \quad (16)$$

Onde:

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

$\eta_{din,i}$ 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 (utiliza-se 1 para todas as condições).

a. Definição do padrão a ser seguido

Conforme procedimentos apresentados acima, os três principais padrões internacionais que tratam medições da eficiência em inversores fotovoltaicos possuem requisitos similares, mas

apresentam focos distintos. A IEC 61683, única dentre as três a abranger tanto inversores *on-grid* quanto *off-grid*, indica medições em quatro tipos de cargas: resistiva, reativa, não-linear e complexa, sendo as três últimas indicadas para medições de inversores *off-grid*. Além disso, requer que essas medições sejam repetidas para diferentes níveis de tensão c.c. de entrada no inversor: tensão mínima, tensão nominal e tensão máxima. A eficiência CEC tem foco maior nas condições de operação e, de forma especial, na temperatura de operação e no cálculo da eficiência ponderada. Por fim, a EN 50530 define os métodos para medição da eficiência total, levando em consideração a eficiência do SPMP em condições estáticas e dinâmicas avaliando, de forma especial, os algoritmos de seguimento de máxima potência. As divergências nos focos desses padrões são apresentadas de maneira resumida na Tabela 4 [JOC, 2018].

Tabela 4 - Comparativo entre os padrões da medição de eficiência 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
Máxima potência de saída contínua	Não	Sim	Não
Eficiência de inversores Off-Grid	Sim	Não	Não
Autoconsumo noturno	Sim	Sim	Não
Consumo sem carga	Sim	Não	Não

Conforme apresentado, as referências para ensaios da eficiência de inversores fotovoltaicos possuem alguns critérios que podem ser viabilizados somente em ambientes de laboratório. Baseado no estudo bibliográfico realizado, não foi possível identificar um procedimento padrão de referência internacional para realização das medições de eficiência dos inversores que já se encontram em operação. Em grande parte dos casos, geraria transtornos ao proprietário do inversor, por exemplo, a desinstalação de um equipamento de médio porte e transporte a um laboratório credenciado a fazer esse tipo de ensaio. Isso inviabilizaria análises do ciclo de vida do equipamento, restando dúvidas ao proprietário do ativo quanto a qualidade do produto ou às garantias providas pelos fabricantes.

Com o intuito de alcançar os objetivos deste estudo, a base de orientação das medições a serem realizadas em inversor fotovoltaico em operação será a IEC 61683, mesmo que alguns requisitos, tais como temperatura de ensaio controlada e variação da tensão aplicada na entrada do inversor, não possam ser realizados da maneira que a norma sugere. Esse padrão foi escolhido porque flexibiliza alguns requisitos dependendo das condições de ensaios, além de apresentar o método completo para realização das medições da eficiência de inversores.

4. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO ADOTADA

A metodologia adotada neste trabalho consistiu da divisão nas seguintes etapas:

- a) Revisão bibliográfica acerca de normas nacionais e internacionais que tratem da medição de eficiência em inversores para geração fotovoltaica conectada à rede;
- b) Definição de um procedimento de medição de eficiência de inversores *in loco* e estabelecimento dos requisitos mínimos para os equipamentos de medição tendo como base as principais recomendações das normas estudadas;
- c) Aplicação da metodologia de medição proposta em uma planta modelo;
- d) Análise e discussão dos resultados coletados, comparando-os com os dados de catálogo do inversor da planta modelo.

4.1 Características do sistema avaliado

Existem equipamentos disponíveis no mercado que se propõem a coletar os dados na entrada e saída de inversores fotovoltaicos e aplicar algoritmos para realização dos cálculos de eficiência de conversão dos equipamentos sem se comprometerem com atendimento a um padrão internacional específico, uma vez que existem diversas variáveis que não podem ser controladas conforme requerido nesses padrões, mas garantindo que a coleta e o processamento dos dados ocorram dentro de determinadas classes de exatidão. Neste trabalho, além do estudo bibliográfico, é proposta a realização de coleta de dados de um sistema real e comparação dos resultados obtidos com as curvas fornecidas pelo fabricante do inversor fotovoltaico medido.

As medições foram realizadas no sistema de geração de energia fotovoltaica instalado no Laboratório TESLA de Eletrônica de Potência da Universidade Federal de Minas Gerais, cujas principais características são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados da usina de geração à qual o inversor objeto do estudo faz parte.

Nome	Usina Experimental Fotovoltaica TESLA Engenharia de Potência
------	--

Localização	Brasil, Minas Gerais, Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG
Coordenadas	19°52'10,81" S 43°57'42,01" O
Elevação (m)	808
Potência nominal da usina (kWp)	37
Quantidade de módulos fotovoltaicos	152
Quantidade de <i>strings</i>	11
Quantidade de inversores	3

O inversor escolhido para realização das medições foi o da marca SMA, cujos dados gerais são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados do inversor selecionado para realização das medições.

Marca e modelo do inversor fotovoltaico medido	SMA Tripower 12 kW
Faixa de tensão de entrada para rastreamento de máxima potência (V)	150-800
Tensão máxima de entrada (V _{cc})	1000
Corrente máxima de entrada (Acc)	22
Número de entradas	2
Número de conexões	5
Tensão nominal de saída (V)	400
Frequência nominal de saída (Hz)	60
Fator de Dimensionamento	1,088

4.2 Características do medidor utilizado

O equipamento utilizado para a realização das medições, Metrel modelo MI 2892, é um equipamento portátil de fácil manuseio, capaz de realizar coleta dos dados a uma taxa de amostragem de até 50 mil amostras por segundo e possui, dentre outras características, display integrado com facilidade de análise gráfica de energia, harmônicos, representação fasorial das grandezas e anomalias nas formas de onda por meio de simples instalação e configuração. Além disso, o equipamento permite o armazenamento de dados em cartão SD para períodos longos e possui *software* para visualização e *download* das informações. As informações técnicas do medidor portátil são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Informações técnicas do medidor aplicado no ensaio.

Função	Descrição/Precisão
Entrada de tensão	c.c+c.a
Número de entradas	5
Faixa de tensão nominal (L-N)	50 – 1000 V RMS
Faixa de tensão nominal (L-L)	50 – 1730 V RMS
Faixa de medição	10% a 150% da tensão nominal
Precisão	classe A para IEC 61000-4-30, $\pm 0,1\%$ da tensão nominal
Taxa de amostragem	7000 amostras por ciclo a 50/60 Hz
	1700 amostras por ciclo (5 a 110 Hz)
	12200 amostras por ciclo (400 Hz)
Faixa de medição de frequência	42,5 a 69 Hz $\pm 0,01$ Hz
	5 a 110 Hz $\pm 0,01$ Hz (5 a 110 Hz)
	335 a 465 Hz $\pm 0,1$ Hz
Entrada de corrente	c.c+c.a
Número de entradas	4
Faixa de medição (com alicate A1227)	3 a 6000 A RMS $\pm 1,5\%$
Faixa de medição (com alicate A1281)	0,05 a 1200 A RMS $\pm 0,5\%$
Potência	IEC 61557-12 Classe 1
Energia	Ativa: Classe 1 na IEC 62053-21 Reativa: Classe 2 na IEC 62053-23
Harmônicos e inter-harmônicos	Classe 1 na IEC-61000-4-7
Flicker	Classe F3 na IEC 61000-4-15
Desbalanço	(Medição) Tensão: 0 a 5% Corrente: 0 a 17%
Temperatura	$\pm 0,5^\circ\text{C}$
Picos/afundamentos	$\pm 0,2\%$ da tensão nominal - ± 1 ciclo
Interrupções	± 1 ciclo
Período de integração	De 1 segundo a 2 horas
Memória	Suporta até 32 Gb micro SD
Comunicação	USB, Ethernet, RS232
Alimentação	110 a 240 VCA e/ou baterias recarregáveis

4.3 Esquemas e configurações aplicados

Os equipamentos de medição, para realizarem adequadamente suas funções, além de serem bem projetados também devem ser operados e instalados conforme as instruções do

fabricante. Para aquisição dos dados propostos neste estudo, o fabricante do medidor utilizado sugere que as conexões nos circuitos do inversor sob teste sejam realizadas conforme a Figura 4, em casos de inversores monofásicos ou conforme a Figura 5 em casos de inversores trifásicos.

Figura 4 - Esquema de ligação dos instrumentos para medição da eficiência de inversores fotovoltaicos monofásicos.

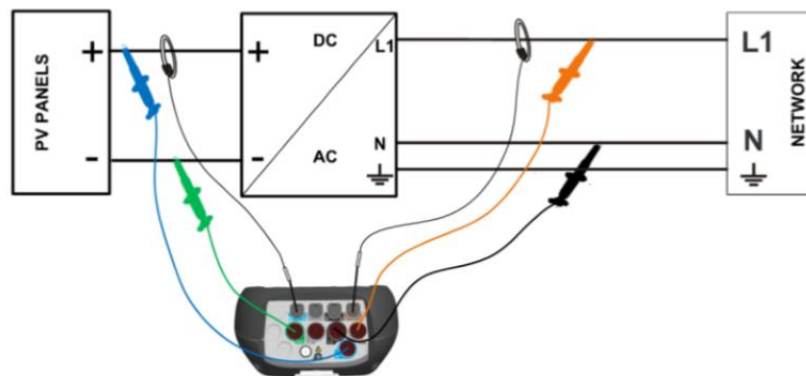
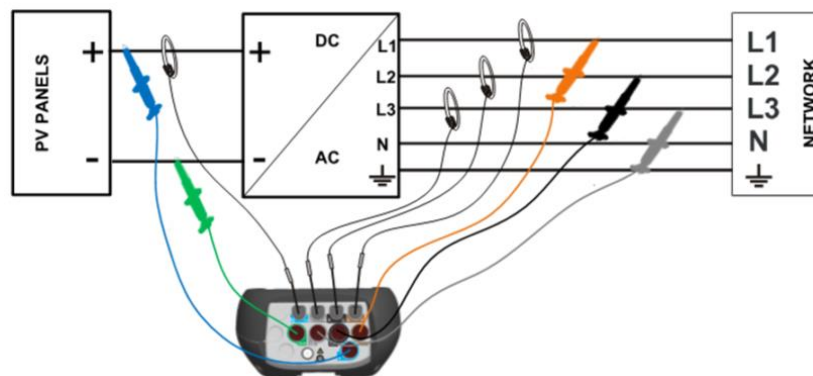


Figura 5 - Esquema de ligação dos instrumentos para medição da eficiência de inversores fotovoltaicos trifásicos.



O *Metrel 2892 Power Master*, modelo de equipamento utilizado, possui a característica de medição de energia de forma indireta, ou seja, é necessário o uso de transdutores de tensão e/ou corrente para abaixar sinais elétricos para níveis compatíveis com os canais de amostragem dos sinais no equipamento. No caso da amostragem de tensão, conforme apresentado na Tabela 7, o medidor pode receber em seu canal de entrada até 1730 Volts entre fases. Logo, é preciso selecionar os transdutores de corrente e tensão adequados para os níveis

primários dessas grandezas e ajustar as configurações do equipamento para que as medições sejam realizadas corretamente.

A primeira instalação do medidor foi realizada na noite do dia 11/11/2019, com início da gravação dos dados às 19h08min e fim dos registros em 12/11/2019 às 18h58min. No entanto, foi constatado que a bateria de alimentação do transdutor utilizado para medição da corrente contínua na entrada do inversor estava descarregada e os dados coletados tiveram que ser descartados.

Nova instalação foi, então, realizada no dia 12/11/2019 com a utilização de uma bateria nova para o sensor de corrente, dando início ao registro dos dados às 19h31min e finalizando-os às 16h54min do dia 13/11/2019. Conforme pode ser visto na Figura 6, as conexões para amostragem dos sinais de tensão, tanto na entrada quanto na saída do inversor, foram feitas de forma direta, sem aplicação de transdutores ou transformadores, uma vez que os níveis de tensão nesses pontos foram compatíveis com os limites do equipamento. As amostragens dos sinais de corrente foram feitas com o uso de transdutores, sendo do tipo bobina de *Rogowski* para medição da corrente alternada na saída do inversor e sensor de efeito hall para medição da corrente na entrada do inversor. Na Tabela 8, são apresentados os parâmetros de conexão ajustados no instrumento de medição para realização do ensaio, conforme sensores utilizados e na Tabela 9 são apresentados os dados de configuração para registros dos dados.

Figura 6 – Fotos dos sensores e instrumentos instalados para amostragem dos dados do inversor SMA.



Tabela 8 – Configurações dos parâmetros de conexão ajustados no instrumento previamente à realização das medições.

<i>Nominal Voltage LL (V)</i>	380
<i>Phase Curr. Clamps</i>	A1257 (30A)
<i>Inverter Curr. Clamps</i>	A1636 (1000A)
<i>Connection</i>	INV-3W
<i>Synchronization</i>	U12
<i>System Frequency</i>	60 Hz

Tabela 9 – Configurações ajustadas no medidor para registros dos dados.

<i>Profile</i>	<i>Limited</i>
<i>Interval</i>	10 s
<i>Include events</i>	<i>Off</i>
<i>Include alarms</i>	<i>Off</i>
<i>Include signaling</i>	<i>Off</i>
<i>Start Time</i>	Manual
<i>Duration</i>	3 days

Após a realização das medições, os dados coletados foram descarregados em um computador pessoal com intuito de realizar as análises gráficas necessárias e posteriores comparações com

os valores de catálogo apresentados pelo fabricante. No entanto, conforme será detalhado na seção dos resultados, quando comparados aos valores nominais, os valores registrados para a corrente contínua na entrada do inversor apresentaram inconsistências, provocadas pelo deslocamento do nível de referência da sonda de corrente ao longo do dia. Não se identificou uma causa inicial para esta anomalia. As demais variáveis medidas, tais como tensão c.c., tensões, correntes, potências e energia na saída do inversor, apresentaram valores aparentemente consistentes quando comparados com os valores nominais e indicados pela interface homem-máquina do inversor medido. Assim sendo, as três principais hipóteses para a ocorrência de tais inconsistências são:

- instalação ou manuseio incorretos;
- configuração incorreta dos parâmetros do sensor no instrumento, uma vez que há uma série de variáveis a serem configuradas;
- nível de corrente do sistema incompatível com a faixa de medição do sensor utilizado;
- níveis de temperatura ambiente inadequados para aplicação dos sensores.

Com a identificação das inconsistências e a indisponibilidade de outros sensores para a realização das medições, para fins de análises, optou-se por tomar os dados medidos com o *Metrel 2892 Power Master* no lado da rede elétrica (corrente alternada) e utilizar os dados registrados pelo sistema SCADA existente na sala de controle, posteriormente fornecidos pelo departamento responsável pelo laboratório, para se estimar a eficiência do inversor. Uma vez que os dados coletados pelo sistema SCADA possuem período de integração igual a 5 minutos e os dados coletados pelo *Metrel MI 2892* possuem periodicidade configurada igual a 10 segundos, foi necessário aplicar filtros com operações de média para tensões, correntes e potências, com o intuito de tornar os intervalos de dados coincidentes e facilitar o cálculo e comparação das eficiências de conversão.

Para realização da análise da eficiência de conversão, os cálculos foram realizados de acordo com a equação (1), conforme IEC 61683, e definido o valor de eficiência máxima para comparação com o valor de catálogo do equipamento. Para fins investigativos, foi feita uma análise gráfica da eficiência calculada com as amostras feitas, tanto com utilização dos dados mistos (SCADA para potências c.c. e *Metrel MI 2892* para potências c.a.) quanto unificados (SCADA para ambas as potências, c.c. e c.a.).

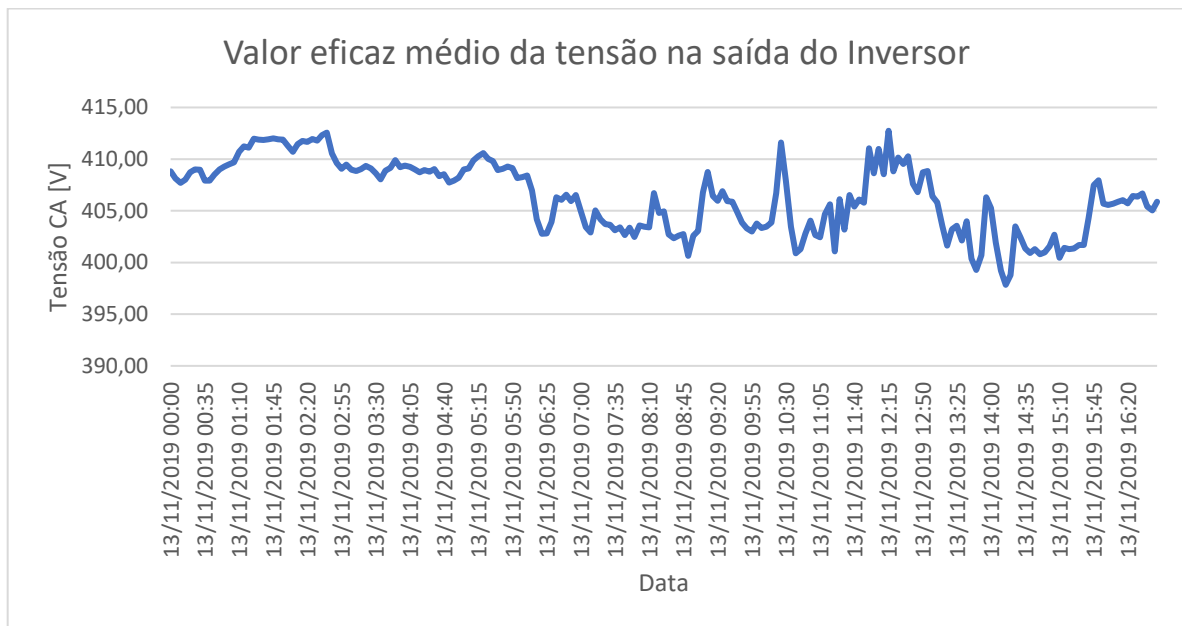
Por fim, foram realizados os cálculos das eficiências baseado nas amostras feitas pelos instrumentos de medição e com aplicação dos fatores de ponderação da Califórnia (CEC) e o europeu (EN) definidos pela norma CEC.

5. RESULTADOS

Na primeira análise dos dados coletados, foram avaliadas as principais grandezas de entrada e saída do inversor fotovoltaico, a destacar: tensão, corrente e potência na entrada e tensão média, corrente média e potência na saída do inversor. Esses dados mostraram que os valores medidos na saída do equipamento sob ensaio apresentaram compatibilidade com os valores esperados, enquanto os valores medidos na saída do inversor aparentemente sofreram desvios significativos. Em todos os casos apresentados abaixo, os dados foram filtrados em períodos menores para facilitar a visualização gráfica, uma vez que a medição original foi realizada com intervalos de 10 segundos entre os registros.

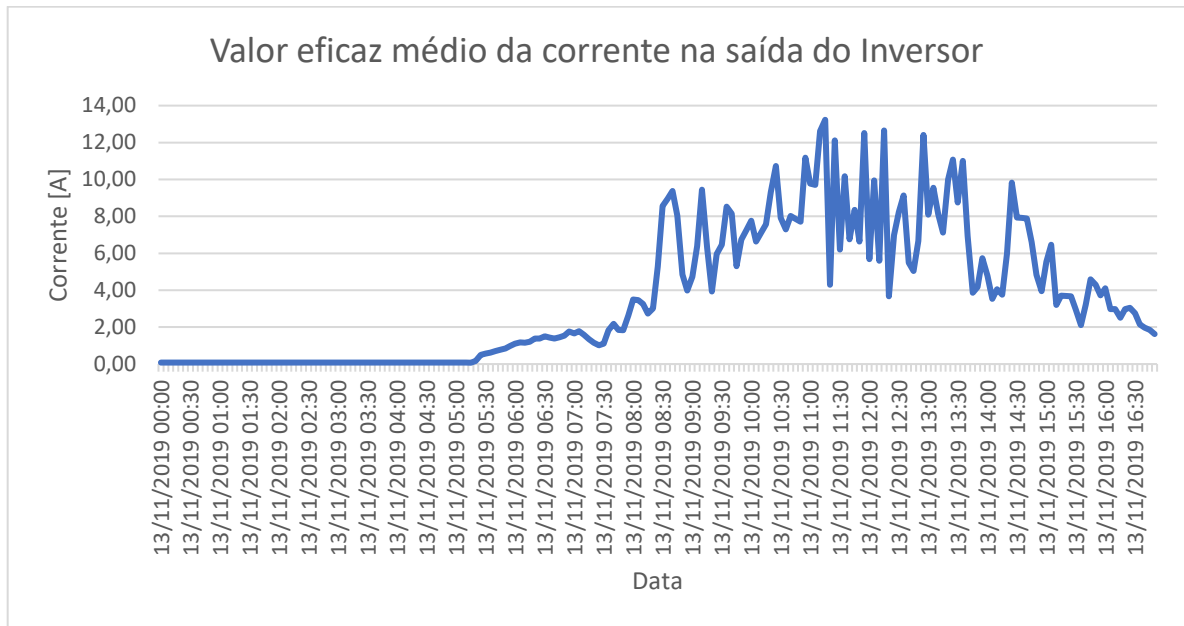
Na Figura 7, é apresentado o gráfico da tensão eficaz média na saída do inversor, ou seja, do lado da rede. Esse gráfico mostra que houve pouca variação no valor da tensão, tanto no período noturno, quando não havia geração de energia, quanto no período diurno, quando a usina se encontrava em operação devido à incidência de irradiação solar nos módulos fotovoltaicos. O valor mínimo de tensão registrado foi de 397,84 V e o valor máximo foi de 412,74 V.

Figura 7 – Gráfico do valor eficaz médio da tensão na saída do inversor monitorado pelo equipamento Metrel.



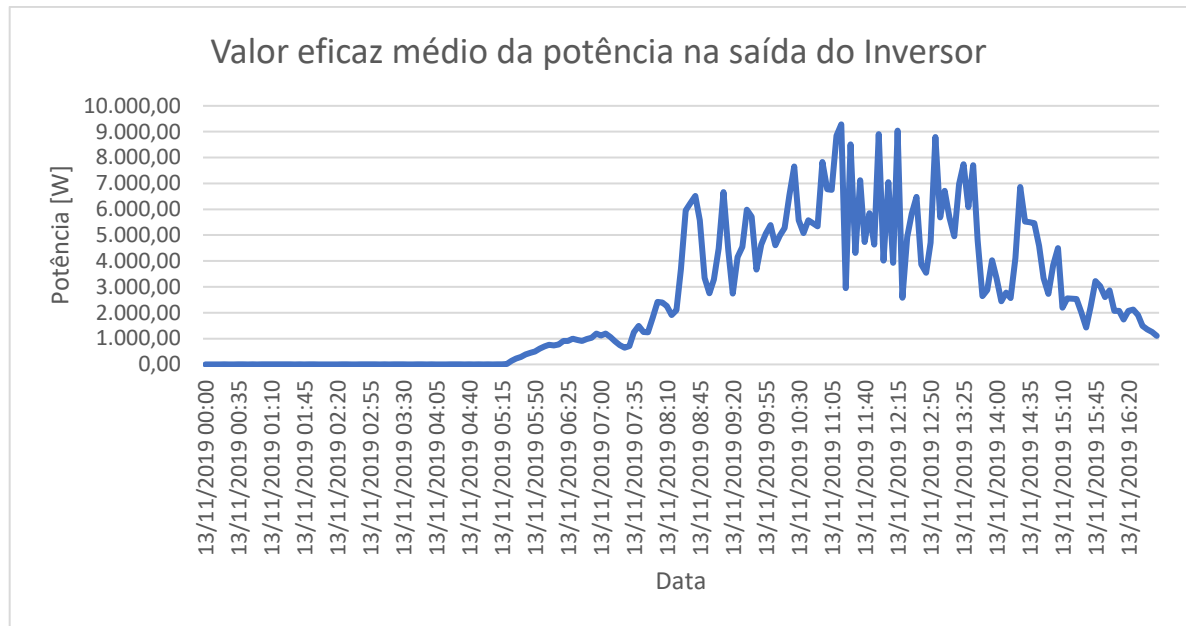
Na Figura 8 é apresentado o gráfico da corrente eficaz média na saída do inversor para o período monitorado. O valor mínimo registrado para a corrente na saída do inversor foi zero, registrado durante o período noturno e o valor máximo registrado foi 13,23 A, ocorrido no momento de maior incidência de irradiação solar nos módulos fotovoltaicos.

Figura 8 – Gráfico do valor eficaz médio da corrente na saída do inversor monitorado.



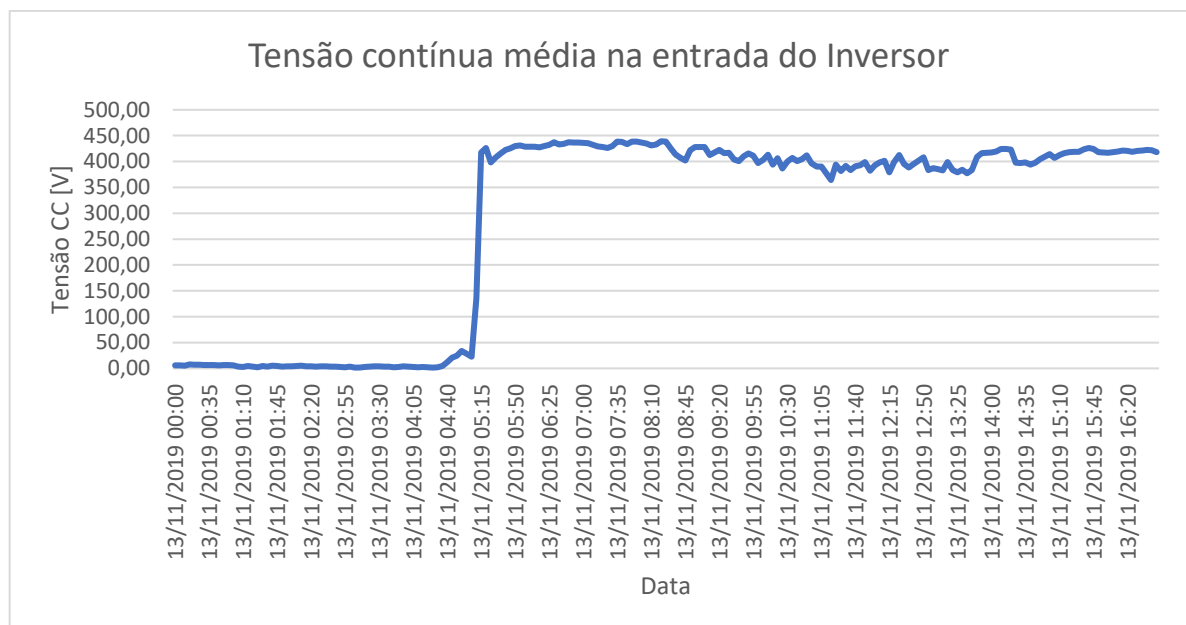
Na Figura 9 é apresentado o gráfico de potência na saída do inversor para o período monitorado. O valor mínimo registrado para a potência média na saída do inversor foi zero, verificado durante o período noturno e o valor máximo registrado foi 9283,25 W, ocorrido, assim como a corrente elétrica máxima na saída do inversor, no momento de maior incidência de irradiação solar nos módulos fotovoltaicos.

Figura 9 – Gráfico do valor eficaz médio da potência na saída do inversor monitorado.



O gráfico dos valores médios de tensão registrados na entrada do inversor é apresentado na Figura 10. Nota-se que a tensão tem uma elevação abrupta nos terminais de entrada do inversor nas primeiras horas do dia, quando a incidência de irradiação solar nos módulos fotovoltaicos tem início. O valor médio máximo registrado foi 439,21 V.

Figura 10 – Gráfico da tensão contínua média na entrada do inversor monitorado.

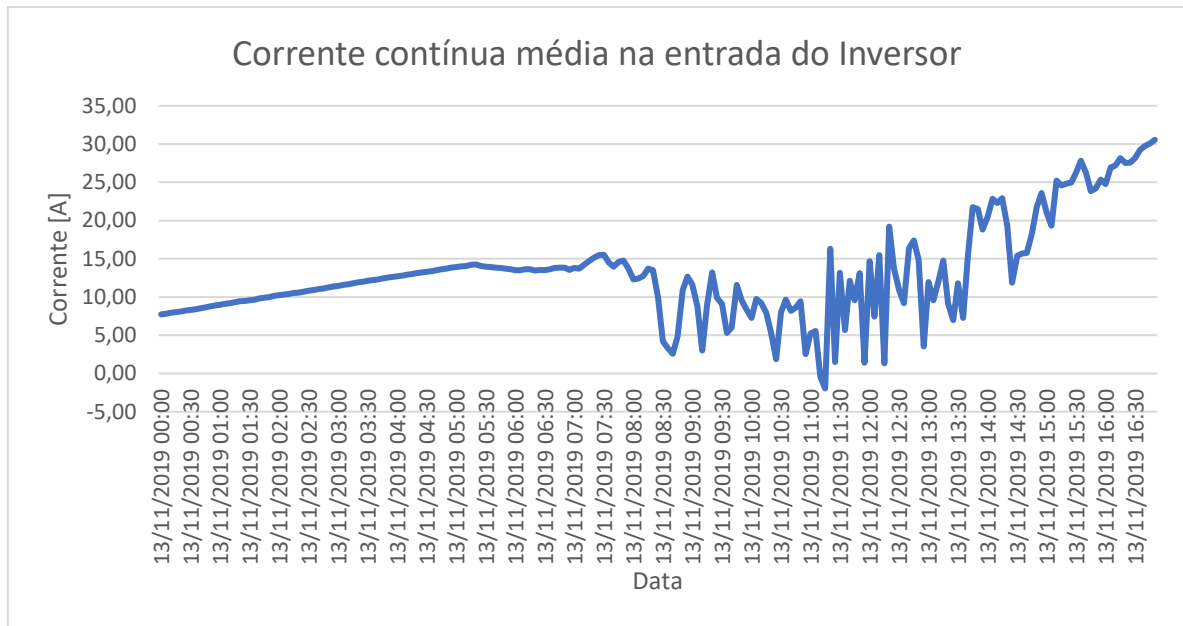


O gráfico dos valores médios de corrente registrados na entrada do inversor é apresentado na Figura 11. Nesse caso, nota-se que a corrente tem um comportamento ascendente ao longo de

todo o período de medição, inclusive durante a noite, quando não há incidência de irradiação solar nos módulos fotovoltaicos. Esse comportamento atípico nos leva à interpretação de que as medições foram feitas com algum vício ou falhas em sua realização. As principais hipóteses para a origem dessas inconsistências são:

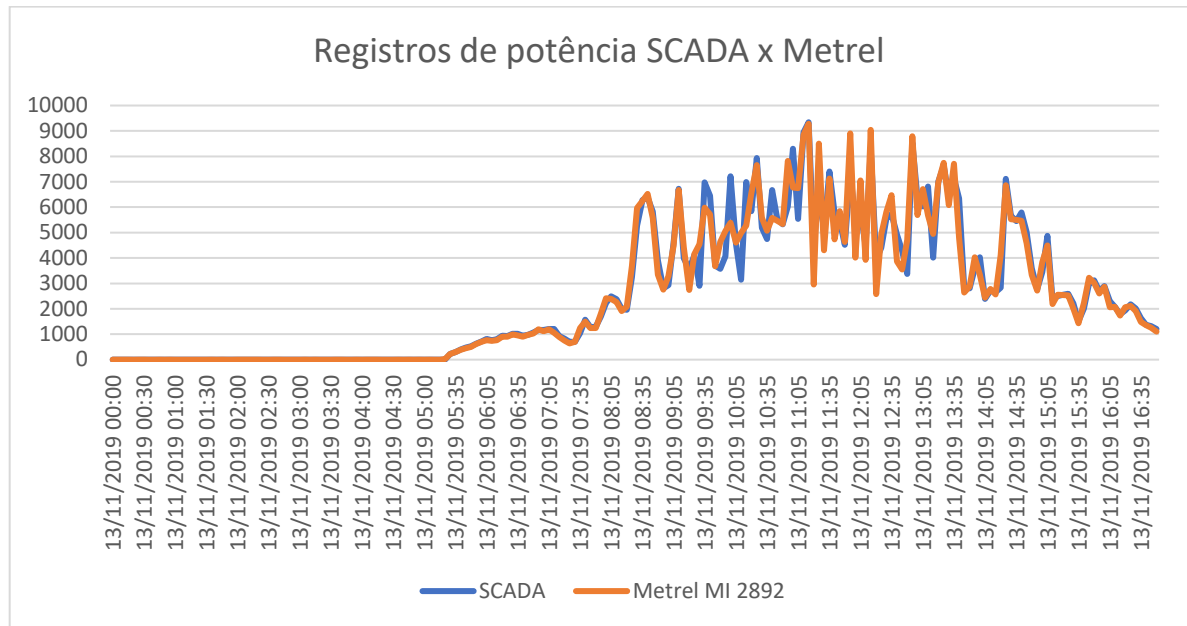
- instalação ou manuseio incorretos; conforme apresentado nas Figuras 4 e 5, as ligações dos instrumentos devem ocorrer em uma das formas previstas pelo fabricante de acordo com o objetivo da medição. Essa hipótese não é descartada apesar de todas as ligações terem sido realizadas com cautela e verificações prévias ao início do registro dos dados.
- configuração incorreta dos parâmetros do sensor no instrumento, uma vez que há uma série de variáveis a serem configuradas; o medidor portátil MI 2892 possui alguns parâmetros internos de configuração. Esses ajustes são necessários para que o equipamento possa aplicar as devidas relações de transformação e interpretação dos dados medidos. Por se tratar de um equipamento novo e ainda sem evidências desse tipo de medição na Metrum, empresa brasileira dona do instrumento, essa hipótese possui maiores chances de ser a verdadeira causa raiz das inconsistências nos dados.
- nível de corrente do sistema incompatível com a faixa de medição do sensor utilizado. O sensor de corrente utilizado, modelo A1636, possui faixa de medição de catálogo de 0 a 2000 A para corrente contínua. No entanto, como o nível de corrente máximo do sistema em análise está abaixo de 10% do valor em escala cheia do transdutor, é possível que erros maiores possam ter ocorrido porque os valores medidos estariam em uma faixa não linear do instrumento. Além disso, o manual de instruções do sensor não é claro quanto à forma de configuração, ajuste de zero e instalação do equipamento.

Figura 11 – Gráfico da corrente contínua média na entrada do inversor monitorado.



Diante das inconsistências identificadas na medição de corrente contínua na entrada do inversor, foram solicitados os dados do sistema SCADA para comparação com os valores medidos pelo *Metrel MI 2892* e posterior análise da eficiência de conversão. A Figura 12 apresenta uma comparação gráfica entre os valores de potência total na saída do inversor, registradas pelo sistema SCADA e pelo medidor portátil *Metrel MI 2892*. Essa comparação é importante para certificar que os instrumentos mediram valores iguais ou próximos, uma vez que os intervalos de medição e integração entre eles foram diferentes.

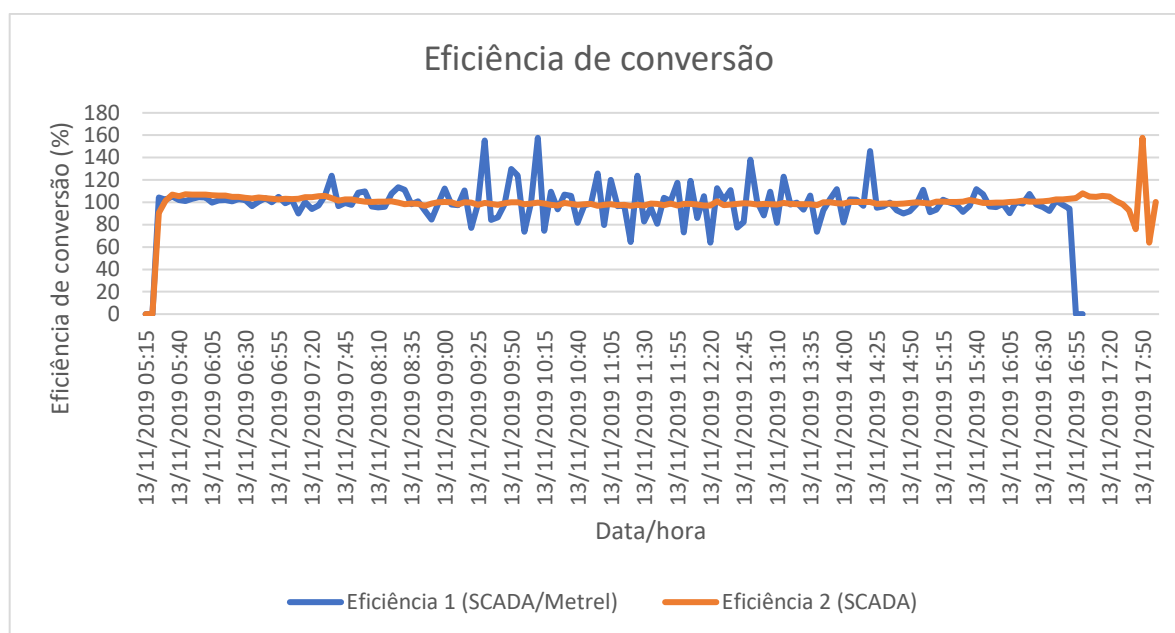
Figura 12 – Gráfico da potência na saída do inversor monitorado (SCADA x Metrel).



Como pode ser observado na Figura 11, os valores medidos pelo sistema SCADA e pelo medidor portátil *Metrel MI 2892* foram próximos, com exceção de uma faixa medida entre 09h20min e 11h05min. Essa diferença deve-se, provavelmente, à falta de sincronismo entre os instrumentos.

Com os dados coletados, medidos pelo *Metrel MI 2892* na saída do inversor e pelo sistema SCADA medidos na entrada do inversor, foi possível calcular a eficiência de conversão conforme a equação 1, definida pela IEC 61683. A Figura 13 apresenta os gráficos das eficiências de conversão calculadas para o período em análise.

Figura 13 – Gráfico da eficiência de conversão calculada com medições mistas (SCADA/Metrel).



Os valores mínimos, médios e máximos para ambas as formas de cálculo aplicadas, considerando tanto as medições do Metrel+SCADA quanto considerando apenas o SCADA, são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Dados de potência medidos na entrada e saída do inversor.

	SCADA+Metrel	SCADA
η_{\min} (%)	63.80	90.61
η_{med} (%)	100.27	100.26
η_{\max} (%)	157.67	107.15

De acordo com as faixas de potência apresentadas na Tabela 2 e com os fatores de ponderação da Tabela 3, definidos pela CEC, as eficiências CEC e EN podem ser calculadas. Para isso, foram excluídas as amostras que não pertenciam às faixas de potência definidas na Tabela 2. Logo, após a aplicação desses critérios, a classificação das amostras ficou conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Dados de potência medidos na entrada e saída do inversor.

	Soma das amostras	Número de amostras	Eficiência Média (%)
η 10%	1413.38	14	100.96

	Soma das amostras	Número de amostras	Eficiência Média (%)
η 20%	1165.36	12	97.11
η 30%	740.68	8	92.59
η 50%	1837.98	19	96.74
η 75%	641.21	6	106.87
η 100%	0	0	-

Pela análise dos valores de eficiência apresentados na Tabela 11, são observados valores de eficiência de conversão superiores a 100%, o que, do ponto de vista técnico, não seria possível acontecer. Pelo fato de os inversores operarem em níveis de eficiência próximas de 100%, pequenos erros de medição e calibração dos instrumentos podem ocasionar grandes desvios nos cálculos, o que provavelmente tenha ocorrido neste caso.

Aplicando-se os valores de eficiência na Equação 5, reescrita abaixo, calculam-se as eficiências CEC e EN. É importante ressaltar que, no caso das amostras realizadas, seria necessária a repetição das medições, pois não houve nenhuma amostra na faixa considerada aceitável para o nível de 100% da potência nominal do inversor. Nesse estudo, foi aplicada eficiência unitária nessa faixa para fins de estudos e comparação com a eficiência indicada no catálogo do equipamento. Sendo assim, a seguir são apresentados os cálculos e seus respectivos valores:

$$\begin{aligned}\eta wtd_{CEC} &= F_1 x \eta_{10} + F_2 x \eta_{20} + F_3 x \eta_{30} + F_4 x \eta_{50} + F_5 x \eta_{75} + F_6 x \eta_{100} \\ &= 0,04 x 1,0096 + 0,05 x 0,9711 + 0,12 x 0,9259 + 0,21 x 0,9674 \\ &\quad + 0,53 x 1,0687 + 0,05 x 1 = \mathbf{101,96\%}\end{aligned}$$

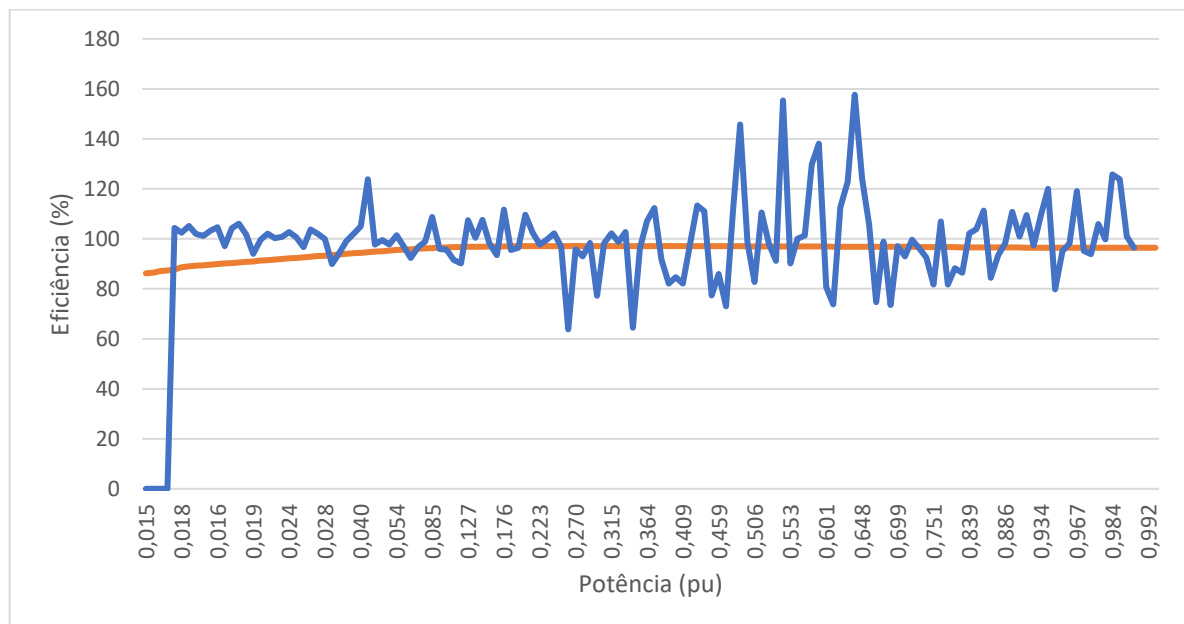
$$\begin{aligned}\eta wtd_{EN} &= F_1 x \eta_{10} + F_2 x \eta_{20} + F_3 x \eta_{30} + F_4 x \eta_{50} + F_5 x \eta_{75} + F_6 x \eta_{100} \\ &= 0,09 x 1,0096 + 0,13 x 0,9711 + 0,10 x 0,9259 + 0,48 x 0,9674 + 0 x 1,0687 \\ &\quad + 0,2 x 1 = \mathbf{97,40\%}\end{aligned}$$

Conforme calculado acima, com a mesma amostra de dados, foram obtidas eficiências distintas, segundo aplicação dos fatores de ponderação da norma europeia e californiana, sendo o valor obtido para a eficiência CEC absurdo do ponto de vista técnico. Essa divergência ocorreu porque os valores medidos acima de 100%, considerados absurdos,

ocorreram na faixa de potência cujo fator de ponderação da CEC possui um peso mais significativo, enquanto na norma europeia essa faixa possui peso menor.

Os valores calculados apresentaram uma divergência significativa entre si devido ao maior peso do fator de ponderação para a faixa de 100% da potência nominal dado no cálculo da eficiência europeia. A seguir, na Figura 14, é apresentada a curva de eficiência disponibilizada pelo fabricante comparada àquela levantada com os resultados das medições realizadas.

Figura 14 – Comparação entre as Curvas de Eficiência x Carregamento fornecida pelo fabricante do inversor e os valores medidos.



Comparando-se os valores medidos e calculados e àqueles constantes no catálogo do fabricante do inversor, nota-se uma similaridade significativa. O valor de eficiência máxima calculada foi 157,65%, enquanto no catálogo do equipamento é indicado um valor de 98,3%. Uma vez que a eficiência superior a 100% é, do ponto de vista científico, absurda, a divergência nos valores deve estar relacionada à falta de sincronismo entre os instrumentos utilizados, associada às incertezas inseridas pelos erros dos sensores e equipamentos de medição. A divergência nas medições para a eficiência de conversão segundo os fatores de ponderação CEC ou EN também são significativas e podem ser justificadas com o mesmo embasamento adotado para as divergências encontradas na eficiência máxima.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os principais objetivos desse trabalho foram a realização de um estudo bibliográfico dos principais padrões de medição de eficiência de inversores para aplicação em sistemas fotovoltaicos e entender como esse tipo de averiguação poderia ser realizada em equipamentos instalados em campo e que já estejam em operação. Além disso, foi proposta a realização de medição da eficiência de um equipamento em operação para análise e comparação com as informações fornecidas pelo fabricante. Constatou-se que, os padrões de ensaios propostos pelas normas internacionais, apesar de flexíveis para avaliação de alguns parâmetros, são inviáveis de serem realizadas em inversores *on-site* devido a algumas das restrições impostas, tais como controle da temperatura sob a qual o equipamento é submetido e tensões de entrada e saída no equipamento.

Os padrões internacionais estudados foram a IEC 61683, EN 50530 e o *Performance Test Protocol for Evaluating Inverters Used in Grid-Connected Photovoltaic Systems*, esse adotado pela Comissão de Energia da Califórnia como o padrão a ser seguido para medir a eficiência de inversores fotovoltaicos e homologar o uso desses equipamentos no estado. O foco principal dos três padrões é a verificação da eficiência de conversão da energia em corrente contínua provida pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada, com algumas diferenças entre elas nos quesitos de parâmetros avaliados, condições ambientais e requisitos dos equipamentos utilizados para ensaios.

As medições propostas foram realizadas na Usina Experimental Fotovoltaica TESLA Engenharia de Potência da UFMG. Foram encontradas dificuldades na coleta dos dados devido a problemas relacionados ao sensor de corrente contínua utilizado, modelo A1636, de fornecimento do mesmo fabricante do medidor *Metrel* MI 2892. Alternativamente, foram utilizados os dados coletados pelo sistema SCADA da usina para manter a possibilidade de análise comparativa com os dados do fabricante do inversor. Com as informações coletadas, foi possível identificar que os valores medidos e a referida eficiência de conversão são, de um modo geral, consistentes.

Ficou comprovado que, para que haja a aplicação completa ou aproximada dos padrões internacionais de medição da eficiência em equipamentos em campo, há uma série de desafios

a serem superados, pois, pequenos erros de medição podem impactar de forma significativa a estimativa de eficiência do conversor. Além disso, fatores ambientais, como temperatura e umidade, podem influenciar na calibração dos instrumentos, o que significa a inserção de uma fonte de erro adicional nas medições. Dessa forma, apesar dos resultados preliminarmente indicarem uma congruência com os dados de catálogo do fabricante, a validade das normas IEC61680, CEC e EN nas condições climáticas brasileiras para ensaios em campo ainda se mostra em aberto. Portanto, a realização de um estudo do tipo de instrumentação a ser empregada neste tipo de serviço se faz necessária.

Com o intuito de possibilitar a realização de medições futuras com maiores exatidão e precisão, a seguir são listadas as possíveis melhorias nos procedimentos adotados para coleta dos dados com finalidade de avaliação da eficiência de conversão:

- uso de equipamentos calibrados em laboratório independente;
- monitoramento e registro da temperatura e umidade no ambiente ao qual o inversor está exposto, bem como dos níveis de irradiação aos quais os módulos fotovoltaicos estão submetidos;
- medições por períodos mais longos e em diferentes condições climáticas, que possibilitem coletas de dados em todas as faixas de operação sob diferentes condições, os quais poderiam proporcionar uma análise mais completa;
- uso de mecanismo de sincronismo entre os equipamentos que realizam as amostragens dos dados na entrada e saída dos inversores.

Como propostas de continuidade desse trabalho, são indicadas análises investigativas com instrumentos calibrados em laboratórios independentes para verificações das eficiências de conversão de múltiplos modelos de inversores, com o intuito de fazer uma comparação mais precisa e exata acerca da eficiência de catálogo e avaliar se existem vícios na homologação de inversores para inserção no mercado.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Normas técnicas: você sabe o que é e para que servem?** Disponível em: “<http://www.abnt.org.br/imprensa/releases/5698-normas-tecnicas-voce-sabe-o-que-e-e-para-que-servem>”. Acesso em: 01 set. 2019.

AARNIOVUORI, L.; KOSONEN, Antti; SILLANPÄÄ, P.; NIEMELÄ, Markku. **High-Power Solar Inverter Efficiency Measurements by Calorimetric and Electric Methods.** Disponível em: “https://www.researchgate.net/publication/260496550_High-Power_Solar_Inverter_Efficiency_Measurements_by_Calorimetric_and_Electric_Methods/citation/download”. Acesso em: 03 out. 2019.

BORTOLINI, Ricardo Jochann Franceschi. **Ensaio automatizado de medição da eficiência energética de inversores fotovoltaicos conectados à rede.** 2018. Disponível no repositório da UFSM em “<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/16570>”. Acesso em: 09 ago. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Matriz Energética e Elétrica.** Disponível em: “<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>”. Acesso em 09 nov. 2019.

EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE. **About us.** Disponível em: “<https://www.etsi.org/about>”. Acesso em: 01 set. 2019.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Who we are.** Disponível em: “<https://www.cen.eu/about/Pages/default.aspx>”. Acesso em: 01 set. 2019.

EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION. **Who we are.** Disponível em: “<https://www.cenelec.eu/aboutcenelec/howeare/index.html>”. Acesso em: 01 set. 2019.

LOOP SOLAR. **Datasheet for more popular models.** Disponível em: “<https://loopsolar.com/datasheet/sma-solar/sma-sunny-tripower-three-phase5-12kw-string-inverter-india.pdf>”. Acesso em 17 nov. 2019.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61683:1999 **Photovoltaic Systems - Power conditioners - Procedure for measuring efficiency.** Disponível em: “<http://cdn14.21dianyuan.com/download.php?id=49790>”. Acesso em: 04 out. 2019.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Who we are.** Disponível em: “<https://www.iec.ch/about/profile/?ref=menu>” Acesso em: 01 set. 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **We’re ISO: we develop and publish International Standards.** 2018a. Disponível em: “<https://www.iso.org/standards.html>”. Acesso em: 01 set. 2019.

NEWMILLER, Jeff; BLODGETT, Douglas; GONZALEZ, Sigifredo. **Performance Test Protocol for Evaluating Inverters Used in Grid-Connected Photovoltaic Systems.** 2015. Disponível em: “<https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2015/154418r.pdf>”. Acesso em: 09 ago. 2019.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Geração de Energia**.2019.
Disponível em: “http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx”. Acesso em: 12 ago. 2019.