

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

João Vítor Marques Antunes

**Desenvolvimento de um equipamento
portátil para verificação em campo de
medidores de energia**

Belo Horizonte

2020

João Vítor Marques Antunes

**Desenvolvimento de um equipamento portátil para
verificação em campo de medidores de energia**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Clever Sebastião Pereira Filho

Coorientador: Carmela Maria Polito Braga

Belo Horizonte

2020

A636d

Antunes, João Vítor Marques.

Desenvolvimento de um equipamento portátil para verificação em campo de medidores de energia [recurso eletrônico] / João Vítor Marques Antunes. - 2020.

1 recurso online (x, 83 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Clever Sebastião Pereira Filho.

Coorientadora: Carmela Maria Polito Braga.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f.79-83.

Bibliografia: f. 77-78.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Medidores elétricos - Teses.
3. Calibração - Teses. I. Pereira Filho, Clever Sebastião. II. Braga, Carmela Maria Polito III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)

**"Desenvolvimento de Um Equipamento Portátil Para
Verificação Em Campo de Medidores de Energia"**

João Vítor Marques Antunes

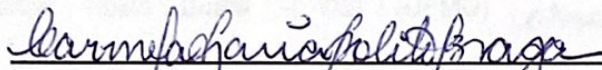
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 17 de fevereiro de 2020.

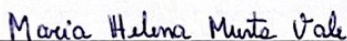
Por:



Prof. Dr. Clever Sebastião Pereira Filho
DEE (UFMG) - Orientador



Profa. Dra. Carmela Maria Polito Braga
DELT (UFMG) - Coorientadora



Prof. Dr.ª. Maria Helena Murta Vale
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Lenin Martins Ferreira Moraes
DELT (UFMG)

Dedico esta dissertação de mestrado aos meus pais, João e Natalina, que, com seus conselhos e incentivos, me ensinaram a importância do estudo para minha vida.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos meus pais João e Natalina, que sempre me apoiaram nos estudos, não sendo diferente no mestrado, e em quem sempre me inspirei, pela simplicidade e honestidade.

Ao meu pai, pelo esforço em me auxiliar e querer me passar seus conhecimentos, pela orientação e paciência nos momentos de discussão técnica, e pelas sugestões e correções que foram de extrema relevância para a conclusão deste trabalho.

À minha mãe, pelo carinho, conselhos e apoio incondicional, que me deram suporte para concluir mais esta etapa, e cujos ensinamentos vão além desta dissertação. Aos meus irmãos André, Joaquim, Sandra e Juliana pelo apoio, incentivo e por desejarem sempre o melhor para mim.

Agradeço à minha namorada Gabriela por todo o amor, apoio e incentivo dado, o que contribuiu para a conclusão deste trabalho.

À vocês, minha família, sou grato por tudo que sou e por tudo que consegui conquistar até aqui.

Agradeço aos meus orientadores, Clever Sebastião Pereira Filho e Carmela Maria Polito Braga, que me proporcionaram esse sentimento de realização e sucesso.

À professora Carmela Braga, pela orientação atenciosa e dedicada, cuja disposição e auxílio contribuíram significativamente que eu conseguisse concluir o mestrado com êxito.

À Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) que ao longo dos últimos 10 anos me proporcionou um ensino de qualidade, tanto na graduação como na pós-graduação. Aos professores do LRC pelas disciplinas ministradas, pela disponibilidade e disposição em ensinar, e por todo o aprendizado.

Agradeço também ao meu coordenador do trabalho, José Calazans, pela orientação técnica, pelas conversas e soluções encontradas em conjunto e pela disponibilidade em ajudar, o que contribuiu substancialmente no desenvolvimento do equipamento assunto desta dissertação.

Aos amigos do trabalho, e da vida, Rafael Ramos, Felipe Prates e Matheus Rungue, pelos agradáveis, e engraçados, momentos de desenvolvimento de projetos, e pelas inúmeras

conversas que também contribuíram para o projeto do equipamento desenvolvido nesta dissertação.

Aos amigos no LRC, pela companhia, por toda ajuda em momentos difíceis e pelas agradáveis discussões. Em especial, ao Gustavo Diniz, pela parceria nos estudos em conjunto.

E por fim, aos demais familiares, amigos e colegas que de alguma forma, direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

"Conhecimento não é aquilo que você sabe, mas o que você faz com aquilo que sabe."
Aldous Huxley (1937 - 1963)

Resumo

Apresenta-se o desenvolvimento de um equipamento para verificação em campo de medidores de energia, portátil e leve, sem a dependência do uso de uma bateria para garantir seu funcionamento, capaz de executar os ensaios exigidos nas normas técnicas vigentes no Brasil, proporcionando uma redução significativa nos prazos e custos envolvidos no procedimento padrão atual. O instrumento automatiza todos os ensaios necessários, implementando a metodologia de inspeção e ensaios de verificação, possui capacidade de fornecimento de corrente de até 50 A e imprime, via impressora Bluetooth, um laudo técnico, in loco, com as principais informações do processo de verificação. São apresentados os requisitos técnicos necessários para que um instrumento deste tipo seja viável e como o verificador desenvolvido atende a estes requisitos. Evidencia-se as vantagens de sua utilização, bem como uma análise técnica, abordando suas principais funcionalidades e características relevantes de hardware e software, é realizada. Um MVP do equipamento foi calibrado por laboratório credenciado, tendo todas as suas funcionalidades validadas. Já possui modelo comercialmente disponível. Trata-se de uma solução inovadora no sentido de que seu uso reduz os custos e prazos relacionados a um procedimento padrão de verificação de medidores de energia.

Palavras-chave: Verificação em campo. Instrumento portátil. Padrão de energia. Irregularidades e Perdas. Carga fantasma.

Abstract

It is presented the development of a portable and lightweight equipment for energy meter calibration on field, without relying on the use of a battery to ensure its operation, capable of performing all necessary tests required by current technical standards in Brazil, providing a significant cost reduction and shortening the duration of the whole current process. The instrument automates all tests, has its own load up to 50 A and prints, via Bluetooth printer, an on site technical report with the main information of the measurement process. Technical requirements for the device to be viable are presented. It is shown the advantages of its use, as well as a technical analysis of its main functionalities and relevant hardware and software resources. An equipment's MVP was calibrated by an accredited laboratory, having all its functionalities validated. It already has a commercially available model. It is an innovative, point-of-use market solution for the entire field calibration process, reducing costs and lead time related to a standard energy meter verification procedure.

Keywords: Field Calibration, Portable Instrument, Power Standard, Irregularities and Losses, Virtual Load.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Diagrama representativo dos componentes internos de um medidor monofásico eletromecânico. Fonte: http://blog.novaeletronica.com.br/medidor-de-energiaeletrica Acessado em: 16/02/2020	21
Figura 2 – Medidor monofásico eletrônico com mostrador ciclométrico e digital. Fonte: https://www.minulight.com.br/energia-eletrica/medidores-de-energia/medidoreletronico-monofasico-cronos-6001-e-6021 Acessado em: 16/02/2020	21
Figura 3 – Medidor Monofásico eletromecânico de 1 elemento 2 fios e seu diagrama elétrico simplificado. Fonte: Autor	22
Figura 4 – Tabela explicativa dos índices do medidor monofásico. Fonte: Autor	22
Figura 5 – Medidor Bifásico eletrônico de 2 elemento 3 fios e seu diagrama elétrico simplificado. Fonte: Autor	23
Figura 6 – Tabela explicativa dos índices do medidor bifásico. Fonte: Autor	23
Figura 7 – Medidor Trifásico eletromecânico de 3 elemento 4 fios e seu diagrama elétrico simplificado. Fonte: Autor	24
Figura 8 – Tabela explicativa dos índices do medidor trifásico. Fonte: Autor	24
Figura 9 – Bancada de Ensaio de Medidores de Energia de 10 posições. Fonte: Metrum	27
Figura 10 – Limites de erros(%) por classe para medição ativa em campo. Fonte: (1)	34
Figura 11 – Limites de erros(%) por classe para medição ativa em Laboratório. Fonte: (1)	34
Figura 12 – Equipamento Smartem M100 e aplicativo para celular ou tablet. Fonte: Autor.	38
Figura 13 – Sequência de operações do instrumento. Fonte: Autor.	39
Figura 14 – Diagrama de blocos representativo básico do Smartem. Fonte: Autor.	40
Figura 15 – Exemplo de autotransformador elevador de tensão. Fonte: Autor.	41
Figura 16 – Autotransformador elevador de tensão utilizado no Smartem. Fonte: Autor.	42
Figura 17 – Exemplo de transformador comum. Fonte: Autor.	44

Figura 18 – AutoTransformador utilizado no Smartem. No primário manteve-se o autotrafo e no secundário foi inserido a carga fantasma. $N_p \gg N_s$. Fonte: Autor.	45
Figura 19 – Esquema do primário e secundário do Autotransformador utilizado no Smartem, conectado a um medidor de energia. Fonte: Autor.	46
Figura 20 – Gráfico representativo da variação do erro para diferentes quantidades de pulsos. Fonte: Autor.	51
Figura 21 – Conjunto de 50 aferições do Smartem em um medidor eletrônico com erro de -0,03%. Fonte: Autor.	52
Figura 22 – Gráfico representativo da variação do erro para diferentes quantidades de pulsos. Fonte: Autor.	52
Figura 23 – Gráfico representativo da variação do erro para diferentes quantidades de pulsos. Fonte: Autor.	53
Figura 24 – Gráfico representativo da variação do erro para diferentes quantidades de pulsos. Fonte: Autor.	54
Figura 25 – Diagrama de blocos representativo da PCI de Controle do equipamento Smartem. Fonte: Autor.	55
Figura 26 – Diagrama de blocos representativo da PCI de Relés do equipamento Smartem. Fonte: Autor.	56
Figura 27 – Diagrama de blocos representativo da PCI da Fonte do equipamento Smartem. Fonte: Autor.	57
Figura 28 – Tela de definição do modo de funcionamento do aplicativo. Fonte: Autor.	57
Figura 29 – Fluxograma do funcionamento do aplicativo no modo básico. Fonte: Autor.	58
Figura 30 – Fluxograma do funcionamento do aplicativo no modo Completo. Fonte: Autor.	58
Figura 31 – Tela com os testes de Curto e de sensor, necessários para habilitar o usuário a realizar os ensaios exigidos por norma. Fonte: Autor.	59
Figura 32 – Tela com os dados do medidor sob teste. Os dados carregam sozinhos para medidores pré-cadastrados no aplicativo. Fonte: Autor.	60
Figura 33 – Tela de Ensaios do App Smartem. Fonte: Autor.	61
Figura 34 – App Smartem mostra um gráfico do valor RMS da tensão, corrente e andamento do ensaio em tempo real. Fonte: Autor.	61
Figura 35 – Opções do Menu superior do aplicativo Smartem. Fonte: Autor.	62
Figura 36 – Diagrama de blocos representativo completo do equipamento Smartem. Fonte: Autor.	63
Figura 37 – Tabela de Tensões de teste para isolamento sólido em circuitos/instrumentos CAT IV. Fonte: (2)	65

Figura 38 – Tabela de Tensões de teste para avaliar o estresse a longo prazo do isolamento sólido em circuitos/instrumentos CAT IV. Fonte: (2)	65
Figura 39 – Funções dos componentes externos do equipamento Smartem. Fonte: Autor.	70
Figura 40 – Funções dos componentes externos do equipamento Smartem. Fonte: Autor.	70
Figura 41 – Laudo Técnico emitido pela CEMIG durante uma inspeção, gerado no aplicativo Smartem e impresso pela impressora térmica portátil. Fonte: Autor.	71
Figura 42 – Smartem conectado a um medidor monofásico de energia e um tablet com o aplicativo aberto na página inicial. Fonte: Autor.	71
Figura 43 – Smartem com o selo de homologação da ANATEL e sua impressora portátil bluetooth para emissão de Laudo Técnico em campo. Fonte: Autor.	72
Figura 44 – Bancada de calibração monofásica Smartem. Fonte: Autor	73

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
RTM	Regulamento Técnico Metrológico
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
LEM	Laboratório Eletrônico de Medição da Cemig
RBC	Rede Brasileira de Calibração
IEC	International Electrotechnical Commission
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
PNT	Perdas Não Técnicas
CM	Carga Maior
CP	Carga Pequena
PCI	Placa de Circuito Impresso
ADC	Analogic to Digital Converter
MVP	Minimum Viable Product
I2C	Inter-Integrated Circuit
TOI	Termo de Ocorrência de Irregularidade

Lista de Símbolos

t	Tempo
K_d	Constante de pulsos de Medidores Eletromecânicos (Wh/revolução)
K_e	Constante de pulsos de Medidores Eletrônicos (Wh/pulso)
N_e	Número de Elementos do medidor de Energia
V_N	Tensão Nominal
I_{min}	Corrente mínima em ampères no transformador
I_{med}	Corrente máxima em ampères no transformador
I_{max}	Corrente máxima em ampères no transformador
N_p	Número de enrolamentos do enrolamento do primário do transformador
N_s	Número de enrolamentos do enrolamento do secundário do transformador
$E_{medidor}$	Energia medida em Wh pelo medidor sob análise
$E_{smartem}$	Energia medida em Wh pelo calibrador SMARTEM
$Erro(\%)$	Erro em % obtido pelo Calibrador SMARTEM
Res_V	Resolução da medição de Tensão
Res_I	Resolução da medição de Corrente
α	Coefficiente de Temperatura
T	Temperatura final
T_0	Temperatura inicial
R_{final}	Resistência final
$R_{inicial}$	Resistência inicial

Sumário

1	Introdução	17
1.1	Medição de Energia Elétrica	17
1.2	Objetivo Principal	18
1.3	Motivação e Justificativa	18
1.4	Estrutura da Dissertação	18
2	Contextualização	20
2.1	Medidores de Energia	20
2.1.1	Princípio de Funcionamento	20
2.1.2	Tipos de Medidores	22
2.2	Normatização Vigente	24
2.3	Terminologia Adequada	25
2.4	Procedimentos Adotados Atualmente	26
2.4.1	Bancadas de Verificação	26
2.4.2	Relevância dos Custos e Prazos Envolvidos	27
2.5	Verificação em Campo de Medidores de Energia	28
2.6	Comentários finais	29
3	Metodologia de Inspeção e Ensaios Para Verificação	31
3.1	Inspeção Inicial	31
3.2	Marcha em Vazio	32
3.3	Mostrador	33
3.4	Exatidão	33
3.5	Comentários Finais	35
4	Equipamento Desenvolvido	36
4.1	Metodologia de Desenvolvimento e Percurso	36
4.2	Diagrama Representativo Básico e Fluxo de Operações	39
4.3	Carga Fantasma	40
4.3.1	Autotransformador - Tensão	40
4.3.2	Autotransformador - Corrente	44
4.3.3	Variação da corrente com a temperatura	48
4.4	Padrão de Medição	50
4.5	Processador e Periféricos	54
4.6	Aplicativo Smartem	57
4.7	Diagrama Representativo Completo	63
4.8	Certificações	64
4.8.1	Categoria de Sobretensão	64
4.8.2	Homologação da Anatel	66

4.8.3	Verificação do Equipamento Desenvolvido	67
4.9	Comentários Finais	67
5	Verificador de Medidores de Energia - SMARTEM	69
5.1	Kit SMARTEM	69
5.1.1	Uso em Laboratório	72
5.2	Aplicação Comercial	72
5.3	Comentários Finais	74
6	Conclusão	75
6.1	Sugestão de trabalhos futuros	76
 Referências		 77
 Anexo A Certificado de Calibração do Smartem no Laboratório Eletrônico de Medição - LEM - CEMIG		 79

Capítulo 1

Introdução

1.1 Medição de Energia Elétrica

A medição de energia elétrica residencial, comercial ou industrial, é feita através de medidores do consumo de energia instalados estrategicamente entre a concessionária e o consumidor. Na prática, em termos comerciais, estes dispositivos representam a fronteira entre a produção de energia e o consumo. É a forma de mensurar a energia consumida pelo usuário, a fim de permitir à empresa fornecedora o faturamento adequado, com base em uma tarifa pré-estabelecida.

Dessa forma, para garantir uma medição de energia precisa e condizente com o consumo do usuário, as empresas fabricantes de medidores de energia devem, além de calibrá-los, realizar alguns testes e ensaios, de acordo com um ou mais regulamentos técnicos estabelecidos pela agência reguladora do setor (ANEEL) e do organismo nacional de metrologia (INMETRO), antes de liberá-los para serem instalados. Este procedimento se vê necessário, pois evita que a concessionária e o cliente sejam prejudicados com medições errôneas e, conseqüentemente, cobranças equivocadas.

Porém, estes medidores podem apresentar problemas mesmo após serem testados e instalados no cliente. Estes problemas podem ser, desde uma simples descalibração dos parâmetros de medição, até o resultado de algum defeito de fabricação, algum dano causado pela exposição ao tempo ou, em alguns casos, devido a alguma adulteração em seu funcionamento e, a partir daí, o consumo efetivamente realizado é equivocadamente assinalado pelo medidor.

Em qualquer um destes casos, a concessionária pode vistoriar e o cliente pode reivindicar uma vistoria, ou seja, uma verificação do medidor em questão para avaliar se sua calibração está em conformidade com as normas regulamentares, para constatar algum defeito ou para detectar alguma possível intervenção ilegal no medidor.

No caso de uma solicitação de verificação por parte do cliente, a concessionária

é obrigada, de acordo com a Resolução Normativa nº 414 (3), dentro de um período de no máximo 30 dias, aferir o medidor e informar o cliente sobre seu funcionamento adequado ou não. Atualmente, todo esse procedimento é feito em laboratório especializado, o que requer que este medidor seja retirado e transportado até lá.

1.2 Objetivo Principal

Neste contexto, o objetivo principal desta dissertação é apresentar e analisar as principais características e princípio de funcionamento de um verificador portátil de medidores de energia, cujo projeto teve início em 2017, com participação efetiva do autor desta dissertação, e aprimorado, ao longo dos últimos 3 anos. Tal equipamento se encontra em fase de comercialização desde meados de 2018.

O equipamento, apresentado neste texto, foi desenvolvido com o objetivo de permitir realizar, em campo, os mesmos procedimentos e ensaios feitos em laboratório, de acordo com as normas vigentes, no processo de verificação de medidores de energia. Porém, com o desafio de possuir elevada capacidade de fornecimento de corrente, até 50 A, sendo, ao mesmo tempo, leve e portátil.

Dessa forma, aborda-se sobre suas principais características de hardware, analisando e justificando as definições de projeto que moldam seu princípio de funcionamento. Também são apresentadas as características do software que o gerencia e estabelece, de forma simples e intuitiva, sua interface com o usuário.

Além disso, esta dissertação visa evidenciar as vantagens e benefícios para as concessionárias do uso deste equipamento.

1.3 Motivação e Justificativa

Tem-se como fator motivador para esta dissertação a inexistência, até então, de um estudo detalhado deste equipamento, com descrição do princípio de funcionamento, bem como uma análise técnica de algumas das suas características principais do projeto de hardware e funcionamento do software.

1.4 Estrutura da Dissertação

Para cumprir o objetivo mencionado, apresenta-se, inicialmente, para fins de contextualização, os principais tipos e características dos medidores de energia mais comuns no Brasil, a normatização vigente a que estes medidores estão submetidos para o caso de uma verificação, popularmente conhecido como aferição, e a terminologia adequada para esse procedimento. Estes itens compõem o início do capítulo 2 intitulado

Contextualização . Ainda neste capítulo, mostra-se como as concessionárias de energia do Brasil procedem em relação à verificação de medidores de energia por solicitação do usuário, qual a relevância dos custos e prazos envolvidos nesse processo e como foi uma verificação dos medidores feita em campo, torna esse procedimento mais eficiente, no que diz respeito ao tempo total do processo, e com menores custos associados. Uma breve introdução sobre o equipamento verificador, a ser analisado nessa dissertação, encerra a contextualização.

Para melhor compreensão das funcionalidades do equipamento, fez-se necessário apresentar de forma detalhada quais são os ensaios exigidos por norma para avaliar se um medidor está em condições de uso ou não. Todo o capítulo 3 intitulado **Metodologia de Inspeção e Ensaios Para Verificação** foi destinado para este fim.

No capítulo 4 **Equipamento Desenvolvido**, aborda-se o o desenvolvimento do dispositivo projetado, desde os motivos que levaram ao desenvolvimento do primeiro protótipo até a apresentação de um diagrama de blocos contemplando todas os principais elementos que o compõe. Neste capítulo aborda-se sobre seu princípio de funcionamento, bem como suas características eletroeletrônicas principais, acompanhadas de justificativas de porque foram adotadas. Também são exibidos fluxogramas de funcionamento, tanto do hardware quanto do software (aplicativo) a fim de possibilitar uma maior compreensão de suas características de projeto e funcionalidades.

Por fim, antes do capítulo 6 de discussão final e conclusões, dedicou-se o capítulo 5 para apresentação do instrumento final, suas características externas e acessórios. Além disso, neste capítulo foi exposto e comentado alguns feedbacks de concessionárias de energia que já estão fazendo uso do equipamento.

Capítulo 2

Contextualização

2.1 Medidores de Energia

2.1.1 Princípio de Funcionamento

Medidores de energia elétrica são dispositivos eletromecânicos ou eletrônicos capazes de medir o consumo de energia elétrica, normalmente na unidade quilowatt-hora(kWh), fornecida pela concessionária ao cliente.

O medidor eletromecânico (figura 1) funciona como resultado da interação entre dois fluxos magnéticos produzidos em bobinas específicas, internas ao equipamento. Estes fluxos são proporcionais à tensão e à corrente, respectivamente, em cada bobina. A interação entre estes campos promove o aparecimento das correntes de Foucault (4) em um fino disco de alumínio estabelecendo velocidade de giro proporcional aos campos magnéticos. Ao girar, este disco movimentava uma série de engrenagens, semelhantes às de um relógio, (por isso a denominação popular "relógio de luz") que por sua vez movem os mostradores ou registradores que integram a energia que é consumida em kWh.

Sendo assim, a concessionária responsável pelo fornecimento de energia elétrica cobra pela energia consumida pelo cliente com base nas leituras mensais indicadas no mostrador do medidor. Neste caso, a diferença nas leituras de dois meses consecutivos indica quantos quilowatts-hora foram consumidos naquele determinado mês. Além disso, cada giro completo do disco de alumínio corresponde a uma quantidade de energia discreta consumida, que é descrita pela constante K_d , cuja unidade comumente é Wh/revolução.

Já o medidor eletrônico (figura 2) faz a medição de energia através de transdutores de tensão e de corrente (TP e TC, respectivamente). Estes medem os sinais da entrada e integram a energia consumida em um mostrador digital. De forma similar aos medidores eletromecânicos, que fazem uso de um disco girante, os eletrônicos possuem um mecanismo semelhante, porém utilizando pulsos de um LED, que indica quando uma quantidade discreta da energia foi mensurada internamente. Com isso, cada pulso deste LED significa

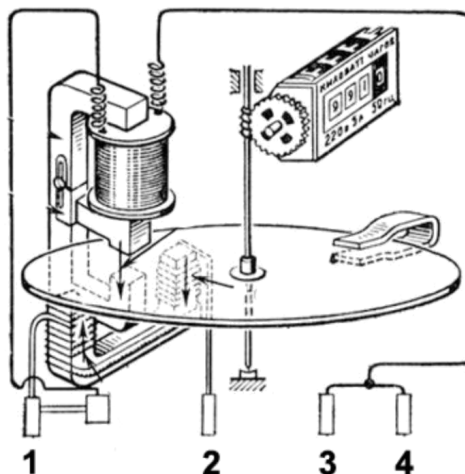


Figura 1 – Diagrama representativo dos componentes internos de um medidor monofásico eletromecânico. Fonte: <http://blog.novaeletronica.com.br/medidor-de-energiaeletrica> | Acessado em: 16/02/2020

que foi mensurado pelo medidor uma quantidade discreta, denominada K_e , de energia. A unidade de K_e é, normalmente, Wh/pulso. Medidores eletrônicos também possuem mostradores ciclométricos ou digitais que integram a energia que é consumida em kWh.



Figura 2 – Medidor monofásico eletrônico com mostrador ciclométrico e digital. Fonte: <https://www.minulight.com.br/energia-eletrica/medidores-de-energia/medidoreletronico-monofasico-cronos-6001-e-6021> | Acessado em: 16/02/2020

Para melhor compreensão, considera-se uma situação de dois medidores (um eletrônico e outro eletromecânico) instalados em residências diferentes onde está havendo consumo de energia. Caso o disco do medidor eletromecânico, cujo K_d é, por exemplo, 5 Wh/revolução, complete 4 giros completos, significa que foi mensurado pelo medidor uma quantidade de energia igual a 20 Wh. Da mesma forma, caso o LED do medidor eletrônico, cujo K_e é, por exemplo, 1 Wh/pulso, pulse 20 vezes, significa que foi mensurado pelo medidor a mesma quantidade de 20 Wh de energia.

2.1.2 Tipos de Medidores

Apesar de, no Brasil, segundo (5), a maioria dos medidores serem eletromecânico, a tendência atual é a substituição destes por medidores eletrônicos uma vez que este último aumenta a segurança em relação a fraudes nos medidores, dentre outras vantagens de acordo com (5).

Estes medidores podem ser, em geral, monofásicos (figura 3), bifásicos (figura 5) ou trifásicos (figura 7) dependendo da aplicação. Os medidores monofásicos mais comuns possuem 1 bobina de corrente e uma bobina de tensão referenciada ao neutro, o que caracteriza este medidor como um medidor a 2 fios, sendo um fio representando a fase e o outro representando o neutro. Neste caso, a bobina de corrente, de baixa resistência, é um "curto-circuito" entre a primeira e última conexão do medidor, como pode ser observado na figura 3. Já a bobina de tensão é um "circuito aberto" entre a fase e o neutro. O esquema elétrico da figura 3 evidencia de forma mais clara as conexões do medidor monofásico e o cliente/carga, sendo que a entrada do medidor é dedicada à fase da rede e sua saída para a carga na quarta conexão. A referência do sistema está em curto na segunda e terceira conexão.

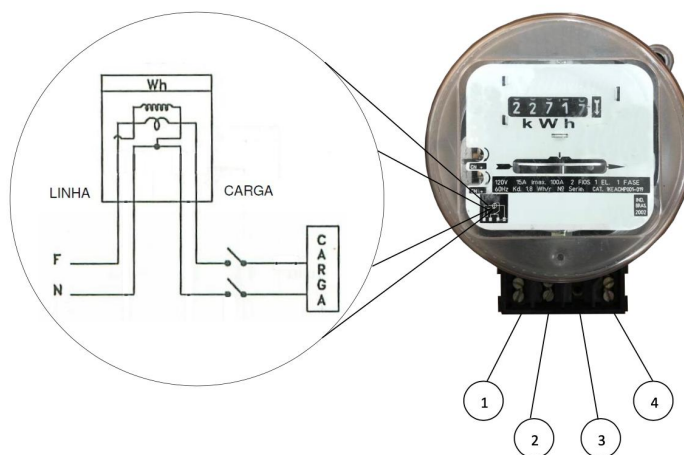


Figura 3 – Medidor Monofásico eletromecânico de 1 elemento 2 fios e seu diagrama elétrico simplificado. Fonte: Autor

Monofásico 1 elemento 2 fios	
Conexão	Função
1	Fase 1
2	Neutro
3	Neutro
4	Carga

Figura 4 – Tabela explicativa dos índices do medidor monofásico. Fonte: Autor

Da mesma forma, os medidores bifásicos mais comuns possuem 2 bobinas de corrente e 2 bobinas de tensão, uma para cada uma das fases, referenciadas ao neutro.

Portanto, são medidores de 2 elementos e 3 fios (duas fases e um neutro) como pode ser observado na figura 5. As bobinas de corrente, como mencionado anteriormente, são um "curto" entre a primeira conexão e a última e um "curto" entre a segunda conexão e a quinta. As conexões do meio sempre são conectadas ao neutro para este tipo de medidor. Na figura 5 pode ser observado o esquema elétrico das conexões de um medidor bifásico do tipo descrito.

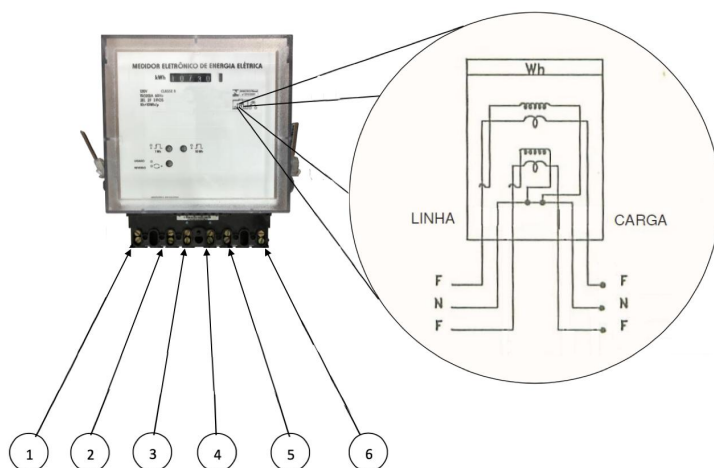


Figura 5 – Medidor Bifásico eletrônico de 2 elemento 3 fios e seu diagrama elétrico simplificado. Fonte: Autor

Bifásico 2 elemento 3 fios	
Conexão	Função
1	Fase 1
2	Fase 2
3	Neutro
4	Neutro
5	Carga
6	Carga

Figura 6 – Tabela explicativa dos índices do medidor bifásico. Fonte: Autor

Por fim, os medidores trifásicos mais comuns possuem 3 bobinas de corrente e 3 bobinas de tensão, uma para cada uma das fases, referenciadas ao neutro. Portanto, são medidores de 3 elementos e 4 fios (três fases e um neutro) como pode ser observado na figura 7. As bobinas de corrente compõem as 3 primeiras conexões e as 3 últimas, com as duas conexões centrais referenciadas ao neutro. Na figura 7 pode ser observado o esquema elétrico das conexões de um medidor trifásico do tipo descrito.

Existem ainda medidores com indicadores de corrente reversa, o que, basicamente, consiste em um LED que se acende para caso a corrente esteja fluindo do cliente para a concessionária. No caso de um medidor eletromecânico, isto se evidencia com o disco girando para o lado contrário da seta indicativa presente nos mesmos.

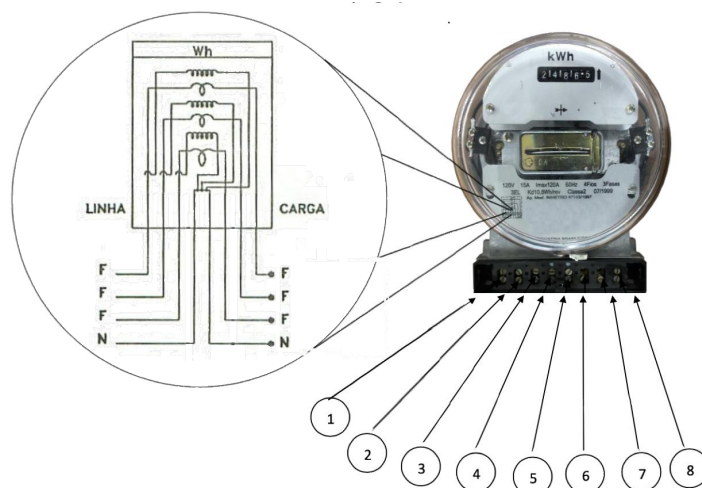


Figura 7 – Medidor Trifásico eletromecânico de 3 elemento 4 fios e seu diagrama elétrico simplificado. Fonte: Autor

Trifásico 3 elemento 4 fios	
Conexão	Função
1	Fase 1
2	Fase 2
3	Fase 3
4	Neutro
5	Neutro
6	Carga
7	Carga
8	Carga

Figura 8 – Tabela explicativa dos índices do medidor trifásico. Fonte: Autor

Além destes, existem diversos outros tipos de medidores com diferentes tipos de funcionalidades e aplicabilidades, como, por exemplo, medidores bidirecionais e medidores com capacidade de medir energia ativa e reativa. Medidores digitais, que armazenam e enviam dados para algum servidor ou nuvem também já são usados. Entretanto, como mencionado, os medidores mais comuns, no Brasil, são medidores eletromecânicos e eletrônicos com tensão referenciada ao neutro. Por esse motivo, o verificador portátil, abordado nesta dissertação, foi desenvolvido para aferir especialmente este tipo de medidores.

2.2 Normatização Vigente

Os Regulamentos Técnicos Metrológicos (RTM) estabelecidos pelo INMETRO, cujo cumprimento é obrigatório, são documentos que estabelecem os requisitos técnicos e metrológicos que instrumentos de medição devem satisfazer e os processos e os métodos relacionados que devem compor a metrologia legal. Dessa forma, no âmbito do tema abordado nesta dissertação, considera-se o Regulamento Técnico Metrológico (RTM),

aprovado pela Portaria nº 285 (6), e pela Portaria nº 587 (1). Estes regulamentos estabelecem as condições mínimas a serem observadas na especificação técnica de um medidor de energia, além de indicar quais as etapas para uma verificação inicial, em campo, antes de qualquer intervenção técnica, quais os procedimentos de verificação após reparos de medidores de energia e, por fim, quais ensaios devem ser realizados no procedimento de verificação ou aferição por solicitação do usuário/proprietário, em medidores eletromecânicos e eletrônicos, respectivamente, de energia elétrica ativa e/ou reativa, monofásicos e polifásicos.

Dentre as obrigatoriedades apresentadas em (6) e nº (1), o foco desta dissertação está na verificação por solicitação do usuário. Nela é estabelecida uma metodologia de realização de um conjunto de ensaios para verificação do medidor de energia por solicitação do usuário/proprietário com a possibilidade de realização destes ensaios em campo ou em laboratório. Todavia, este procedimento é comumente realizado em laboratório, credenciado pelo próprio INMETRO, por empresas especializadas em calibração, fabricantes de medidores de energia e concessionárias de energia uma vez que não se dispunha, até então, de um equipamento portátil que permitisse a realização destes ensaios em campo.

2.3 Terminologia Adequada

É importante mencionar que o termo "aferição", ainda muito usado por empresas do ramo de medição e energia, e também utilizado em alguns momentos nesta dissertação, por ser uma terminologia ainda muito presente no meio industrial, foi removido do Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) de 2012 (7). Segundo o VIM, os termos adequados envolvidos em neste processo são:

1. **Verificação:** Fornecimento de evidência objetiva de que um dado item satisfaz requisitos especificados.
2. **Calibração:** Operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidas por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação.
3. **Ajuste:** Conjunto de operações efetuadas num sistema de medição, de modo que ele forneça indicações prescritas correspondentes a determinados valores duma grandeza a ser medida.

Portanto, o processo de calibração compreende uma operação completa, em que os valores são verificados, e também são identificados erros e incertezas, registrados em um Certificado de Calibração, por laboratório credenciado.

Já o termo "aferição" de um medidor de energia descreve o processo de verificação da calibração de um equipamento de medição, ou seja, consiste na constatação de que o instrumento sob análise está em conformidade com as exigências regulamentares. Essa constatação se dá por meio da comparação do resultado do medidor com um padrão de referência, observando-se sua adequação com o erro máximo admissível para uma dada condição de uso (8). Portanto, tanto o serviço de calibração com ajuste ou somente o comparativo, recebem o mesmo nome de calibração, existindo então, a calibração com ajuste ou a calibração sem ajuste (ou simplesmente verificação).

Neste trabalho, o uso do termo "aferição" é evitado, sendo substituído por verificação ou calibração sem ajustes. O objetivo desta prática é, além de reforçar a importância de se implantar as terminologias adequadas estabelecidas pelo VIM (7), evidenciar a distinção entre o processo de calibração e o de verificação e facilitar a compreensão do uso destes termos em substituição ao termo removido.

2.4 Procedimentos Adotados Atualmente

Neste contexto, dada uma solicitação de usuário para verificação em campo ou dada a iniciativa da concessionária de fazê-lo, seja por suspeita de fraude ou de mal funcionamento de um determinado medidor, uma equipe técnica da própria concessionária é enviada ao local de instalação do medidor. Chegando lá, após uma observação técnica inicial (que é melhor descrita no capítulo seguinte) o medidor é colocado em um invólucro, lacrado e enviado, junto com outros medidores em situação similar, para um laboratório especializado. Lá são realizados os ensaios exigidos por norma e um laudo técnico final a respeito da condição de cada medidor é gerado para ser entregue ao cliente. Em geral, a quantidade de medidores para testes nestes laboratórios é considerável a ponto de necessitar que estes fiquem armazenados, aguardando para serem aferidos para constatar, ou não, seu mal funcionamento.

2.4.1 Bancadas de Verificação

Os laboratórios utilizam bancadas, equipadas com uma fonte trifásica de tensão, com capacidade de, normalmente, até 300Vac, e uma fonte trifásica de corrente, com capacidade de fornecimento de até 30A, para bancadas mais antigas, e 60A em bancadas mais atuais, capazes de fornecer a energia necessária para se realizar os procedimentos previstos nas portarias mencionadas em diferentes tipos de medidores, em várias posições, ou seja, com a possibilidade de se verificar, em geral, de 1 até 20 medidores, sejam eles monofásicos ou trifásicos, simultaneamente, dependendo da bancada.

Estes equipamentos são bancadas robustas compostas por uma rack com um dispositivo de fixação de diversas fotocélulas capazes de detectar pulsos dos medidores

eletrônicos ou revoluções dos discos de medidores eletromecânicos, e aparatos mecânicos para encaixe rápido de medidores, de forma a tornar mais simples e prático o processo de calibração.



Figura 9 – Bancada de Ensaio de Medidores de Energia de 10 posições. Fonte: Metrum

Além disso, cada posição destas bancadas possui um medidor padrão de energia, ou seja, um equipamento embutido ou um circuito especializado, com precisão pelo menos três vezes maior que a dos medidores sob análise (6) (1), capaz de medir a energia que passa através do medidor comum, auxiliando, por exemplo, na obtenção do erro de medição deste último.

Um software instalado em um computador embutido na bancada automatiza a rotina de ensaios e permite que a leitura dos dados medidos seja armazenada na memória do sistema e o resultado dos ensaios seja fornecido automaticamente. Na figura 9 pode-se observar um modelo padrão de Bancada de Ensaio de Medidores de Energia. É um sistema completo destinado a realizar ensaios em medidores de energia elétrica de diferentes categorias e classes de medição.

2.4.2 Relevância dos Custos e Prazos Envolvidos

No procedimento atual de verificação de medidores adotado pela maioria das concessionárias de energia brasileiras, a logística envolvida no processo de mobilização de uma equipe da empresa responsável para retirada do medidor de energia do cliente, instalação de um novo medidor no local, transporte destes até um laboratório credenciado, verificação do funcionamento adequado do mesmo e armazenamento é, muitas vezes, onerosa e demorada, visto que existem empresas que são responsáveis pela distribuição de energia em mais de um estado brasileiro podendo, o transporte de medidores até um laboratório, durar dias. O artigo 137 da resolução normativa 414 da ANEEL (3) diz que a concessionária deve realizar, em até 30 dias, a verificação de medidores de energia e demais equipamentos de medição que for solicitada pelo consumidor e, apenas com transporte, a empresa pode perder dias valiosos deste período pré-estabelecido.

Além disso, segundo (9), para a CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais, em 2010, o custo médio para uma unidade de medidor de energia ser levada a um laboratório para verificação atendendo um chamado do cliente era de R\$ 87,00 e que só neste ano, haviam sido avaliados 5.933 medidores. O fato é que 91% dos medidores enviados ao laboratório estavam funcionando corretamente e poderiam ter permanecido em campo, o que geraria uma economia de aproximadamente R\$ 470 mil reais. Ainda segundo (9), este dado foi similar nos 2 anos anteriores a 2010, fazendo com o que a economia, que seria gerada, atingisse quase R\$ 1,2 milhão, não sendo incluídos, neste montante, os medidores cujos clientes, que são convidados a comparecer no processo de verificação de seu medidor, não aparecem e podem solicitar nova verificação caso discordem do laudo final anterior. Este ônus existe não só para a CEMIG, mas para toda concessionária brasileira ou empresa especializada que realiza tais procedimentos.

2.5 Verificação em Campo de Medidores de Energia

Com base nos fatos apresentados, um equipamento capaz de realizar, em campo, os mesmos procedimentos que uma bancada de laboratório faz, no caso de uma verificação por solicitação do cliente, mas com a praticidade de se emitir um laudo técnico in loco no instante após a verificação atestando o funcionamento adequado ou não do medidor sob teste, elimina os gastos consideráveis da concessionária ou empresa responsável em relação aos medidores que apresentam bom funcionamento. Outro benefício do uso de um equipamento do tipo é a conclusão de todo o processo de verificação em apenas alguns minutos ao invés de até 30 dias, além de trazer maior transparência para o cliente uma vez que toda a verificação é feita na presença do próprio solicitante.

Dessa forma, desenvolveu-se um equipamento, que recebeu o nome fantasia de Smartem, capaz de realizar a verificação de medidores de energia em campo ou em laboratório, com o grande diferencial, em relação a dispositivos de calibração similares, como em (9), em (10) e em (11) que, em geral, possuem apenas um padrão gerenciado por um software de computador, de ser capaz de gerar sua própria corrente de carga de até 50A em corrente alternada, consumindo apenas 80 VA. Este requisito é de extrema utilidade a fim de reduzir o tempo de verificação em campo como é descrito adiante.

Durante o desenvolvimento do Smartem, foram definidas algumas características principais de forma a moldar um produto que, além de possuir os requisitos técnicos necessários para realizar a verificação de medidores de energia, fosse focado também na experiência do usuário e praticidade. Por esse motivo, todo controle e gerenciamento do equipamento é realizado por um aplicativo, de mesmo nome Smartem, simples e intuitivo, para tablet ou celular, com sistema operacional Android®^(R), não sendo necessário seu uso por parte de um especialista da empresa.

Além disso, o equipamento foi projetado para possuir um preço viável, ser leve e ter tamanho suficientemente pequeno, além de ergonomia, para ser segurado na mão, atendendo, sua proposta de ser portátil e, por fim, emitir, armazenar, imprimir ou compartilhar um laudo técnico após a realização de uma verificação.

Vale ressaltar o caráter inovador deste equipamento uma vez que, ao ser constatado uma possibilidade de otimização do tempo e redução dos custos do procedimento adotado atualmente pela maioria das concessionárias de energia, desenvolveu-se, desde suas funcionalidades básicas, até seu acabamento final, uma solução simples, mas completa, cujos benefícios funcionais, logísticos e econômicos são favoráveis à sua utilização.

É importante mencionar que o projeto deste dispositivo verificador, se iniciou em Janeiro do ano de 2017, fruto da atuação conjunta de uma equipe de projetistas, devido a uma demanda de algumas concessionárias de energia que necessitavam de um equipamento com tais características. Seu primeiro protótipo funcional foi montado em Março de 2017 e já em junho do mesmo ano concluiu-se seu primeiro MVP (Minimum Viable Product), que consiste em uma primeira versão comercializável, carente de melhorias e aperfeiçoamentos. Dessa forma, o equipamento que, no ato de realização desta dissertação, se encontra em fase de comercialização, sofreu diversos aperfeiçoamentos e adequações, nos anos seguintes, para se chegar ao produto atual, nomeado de Smartem M100, que é apresentado e analisado neste texto.

O autor desta dissertação é responsável por grande parte do processo de desenvolvimento do equipamento, contando com a colaboração de uma equipe técnica multidisciplinar, sobretudo para a implementação do aplicativo. Esta participação consistiu no projeto, desenvolvimento e teste de grande parte do hardware do dispositivo, na programação do firmware de seu processador e na definição dos protocolos de comunicação entre firmware e software. Além disso, promoveu aprimoramentos e contribuiu para diversas melhorias que moldaram o produto atualmente comercializado.

2.6 Comentários finais

Neste capítulo, exibe-se um conjunto de informações específicas no intuito de contextualizar sobre a área de aplicação do dispositivo projetado. Sendo assim, foi abordado sobre o funcionamento do objeto em que o equipamento portátil atua (os medidores de energia), as normas que moldam seu funcionamento, os benefícios de sua utilização em relação a custos e prazos envolvidos, comparando-se com os procedimentos adotados atualmente. Além disso, destaca-se como o procedimento atual se torna mais eficiente no que diz respeito ao tempo de espera do cliente para uma resposta sobre o funcionamento, ou não, de seu medidor de energia.

Evidencia-se também o desafio de se projetar um equipamento para verificação em

campo com as características essenciais de portabilidade, bem como ser capaz de fornecer 50 A de corrente, mesmo garantindo custos baixos de projeto.

Por fim, chama-se a atenção para o fato de o projeto do verificador ter sido iniciado em 2017, com participação efetiva do autor em todas as etapas de seu desenvolvimento e aprimoramento, auxiliado por uma equipe técnica de projetistas.

Após esta contextualização, tem-se uma visão mais ampla da área de atuação, aplicabilidade e motivação do desenvolvimento do dispositivo, nomeado de Smartem, para verificação de medidores de energia em campo.

Com isso, no capítulo seguinte, são apresentados os procedimentos e ensaios exigidos pelas normas (1) e (6) que um equipamento deve executar para realizar um processo de verificação válido, em conformidade com estas normas do INMETRO.

Capítulo 3

Metodologia de Inspeção e Ensaios Para Verificação

Em (6) e (1) são descritos diversos tipos de ensaios para validação de medidores de energia elétrica, tanto eletrônicos como eletromecânicos. Entretanto, o equipamento apresentado e analisado neste texto, se propôs a realizar apenas os ensaios exigidos no procedimento de verificação. Dessa forma, a seguir são descritos os procedimentos para uma verificação de medidores de energia, conforme exigido pelas normas do INMETRO.

3.1 Inspeção Inicial

O primeiro procedimento do técnico responsável, ao chegar no local onde ocorreu solicitação de verificação por parte do usuário, é avaliar as condições de instalação do medidor para decidir sobre a necessidade ou não da execução dos ensaios. Para isso, ele verifica a integridade dos lacres da concessionária, verifica se o modelo do medidor é o que consta instalado no local e, por fim, avalia a presença de falhas nas ligações ou danos físicos no mesmo. Constatada alguma irregularidade nesta primeira etapa, o medidor é retirado e substituído por um novo sem a necessidade de verificação. Caso contrário, ele inicia o procedimento para realização dos 4 ensaios apresentados a seguir, não necessariamente nesta ordem. Para isso, o técnico responsável deve desconectar o circuito de tensão e corrente do medidor, ou seja, desconectar o cabo proveniente da concessionária e o cabo da carga, para que o mesmo esteja isolado de qualquer interferência externa no processo de verificação.

Todo este processo é previsto no aplicativo Smartem para Android® e mesmo não havendo execução dos ensaios descritos nas próximas etapas, um laudo técnico final é emitido contendo todas as constatações evidenciadas. Vale mencionar que não é necessário que o técnico escreva (digite no tablet) todas as irregularidades encontradas, visto que o aplicativo permite um pré-cadastro dos tipos de problemas mais comuns, reduzindo o

tempo de verificação, uma vez que torna desnecessário para o técnico redigir sobre tudo que encontrou.

3.2 Marcha em Vazio

Para este ensaio, deve-se primeiro desconectar o circuito de corrente do medidor, como mencionado anteriormente, ou seja, não haverá carga. Em seguida, por um determinado tempo, definido pela equação 3.1 aplica-se uma tensão correspondente à tensão da rede local, em caso de verificação em campo ou, em caso de verificação em laboratório, 115% da tensão nominal do medidor, para o caso de medidores eletrônico e 110% da tensão nominal do medidor, para o caso de medidor eletromecânico, de acordo com (6) e (1). Esta diferença do valor da tensão a ser aplicada para situação de campo ou laboratório é prevista no aplicativo Smartem. Se, durante um tempo pré-determinado, o medidor emitir algum pulso ou girar seu disco, significa que está medindo energia sem efetivamente haver uma energia circulante, caracterizando um defeito no mesmo. Caso contrário, o medidor é aprovado no ensaio. Todas as variáveis envolvidas no cálculo da equação 3.1 são informadas no próprio medidor de energia e, por esse motivo, são facilmente obtidas. O aplicativo Smartem, com base nos dados do medidor sob análise, realiza o cálculo, automaticamente, do tempo de ensaio de marcha em vazio, de acordo com a equação 3.1.

$$t = \frac{900 * 10^3 * K}{N_e * V_N * I_{max}} \quad (3.1)$$

Em que:

t = Tempo de ensaio em minutos

K = Constante de calibração do medidor

N_e = Número de elementos de medição

V_N = Tensão nominal

I_{max} = Corrente máxima em amperes

Para o caso de medidores polifásicos, é comumente utilizado, em campo, um adereço conhecido como "jumper" para conectar, em série, as bobinas de corrente dos medidores sob teste e, em paralelo, as bobinas de tensão, a fim de circular uma corrente monofásica em todas as fases daquele medidor. Este procedimento não é mais mencionado na norma, mas permite a obtenção de uma verificação apenas aproximada do medidor. Por esse motivo, para verificações em laboratório de medidores polifásicos, recomenda-se o uso de uma bancada trifásica para que as tensões e correntes envolvidas no ensaio tenham o defasamento adequado.

3.3 Mostrador

O objetivo deste ensaio é avaliar se o registrador de medidas, seja ele um display digital ou ciclométrico, está medindo de forma correta. Sendo assim, o procedimento consiste na aplicação de 1 kWh de energia através do medidor sob teste, observando se o mostrador registrará essa medida de forma adequada. Para isso, aplica-se a tensão da rede nos terminais de tensão do medidor, para o caso de verificação em campo, ou a tensão nominal para o caso de verificação em laboratório. Além disso, aplica-se uma corrente de valor arbitrário, que seja menor que a corrente máxima suportada pelo medidor, a fim de simular o consumo de energia. Neste caso, quanto mais energia circular no medidor, mais rápido será contabilizado 1 kWh e, por esse motivo, o equipamento Smartem foi projetado para aplicar uma corrente de, aproximadamente, $45\text{A} \pm 10\%$ neste ensaio, com o objetivo de realizá-lo no menor tempo possível. Para o caso de medidores polifásicos, novamente é feito o uso do "jumper", conectando-se as bobinas de corrente do medidor em série. Dessa forma, circulam aproximadamente $45\text{A} \pm 10\%$ em cada uma das fases deste medidor polifásico, tornando o processo ainda mais rápido ao passo que, quanto maior o número de fases do medidor, mais rápido o mesmo atinge 1 kWh.

Seria interessante a possibilidade de registro em campo da situação do mostrador do medidor antes e após a realização deste ensaio, apenas para reforçar o resultado apresentado pelo dispositivo de verificação utilizado. O aplicativo Smartem possui essa funcionalidade, possibilitando, ao técnico responsável, não só realizar registros fotográficos antes e depois do ensaio de mostrador, como também registrar situações da inspeção inicial citadas anteriormente.

Por fim, é exigido, por norma, que o teste do mostrador seja realizado com fator de potência unitário para o caso de uma verificação em medidores que medem apenas energia ativa. Assim, o equipamento Smartem foi projetado para trabalhar com o fator de potência unitário, permitindo que este ensaio seja realizado de forma adequada.

3.4 Exatidão

Os medidores fabricados no Brasil ou fabricados internacionalmente, mas utilizados no Brasil, são regulados pelo INMETRO e são classificados em medidores de classe A, B, C e D, para o caso de medidores eletrônicos, e classes 1 e 2, para o caso de medidores eletromecânicos. Cada classe possui por definição, tolerância de erros máximos para comercialização e funcionamento.

Neste ensaio, tem-se o objetivo de avaliar se os erros, apresentados pelo medidor sob verificação, estão dentro dos limites estabelecidos por (6) e (1) dependendo da classe do medidor. Para medidores eletromecânicos, o erro percentual não deverá exceder, em

campo, 4,0% para medidores de classe 2 e 2,0%, para medidores de classe 1. Para medidores eletrônicos, em campo e em laboratório os limites estão indicados para os índices de classe, conforme Tabelas das figuras 10 e 11.

D	C	B	A
± 0,4	± 1,2	± 2,2	± 3,2

Figura 10 – Limites de erros(%) por classe para medição ativa em campo. Fonte: (1)

D	C	B	A
± 0,3	± 0,7	± 1,3	± 2,5

Figura 11 – Limites de erros(%) por classe para medição ativa em Laboratório. Fonte: (1)

Além disso, a norma exige que o ensaio seja realizado com no mínimo duas condições distintas de carga ou corrente, com fator de potência entre 0,5 e 1 indutivo, para medidores de energia ativa, ou seja, deve ser realizado um ensaio de exatidão com um valor de corrente (entre 10% da corrente nominal e a corrente máxima suportada pelo medidor sob análise) e em seguida com outro valor de corrente diferente (também entre 10% da corrente nominal e a corrente máxima suportada pelo medidor sob análise) (1) e (6).

Dessa forma, são realizados dois ensaios distintos. Para o Smartem, esta distinção se dá pelo nome de Ensaio de Carga Pequena (CP), para uma aplicação de corrente de valor maior ou igual, mas próximo a 10% da corrente nominal, e Ensaio de Carga Maior (CM), para aplicação de corrente com valor próximo ao valor nominal do medidor. Em ambos os casos, ao fim do ensaio, o aplicativo indica se o erro obtido está em conformidade ou não com os limites estabelecidos em (1) e (6).

O procedimento deste ensaio consiste na aplicação da tensão da rede, no caso de ensaio em campo, ou tensão nominal do medidor, no caso de ensaio em laboratório, para duas situações distintas de corrente como mencionado anteriormente. Em seguida, com o uso de um sensor fotossensível, que acompanha o equipamento, capta-se os pulsos de medidores eletrônicos, ou o giros do disco de medidores eletromecânicos. Estes pulsos, ou giros, indicam, de forma discreta, quanto de energia foi medido pelo medidor sob teste. Neste sentido, o aplicativo Smartem estabelece um número de pulsos, ou giros, para que este ensaio seja realizado. Ao término do procedimento, o equipamento compara a energia indicada pelo medidor com a energia medida pelo próprio equipamento, indicando, assim, o erro da medição de energia do medidor sob verificação. Detalhes de como todo este procedimento é viabilizado pelo verificador Smartem são apresentados no capítulo seguinte.

3.5 Comentários Finais

Como pôde ser observado, neste capítulo foram detalhados os ensaios e procedimentos necessários para realizar uma verificação em campo, e em laboratório, de medidores de energia elétrica. Estes procedimentos foram apresentados para permitir uma melhor compreensão das funções do equipamento e para justificar algumas características do hardware e do software que são apresentadas no capítulo posterior.

Dessa forma, o seguinte capítulo apresenta, detalha e justifica as principais definições de projeto do hardware e software do equipamento, bem como seu princípio de funcionamento e os componentes que o compõe, de forma a viabilizar a execução dos ensaios descritos neste capítulo, garantindo a manutenção das características, estabelecidas inicialmente, de portabilidade e baixo custo de projeto.

Capítulo 4

Equipamento Desenvolvido

Conhecendo-se quais os ensaios e procedimentos que um instrumento deve realizar de forma a atuar como um verificador portátil em campo, faz-se necessário descrever como o equipamento desenvolvido, Smartem, viabiliza todo este processo levando-se em conta seu tamanho, peso e custo de projeto reduzidos, somados a capacidade de geração de corrente de carga própria e a independência do uso de bateria, que são diferenciais em comparação com as bancadas de laboratório e verificadores portáteis similares.

A seguir é apresentada a metodologia do desenvolvimento do Smartem, desde seu projeto inicial, em 2017, até o produto atualmente comercializado. Em seguida, são descritas e analisadas as características mais relevantes da composição de seu hardware, seu princípio de funcionamento, e de seu software, destacando suas principais funcionalidades.

4.1 Metodologia de Desenvolvimento e Percurso

O projeto de um equipamento verificador de medidores de energia se iniciou no ano de 2017, através da demanda de algumas concessionárias de energia do Brasil. Na época, estas concessionárias afirmaram necessitar de um equipamento que realizasse, em campo, os mesmos ensaios realizados, em medidores de energia, em laboratório. Dessa forma, seriam eliminados custos envolvidos, como evidenciado na sessão [2.4.2](#) deste texto.

Dessa forma, realizou-se um estudo detalhado das normas técnicas relacionadas, de forma a compreender a metodologia de inspeção de medidores e os ensaios para verificação dos mesmos. Este estudo permitiu o estabelecimento de diretrizes do projeto de hardware para possibilitar a realização dos ensaios necessários por parte do equipamento.

O processo de desenvolvimento foi realizado por etapas, na maioria das vezes, paralelas entre si. A primeira etapa consistiu na definição de requisitos técnicos de hardware e simulações de funcionalidades, seguido do projeto básico das PCIs, especificação e aquisição de componentes, montagem e testes de bancada. O autor conduziu o processo de desenvolvimento juntamente com uma equipe técnica multidisciplinar durante todo o

tempo.

Além disso, tomando como orientação as requisições, por parte das concessionárias de energia, em termos da operacionalidade e interatividade do software, para melhorar a experiência do usuário, e com base no conhecimento adquirido sobre as normas, deu-se início ao desenvolvimento do aplicativo que gerencia o equipamento. Este aplicativo, desde sua criação, é constantemente atualizado até o momento do desenvolvimento desta dissertação.

É importante mencionar que, diferentemente do hardware e firmware, cujo projeto e desenvolvimento contou com atuação efetiva do autor, o aplicativo foi desenvolvido por uma equipe de programadores especialistas, cabendo ao autor desta dissertação, orientar e definir o protocolo de comunicação entre o software e o firmware.

Com isso, desenvolveu-se, em março de 2017, o primeiro protótipo de um verificador a fim de validar a concepção geral de hardware estabelecida no projeto inicial, composto por um conjunto microprocessado para a aquisição e medição das grandezas elétricas, junto com a programação básica do firmware. Uma primeira versão, mais simples, do aplicativo também foi desenvolvida com capacidade de executar apenas funções e comandos básicos.

O objetivo principal deste primeiro protótipo foi averiguar se o conceito inicial estabelecido para medição de energia, de forma precisa, estava de acordo com o esperado. Dessa forma, ele foi submetido a testes laboratoriais visando avaliar e evidenciar falhas, de forma a contribuir para correções e aprimoramentos do projeto inicial. Restrições, estabelecidas inicialmente, como portabilidade (peso, volume e ergonomia), baixo custo de projeto e capacidade de fornecimento próprio de corrente de até 50 A, exigiram algumas mudanças neste protótipo, já que, seu projeto inicial não estabeleceu estes requisitos como foco.

Por meio destes testes, foi constatado a necessidade de redimensionamento e reespecificação de alguns componentes de hardware como transformadores, relés e elementos eletrônicos mais precisos e menos sensíveis a variações de temperatura. Adiante, neste capítulo, são evidenciados os motivos destas alterações no projeto inicial. Além disso, o invólucro, ou carcaça, do equipamento precisava ser ergonomicamente viável, já que o protótipo inicial foi concebido em uma maleta plástica de grande volume. Todavia, a funcionalidade de medição de energia do equipamento foi aprovada já neste primeiro protótipo, sendo feito apenas alguns aprimoramentos posteriormente.

Dessa forma, estas alterações no hardware culminaram no desenvolvimento do seu primeiro MVP (Minimum Viable Product), em junho de 2017, nomeado de Smartem, que consiste em uma primeira versão comercializável, porém carente de melhorias e aperfeiçoamentos. Este MVP foi levado a um laboratório especializado em calibração de padrões de energia elétrica, credenciado pelo INMETRO, para atestar a qualidade

da precisão do verificador Smartem, o que lhe gerou um certificado de calibração. Esta certificação foi de extrema importância para validação definitiva do quesito medição e cálculo de energia, feita exclusivamente pelo padrão interno do equipamento, que é melhor apresentado e analisado adiante neste capítulo.

Durante o restante do ano de 2017 e meados do ano de 2018, foram realizados ajustes, aprimoramentos e adequações no projeto do MVP para tornar o Smartem um produto comercializável no Brasil. Neste contexto, o equipamento foi submetido a testes laboratoriais, em laboratórios credenciados pela ANATEL, para validar e regularizar o uso do Bluetooth e do WiFi presente em seu hardware. Da mesma forma, o equipamento foi classificado como categoria IV no quesito sobretensão, o que foi validado também em laboratório credenciado pelo INMETRO no início de 2019.



Figura 12 – Equipamento Smartem M100 e aplicativo para celular ou tablet. Fonte: Autor.

A comercialização do Smartem M100 iniciou-se na segunda metade do ano de 2018, pela empresa Minipa do Brasil Ltda. Suas cores e painéis se adequaram às cores desta empresa. Vale mencionar que obter o certificado da ANATEL é procedimento indispensável para regularizar a venda de um equipamento com comunicação sem fio no Brasil. Já a classificação de categoria de sobretensão é garantida pela empresa responsável pela fabricação do produto. Esta garantia pode, ou não, ser validada por um laboratório especializado, o que trás maior confiabilidade para o uso do equipamento. Por esse motivo, sua comercialização se iniciou antes da realização dos ensaios para validar sua categoria de sobretensão, estabelecida previamente.

Portanto, de forma geral, o projeto inicial do verificador, motivado pela demanda de algumas concessionárias brasileiras, resultou em um equipamento portátil monofásico, capaz de realizar os ensaios, em campo, para verificação de medidores de energia monofásicos, bifásicos ou trifásicos, atendendo as normas vigentes. Além disso, é capaz de fornecer, garantindo sua característica de portabilidade, até 50 A de corrente alternada. A análise e detalhamento de como o projeto deste equipamento permite que ele seja capaz de atender

a sua proposição de realizar, em campo, os ensaios e procedimentos feitos em laboratório, são apresentadas nas sessões a seguir.

4.2 Diagrama Representativo Básico e Fluxo de Operações

O Smartem é um instrumento microprocessado, desenvolvido para verificar medidores de energia monofásicos e com possibilidade de se verificar medidores polifásicos, ligando-se o circuito de corrente destes medidores em série. Para isso, requer que o medidor, a ser verificado, seja desconectado da rede proveniente da concessionária de energia e também desconectado da carga ou cliente, de forma a permitir que apenas o dispositivo verificador controle o fluxo de energia sobre o medidor de energia em verificação.

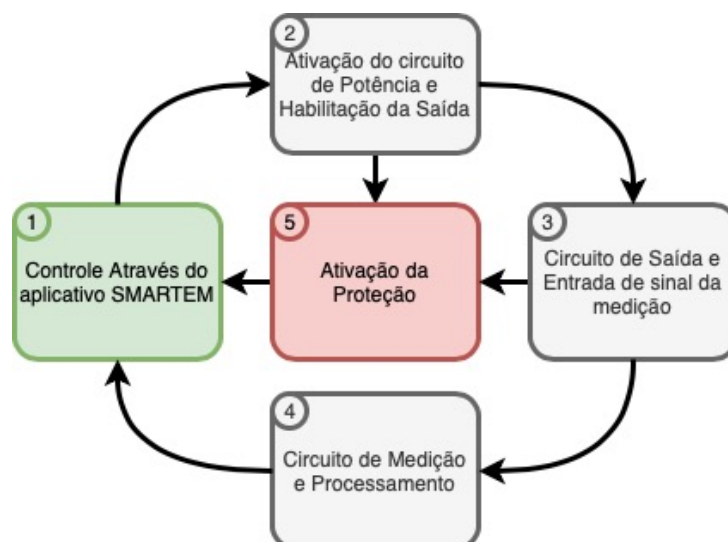


Figura 13 – Sequência de operações do instrumento. Fonte: Autor.

Internamente, o equipamento possui dispositivos eletroeletrônicos que habilitam uma saída com sinal de tensão, corrente e um sensor fotossensível para captação de pulsos ou giros de um disco. Para garantir a segurança em relação a operação do mesmo, conta com elementos de segurança ativados via programação ou via atuação mecânica. O diagrama de blocos da figura 13 mostra a sequência básica de operações do instrumento, a partir do controle através do aplicativo. Cada uma destas operações envolve um ou mais módulos que compõe o hardware e o software (aplicativo) que o gerencia.

Com o objetivo de possibilitar uma melhor compreensão de seu funcionamento, o equipamento em questão foi simplificado e representado no diagrama da figura 14. Dessa forma, como pode ser observado, existem 4 blocos principais que compõe todo o equipamento. O bloco central é composto pelo processador e seus periféricos. Este é o bloco responsável por comandar, definir e integrar todo o processo de funcionamento de outros dois blocos. O bloco, nomeado de carga fantasma, responsável pelo fornecimento

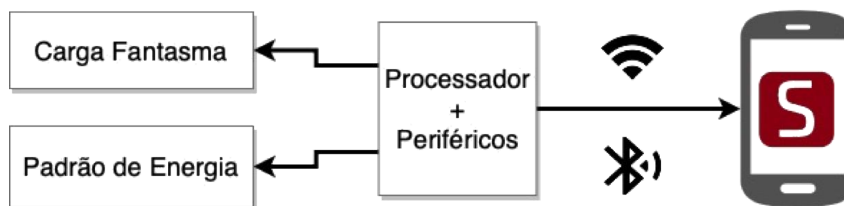


Figura 14 – Diagrama de blocos representativo básico do Smartem. Fonte: Autor.

de tensão e corrente para os ensaios, e o bloco do padrão de energia, responsável pela medição e cálculo da energia. Já o bloco do aplicativo, representado por um celular no diagrama da figura 14, é responsável pelo gerenciamento, a nível de usuário, do bloco central. Em outras palavras, este bloco é a interface entre as funcionalidades do hardware e o usuário do equipamento. Cada um destes blocos é explicado de forma mais detalhada nas próximas sessões.

4.3 Carga Fantasma

4.3.1 Autotransformador - Tensão

Para atender aos requisitos de fornecimento de tensão, o equipamento utiliza a própria tensão da rede que o alimenta, não sendo necessário, portanto, o uso de uma fonte de tensão controlável. Assim, o verificador não possui dependência do uso de uma bateria para garantir seu funcionamento. Esta prática é prevista e permitida por (1) e (6).

Dessa forma, a cada ensaio, o equipamento aplica no medidor sob verificação, através do acionamento de relés dedicados a este fim, a tensão da rede que, antes do procedimento, alimentava o próprio medidor. Para isso, faz-se uso de um autotransformador cujo enrolamento primário é totalmente dedicado ao fornecimento de tensão para os ensaios. O uso deste tipo de transformador não é vedado pelas normas para situação de verificação de medidores de energia.

Um autotransformador é semelhante a um transformador comum, com a diferença de possuir um único enrolamento ao redor do núcleo ferromagnético, ou seja, não possui um isolamento galvânico entre entrada e saída, o que significa que o circuito primário e o secundário não ficam isolados eletricamente, como ocorre em transformadores comuns, como pode-se ver em (12).

A transferência de potência em um autotrafo ocorre devido ao acoplamento magnético, semelhante a um transformador comum, e também devido à conexão galvânica (fluxo de corrente através de caminhos de condução metálicos). Por este motivo, um autotransformador, com as mesmas dimensões e tensões nominais que um transformador comum, consegue fornecer uma potência maior que este último. De igual modo, um transformador aumenta sua capacidade de transferência nominal de potência ao ser

conectado como autotransformador.

De forma a possibilitar uma melhor compreensão do funcionamento deste trafo, é apresentado na figura 15 um autotransformador elevador de tensão padrão e as equações envolvidas.

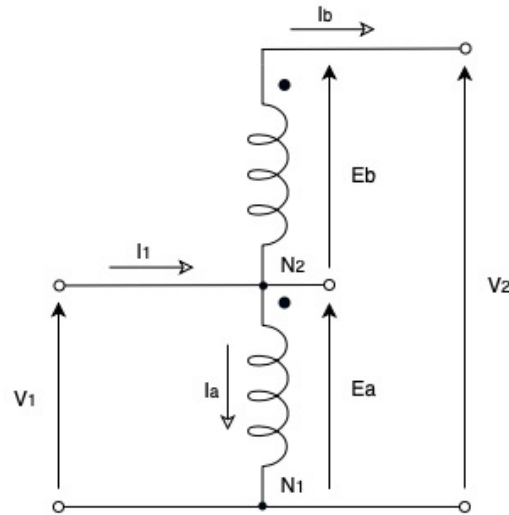


Figura 15 – Exemplo de autotransformador elevador de tensão. Fonte: Autor.

Sabe-se que, neste caso, V_1 é a tensão do enrolamento comum entre entrada e a saída e que $V_1 = E_a$. Já E_b é a tensão no enrolamento em série e V_2 é a tensão de saída (enrolamento comum + enrolamento em série). A corrente I_a é a corrente do enrolamento comum do primário e I_b é a corrente do enrolamento em série. Além disso, N_1 é o número de enrolamentos da entrada e N_2 o número de enrolamentos da saída. Nestas condições, tem-se que:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{E_a + E_b}{E_a} = \frac{N_1 + N_2}{N_1} \quad (4.1)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{I_b}{I_a + I_b} = \frac{N_1}{N_1 + N_2} \quad (4.2)$$

Em relação a potência, em um transformador comum, a potência aparente da entrada, desprezando as perdas, é igual a potência da saída e é dada pela multiplicação da tensão com a corrente de cada enrolamento:

$$S = E_a I_a = E_b I_b \quad (4.3)$$

Para o caso do autotransformador, a potência aparente é dada por:

$$S_{auto} = V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (4.4)$$

Substituindo as equações 4.1 e 4.2 em 4.4, tem-se:

$$\begin{aligned}
 S_{auto} &= E_a(I_a + I_b) \\
 &= E_a I_a + E_a I_b \\
 &= E_a I_a + E_a I_a \frac{N_1}{N_1 + N_2}
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Dessa forma, substituindo a equação 4.4 em 4.5:

$$\begin{aligned}
 S_{auto} &= E_a \left(1 + \frac{N_1}{N_1 + N_2}\right) \\
 &= S \left(1 + \frac{N_1}{N_1 + N_2}\right)
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

Assim, segundo a equação 4.6, ao conectar um transformador comum como autotransformador, ele aumenta sua capacidade de transferir energia em uma proporção determinada pela relação de transformação do primário com o secundário. Em outras palavras, é possível transferir uma potência maior com o mesmo transformador quando este é ligado como um autotransformador (potência transformada e potência conduzida). Adicionalmente, autotransformadores são fisicamente menores e mais baratos do que um transformador convencional correspondente, o que atende as premissas deste projeto.

Com base na teoria de autotransformadores, e nas equações apresentadas acima, o autotrafo elevador de tensão utilizado no equipamento foi projetado como mostra o esquema da figura 16.

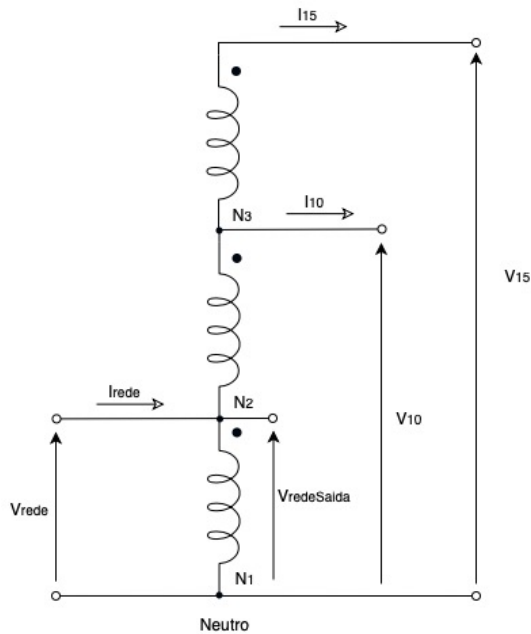


Figura 16 – Autotransformador elevador de tensão utilizado no Smartem. Fonte: Autor.

Neste caso, a entrada do transformador é a tensão V_{rede} e as demais tensões são tensões de saída, sendo que $V_{redeSaída}$ tem relação de transformação 1:1, V_{10} tem relação

de transformação de 1:1,10 e V_{15} tem relação de transformação de 1:1,15. Estes três níveis de tensão de saída são necessários pois, para o caso de ensaios em campo, a tensão a ser aplicada pelo verificador é a tensão da rede ($V_{redeSaida}$). Mas para o caso de testes em laboratório, segundo (6) e (1), deve ser aplicado 110% da tensão nominal do medidor, no caso de medidores eletromecânicos, ou 115%, para medidores eletrônicos. Para este fim, as tensões V_{10} e V_{15} são utilizadas.

As equações do autotransformador do equipamento são apresentadas abaixo nas equações 4.7, 4.8 e 4.9, mas seu desenvolvimento é semelhante às equações do autotrafo da figura 15 e, por isso, não é desenvolvido novamente.

$$\frac{V_{redeSaida}}{V_{rede}} = \frac{N_1}{N_1} \quad (4.7)$$

$$\frac{V_{10}}{V_{rede}} = \frac{N_1 + N_2}{N_1} \quad (4.8)$$

$$\frac{V_{15}}{V_{rede}} = \frac{N_1 + N_2 + N_3}{N_1} \quad (4.9)$$

Durante os ensaios, o equipamento, através do acionamento de relés, aplica a tensão adequada proveniente do autotransformador da figura 16. Mas, além disso, o equipamento deve medir a tensão e a corrente aplicada para que consiga calcular com precisão a energia medida pelo medidor sob teste. Para se medir a tensão, faz-se uso de divisor resistivo de forma que o sinal de tensão fique em um nível adequado para ser interpretado pelo circuito microprocessado.

Como o verificador utiliza a tensão da rede em seus ensaios, naturalmente, há presença de harmônicos tanto na tensão quanto na corrente que é aplicada pelo dispositivo. Porém, o projeto proposto inicialmente prevê o desenvolvimento de um equipamento capaz de realizar uma verificação em campo, e em laboratório, de medidores de energia, realizando os ensaios exigidos no regulamento técnico metrológico de medidores (1) e (6). Análise de distorções harmônicas e da qualidade da energia da rede não fazem parte do escopo do projeto inicial. Por esse motivo, optou-se por um padrão interno sem esta função, o que reduziu consideravelmente os custos envolvidos, contribuindo para manutenção do baixo custo de produção e, conseqüentemente, baixo custo de venda.

Além disso, entende-se que, para verificar medidores de energia, o padrão interno do Smartem deve estar submetido às mesmas condições de tensão (conectado em paralelo) e corrente (conectado em série) a que o medidor sob análise está submetido. Dentre estas condições, estão inclusas as distorções harmônicas, que não são detectados pela grande maioria de medidores eletrônicos ou eletromecânicos no Brasil e, por esse motivo, são incluídas no processo de medição de energia do medidor. São estabelecidos, em norma (13),

limites para esta distorção harmônica na rede. E fatores como o crescimento da geração fotovoltaica, que faz uso de inversores CC/CA, tem comprometido estes índices, como evidenciado em (14). Soluções como filtros para permitir apenas a passagem das faixas de frequência desejadas podem minimizar estes valores.

Dessa forma, o padrão mede, não apenas a componente fundamental, mas as componentes harmônicas que compõe a forma de onda de tensão e corrente de ordem superior. Isto é possível, pois faz-se uso de uma frequência de amostragem de 8 kHz permitindo a detecção de harmônicos de até 4 kHz de frequência, de acordo com o teorema da amostragem de Nyquist.

4.3.2 Autotransformador - Corrente

Para atender os requisitos de corrente, o equipamento faz uso de uma carga fantasma ou carga virtual. Uma carga fantasma é um arranjo elétrico desenvolvido com o objetivo de simular o comportamento de uma carga real. No caso de um medidor de energia, a carga fantasma deve simular uma tensão e uma corrente, passando através deste medidor, para que o mesmo entenda que há um consumo real de energia elétrica e, com isso, passe a medir este consumo.

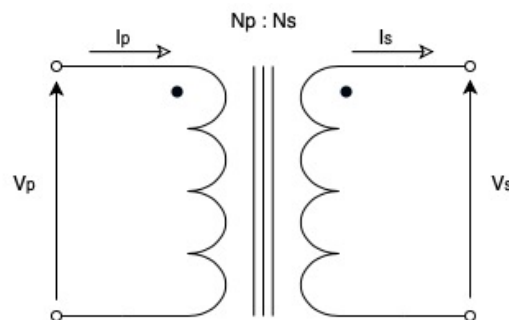


Figura 17 – Exemplo de transformador comum. Fonte: Autor.

Com a intenção de descrever melhor como esta carga fantasma foi desenvolvida, uma análise é feita no diagrama da figura 17, que mostra um transformador comum com relação de transformação $N_p : N_s$. Neste transformador, sabendo que a potência da saída é igual à potência da entrada, desconsiderando as perdas e que, para uma condição de $N_p \gg N_s$ (o número de enrolamentos do primário ser muito maior que o número de enrolamentos do secundário), tem-se as seguintes equações:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (4.10)$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} \quad (4.11)$$

Sendo assim, pode-se concluir que a tensão V_s terá um valor muito pequeno e a corrente I_s terá um valor muito alto de forma a obedecer a relação de potência, ambos equivalentes à relação de transformação entre os enrolamentos do primário e do secundário.

Este fato se mostrou útil para o equipamento uma vez que era necessário um circuito que fornecesse para o medidor de energia uma quantidade de corrente considerável a fim de permitir a realização dos ensaios exigidos por norma. O uso de circuitos como uma fonte de corrente, como é feito em (15), tornariam o equipamento maior e mais pesado inviabilizando sua característica de ser portátil. Sendo assim, a utilização de uma carga fantasma se mostrou ser uma solução mais simples e menos onerosa, cumprindo bem com o que foi proposto.

Com isso, para atender aos diferentes níveis de carga exigidos nos ensaios da norma, foi projetado uma carga fantasma com diferentes TAPs para diferentes condições de corrente, já que nos ensaios exigidos por norma, são necessários diferentes valores de corrente para cada um. Esta carga fantasma foi integrada ao autotransformador apresentado no item anterior de forma a contemplar o secundário deste trafo, já que o mesmo apresenta apenas um enrolamento, com diferentes níveis de tensão.

O diagrama da figura 18 mostra o esquema da carga fantasma, integrada ao autotransformador, utilizada no equipamento Smartem.

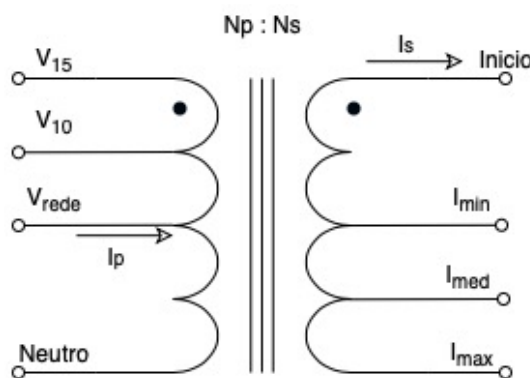


Figura 18 – AutoTransformador utilizado no Smartem. No primário manteve-se o autotrafo e no secundário foi inserido a carga fantasma. $N_p \gg N_s$. Fonte: Autor.

Como pode ser observado, foi adicionado um enrolamento no secundário do transformador de forma que o valor de N_p fique muito maior que N_s o que implica uma corrente maior e uma tensão menor no secundário, em relação ao primário, como descrito anteriormente.

Durante os ensaios, o secundário deste transformador é conectado em série com o circuito de corrente do medidor de energia. Este circuito de corrente apresenta uma resistência muito pequena, o que o caracteriza como curto. Assim, em outras palavras, o secundário deste autotransformador é ligado em curto, o que permite que suas correntes fiquem com valores maiores. Em seguida, relés acionam o "início" do enrolamento secundário

juntamente com apenas um dos outros três TAPs (I_{min} , I_{med} , I_{max}) de forma a permitir a circulação de corrente. O secundário foi projetado para que cada Tap apresente um nível de corrente aproximado ($2.5A \pm 10\%$, $18A \pm 10\%$ e $45A \pm 10\%$), já que seu valor depende da variação da tensão da rede, que por norma, pode variar até $\pm 10\%$.

Além disso, sabe-se que a impedância em um bobina é dada por $Z = R + jX$, sendo R a resistência da bobina e X a sua reatância. Isto significa que o enrolamento utilizado no secundário do autotransformador do equipamento é uma carga indutiva, o que resulta em um fator de potência diferente de 1, o que inviabilizaria ensaios com fator de potência unitário exigidos pela norma. Entretanto, o projeto do secundário definiu um enrolamento com um número de voltas suficientemente pequeno para que o valor da reatância X seja desprezível em relação ao da resistência R, tornando o secundário um circuito praticamente resistivo para esta aplicação, o que torna uma carga fantasma que consome, essencialmente, potência ativa. Ensaios realizados fazendo-se uso do analisador de energia modelo ET5061C da Minipa, mediram ângulos de carga (entre tensão e corrente aplicadas pelo Smartem no medidor sob teste) variando de 2° a 5° graus, o que resultaria em um fator de potência de 0,999 a 0,996.

Porém, como pode ser observado, como a relação de transformação do secundário para o primário é tal que eleva a corrente para um valor alto suficiente, tem-se que a tensão fica muito pequena, o que impossibilitaria os ensaios já que o secundário é conectado em série com o medidor e estes ensaios precisam da tensão da rede para ter validade. Para isso, no início dos ensaios, um relé interconecta um dos TAPs de tensão, ao curto do secundário, como pode ser observado na figura 19.

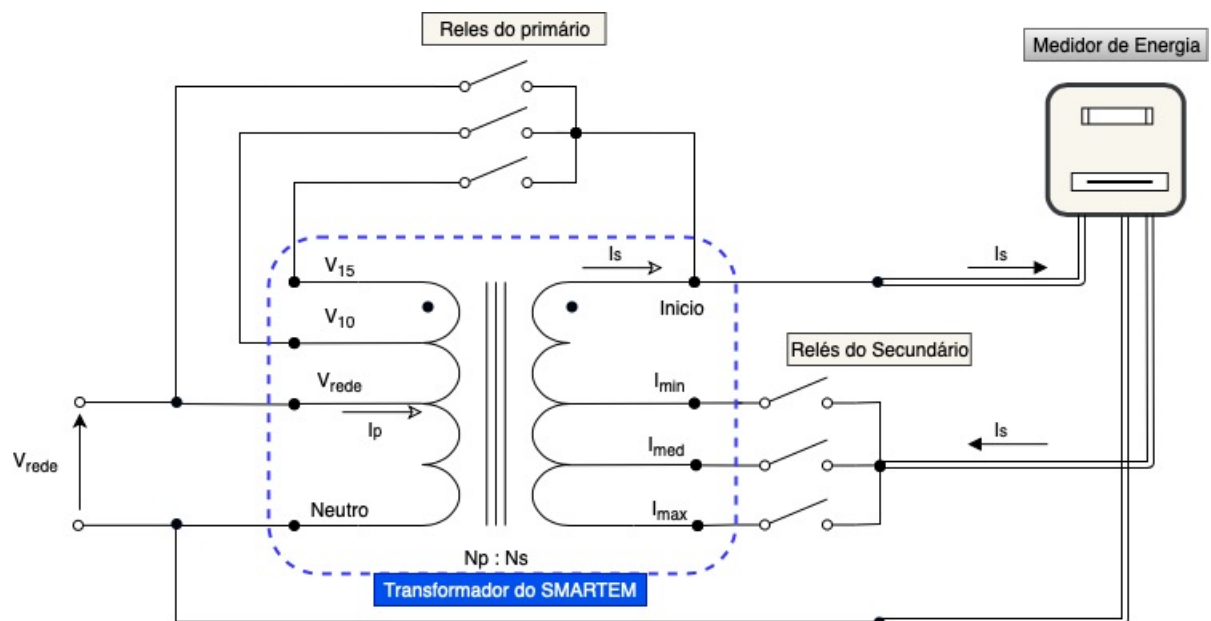


Figura 19 – Esquema do primário e secundário do Autotransformador utilizado no Smartem, conectado a um medidor de energia. Fonte: Autor.

É importante mencionar que ao interconectar o primário no secundário todo

o conjunto passa a ser um autotransformador de dois enrolamentos, aumentando sua capacidade de transmissão de potência para o secundário conforme explicado anteriormente, mas, em contrapartida, retirando o isolamento galvânico antes presente.

Esse fato implica que, no secundário, o potencial em relação ao neutro, que antes era um valor muito baixo por causa da relação de transformação, agora é o mesmo potencial de tensão do TAP do primário que se interconectou ao secundário, durante a realização de algum dos ensaios, somado ao valor baixo antes presente, que chega a ser desprezível nesta aplicação. Porém a queda de potencial em todo o enrolamento continua baixa, por se tratar de um curto (ao ser conectado ao circuito de corrente de um medidor sob teste).

Dessa forma, o equipamento desenvolvido viabiliza a aplicação de tensão e corrente no medidor de energia durante os ensaios que se propôs a realizar, simulando o comportamento de uma carga com o fator de potência praticamente unitário, conforme mencionado anteriormente.

Uma das vantagens da utilização de uma carga fantasma para esta aplicação é o fato de que, apesar de estar simulando uma determinada potência, resultante de uma tensão de, aproximadamente, 127V e uma corrente de, aproximadamente, 45A (em um dos ensaios), o consumo real do dispositivo é de aproximadamente 80 VA.

O valor das correntes em todos os TAPs do secundário é definido pela resistência dos fios associado ao TAP respectivo do transformador. Esta resistência é relacionada ao seu diâmetro e comprimento do fio escolhido. Esta foi a opção tecnológica, mais simples e de baixo custo de projeto, de obter as diversas escalas de corrente definidos em norma, sendo $2.5A \pm 10\%$, para o ensaio exatidão com carga pequena, $18A \pm 10\%$, para o ensaio de exatidão com carga maior, e $45A \pm 10\%$, para o ensaio do mostrador.

Vale mencionar que o autotransformador usado no equipamento tem formato toroidal. Este formato foi definido no projeto do transformador devido a alguns fatores importantes. Primeiramente, em um transformador toroidal, o fluxo magnético de dispersão é praticamente nulo, evitando que o mesmo afete circuitos eletrônicos sensíveis que estão próximos, como é o caso do circuito do padrão de medição de energia do próprio equipamento. Além disso, este tipo de transformador é 40% a 60% menor e mais leve que outros transformadores convencionais e, por se tratar de um autotransformador, seu tamanho ainda fica mais reduzido se comparado a um transformador comum de mesma potência. Tais características são essenciais para viabilizar um equipamento leve e portátil para ser utilizado em campo.

Outra característica interessante é que o ruído mecânico de um transformador toroidal, devido à vibração do núcleo durante seu funcionamento, é muito menor (16) (praticamente imperceptível) se comparado a outros transformadores. Por fim, segundo (16), uma das principais vantagens deste tipo de trafo é a não existência recortes em seu

núcleo, o que aumentaria as perdas consideravelmente. No caso de um núcleo toroidal, o fluxo magnético fica homogêneo, fazendo com que seja mais eficiente (cerca de 90% a 95% de eficiência).

Para qualquer TAP do secundário, a medição da corrente é feita através de um transformador de corrente (TC) sem gap instalado dentro do equipamento, conectado em paralelo com um resistor shunt para permitir a leitura, pelo sistema micro processado, do sinal gerado pelo TC, permitindo que o equipamento acompanhe, com precisão, a tensão (divisor resistivo) e a corrente (TC) aplicados no medidor de energia sob teste, podendo, assim, verificá-lo.

4.3.3 Variação da corrente com a temperatura

Sabe-se que a resistência de um condutor varia com a temperatura conforme a equação 4.12. Nesta equação, α é o coeficiente de temperatura do material, cuja unidade é o inverso de uma unidade de temperatura. Considerando a unidade de temperatura mais comum ($^{\circ}\text{C}$), a unidade de α é $1/^{\circ}\text{C}$. Além disso, $R_{inicial}$ é a resistência do condutor à temperatura inicial T_0 e R_{final} a resistência do condutor à temperatura T .

$$R_{final} = R_{inicial}[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (4.12)$$

No caso da carga fantasma, seu enrolamento do secundário (responsável por fornecer as altas correntes dos ensaios) é feito com fios de cobre de 6mm^2 e, para metais, a resistência aumenta quando a temperatura aumenta.

Assim, utilizando como exemplo o ensaio de mostrador ou registrador (item 3.3 do Capítulo 3) por este ser o ensaio mais demorado de todo o procedimento de verificação e, por este motivo, os fios ficam mais tempo submetidos a uma corrente alta, observa-se uma variação nesta corrente fornecida pelo equipamento. A corrente se inicia com um valor de aproximadamente 50 A e finaliza o ensaio, na maioria dos casos, em aproximadamente 44 A. Em outras palavras, há uma variação de cerca de 12,0% na corrente desde o início até o fim do ensaio. Sabendo que a tensão se mantém aproximadamente constante nos ensaios, pode-se concluir que a resistência dos fios de cobre variou em 13,63%, conforme pode ser observado na equação 4.13

$$\begin{aligned} V_{inicial} = V_{final} &= R_{inicial} * 50 = R_{final} * 44 \\ R_{inicial} * 50 &= R_{inicial} * K * 44 \\ K &= \frac{50 * R_{inicial}}{44 * R_{inicial}} \\ K &= 1,1363 \end{aligned} \quad (4.13)$$

Sendo assim, com base na equação 4.12, pode-se obter um valor de aproximado da temperatura destes fios ao final deste ensaio de mostrador. Com isso, considerando uma temperatura ambiente inicial de 25°C e sabendo que o coeficiente de temperatura do cobre é $\alpha = 0,00393/^\circ\text{C}$ a 20°C e, para 25°C, segundo o site de uma fabricante de cabos brasileira (17), faz-se uso de uma constante multiplicadora de 0,9807, sendo, então, $\alpha = 0,00382/^\circ\text{C}$, tem-se a equação 4.14 desenvolvida abaixo.

$$\begin{aligned}
 R_{final} &= R_{inicial}[1 + \alpha(T - T_0)] \\
 1,1363 &= 1 + \alpha(T - T_0) \\
 0,1363 &= \alpha(T - T_0) \\
 T &= \frac{0,1363 + \alpha T_0}{\alpha} & (4.14) \\
 T &= \frac{0,1363 + 0,00382 * T_0}{0,00382} \\
 T &= 60,68^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Como pode ser observado, a temperatura dos fios de cobre que compõe o secundário do autotransformador do Smartem chega a aumentar cerca de 35,68°C ao fim do ensaio do registrador. Este aumento de temperatura não interfere no andamento do ensaio nem em seu resultado e não danifica os componentes eletrônicos internos do equipamento uma vez que foi projetado e estruturado para operar em temperaturas maiores que esta. Neste sentido, uma de suas características internas é a disposição, com base na sensibilidade quanto a temperatura, de seus componentes, de forma que os mais sensíveis a temperatura maiores, são posicionados longe do transformador.

A inserção de sistemas de resfriamento, como ventiladores (coolers) ou dissipadores no transformador minimizaria as elevações de temperatura, mas o aumento nos custos do projeto e, principalmente, aumento do espaço interno do equipamento, contrariam o objetivo inicial de desenvolver um dispositivo de baixo custo, leve e portátil.

Dessa forma, optou-se pela uso da carga fantasma no projeto do verificador, mesmo com esta variação na corrente aplicada e o aumento de temperatura, o que não interfere no resultado final dos ensaios, ao invés de utilizar fontes de tensão ou de corrente que manteriam o valor destas grandezas constantes, mas deixaram o produto mais oneroso, maior e mais pesado, contrariando sua proposta de ser leve e portátil. Esta, portanto, foi uma solução robusta e barata, que atende de forma eficaz na realização dos ensaios, conforme proposto.

4.4 Padrão de Medição

O Smartem possui também um padrão interno de medição. Este padrão consiste em uma placa microprocessada exclusiva para cálculo da energia que passa pelo medidor no momento dos ensaios, permitindo, assim, que o equipamento seja capaz de calcular o erro entre seu padrão interno e o medidor sob verificação. Este padrão possui um erro absoluto de $\pm 0,05$ Wh na medição de energia, porém consegue atender os Regulamentos Técnico Metrológicos (1) e (6) que exigem um erro de pelo menos $\pm 0,3\%$ na precisão da medição. Para o cálculo do erro no ensaio de exatidão, a equação 4.15 é utilizada:

$$Erro(\%) = \frac{(E_{medidor} - E_{Smartem}) * 100}{E_{Smartem}} \quad (4.15)$$

Sendo que um resultado com erro negativo significa que o medidor está lendo uma energia menor do que a que realmente está passando por ele e, neste caso, a concessionária está em prejuízo. Já um resultado com erro positivo indica que o medidor está medindo mais do que realmente está sendo utilizado e, portanto, o cliente está sendo prejudicado. Para ambos os casos, os limites aceitáveis de erros para mais e para menos apresentados nas tabelas das figuras 10 e 11 indicam a necessidade ou não da troca daquele medidor.

O padrão interno do Smartem também é passível de calibração com ajustes e sem ajustes. Para a calibração sem ajustes (ou verificação), da mesma forma que os medidores de energia comuns, ele emite pulsos que ficam disponíveis para acesso, tornando possível emitir um certificado de calibração do próprio verificador. Já a calibração com ajustes é feita de fábrica, onde são obtidos e informados ao instrumento os ajustes devidos de ganho e de offset. Estes ajustes são registrados na memória EEPROM do medidor, permitindo que ele faça um auto ajuste, ou auto calibração, com os parâmetros de calibração obtidos de fábrica, toda vez que é ligado.

O erro do padrão interno de $\pm 0,05$ Wh absoluto exige do equipamento uma particularidade durante os procedimentos de ensaio para garantir que sua precisão final esteja na faixa de $\pm 0,3\%$ exigidos pela norma. Isto ocorre, pois, dependendo da quantidade de energia envolvida em um ensaio, o valor de $\pm 0,05$ Wh tem um "peso" significativo. Entende-se como significativo o fato de que, uma variação de $\pm 0,05$ Wh na medição de energia do padrão, implique em uma variação no resultado do erro, obtido pelo próprio padrão, de mais do que $\pm 0,3\%$.

No gráfico da figura 20 são mostrados ensaios de exatidão realizados pelo Smartem, para diferentes quantidades de pulsos, em um medidor monofásico eletrônico com constante K_e igual a $0,625$ Wh/pulso e erro real de $-0,08\%$. Este erro real foi obtido por um verificador de laboratório, com precisão de $\pm 0,001\%$, muito maior que a do verificador apresentado neste texto. O objetivo deste experimento é verificar o efeito da quantidade de pulsos, utilizados em um ensaio de exatidão, no cálculo do erro do medidor, realizado pelo Smartem.

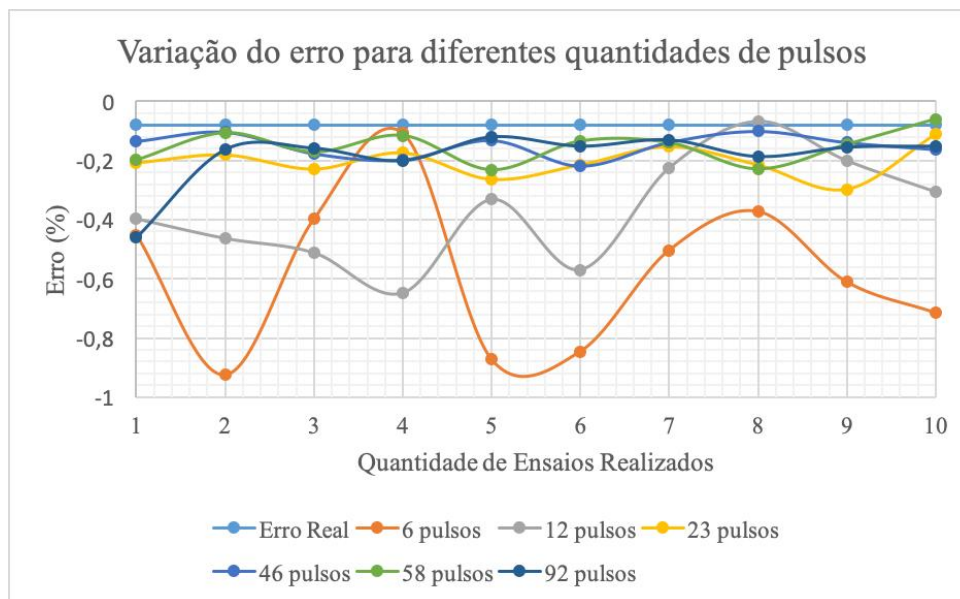


Figura 20 – Gráfico representativo da variação do erro para diferentes quantidades de pulsos. Fonte: Autor.

Neste caso, o aplicativo sugeriu uma quantidade de 23 pulsos para garantir a precisão do Smartem de $\pm 0,3\%$ no processo de verificação. Pode ser observado que para uma quantidade de pulsos menor que este valor, a imprecisão fica alta, resultando em uma indicação de um erro de $-0,9\%$ no caso de apenas 6 pulsos. Já para quantidades iguais ou acima do número de pulsos sugeridos, observa-se que a variação do erro apresentado é de aproximadamente $0,3\%$, garantindo a manutenção da precisão do equipamento, na faixa $\pm 0,3\%$, exigida por norma.

Para melhor compreensão sobre o erro absoluto do equipamento, foram realizados dois procedimentos, de 50 ensaios de exatidão, em dois medidores distintos a fim de verificar o efeito do resultado do erro, obtido pelo equipamento, durante o ensaio, de acordo com a quantidade de pulsos utilizada.

Sendo assim, selecionou-se um medidor monofásico eletrônico com erro real, em porcentagem, de $-0,03\%$, pré-obtido por meio do uso de um verificador de laboratório mais preciso que o Smartem, e constante K_e igual a $1,0 \text{ Wh/pulso}$. Para este caso, foi sugerido pelo aplicativo Smartem uma quantidade igual a 14 pulsos.

A figura 21 apresenta a variação do erro(%) obtido pelo equipamento em cada um dos 50 ensaios. Pode-se notar que apesar de haver uma certa oscilação, sendo que a média das medidas obtidas foi de $-0,095\%$ com variação entre $0,025\%$ e $-0,252\%$, os erros obtidos se encontram dentro da faixa de $\pm 0,3\%$ proposta e próximo à referência correta de $-0,03\%$.

Já na figura 22, foram usados 33 pulsos durante a realização dos ensaios de exatidão. Neste caso, a variação dos valores obtidos foi menor, entre $-0,121\%$ e $0,048\%$, com média de $-0,034\%$, evidenciando uma melhora nos resultados em relação aos ensaios

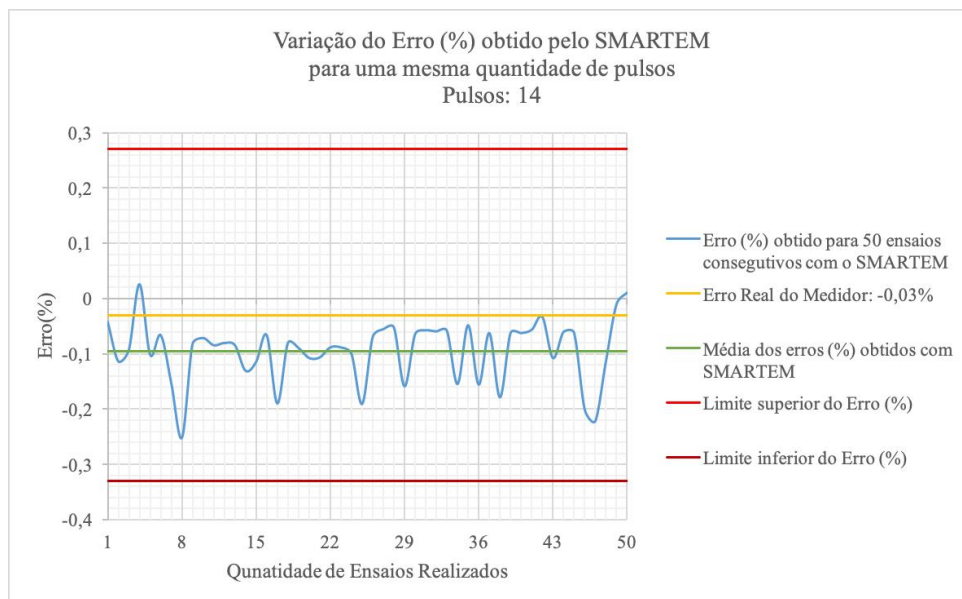


Figura 21 – Conjunto de 50 aferições do Smartem em um medidor eletrônico com erro de -0,03%. Fonte: Autor.

com menos pulsos, porém não desqualificando os resultados anteriores, já que estão dentro da faixa de precisão do equipamento.

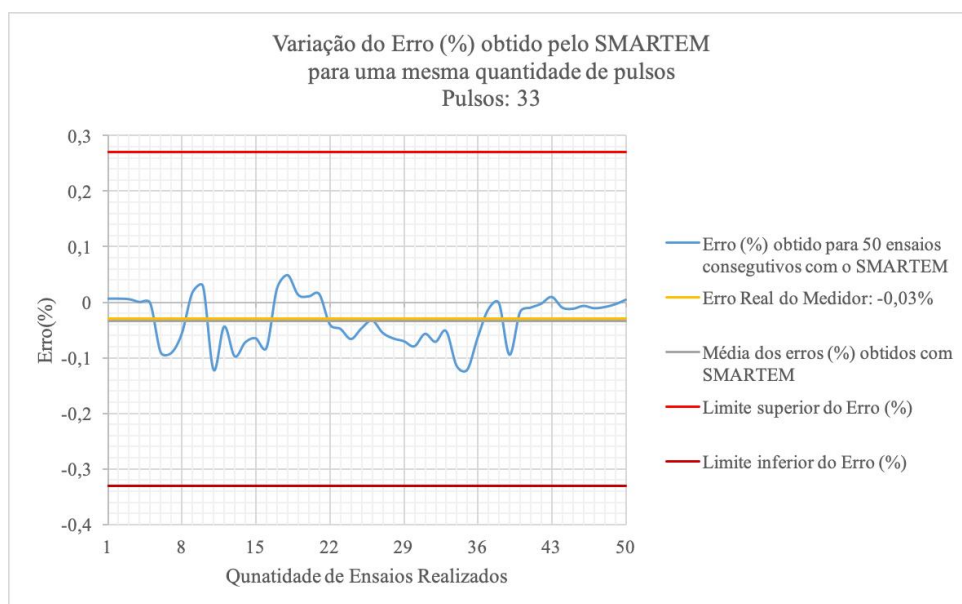


Figura 22 – Gráfico representativo da variação do erro para diferentes quantidades de pulsos. Fonte: Autor.

Em seguida, o mesmo procedimento foi realizado em um medidor de energia monofásico eletromecânico de K_d igual a 1,25 Wh/revolução, com erro real, previamente medido por um verificador laboratorial com precisão melhor que o Smartem, de + 0,35%. O aplicativo Smartem sugeriu uma quantidade de 11 revoluções para a realização dos ensaios de exatidão executados. Vale lembrar que o número de pulsos (ou revoluções) sugeridos pelo aplicativo visa garantir que o dispositivo execute os ensaios com precisão

de $\pm 0,3\%$, conforme exigido por norma.

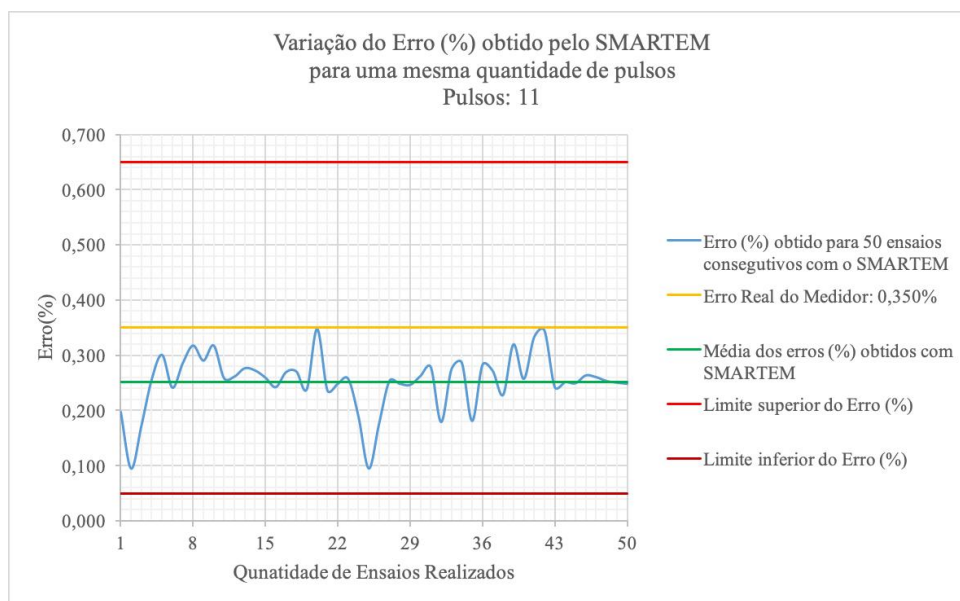


Figura 23 – Gráfico representativo da variação do erro para diferentes quantidades de pulsos. Fonte: Autor.

A figura 23 mostra os resultados de erro para um conjunto de ensaios com 11 pulsos do medidor. Neste caso, a média das medidas obtidas foi de $0,252\%$ com variação de $0,095\%$ a $0,347\%$.

Da mesma forma que no procedimento anterior, houve uma melhora nas medições do Smartem dado o aumento do número de pulsos para o ensaio de exatidão. Como pode ser visto na figura 24, os erros estão menos oscilantes e mais próximos do valor real do erro do medidor sob análise, sendo que sua média foi de $0,321\%$ com variação de medições entre $0,248\%$ e $0,416\%$, menor que a do procedimento com menos pulsos.

Portanto, com base neste dois procedimentos pode-se observar que o erro absoluto na medição de energia do verificador tem influência considerável dependendo do número de pulsos (ou revoluções) escolhidos para realização do ensaio. Uma sub rotina implementada no código do aplicativo calcula e sugere ao usuário um número de pulsos ou revoluções adequado com o intuito de garantir um procedimento de verificação adequado por parte do equipamento. Este cálculo se baseia na informação, pré solicitada no próprio aplicativo, do K_e ou K_d do medidor sob análise. Inclusive, se mesmo após a sugestão do aplicativo, o usuário optar por realizar o ensaio com quantidades de pulsos ou revoluções menores que o recomendado, o aplicativo emite um alerta informando que não conseguirá garantir a precisão necessária para que o ensaio de exatidão tenha validade, segundo as normas.

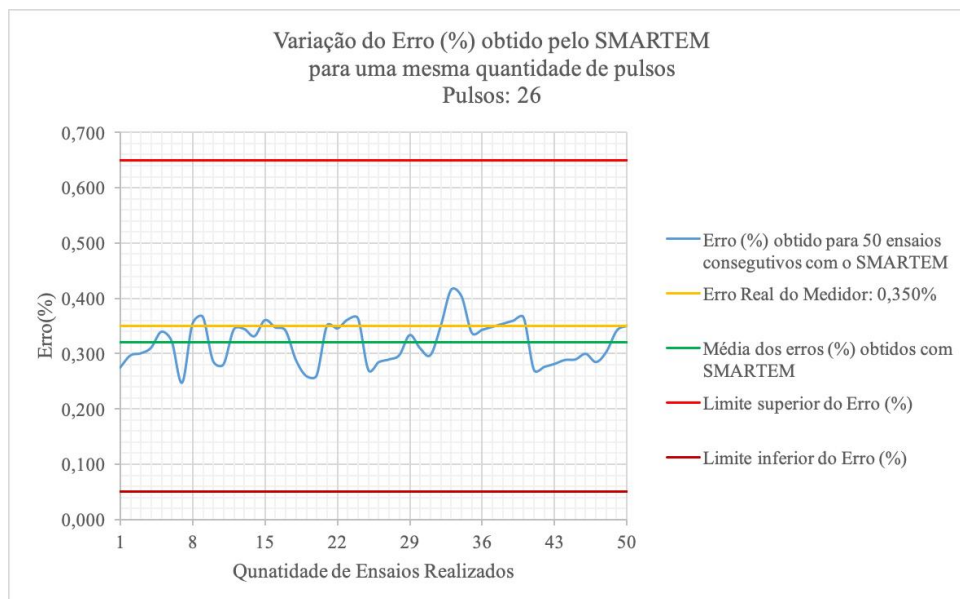


Figura 24 – Gráfico representativo da variação do erro para diferentes quantidades de pulsos. Fonte: Autor.

4.5 Processador e Periféricos

Internamente ao Smartem existem três PCIs (Placa de circuito impresso) que juntas compõem o conjunto microprocessado do equipamento. Todos os componentes eletrônicos que compõem tais PCIs foram especificados de forma a atender às condições transitórias de temperatura, conforme mencionado na sessão anterior, durante a realização dos ensaios.

A PCI principal recebe o nome de PCI de Controle e nela contém as unidades de processamento, o padrão de energia e as ferramentas de comunicação. Nesta PCI são processadas as aquisições de tensão e corrente feitas pelo divisor de tensão e pelo TC durante os ensaios realizados pelo verificador em medidores de energia. Estas aquisições são feitas por meio de um ADC (analogic to digital converter) de 16 bits a uma taxa de amostragem de 8 kHz ou 0,125 ms por amostra e fornecidas ao padrão de energia para o cálculo da energia que está sendo fornecida ao medidor sob teste. Em outras palavras, a taxa de amostragem de 8kHz significa que são medidas 133 amostras para um ciclo de uma onda de 60 Hz, cuja duração é de 16,67 ms. Este padrão, então, fornece ao processador principal uma média das amostras obtidas em 24 ciclos de onda.

Os 16 bits destes ADCs possibilitam ao equipamento uma medição subdividida em $2^{16\text{bits}} - 1 = 65535$ partes, o que garante ao equipamento condições de realizar uma medição mais precisa, mesmo se tratando de um instrumento de baixo custo. Sabendo que o range de leitura de tensão RMS é de 0V a 655V e o range de leitura de corrente RMS é de 0 A a 65A, tem-se que a resolução de medição destas duas grandezas pode ser obtida por meio das equações 4.16 e 4.17.

$$Res_v = \frac{655,35V}{2^{16_{bits}}} = 0,01V \quad (4.16)$$

$$Res_i = \frac{655,35A}{2^{16_{bits}}} = 0,001A \quad (4.17)$$

A análise dos dados obtidos pelos ADCs e da energia calculada pelo padrão interno bem como o resultado final dos ensaios são processados e analisados pelo processador principal, cujo firmware foi programado para este fim. Todos os comandos e entradas do firmware são feitas via aplicativo para Android®. Uma explicação mais detalhada do aplicativo é feita no item posterior. Este firmware pode ser atualizado a qualquer momento via conexão WiFi. O aplicativo avisa ao usuário que existe uma atualização e o instrui a se conectar na rede WiFi que o equipamento disponibiliza exclusivamente para a finalidade de atualização do firmware via OTA (over the air) update. Toda a comunicação com o aplicativo é feita por meio de comunicação Bluetooth classe 2.0 de 2,4 GHz cuja potência máxima de 2,5 mW possibilita um alcance de até 10 metros de distância, que é suficiente para comunicação com o firmware do verificador. Por fim, nesta PCI também se encontra o módulo de circuito de adequação dos sinais do sensor fotossensível que auxilia o verificador durante alguns dos ensaios (ensaio de exatidão e ensaio a vazio). O diagrama de blocos da figura 25 sintetiza o que foi descrito até aqui da PCI de controle.

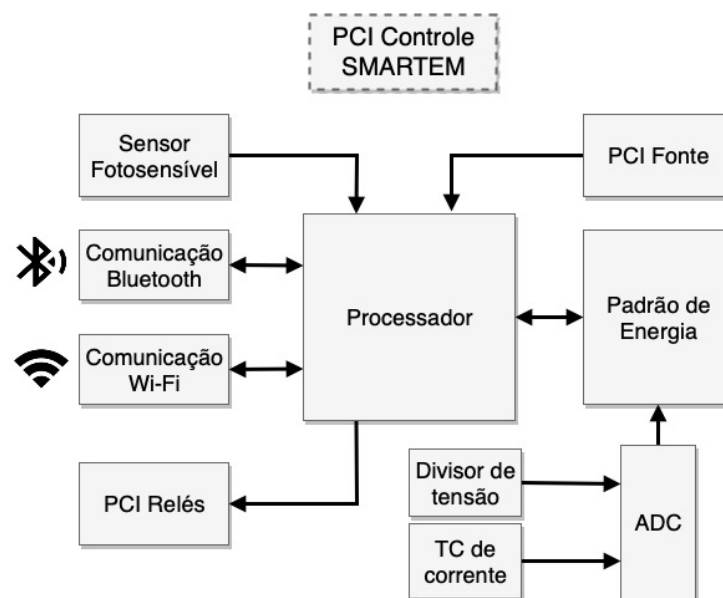


Figura 25 – Diagrama de blocos representativo da PCI de Controle do equipamento Smartem. Fonte: Autor.

Já a PCI de Relés, é conectada com a PCI de Controle via caixas conectoras que garantem a comunicação do processador principal com esta segunda placa. O processador envia um comando para o I2C (Inter-Integrated Circuit) presente na placa de Relés. O I2C é, basicamente, um tipo de comunicação serial que utiliza apenas dois fios que geralmente

é utilizado para conectar microcontroladores a periféricos de baixa velocidade, como é o caso dos relés. O I2C, então, aciona, via opto-acopladores, os relés específicos para realizar determinado ensaio. A definição de quais relés são acionados é feita no firmware do microcontrolador. Como visto na figura 19, os relés estão conectados a TAPs de tensão e de corrente do autotransformador toroidal e, portanto, o acionamento dos mesmos permite o fornecimento da carga fantasma ou virtual para o medidor sob teste, possibilitando a realização dos ensaios. A figura 26 apresenta um diagrama de blocos representativo da PCI de relés descrita.

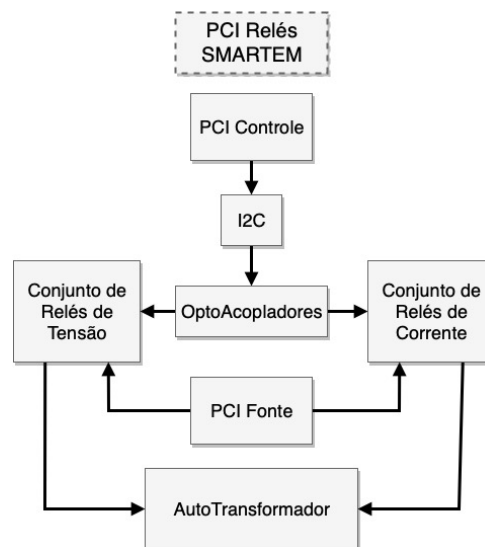


Figura 26 – Diagrama de blocos representativo da PCI de Relés do equipamento Smartem. Fonte: Autor.

O microcontrolador e todos os periféricos da PCI de Controle e da PCI de Relés, que necessitam de uma fonte de tensão, são alimentados por uma fonte de tensão de 5V específica para este fim. Da mesma forma, uma outra fonte de tensão de 12V alimenta exclusivamente os relés para evitar que algum ruído provocado por seu acionamento não atinga eletrônicos importantes no processo de medição de energia, o que poderia acarretar em erros nas medições do padrão de energia ou nas medições de tensão ou corrente. A figura 27 apresenta um diagrama de blocos da PCI de Fonte do equipamento.

Optou-se por desenvolver 3 PCIs em separado, ao invés de uma única PCI, por dois motivos. O primeiro deles para aproveitamento melhor do espaço interno da carcaça do equipamento. Neste caso, o transformador toroidal ocupa a parte superior do verificador inviabilizando uma placa inteira em toda sua extensão. O segundo motivo foi tornar o processo de produção, manutenção e assistência técnica mais ágil e prático, com um sistema de placas modular. Dessa forma, identificando-se um problema em algum componente específico de alguma das PCIs, basta a substituição imediata do módulo inteiro para que o equipamento volte a funcionar imediatamente.

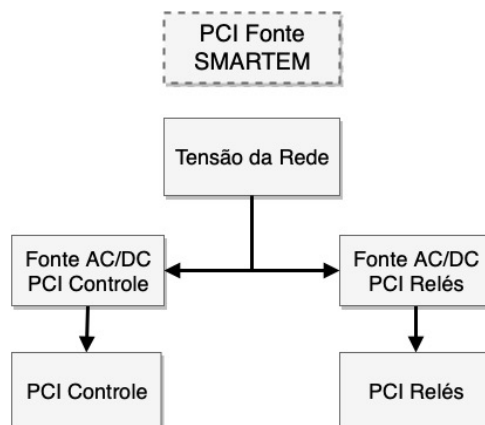


Figura 27 – Diagrama de blocos representativo da PCI da Fonte do equipamento Smartem. Fonte: Autor.

4.6 Aplicativo Smartem

Todas as funcionalidades do verificador portátil são controladas por meio de um aplicativo, com o mesmo nome do equipamento, disponível para celular ou tablet com o sistema operacional Android®. Ao se iniciar o aplicativo, é solicitado ao usuário se conectar ao bluetooth do equipamento Smartem.

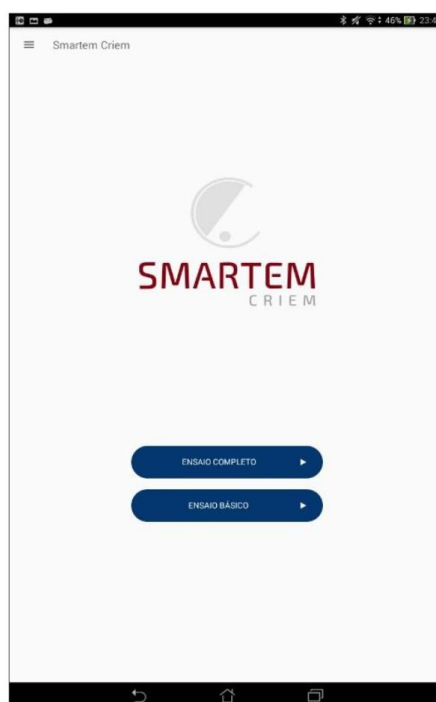


Figura 28 – Tela de definição do modo de funcionamento do aplicativo. Fonte: Autor.

Após feita a conexão, o aplicativo dá ao operador duas opções de procedimentos: o Ensaio Completo e o Ensaio Básico, conforme mostra a Figura 28. No primeiro, são exigidos, do operador, um detalhamento mais completo de todo procedimento realizado de forma a contemplar todas as exigências previstas em (1) e (6) para uma verificação por

solicitação do usuário/proprietário. Cada informação solicitada pelo aplicativo durante uma visita é relevante para o preenchimento do laudo técnico que será impresso, via comunicação Bluetooth, com a impressora térmica portátil que acompanha o equipamento, logo após finalizada a verificação. Este relatório final foi desenvolvido com base no TOI - Termo de Ocorrência de Irregularidade, previsto no artigo 129, inciso I, da Resolução normativa 414/2010 da ANEEL (3), que tem por finalidade formalizar a constatação de qualquer irregularidade encontrada nas unidades de consumo dos usuários de energia elétrica, que proporcione faturamento diferente do real.

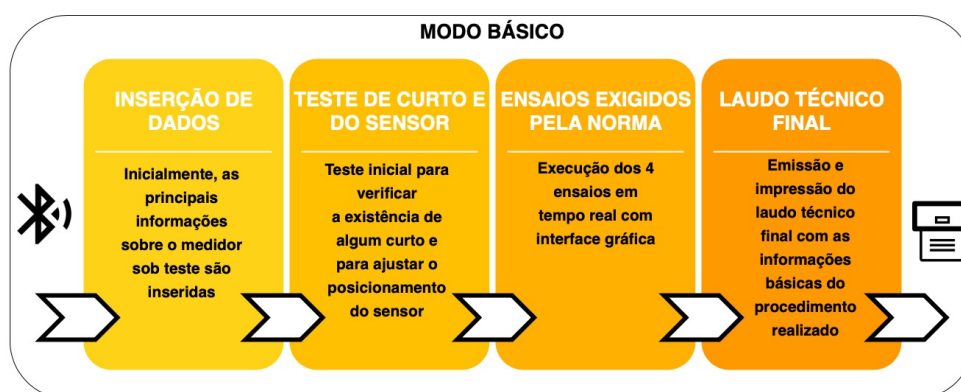


Figura 29 – Fluxograma do funcionamento do aplicativo no modo básico. Fonte: Autor.



Figura 30 – Fluxograma do funcionamento do aplicativo no modo Completo. Fonte: Autor.

Já o ensaio Básico, a fim de tornar o processo mais rápido e dinâmico, são disponibilizados para o operador os 4 ensaios exigidos pela norma apenas para averiguação da situação do medidor. Um laudo apenas informativo, ou seja, sem os dados de procedimentos

necessários no TOI, contendo apenas o veredito final de cada ensaio é emitido e pode também ser impresso de forma similar ao anterior.

O diagrama da figura 29 apresenta um fluxograma, de forma sucinta, das telas do aplicativo no modo Básico. Seguindo o sentido das setas na parte inferior do diagrama, pode ser observado que ao se conectar com o bluetooth de um equipamento, o aplicativo solicita ao usuário alguns dados referentes ao medidor de energia que será aferido. Em seguida, com a intenção de se iniciar os ensaios de maneira segura e eficaz, o aplicativo inicia um teste para verificar a presença de curto na instalação e, em seguida, inicia um procedimento que ajuda a posicionar o sensor ótico do equipamento no local correto. Ao fim destes ensaios, o modo básico do aplicativo leva o usuário para a tela de impressão de um laudo informativo, contendo os resultados dos testes.

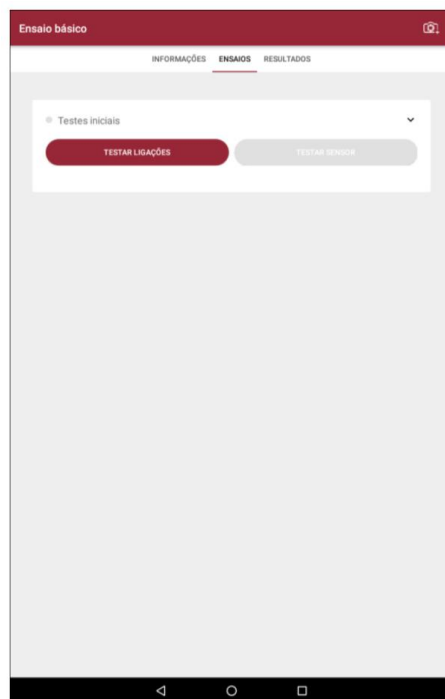
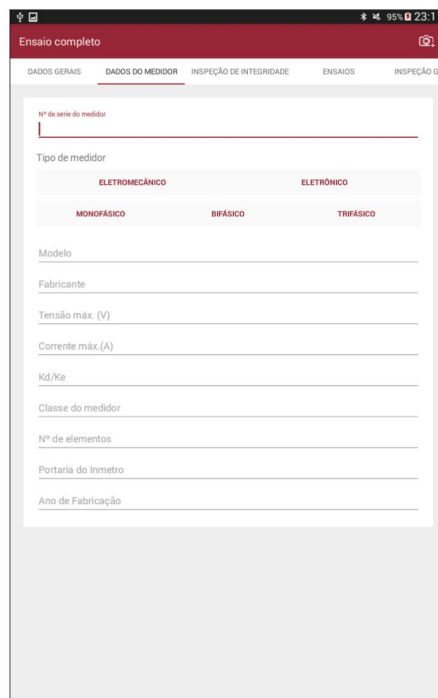


Figura 31 – Tela com os testes de Curto e de sensor, necessários para habilitar o usuário a realizar os ensaios exigidos por norma. Fonte: Autor.

Da mesma forma, o diagrama da figura 30 apresenta um fluxograma, também de forma sucinta, das telas do aplicativo no modo Completo. Neste caso, após a conexão com o equipamento Smartem, o primeiro passo é inserir os dados do executante do procedimento de calibração. Em seguida, é solicitado ao usuário os dados do medidor a ser calibrado. Estes dados podem ser armazenados no próprio aplicativo, via arquivo de planilha, de forma que eles sejam carregados automaticamente, evitando que o operador tenha que digitar seus dados pessoais diversas vezes no mesmo dia, para cada um dos procedimentos de verificação que realizar. Após isto, inicia-se o procedimento de inspeção inicial dos lacres do medidor de energia conforme explicado na sessão 3.1 desta dissertação. Este procedimento é previsto por norma e deve ser realizado uma vez que suas conclusões

devem constar no laudo técnico final. Com isso, o aplicativo leva o usuário à tela de teste de curto e teste do sensor ótico e, posteriormente, aos ensaios exigidos pela norma. Estes dois últimos procedimentos são comuns nos dois modos de funcionamento do aplicativo.



A imagem mostra a interface de usuário de um aplicativo móvel, especificamente a tela 'Ensaio completo'. No topo, há uma barra de navegação com o título 'Ensaio completo' e ícones de menu e pesquisa. Abaixo, há uma barra de navegação com cinco opções: 'DADOS GERAIS', 'DADOS DO MEDIDOR', 'INSPEÇÃO DE INTEGRIDADE', 'ENSAIOS' e 'INSPEÇÃO GER'. O formulário principal contém os seguintes campos e opções:

- Nº de serie do medidor: campo de texto com uma linha vermelha de validação.
- Tipo de medidor: duas opções de radio button, 'ELETROMECÂNICO' e 'ELETRÔNICO'.
- Modelo: campo de texto.
- Fabricante: campo de texto.
- Tensão máx. (V): campo de texto.
- Corrente máx. (A): campo de texto.
- Kd/Ke: campo de texto.
- Classe do medidor: campo de texto.
- Nº de elementos: campo de texto.
- Portaria do Inmetro: campo de texto.
- Ano de Fabricação: campo de texto.

Figura 32 – Tela com os dados do medidor sob teste. Os dados carregam sozinhos para medidores pré-cadastrados no aplicativo. Fonte: Autor.

Diferentemente do modo básico, o modo completo possui ainda mais uma tela extra para inspeção geral final, onde podem ser registrados detalhes como presença de danos físicos no medidor ou qualquer tipo de característica anormal presente no circuito deste medidor de energia. Por fim, a tela para impressão do laudo final é mostrada ao cliente, com a opção de salvar este laudo no histórico de laudos do próprio aplicativo, para eventuais consultas.

A definição de duas formas de operação distintas se deu para que a concessionária ou empresa responsável pudesse optar pela verificação mais curta e rápida, com cerca de 25 min, mas sem todo o detalhamento do processo, chamado de modo básico, ou escolher o modo completo, com um tempo um pouco maior, de aproximadamente 35 a 40min de verificação, mas com a possibilidade de se emitir e imprimir um laudo técnico contemplando todas as informações necessárias do TOI.

Como mencionado, antes de se iniciar qualquer ensaio em um medidor de energia, o verificador Smartem solicita ao operador os dados essenciais do medidor de energia a ser aferido, como visto na figura 32 e, em seguida, realiza dois testes iniciais, como pode ser visto na figura 31.

O primeiro é um teste de curto, feito para assegurar que o operador, ou técnico

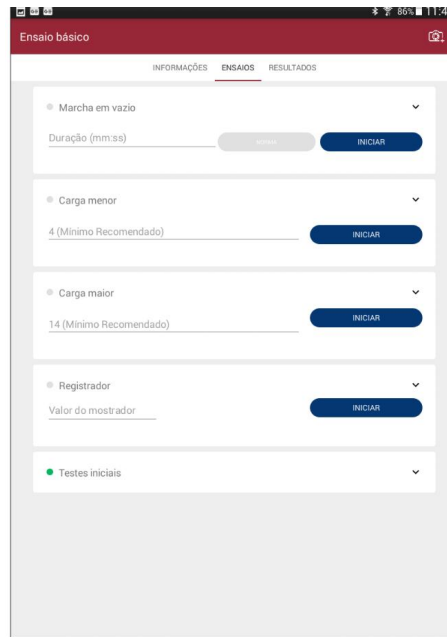


Figura 33 – Tela de Ensaios do App Smartem. Fonte: Autor.

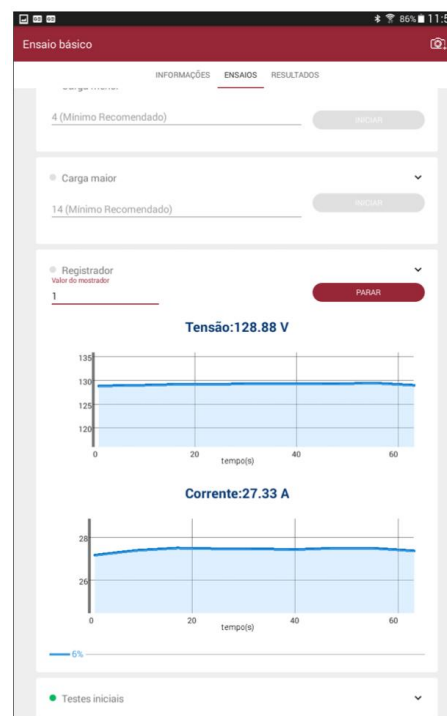


Figura 34 – App Smartem mostra um gráfico do valor RMS da tensão, corrente e andamento do ensaio em tempo real. Fonte: Autor.

responsável, não tenha feito uma conexão em curto, o que pode resultar na queima do medidor sob teste. Este teste sendo aprovado, libera um segundo procedimento, para auxílio do posicionamento correto do sensor fotossensível. Neste caso, o equipamento auxilia o operador a posicionar o sensor de forma que os pulsos ou revoluções estejam sendo detectados pelo instrumento para que, dessa forma, não seja necessário que o técnico ajuste o sensor novamente até que a verificação finalize.

Após os testes iniciais, e o preenchimento de alguns dados importantes para o relatório final, no caso do Ensaio Completo, os 4 ensaios são liberados para serem realizados conforme figura 33. São disponibilizados os ensaios Marcha em Vazio, Carga Maior, Carga Pequena e Registrador, conforme descrito nas sessões 3.2, 3.4 e 3.3, respectivamente. Para cada um desses ensaios, são mostrados, em tempo real, as informações de tensão e corrente medidos e a porcentagem do andamento do ensaio como pode ser visto na figura 34. Ao final de cada um deles, o aplicativo informa se o medidor foi aprovado, ou não, no ensaio conforme as normas vigentes. As informações de aprovação ou desaprovação constam no laudo técnico final. No caso dos ensaios de exatidão, o erro percentual do medidor sob verificação também é apresentado. Já no caso do ensaio do registrador, ou mostrador, o aplicativo permite que o usuário faça um registro fotográfico, caso o celular ou tablet possua este recurso, do instante anterior e posterior ao ensaio para confirmar ou comprovar que foi aplicado 1,0 kWh de energia durante o ensaio. Estas fotos ficam armazenadas em uma pasta, com nome Smartem, na memória interna do celular ou tablet.

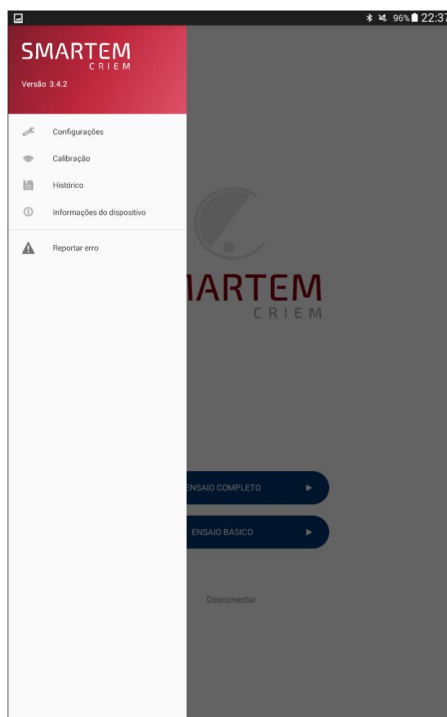


Figura 35 – Opções do Menu superior do aplicativo Smartem. Fonte: Autor.

Por fim, o menu superior da tela inicial do aplicativo apresenta algumas opções interessantes para o usuário, como pode ser visto na figura 35. No item Configurações, é possível salvar um arquivo com extensão .xlsx contendo o cadastro do banco de dados de todos os medidores que a concessionária ou empresa responsável possui de forma a anular a necessidade de se preencher os dados necessários do medidor a ser aferido durante a inspeção, reduzindo ainda mais o tempo de calibração em campo. Além disso, o item Histórico apresenta um histórico de todas as aferições realizadas até então, com suas

respectivas fotos, caso houver, e possibilidade de reimpressão do relatório emitido naquela calibração.

4.7 Diagrama Representativo Completo

Após a apresentação e análise aprofundada dos principais elementos que compõem o hardware do verificador portátil, somado a apresentação das funcionalidades do software, pode-se representar o equipamento através de um diagrama de blocos mais completo e detalhado, se comparado ao diagrama simplificado da figura 14, apresentado no início deste capítulo, na sessão 4.2.

Dessa forma, a figura 36 representa, de forma mais fiel, a composição do hardware e do software (aplicativo) do equipamento Smartem, destacando seus principais elementos. Cada um dos elementos contidos nesta figura são apresentados e analisados neste capítulo.

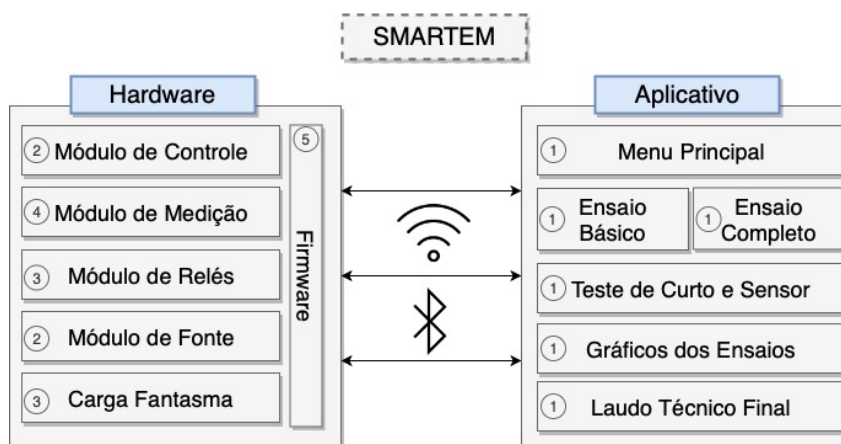


Figura 36 – Diagrama de blocos representativo completo do equipamento Smartem. Fonte: Autor.

Com isso, é interessante destacar alguns detalhes importantes do diagrama da figura 36. Inicialmente, vale mencionar que cada sub-bloco dos dois blocos principais (Hardware e Aplicativo) possui um número associado. Este número remete aos números da figura 13 que representa o fluxo de funcionamento do equipamento Smartem, situada na sessão 4.2 deste capítulo, sendo que cada um deles associa um bloco do hardware a uma função no fluxo de funcionamento. Além disso, chama-se atenção para o sub-bloco Firmware, contido no bloco do Hardware. O firmware, basicamente, é a programação contida no processador do equipamento. Nele são estabelecidos e definidos todos os processos que regem seu funcionamento, estabelecendo a conexão entre o hardware e o software.

4.8 Certificações

4.8.1 Categoria de Sobretensão

De acordo com a IEC61010 (International Electrotechnical Commission) (2), anexo K, instrumentos de medição elétrica são classificados por categorias de segurança dependendo do local onde tal instrumento será usado. As categorias são classificadas em CAT I, II, III e IV e referem-se à capacidade do equipamento de suportar os transientes (surto de tensão elétrica que ocorre num intervalo de tempo muito pequeno) da rede. Ou seja, quanto maior a categoria, maior a resistência a um possível surto da rede elétrica, e consequentemente, mais segurança ao operador.

Instrumentos de categoria I são voltados para uso em eletrônica de laboratório, ou computadores de baixa potência e com níveis de transientes limitados. Já os instrumentos de categoria II podem ser usados para circuitos monofásicos em baixa tensão, como eletrodomésticos ou ferramentas portáteis ligadas a tomadas com distância de menos de 10 metros da fonte. As categorias III e IV são para circuitos com maior potência, que estejam próximos à entrada da rede elétrica pública (no caso da categoria III) ou na origem da instalação elétrica, onde é feita a conexão de baixa tensão ao suprimento de energia fornecido pela concessionária responsável (no caso da categoria IV). Em situações com maior risco de sobretensão, desde medições em medidores de energia elétrica até subestações de energia, deve-se usar instrumentos com categoria IV, como é o caso do verificador apresentado nesta dissertação.

Cada categoria possui um indicador da tensão em que o instrumento irá operar, o que está diretamente relacionado ao grau de suportabilidade de transientes do mesmo. Com isso, um equipamento que é usado apenas para medições de valores de tensão abaixo de 150V não precisa ter o mesmo grau de suportabilidade, ou a mesma categoria de sobretensão, de um dispositivo que opera com tensões de até 1000V.

Segundo (2), para que um instrumento seja classificado com uma das categorias de sobretensão, ele deve ser submetido a alguns testes para avaliar a qualidade e a suportabilidade de seu isolamento elétrico.

As figuras 37 e 38 são tabelas, retiradas da IEC61010 (2), que apresentam os valores de tensões que o equipamento sob teste deve suportar para ser classificado com categoria IV de sobretensão.

Na figura 37 pode ser observado que, para uma dada tensão fase-neutro a que este equipamento ficará submetido durante seu uso, deve ser realizado um teste de suportabilidade de 5 segundos de tensão RMS com valores pré-determinados, ou suportar um impulso de tensão com valores também já pré definidos. Não havendo interrupção do isolamento do equipamento, seja ele básico ou reforçado, o instrumento é classificado com

Voltage line-to-neutral a.c. r.m.s. or d.c. V	Test voltage			
	5 s a.c. test V r.m.s.		Impulse test V peak	
	BASIC INSULATION and SUPPLEMENTARY INSULATION	REINFORCED INSULATION	BASIC INSULATION and SUPPLEMENTARY INSULATION	REINFORCED INSULATION
≤150	2 210	3 510	4 000	6 400
>150 ≤ 300	3 310	5 400	6 000	9 600
>300 ≤ 600	4 260	7 400	8 000	12 800
>600 ≤ 1 000	6 600	11 940	12 000	19 200

Figura 37 – Tabela de Tensões de teste para isolamento sólido em circuitos/instrumentos CAT IV. Fonte: (2)

Voltage line-to-neutral a.c. r.m.s. or d.c. V	Test voltage			
	1 min a.c. test V r.m.s.		1 min d.c. test voltage V d.c.	
	BASIC INSULATION and SUPPLEMENTARY INSULATION	REINFORCED INSULATION	BASIC INSULATION and SUPPLEMENTARY INSULATION	REINFORCED INSULATION
≤150	1 350	2 700	1 900	3 800
> 150 ≤ 300	1 500	3 000	2 100	4 200
> 300 ≤ 600	1 800	3 600	2 550	5 100
> 600 ≤ 1 000	2 200	4 400	3 100	6 200

Figura 38 – Tabela de Tensões de teste para avaliar o estresse a longo prazo do isolamento sólido em circuitos/instrumentos CAT IV. Fonte: (2)

a devida categoria.

Da mesma forma, na figura 38 são apresentados os valores de tensão a que um instrumento deve ser submetido, dependendo da tensão de operação do mesmo, para que garanta a segurança do usuário. Neste caso, o teste avalia o estresse a longo prazo do isolamento sólido aplicando um determinado valor de tensão RMS por um período de 1 min no equipamento ou uma tensão DC pelo mesmo período de tempo.

Com isso, o equipamento apresentado nesta dissertação foi submetido a tais testes em um laboratório especializado, para comprovar sua classificação como um instrumento de categoria IV, já que seu uso em medidores de energia elétrica demanda esta categoria de isolamento.

Portanto, após realizados os devidos testes, assegurou-se que o Smartem é um equipamento CAT IV - 300V (já que opera em medidores de 127/220V), trazendo maior

confiabilidade ao dispositivo. Dessa forma, ele atende aos padrões de segurança estabelecidos pelo padrão internacional IEC61010-1 (2) e pela norma brasileira NBR5410 (18), anexo E, uma vez que se trata de um instrumento com tensão de operação de até 300V que opera com medidores de energia na entrada de instalações elétricas.

4.8.2 Homologação da Anatel

Antes de serem comercializados ou até mesmo utilizados no Brasil, a maioria dos dispositivos de telecomunicações precisam ser homologados pela agência reguladora e fiscalizadora da área de telecomunicações responsável por este procedimento, a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações).

Entre os dispositivos que devem ser submetidos ao processo de homologação inclui telefones celulares, telefones fixos, tablets, notebooks, consoles de videogame, Smart Tv's, impressoras, dentre outros similares, que obviamente fazem uso de telecomunicações. Mas, produtos ou acessórios que não são necessariamente envolvidos na transmissão de sinais também necessitam de homologação, como é o caso de baterias de celular e fios carregadores.

Dessa forma, evidencia-se que é necessário uma compreensão adequada de quais dispositivos ou acessórios necessitam de tal homologação da ANATEL para evitar algum tipo de medida punitiva por parte do órgão fiscalizador. Estas medidas podem vir a ser uma aplicação de multa ou até mesmo culminar no impedimento da comercialização do dispositivo. Com isso, todo o tipo de produto que inclui tecnologias Wifi, deve ser homologado, ou seja, obter um certificado atestando a validade do seu uso no Brasil, atendendo às normas vigentes. Esse mesmo critério se aplica a transmissões por Bluetooth, o que engloba produtos como fones de ouvido sem fio e aparelhos de GPS com capacidade de transmissão de dados por essa tecnologia.

Os certificados que regularizam o uso e comercialização de um dispositivo de telecomunicação são um pré-requisito para a expedição da homologação da Anatel. Para isso, o produto deve passar por testes em laboratórios e ter sua qualidade e segurança comprovada, de acordo com especificações da regulamentação no Brasil.

O verificador portátil, como mencionado, possui comunicação via bluetooth, com tablet ou celular, para comandar as funcionalidades do aparelho, e comunicação via WiFi para atualização remota do firmware do processador do equipamento. Portanto, fez-se necessário obter-se a homologação deste produto junto à ANATEL tanto para a comunicação WiFi quanto para a comunicação Bluetooth.

O WiFi utiliza os padrões wireless IEEE 802,11b/g/n, com faixa de frequência entre 2,4GHz - 2,5GHz. Já o bluetooth também tem sua faixa de frequência entre 2.4 a 2.485 GHz, com potência de 2.5mW e alcance de até 10m.

Tais características foram avaliadas e testadas em um laboratório especializado da ANATEL a fim verificar sua qualificação como um produto homologado pelo órgão. Dessa forma, ao ser aprovado nos testes laboratoriais, garantiu-se que as frequências utilizadas pelo equipamento estão dentro das permitidas pela Anatel viabilizando seu uso e comercialização no Brasil.

4.8.3 Verificação do Equipamento Desenvolvido

Visando atestar a performance do produto para sua principal proposta de operação como verificador, o Smartem também passou por um processo de calibração no Laboratório Eletrônico de Medição - LEM da CEMIG pelo Padrão de Referência Monofásicos marca Radian, modelo RM-11, cuja precisão é de $\pm 0.003\%$. O dispositivo Smartem foi aprovado com sucesso no procedimento. O certificado emitido se encontra nos Anexos deste texto.

O LEM é um laboratório referência onde também são realizadas as análises de protótipos de medidores de energia. Esse laboratório há alguns anos vem prestando serviços de calibração de padrões de energia ativa para outras empresas de instrumentação e medição, fabricantes de medidores, indústrias, reformadoras de medidores e distribuidoras.

É um laboratório credenciado pelo INMETRO com certificação RBC (Rede Brasileira de Calibração), Normalização e Qualidade Industrial e certificado pelo Bureau Veritas Quality International - BVQI no Sistema de Gestão da Qualidade - ISO 9002, o que garante ao equipamento a confiabilidade e a credibilidade necessária para operar no mercado.

4.9 Comentários Finais

Neste capítulo, foram apresentados todos os blocos que compõe o desenvolvimento do verificador portátil, suas características técnicas e a justificativa do uso de seus principais elementos de hardware e funcionalidades de software. Além disso, também foram mostradas as certificações necessárias para viabilizar o uso do equipamento no mercado brasileiro e qual o motivo do dispositivo necessitar destas certificações.

Com isso, apresentou-se, inicialmente neste texto, os medidores que seriam calibrados, a motivação para o uso de um equipamento portátil de calibração e as normas técnicas vigentes, para fins de contextualização. Em seguida, no capítulo seguinte, foram descritos, de forma detalhada, cada um dos ensaios exigidos pela norma e que deveriam ser realizados em caso de uma verificação por solicitação do cliente.

O objetivo destes capítulos foi de contextualizar a respeito da área de atuação e os ensaios que o equipamento deve realizar de forma a possibilitar uma melhor compreensão das escolhas e opções eletroeletrônicas adotadas no hardware do dispositivo, bem como

corroborar a dinâmica de funcionamento do software (aplicativo), ambos apresentados neste capítulo que se encerra.

Dessa forma, no capítulo seguinte, apresenta-se o produto verificador portátil atualmente comercializado e seus acessórios. Além disso, é descrito todo o procedimento para utilização do mesmo em uma eventual inspeção em campo. Aborda-se também sobre a opção de utilizar o equipamento em laboratório, encaixado em uma bancada. Por fim, também é mostrado como as concessionárias de energia, que já estão fazendo uso do equipamento, estão se beneficiando de suas funcionalidades.

Capítulo 5

Verificador de Medidores de Energia - SMARTEM

5.1 Kit SMARTEM

Na Figura 39 pode-se observar a unidade do instrumento de calibração portátil Smartem juntamente com a indicação da função de cada um dos seus componentes externos apresentados na figura 40.

Para a realização de uma verificação faz-se necessária a desconexão da rede elétrica e da carga ou cliente como mencionado anteriormente. Os cabos da própria rede elétrica são usados para energizar o Smartem e gerar as grandezas elétricas para a realização dos ensaios. A figura 39 exemplifica como é feita a ligação em medidores monofásicos. No painel frontal do equipamento, um diagrama foi inserido para auxiliar neste processo de instalação do equipamento no medidor.

O kit completo do verificador contém seu manual de operação, um cabo de alimentação, com possibilidade de conexão para fase, neutro e terra. Além disso, possui dois cabos de corrente de 6mm², que conectam, em série, a saída e o retorno do equipamento, conforme figura 39 e 40 (tabela), com o circuito de corrente do medidor e dois "jumpers" para conectar, em série, em medidores polifásicos, o circuito de corrente das diferentes fases.

Todos os cabos utilizados externamente, bem como todo o enrolamento do secundário do transformador internamente, são de 6mm². Optou-se por esta espessura para que a resistência do secundário fosse a menor possível, para que a corrente fosse grande o suficiente, dentro do comprimento fixado em 1,2m. Cabos mais grossos fariam com que o custo de fabricação fosse maior. Já o comprimento de 1,2m foi escolhido, empiricamente, como sendo ideal para realização dos ensaios com o equipamento posicionado no chão, elevando-se apenas os cabos para se conectar no medidor sob análise.

Ao ser executado o teste a vazio ou o teste de exatidão, no qual se faz uma



Figura 39 – Funções dos componentes externos do equipamento Smartem. Fonte: Autor.

Nº	NOME	FUNÇÃO	Nº	NOME	FUNÇÃO
1	Saída	Saída de Corrente	5	Proteção	Fusível de ação rápida
2	Retorno	Conector de Retorno do Circuito	6	Alimentação	Conector para alimentação Vac (60Hz) F/N
3	LED de Corrente	LED amarelo habilitado quando OUTPUT conduz corrente	7	ON / OFF	Chave liga-desliga do equipamento
4	LED do Bluetooth	LED vermelho indicador de conexão Bluetooth	8	Unidade Ótica	Unidade Ótica de detecção de pulsos de medidores

Figura 40 – Funções dos componentes externos do equipamento Smartem. Fonte: Autor.

comparação da medição feita pelo medidor sob análise com a medição do padrão interno do verificador, é necessário que seja feita a leitura dos pulsos emitidos pelo medidor, no caso de um medidor eletrônico, ou as revoluções do disco, no caso de um medidor eletromecânico. Para isso, o verificador conta com dois adereços. O primeiro, e mais preciso, é um sensor fotossensível capaz de detectar pulsos de LED e também a marca preta do disco. Este sensor é fixado através de uma haste encaixada no pino de neutro do medidor (como pode ser observado na figura 42), o que garante o aterramento do mesmo e maior estabilidade. O segundo é um aparato, nomeado de "botoeira". Este aparato é usado, pelo operador do instrumento, para detecção manual dos pulsos ou giros do disco dos medidores de energia. Todos estes itens são acomodados em uma maleta rígida e própria para transporte.

Para que o equipamento seja autônomo na execução de suas funcionalidades, alguns itens opcionais podem ser incluídos. Estes itens consistem em um tablet, com sistema operacional Android® (figura 42), com o aplicativo Smartem previamente instalado, e

uma impressora térmica Bluetooth portátil (figura 43), para impressão do laudo técnico (figura 41) ao fim do processo de verificação.

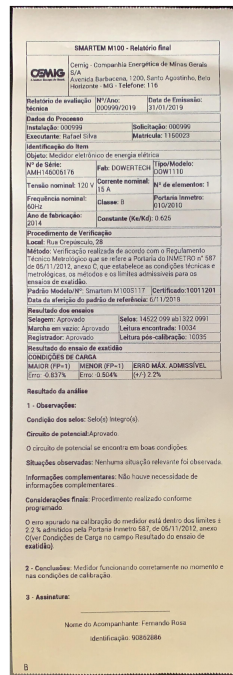


Figura 41 – Laudo Técnico emitido pela CEMIG durante uma inspeção, gerado no aplicativo Smartem e impresso pela impressora térmica portátil. Fonte: Autor.



Figura 42 – Smartem conectado a um medidor monofásico de energia e um tablet com o aplicativo aberto na página inicial. Fonte: Autor.

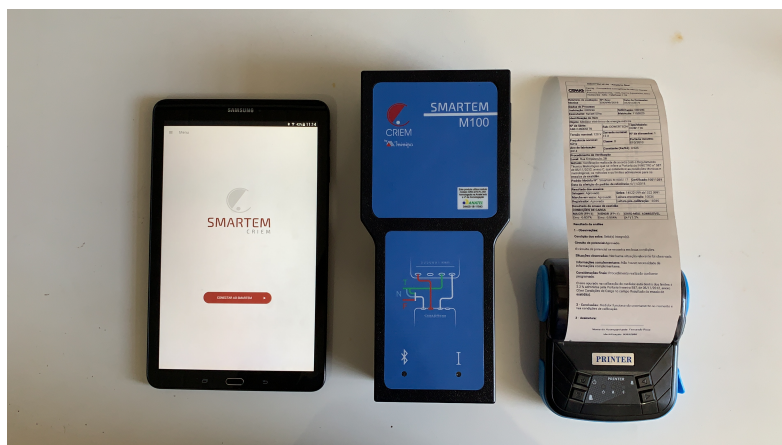


Figura 43 – Smartem com o selo de homologação da ANATEL e sua impressora portátil bluetooth para emissão de Laudo Técnico em campo. Fonte: Autor.

5.1.1 Uso em Laboratório

O verificador Smartem também foi desenvolvido com funcionalidades para uso em laboratório, já que aplica níveis de tensão diferentes para medidores eletrônicos ou eletromecânicos como especificado em (1) e (6).

Para isso, existe a Bancada Monofásica de Calibração Smartem para laboratório. É uma versão simplificada e monofásica das atuais bancadas de calibração descritas na introdução deste texto. Ela conta com um encaixe na sua superfície superior para um equipamento portátil Smartem tornando possível o mesmo instrumento ser utilizado tanto em campo, quanto em laboratório, ao ser encaixado na parte traseira do módulo. A vantagem de se usar o módulo em laboratório é o seu sistema de encaixe rápido que permite troca de medidores a serem aferidos de forma mais dinâmica, tornando mais rápido o processo de verificação em laboratório.

5.2 Aplicação Comercial

O verificador portátil Smartem se encontra comercialmente disponível, em fase de vendas e, apesar de recente, já está sendo utilizado para verificação de medidores em algumas concessionárias de energia e empresas prestadoras de serviços na área, que atuam no Brasil, como CEMIG e ENEL.

É interessante mencionar que, além de ser utilizado para verificação de medidores em campo, via solicitação do cliente, função para a qual foi desenvolvido, o Smartem está atuando como uma importante ferramenta no combate a irregularidades e fraudes, segundo as empresas que adquiriram o equipamento.

Essas irregularidades e fraudes, de acordo com (19) compõem o conjunto das perdas não técnicas (PNT) da concessionária de energia e estão relacionadas, basicamente,



Figura 44 – Bancada de calibração monofásica Smartem. Fonte: Autor

ao não faturamento de uma energia que está sendo consumida pelo cliente. E dentre as principais causas deste fato estão a falta de verificação no medidor de energia e furto através do uso de energia que não é mensurada pelo medidor ou de adulterações ilegais no próprio medidor de energia para que ele registre um consumo diferente do real.

Segundo a ANEEL, como mencionado em (20), irregularidades como ligação direta da fase na carga ("bypass" do medidor) e bloqueio do disco, no caso de medidores eletromecânicos, fazem parte de um segmento das perdas comerciais caracterizado como perdas por ação do consumidor. E algumas destas fraudes são invisíveis diante de uma análise externa do medidor, uma vez que podem se tratar de uma adulteração interna (21), e não são detectadas. Mas ao utilizar o verificador Smartem, as empresas estão detectando a existência de algumas destas fraudes internas, já que, em seu ensaio de exatidão, o verificador portátil Smartem apresenta o erro de medição de energia do medidor, podendo este estar exageradamente aquém do esperado, caracterizando possibilidade de fraude interna, que antes só seria identificada em um laboratório especializado.

Além disso, caso constatada uma irregularidade no local e atestado o funcionamento adequado do medidor, ao se fazer uso do Smartem, acusa-se probabilidade de "gato na rede", ou seja, parte do consumo daquele usuário não está sendo mensurado e registrado pelo medidor atribuído a este usuário.

Portanto, apesar de ser um produto novo no mercado, sua utilização vem facilitando o trabalho de inspeção de irregularidades, trazendo economia para essas empresas responsáveis, segundo as próprias empresas.

5.3 Comentários Finais

Após apresentar e analisar o desenvolvimento do equipamento no capítulo anterior, abordou-se, neste capítulo os procedimentos para realização de uma verificação de medidor de energia em campo e seus principais acessórios. Este capítulo fez-se válido na intenção de apresentar o resultado final do desenvolvimento do verificador, bem como o procedimento básico de como utilizá-lo.

Além disso, sua utilização, por parte das primeiras concessionárias de energia que já estão fazendo uso do equipamento, para detecção de fraudes, evidenciou sua boa aceitação no mercado nacional, até então, e as possibilidades que o dispositivo pode proporcionar à empresa que o utilizar.

No capítulo seguinte são apresentadas algumas conclusões e comentários a respeito dos principais pontos do que se foi discutido até aqui, destacando-se a motivação e o cumprimento do objetivo proposto inicialmente para esta dissertação.

Capítulo 6

Conclusão

O verificador portátil de medidores de energia, Smartem, desenvolvido, testado e aprimorado ao longo dos últimos 3 anos, não possuía, até então, um estudo detalhado, descrevendo seu princípio de funcionamento, bem como suas características de hardware e software. Dessa forma, a apresentação e análise deste equipamento, realizados nesta dissertação, são de grande valia para corroborar e trazer maior credibilidade técnica às soluções de hardware e software adotadas em seu projeto.

O Smartem se propõe a verificar, ou calibrar sem ajustes, medidores de energia monofásicos e polifásicos emitindo e imprimindo um laudo técnico final, de forma a atender as normas (1) e (6) para verificação por solicitação de usuário. Com ele é possível realizar os 4 ensaios exigidos por norma, sendo eles o teste a vazio, o ensaio de exatidão, realizado com dois valores de corrente distintos, e o ensaio do mostrador, no qual se aplica 1 kWh no medidor sob análise. Equipamentos com propostas similares possuem padrões para calibrar os medidores, mas não possuem carga (capacidade de fornecimento de corrente), como em (10) e (9), necessitando de um equipamento auxiliar para este quesito, normalmente uma carga fantasma ou fontes de tensão e corrente, como em (22) e (15), o que aumenta seu tamanho e custo, dificultando seu uso em campo.

O Smartem faz uso de um microprocessador para integrar um padrão de energia a uma carga fantasma de até 50 A em um equipamento de baixo peso, volume e custo, atendendo sua proposta de ser um instrumento portátil, com o benefício da independência do uso de bateria para seu funcionamento. Este equipamento pode, também, auxiliar as concessionárias de energia no processo de inspeção de irregularidades ao verificar o medidor e constatar erros inconsistentes, causados por adulterações ilegais neste medidor.

Seu uso impacta no processo atual de verificação por solicitação de usuário uma vez que reduz os custos operacionais envolvidos, como transporte, troca, verificação laboratorial e armazenamento em mais de 90% dos casos, em geral, por se tratarem de medidores em bom estado de funcionamento, trazendo uma economia de quase 1,2 milhão em 3 anos segundo (9). Somado a isso, o equipamento também reduz o tempo de verificação,

que poderia levar até 30 dias, para aproximadamente 40 min, gerando e imprimindo um laudo técnico ao fim da verificação, na presença do cliente, trazendo maior transparência e confiabilidade para o processo. Além disso, a possibilidade de utilização deste equipamento em laboratório, por meio das bancadas de calibração monofásica e, futuramente, a trifásica, com a praticidade do encaixe de até 3 verificadores Smartem, faz do instrumento uma opção de mercado viável econômica e tecnicamente.

Portanto, o verificador portátil Smartem, além de atender adequadamente as normas técnicas vigentes, possui capacidade de fornecimento de corrente própria e pode ser controlado por um aplicativo, para celular ou tablet com Android®[®], simples e intuitivo capaz de emitir e imprimir um relatório com detalhamento de todo o ensaio ao final do processo de verificação. Trata-se de um instrumento de fabricação nacional, garantindo custos e prazos de manutenção e assistência técnica mais curtos, comparados a equipamentos importados, e, por fim, traz maior eficiência e agilidade para o processo de calibração por solicitação do usuário, reduzindo significativamente prazos e custos de operação.

Considera-se, assim, que o objetivo dessa dissertação foi alcançado, uma vez que é apresentado e analisado as principais características do projeto e o princípio de funcionamento de um verificador portátil de medidores de energia, de forma a contemplar um estudo técnico aprofundado de suas soluções de hardware adotadas para que o equipamento fosse capaz de realizar os ensaios necessários. Esta solução de engenharia inova em características importantes e desejáveis, como a carga própria integrada a um microprocessador, e na solução autônoma, envolvendo hardware gerenciado por aplicativo, que permite a operação ser conclusiva, além de oferecer informações acionáveis aos gestores, quando irregularidades são detectadas.

6.1 Sugestão de trabalhos futuros

Propõe-se, para desenvolvimento futuro, um projeto de uma versão trifásica do Smartem, que consiga manter a característica de portabilidade, sendo leve como o modelo apresentado, porém com capacidade de verificar medidores polifásicos sem a necessidade de utilizar "jumpers" como é feito hoje. Além disso, a inclusão, no projeto de hardware, da possibilidade de variar seu fator de potência, para fazer o teste indutivo em medidores polifásicos com indicação de energia reativa, é uma característica importante para o desenvolvimento de um equipamento mais funcional e completo, sendo capaz de verificar tipos de medidores que hoje não podem ser completamente verificados pelo equipamento Smartem, como é o caso de medidores com indicação de pulsos para energia reativa.

Por fim, é interessante que o dispositivo possua comunicação com algum banco de dados via nuvem para que os laudos obtidos fossem compartilhados instantaneamente com a empresa ou concessionária responsável garantindo ainda mais agilidade no processo.

Referências

- [1] INMETRO, “Regulamento técnico metrológico de medidores de energia eletrônicos.” Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia, Portaria *n*º 587, Novembro, 2012.
- [2] IEC, “Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use.” International Electrotechnical Commission, IEC 61010-1, 2010.
- [3] ANEEL, “Condições gerais de fornecimento de energia elétrica.” Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução normativa *n*º 414, 2010.
- [4] S. Zemansky and Y. E. Freedman, *Física III Eletromagnetismo*. São Paulo: Pearson Universidades, 12 ed., 2008.
- [5] C. T. Nicolau, “Medição de energia elétrica: impactos da mudança tecnológica no setor jurídico de uma concessionária distribuidora de energia elétrica,” Master’s thesis, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2013.
- [6] INMETRO, “Regulamento técnico metrológico de medidores de energia eletromecânicos.” Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia, Portaria *n*º 258, Agosto, 2008.
- [7] INMETRO, “Vocabulário internacional de metrologia vim.” Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia, Portaria *n*º 232, Março, 2012.
- [8] B. de Carvalho do Couto, “Comparação interlaboratorial em ensaios de medidores de energia elétrica,” Master’s thesis, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, INMETRO, Duque de Caxias, 2016.
- [9] L. Rios, J. Batista, F. Ribeiro, F. Diório, J. M. Jr., and C. Ribeiro, “Padrão de energia para calibração de medidores em laboratório ou em campo,” in *P&D Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL*, *n*º 4, ISSN 1981-9803, pp. 55–57, Agosto, 2011.
- [10] A. D. Femine, D. Gallo, C. Landi, and M. Luiso, “Measurement equipment for on-site calibration of energy meters,” in *Proceedings IEEE IMTC*, pp. 1–6, May, 2007.

- [11] A. D. Femine, D. Gallo, C. Landi, and M. Luiso, “Advanced instrument for field calibration of electrical energy meters,” in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Volume 58, Issue 3*, March 2009.
- [12] C. Pereira, *Redes Elétricas no Domínio da Frequência: Técnicas de Análise, Modelos de Componentes, Técnicas Computacionais*, vol. 1 of 10. São Paulo: ArtLiber Editora, 1 ed., 1 2015.
- [13] ANEEL, “Módulo 8 - qualidade da energia elétrica.” Agência Nacional de Energia Elétrica, PRODIST, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Revisão 10, 2018.
- [14] J. A. de Souza, “Relatório de qualidade de energia sistema cemig.” Análise da Subestação Januária 3. COPI - Controle de Processos Industriais, Outubro, 2019.
- [15] Z. Mitrovic and I. Zupunski, “Stable source of ac voltage and current,” in *Proceedings of IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC*, pp. pp. 18–20, Maio, 2004.
- [16] A. Toroids, “Toroidal technology.” Disponível em: <https://amgistoroids.com/toroidal-technology.html>. Acesso em Janeiro de 2020.
- [17] INNOVCABLE., “Coeficiente de temperatura do cobre.” Disponível em: <https://innovcable.com.br/coeficientes-de-temperatura-do-cobre/>. Acesso em Fevereiro de 2020.
- [18] ABNT, “Instalações elétricas de baixa tensão.” Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5410:2004, 2008.
- [19] C. A. de Sousa Penin, *Combate, Prevenção e Otimização das Perdas Comerciais de Energia Elétrica - Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica*. PhD thesis, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2008.
- [20] C. I. Fuchs and T. Amaral, “Tratamento de irregularidades na medição no âmbito administrativo,” in *V CIERTEC - Seminário Internacional sobre Gestão de Perdas, Eficientização Energética e Proteção da Receita no Setor Elétrico*, Agosto, 2005.
- [21] A. Mínguez, “Medidores de energia ativa: Funcionamento, práticas usuais, principais ensaios e análise das fraudes mais comuns,” Master’s thesis, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- [22] G. Aurilio, D. Gallo, C. Landi, and M. Luiso, “Ac electronic load for on-site calibration of energy meters,” in *Proceedings of IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC*, (Minneapolis, MN, USA), pp. 6–9, Maio, 2013.

Anexo A

Certificado de Calibração do Smartem
no Laboratório Eletrônico de Medição -
LEM - CEMIG

LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA DE MEDIÇÃO - LEM



Distribuição S.A.

Telefone: (031) 3878-5321 Fax: (031) 3878-5360 E-mail: lem@cemig.com.br

Laboratório de calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob o número CAL 282

Certificado de Calibração N° 015/2017



Dados do Cliente	
Nome:	Gerência de Gestão e Controle da Medição e das Perdas Comerciais da Distribuição - GR/MP
Endereço:	Rua Osório de Moraes, 281 - Cidade Industrial - Contagem - Minas Gerais - CEP: 32.210-140.

Dados do Instrumento Calibrado (UST)			
Instrumento:	Padrão de Energia Elétrica	Modelo:	Smartem
Fabricação:	CRIEM	N° de Série:	100
N° de Identificação dado pelo Cliente:	-	Data de Recebimento:	27/06/2017

Dados do Padrão de Temperatura e Umidade Utilizado pelo LEM							
Identificação Interna (LEM)	Número	Modelo	Fabricante	Certificado	Calibrado por:	Datas	
						Calibração	Validade
TH-4	9115387	AZ 8829	AZ	T 0218/2017	LABELO	09/03/2017	09/03/2018

Dados do(s) Padrão(ões) de Energia Utilizado(s) pelo LEM (UR)							
Identificação Interna (LEM)	Número	Modelo	Fabricante	Certificado	Calibrado por:	Datas	
						Calibração	Validade
RM11-2	500361	RM-11-06	Radian Research	002/17	LEM / CEMIG	23/01/2017	23/01/2018

Procedimento de Medição
O instrumento identificado neste Certificado (UST) foi calibrado na frequência de 60 Hz através de comparação com o padrão de energia (UR) indicado acima.

Referência Documental
PS 04-08 Rev 7, PS 04-10 Rev 9, IT 04-06 Rev 11

Observações

- Os resultados apresentados neste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento calibrado, nas condições especificadas.
- Os resultados apresentados neste Certificado de Calibração são rastreáveis a padrões nacionais ou internacionais.
- UR = Unidade de Referência (Padrão)
UST = Unidade Sob Teste (Instrumento)

Data da Calibração	Data de Emissão do Certificado
27/06/2017	27/06/2017

 RESPONSÁVEL PELA EXECUÇÃO Helbert Batista de Macedo Técnico do Laboratório CREA - 26992/TD (MG)	 RESPONSÁVEL TÉCNICO Helbert Batista de Macedo Signatário Autorizado CREA - 26992/TD (MG)
--	---



Distribuição S.A.

LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA DE MEDIÇÃO - LEM

Telefone: (031) 3878-5321 Fax: (031) 3878-5360 E-mail: lem@cemig.com.br

Laboratório de calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob o número CAL 282

Certificado de Calibração Nº 015/2017

Temperatura: 22,8 °C	Umidade Relativa: 38,1%
Executado por: Helbert Batista de Macedo	Data de execução: 27/06/2017

Condições Elétricas			Grandeza: Wh				
Tensão (V) / Fase	Cos φ / Âng.	Corrente (A)	Erro Relativo %	Incerteza (U) %	k	Veff	
120 Monofásico	1 0,0°	1,50	0,0354	0,0087	2,00	infinito	
		16,00	0,052	0,020	2,21	13	
		30,00	0,09	0,11	2,87	4	
		*	*	*	*	*	*
		*	*	*	*	*	*
		*	*	*	*	*	*
		*	*	*	*	*	*
		*	*	*	*	*	*
		*	*	*	*	*	*
		*	*	*	*	*	*
		*	*	*	*	*	*
		*	*	*	*	*	*
		*	*	*	*	*	*
		*	*	*	*	*	*
		*	*	*	*	*	*

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k indicado, o qual para uma distribuição t (Student) com Veff graus de liberdade efetivos (também indicados), corresponde a uma probabilidade de abrangência de 95,45%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Visto do Executante



Distribuição S.A.

LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA DE MEDIÇÃO - LEM

Telefone: (031) 3878-5321 Fax: (031) 3878-5360 E-mail: lem@cemig.com.br

Laboratório de calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a
ABNT NBR ISO/IEC 17025 sob o número CAL 282

Certificado de Calibração Nº 015/2017

Informações Adicionais

Correção: (Diferença da UR em relação ao Valor Verdadeiro Convencional) * (-1)

Erro: (Diferença da UST em relação à UR) - (Correção)

Erro Relativo em p.u. (ER) = Erro / VVC \Rightarrow ER(%) = ER * 100 ; ER(ppm) = ER * 1000000

Incerteza Expandida (U):

Incerteza apresentada neste Certificado calculada a partir da multiplicação da incerteza padrão "uc" pelo fator de abrangência "k":

$U = uc \times k$.

Incerteza Padrão (uc):

Incerteza calculada a partir da raiz quadrada da soma quadrática das componentes de incerteza presentes na calibração de energia elétrica e considerados pelo LEM para este Certificado de Calibração.

Fator de Abrangência (k):

Fator baseado na distribuição "t" (student), calculado para "v_{eff}" graus de liberdade efetivos e nível de confiança de 95.45%.

Neste Certificado, graus de liberdade efetivos (v_{eff}) superiores a 510 são relatados como "infinito".

A Incerteza Expandida declarada neste Certificado de Calibração foi determinada de acordo com a Versão Brasileira do Documento de Referência EA-4/02 - Expressão da Incerteza de Medição na Calibração.

Convenções

Para a calibração da grandeza Energia Elétrica, o LEM adota as seguintes convenções:

- 1) Os ângulos elétricos apresentados em qualquer situação tomam como referência a tensão; assim, um ângulo com valor negativo (-) equivale a corrente atrasada em relação à tensão e um ângulo com valor positivo (+) equivale a corrente adiantada em relação à tensão;
- 2) Para medição de energia ativa, o fator de potência equivale ao cosseno do ângulo entre tensão e corrente; fatores de potência indutivos equivalem a ângulos negativos e fatores de potência capacitivos equivalem a ângulos positivos (por exemplo, fator de potência 0,5 indutivo $\Rightarrow \varphi = -50^\circ$ e fator de potência 0,8 capacitivo $\Rightarrow \varphi = +36,9^\circ$);
- 3) Para medição de energia reativa, o $\text{sen } \varphi = 1$ indutivo equivale a um ângulo de -90° (ângulo que produz energia reativa puramente indutiva) e 0,5 indutivo equivale a um ângulo de -30° (ângulo que produz metade da energia reativa da situação anterior); o $\text{sen } \varphi = 1$ capacitivo equivale a um ângulo de $+90^\circ$ (ângulo que produz energia reativa puramente capacitiva) e 0,5 capacitivo equivale a um ângulo de $+30^\circ$ (ângulo que produz metade da energia reativa da situação anterior);