



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Desenvolvimento de um medidor de baixo custo para atendimento
aos novos requisitos de medição amostral dos indicadores de
conformidade de nível de tensão**

Lincoln Társio Silva Oliveira

Uberlândia, setembro de 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Desenvolvimento de um medidor de baixo custo para atendimento
aos novos requisitos de medição amostral dos indicadores de
conformidade de nível de tensão**

**Dissertação apresentada por Lincoln Társio Silva
Oliveira à Universidade Federal de Uberlândia,
como parte dos requisitos necessários para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica.**

Orientador: Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior

Uberlândia, setembro de 2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

O48
2022

Oliveira, Lincoln Tárzio Silva, 1997-
Desenvolvimento de um medidor de baixo custo para
atendimento aos novos requisitos de medição amostral dos
indicadores de conformidade de nível de tensão [recurso
eletrônico] / Lincoln Tárzio Silva Oliveira. - 2022.

Orientador: José Rubens Macedo Junior.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.545>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Macedo Junior, José Rubens
,1972-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III.
Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

Lincoln Társo Silva Oliveira

**Desenvolvimento de um medidor de baixo custo para atendimento
aos novos requisitos de medição amostral dos indicadores de
conformidade de nível de tensão**

Banca examinadora:

Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior
(Orientador – FEELT/UFU)

Prof. Dr. Isaque Nogueira Gondim
(Examinador – FEELT/UFU)

Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior
(Examinador – USP São Carlos)

M.Sc. Renato Eduardo Farias de Sousa
(Convidado – ANEEL)

Uberlândia, setembro de 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 779, PPGEELT				
Data:	dezenove de setembro de dois mil e vinte e dois	Hora de início:	10:00	Hora de encerramento:	13:00
Matrícula do Discente:	12022EEL009				
Nome do Discente:	Lincoln Társio Silva Oliveira				
Título do Trabalho:	Desenvolvimento de um medidor de baixo custo para atendimento aos novos requisitos de medição amostral dos indicadores de conformidade de nível de tensão				
Área de concentração:	Sistemas de Energia				
Linha de pesquisa:	Distribuição de Energia Elétrica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior Título do projeto: Análise e quantificação das perdas harmônicas em sistemas de distribuição de energia elétrica Agência financiadora: P&D ANEEL – Equatorial Maranhão Distribuidora de Energia Elétrica Número do processo na agência financiadora: APLPED00044_PROJETOPED_0036_S01 Vigência do projeto: 20/11/2020 – 19/11/2022.				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Isaque Nogueira Gondim - FEELT/UFU; José Carlos de Melo Vieira Júnior - USP São Carlos; e José Rubens Macedo Junior - FEELT/UFU, orientador do candidato. A Banca Examinadora contou ainda com a participação do Eng. M.Sc. Renato Eduardo Farias de Sousa - ANEEL, na condição de convidado, sem direito a emissão de conceito.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato **APROVADO**.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **José Rubens Macedo Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/09/2022, às 11:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Isaque Nogueira Gondim, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/09/2022, às 11:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Carlos de Melo Vieira Júnior, Usuário Externo**, em 19/09/2022, às 11:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3809703** e o código CRC **B583DD2D**.

Dedico este trabalho aos meus pais José Alberto e Tânia Beatriz, por tudo aquilo que fizeram para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais José Alberto e Tânia Beatriz, que sempre estiveram ao meu lado, por todo o carinho e apoio que me deram. Eu amo vocês.

Aqueles, que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade, apoio e todos os bons momentos, em especial, Aline Marques, Arthur Gomes, Diogo Nascimento, Gabriel Masete, Giovana Soares, João Victor, Marcelo Fadine, Marcelo Carneiro, Marcos Nunes, Pedro Tonim, Thiago Marques e Vanildo Neves.

Ao professor e meu orientador José Rubens por ter me confiado o desenvolvimento deste trabalho. Em 2017 você me aceitou como aluno de iniciação científica, o que pode não parecer grande coisa, mas mudou minha vida. Obrigado por acreditar que eu era capaz.

Aos amigos do Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica – LADEE por todo o apoio e ajuda.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG pela bolsa de fomento.

Ao Grupo Equatorial pela bolsa de fomento por meio do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento realizado junto ao LADEE.

RESUMO

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, através da Resolução Normativa nº 871, de 11 de fevereiro de 2020, aprovou as revisões dos módulos 6 e 8 do PRODIST, as quais trazem mudanças significativas para o processo de medição amostral dos indicadores de conformidade de nível de tensão, o qual passa a ser realizado com o uso de sistemas de medição permanente, conforme sorteio realizado pela ANEEL. Dentre outras mudanças, foi também estabelecida a obrigatoriedade de registro dos 12 últimos valores obtidos para os indicadores de duração relativa da transgressão para tensão precária e crítica, DRP e DRC, bem como das últimas 100 interrupções de curta e longa duração.

Diante do cenário descrito, este trabalho busca inicialmente apresentar os protocolos de medição necessários ao atendimento das mudanças decorrentes da Resolução ANEEL nº 871 de 11 de fevereiro de 2020, desde o cálculo da magnitude da tensão em regime permanente até o registro de interrupções de curta e longa duração.

Em relação aos indicadores DRP e DRC, é realizada uma análise crítica acerca da necessidade de atualização do processo de avaliação dos níveis de tensão no que diz respeito a eficiência dos indicadores que sozinhos sequer possibilitam a identificação do tipo de problema (sobre ou subtensão). Nesse contexto, é apresentada uma metodologia alternativa à atualmente vigente para avaliação da conformidade dos níveis de tensão, baseada em percentis de tensão, que definem limites de operação para faixas adequada, superior e inferior de tensão.

Quanto à implementação dos diferentes indicadores, são abordadas as dificuldades presentes na construção de equipamentos que atendam as novas obrigações, evidenciadas durante testes de calibração, os quais expuseram uma série de deficiências dos equipamentos disponíveis no mercado.

E, por fim, este trabalho apresenta os resultados obtidos no desenvolvimento de um protótipo de medidor de tensão de baixo custo, cujo objetivo foi o pleno atendimento das novas obrigações estabelecidas pela ANEEL, demonstrando o processo de sua construção desde a modelagem em ambiente *Simulink*, até a composição do *hardware* implementado.

Palavras-chave: RN ANEEL 871/2020, PRODIST, tensão em regime permanente, protocolos de medição.

ABSTRACT

The Brazilian Electricity Regulatory Agency – ANEEL, through the Normative Resolution No. 871, of February 11, 2020, approved the revisions of the PRODIST modules 6 and 8, bringing significant changes for the sample measurement process of the voltage level conformity indicators, which starts to be measured with the use of permanent measuring systems, using a rotation model for meters allocation through a lottery to be carried out by ANEEL. Among other changes, it was also established the obligation of registering the last 12 values obtained for the relative transgression duration indicators for precarious and critical voltage level, DRP and DRC, as well as the last 100 short and long duration interruptions.

Given the described scenario, this work initially aims to consolidate the measurement protocols necessary to meet the changes arising from ANEEL No. 871 Resolution of February 11, 2020, from the calculus of the voltage magnitude in steady state to the interruptions record.

Regarding the DRP and DRC indicators, a critical analysis is done on the need to update the process of voltage levels evaluation with regard to the efficiency of the indicators, which alone are unable to even identify the type of problem (over or undervoltage). In this context, it is presented an alternative methodology to the one in effect to evaluate the conformity of voltage levels, based on voltage percentiles that define operation limits for adequate, upper and lower voltage ranges.

As for their implementation, the difficulties present in creating equipment that meet the new obligations are discussed, as shown during different tests. These tests expose a series of deficiencies in the equipment available in the market.

To finish, this work represents the results obtained in the development of a low-cost voltage meter prototype, which objective was fully meeting the new obligations, showing the process of creating it since the modelling part in *Simulink*'s environment to composing the implemented hardware.

Keywords: RN ANEEL 871/2020, PRODIST, steady-state voltage, metering guidelines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Obrigatoriedade de expurgo de leituras de tensão	22
Figura 2 – Obrigatoriedade de registro de interrupções	23
Figura 3 – Cálculo do valor eficaz considerando-se janelas de 1 e 1/2 ciclo	24
Figura 4 – Faixas Adequada, precária e crítica de tensão	25
Figura 5 – Medição de tensão em regime permanente	26
Figura 6 – Histograma de tensão	27
Figura 7 – Faixas Superior, adequada e inferior de tensão.....	28
Figura 8 – Comparativo entre os indicadores percentis e faixas de tensão delimitadas conforme faixas adequada, precária e críticas do PRODIST	31
Figura 9 – Medições de tensão realizadas para composição de indicadores de conformidade de níveis de tensão.....	32
Figura 10 – Indicadores DRP e DRC obtidos a partir da amostra avaliada	32
Figura 11 – Indicadores percentis obtidos a partir da amostra avaliada.....	33
Figura 12 – Montagem laboratorial para realização dos testes de calibração	35
Figura 13 – Testes I.4: Tensão senoidal com amplitude variável	36
Figura 14 – Teste I.5: Tensões distorcidas	37
Figura 15 – Teste II.1: Interrupção momentânea de tensão	38
Figura 16 – Teste II.2: Interrupção temporária de tensão.....	39
Figura 17 – Teste II.3: Interrupção de longa duração.....	39
Figura 18 – Calibração do expurgo de leituras.....	40
Figura 19 – Calibração do cálculo dos indicadores DRP e DRC	41
Figura 20 – Ferramenta MATLAB function	44
Figura 21 – Modelagem em ambiente <i>simulink</i> de um medidor para atendimento aos requisitos de medição amostral de tensão no âmbito do PRODIST	45
Figura 22 – Arranjo utilizado para geração de sinais	45
Figura 23 – Função Clock	46
Figura 24 – Cálculo do valor eficaz da tensão em janelas de 12 ciclos (V12) e 1 ciclo (V1)..	46
Figura 25 – Módulo implementado para realização do registro de interrupções de curta e longa durações	47
Figura 26 – Módulo implementado para apuração dos indicadores de conformidade da tensão em regime permanente.....	47
Figura 27 – Sensor diferencial de tensão.....	48
Figura 28 – Comparativo entre o Sinal Real e a Leitura realizada pelo ESP32	49

Figura 29 – Rotina de processamento do medidor	50
Figura 30 – Rotina de processamento durante a interrupção.....	50
Figura 31 – Obtenção de NLP e NLC	51
Figura 32 – Imagem ilustrativa do ESP 32.....	52
Figura 33 – IDE do Arduino.....	53
Figura 34 – Módulo SD	53
Figura 35 – Display LCD 16x2	54
Figura 36 – Sequência de telas apresentadas no display do protótipo de medidor	54
Figura 37 – Foto do protótipo desenvolvido.	55
Figura 38 – Diagrama de operação de um conversor Delta-Sigma.....	58
Figura 39 – Diagrama de de operação de um conversor SAR.....	58
Figura 40 – Metodologias de amostragem de sinais.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre a janelas de 1 e ½ ciclo	24
Tabela 2 – Numero de leituras associadas as faixas crítica e precária	27
Tabela 3 – Indicadores percentis	30
Tabela 4 – Módulos realizados	35
Tabela 5 – Testes I.1, I.2 e I.3: Tensões fixas não distorcidas	36
Tabela 6 – Teste I.4: Tensão senoidal com amplitude variável.....	36
Tabela 7 – Teste I.5: Tensões distorcidas.....	37
Tabela 8 – Calibração do registro de interrupções	38
Tabela 9 – Resultados esperados da calibração do cálculo dos indicadores DRP e DRC	41
Tabela 10 – Resumo dos testes realizados	42
Tabela 11 – Medidores aprovados por teste realizado	42
Tabela 12 – Organização dos resultados obtidos.....	52
Tabela 13 – Módulo I: Tensões fixas não distorcidas	56
Tabela 14 – Módulo II: Registro de interrupções.....	56
Tabela 15 – Módulo III:Expurgo de leituras de 10 minutos.....	57
Tabela 16 – Módulo IV: Indicadores de conformidade.....	57
Tabela 17 – Resultados do Módulo IV	57

SUMÁRIO

1 – Introdução	16
1.1 – Objetivos.....	18
1.2 – Estado da arte.....	18
1.3 – Estrutura da dissertação	20
2 – Indicadores de conformidade da tensão em regime permanente	21
2.1 – Magnitude da tensão e agregação de 10 minutos	21
2.2 – Registro de Interrupções de Curta e Longa duração.....	23
2.3 – Indicadores DRP e DRC	25
2.3.1 – Indicadores baseados em percentis	28
2.3.2 – Comparativo entre indicadores	30
3 – Avaliação de medidores de tensão em regime permanente	35
3.1 – Estrutura de realização dos testes	35
3.2 – Testes realizados	36
3.2.1 – Módulo I: Tensão eficaz agregada de 10 minutos	36
3.2.2 – Módulo II: Registros de interrupção de curta e longa duração	38
3.2.3 – Módulo III: Expurgos de registros de tensão de 10 minutos quando da ocorrência de variações temporárias de tensão ou de interrupções de longa duração	40
3.2.4 – Módulo IV: Valores calculados dos indicadores DRP e DRC (sem expurgos)....	40
3.2 – Resultados dos Testes de Calibração	42
4 – Desenvolvimento de um medidor de tensão em regime permanente	44
4.1 – Modelagem em ambiente <i>Simulink</i>	44
4.2 – Amostragem e adequação de sinais	48
4.4 – Cálculo dos indicadores DRP e DRC e registro de interrupções.....	51
4.4 – Protótipo final	52
4.5 – Resultados dos testes de calibração no protótipo desenvolvido	56
4.6 – Comparativo entre medidores	58
5 – Conclusões	60
5.1 – Trabalhos futuros	61
Referências bibliográficas	62

Apêndice A – Faixas de operação da tensão em regime permanente dispostas no módulo 8 do PRODIST	63
Apêndice B – Código de implementação dos indicadores DRP e DRC em ambiente <i>Simulink</i>	64
Apêndice C – Código de implementação do registro de interrupções em ambiente <i>Simulink</i>	67
Apêndice D – Código de implementação do cálculo do valor eficaz da tensão em janela de 12 ciclos	68
Apêndice E – Código de implementação do cálculo do valor eficaz da tensão em janela de 1 ciclo	69
Apêndice F – Código de implementação do medidor de tensão em regime permanente	70
Apêndice G – Exemplo de Medição de Tensão em Regime Permanente	85

1 – Introdução

No âmbito da distribuição da energia elétrica, a origem do processo de regulamentação da qualidade do produto ocorre com a publicação da Portaria DNAEE nº 047 em 1978, a qual apresenta pela primeira vez limites para variação da magnitude da tensão em regime permanente nos pontos de entrega dos consumidores. Essa normativa permaneceu vigente (ainda que com praticamente nenhum tipo de acompanhamento e fiscalização) até o ano de 1989, quando a Portaria DNAEE nº 004 consolidou o modelo vigente por mais duas décadas.

Posteriormente, em 26 dezembro de 1996, por meio da Lei nº 9.427, foi então criada a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com o dever de atuar como agente regulador do setor elétrico, bem como em outras funções. Em 2001, foi publicada a Resolução ANEEL nº 505 que, dentre outras mudanças, estabeleceu as faixas Adequada, Precária e Crítica para avaliação dos níveis de tensão, assim como os indicadores estatísticos de conformidade da tensão em regime permanente e os primeiros critérios para realização de medições amostrais.

Desde então, a Agência tem demonstrado preocupação em cobrar melhorias por parte das distribuidoras, principalmente com o estabelecimento de compensações aos consumidores pela prestação de serviço inadequado.

Em 2008, a Resolução ANEEL nº 345 consolidou a primeira versão do PRODIST, inicialmente dividida em oito módulos, sendo o módulo 8 responsável pelo tratamento da Qualidade da Energia Elétrica. Ao longo dos anos, o PRODIST passou por diversas revisões, cumprindo o princípio de sempre buscar a melhoria dos serviços prestados e, em 11 de fevereiro de 2020, através da Resolução Normativa nº 871, foram aprovadas revisões dos módulos 6 e 8, trazendo significativas mudanças no processo de medição amostral de tensão em regime permanente.

Com as mudanças, a medição amostral de tensão em regime permanente passou a ser realizada com o uso de sistemas de medição permanente, conforme sorteio realizado anualmente pela ANEEL, em substituição ao modelo anterior, no qual o processo de medição amostral era realizado em períodos pré-definidos através de um processo de rodízio de medidores. Dentre outras mudanças, foi também estabelecida a obrigatoriedade de registros dos 12 últimos valores obtidos para os indicadores de duração relativa da transgressão para tensão precária e crítica, DRP e DRC, bem como das últimas 100 interrupções de curta e longa duração.

As novas obrigações impostas pela Resolução Normativa nº 871 buscam adicionar mais robustez ao processo de monitoramento dos níveis de tensão, na medida em que o volume informações disponíveis será muito maior, podendo ser utilizadas tanto para a melhoria do

processo de fiscalização das distribuidoras, por parte da ANEEL, como pelas próprias distribuidoras visando melhorias em seus processos de planejamento e operação dos sistemas. Todavia, ainda há uma série de dificuldades associadas à implementação da nova normativa, como, por exemplo: (i) preço elevado e baixa disponibilidade de medidores no mercado e (ii) deficiências intrínsecas dos medidores disponíveis no mercado, evidenciadas durante a realização de testes de calibração.

Os medidores, via-de-regra, utilizam uma mesma família de *chips* metrológicos, comumente aplicados para fins de faturamento energia elétrica, que não se adequam as novas obrigações dispostas na Resolução Normativa nº 871, como, por exemplo, efetuar corretamente o registro da data/hora início e data/hora fim das interrupções com durações inferiores a 1 segundo.

Nesse mesmo cenário, destaca-se ainda a necessidade de ajustes e melhorias nos indicadores DRP e DRC, os quais permaneceram inalterados com a nova Resolução no que se refere a avaliação dos níveis de tensão. Nesse sentido, merece destaque o fato de que ambos os indicadores apenas avaliam o período no qual a tensão permaneceu dentro das faixas precária e crítica, respectivamente, não sendo possível uma análise direta do tipo de violação ocorrida. Em outras palavras, os referidos indicadores não carregam consigo nem mesmo a indicação de que os problemas eventualmente verificados estão associados a questões de sub ou sobretensão, fazendo com que as distribuidoras necessitem da análise das memórias de massa com 1008 registros de medição para esse propósito.

1.1 – Objetivos

Diante do cenário descrito, este trabalho busca inicialmente consolidar os protocolos de medição necessários ao atendimento das mudanças decorrentes da Resolução ANEEL nº 871 de 11 de fevereiro de 2020, desde o cálculo da magnitude da tensão em regime permanente até o registro de interrupções em conformidade com o estabelecido na IEC 61000-4-30 [1], que define metodologias para medição e análise de parâmetros de qualidade da energia elétrica.

Dado que as mudanças abrangeram apenas o processo de medição amostral, é apresentada uma metodologia alternativa à atualmente vigente para avaliação da conformidade dos níveis de tensão, baseada em percentis de tensão, conforme descrito em [2], visando aprimorar o processo vigente.

Quanto ao atendimento das novas obrigações, são apresentados os resultados de diferentes testes de calibração realizados em quatro medidores disponíveis no mercado, objetando evidenciar qual o cenário atual diante da publicação da Resolução ANEEL nº 871. Os testes expõem uma série de deficiências dos equipamentos, que adicionalmente evidencia a falta de diálogo entre a ANEEL, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) e fabricantes.

Por fim, quanto à implementação dos protocolos de medição, é apresentado o desenvolvimento de um protótipo de medidor de baixo custo utilizando-se um ESP32 DEVKIT V1 da Espressif Systems® — apresentando o processo de construção desde a modelagem em ambiente *Simulink*, até a composição do *hardware* implementado —, visando demonstrar a factibilidade de atendimento as novas obrigações no que diz respeito ao processo de medição amostral dos indicadores de conformidade de nível de tensão.

1.2 – Estado da arte

No que diz respeito a avaliação da qualidade do produto, a avaliação da conformidade dos níveis de tensão em regime permanente é apenas um dos temas abordados pelos módulos 8 [3] e 5 [4] do PRODIST. Nesse contexto, a análise parte de um conjunto de 1.008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada, comparadas com faixas de tensão definidas em torno da tensão de referência, conforme destacado no Apêndice A.

Conforme descrito em [5], tratando-se da análise da qualidade da energia elétrica, destacam-se a consideração de indicadores para problemas relacionados aos fenômenos das distorções harmônicas, flutuações de tensão, desequilíbrios de tensão, variações de tensão de

curta duração, além das variações de tensão em regime permanente. No caso específico das variações de tensão em regime permanente, ainda hoje podem ser identificadas algumas oportunidades de melhoria no que diz respeito à regulamentação do assunto.

O trabalho indicado em [6] destaca a importância da padronização dos níveis de tensão como base econômica para a fabricação de máquinas e outros aparatos elétricos. Apesar dessa discussão ter sido levantada em 1927, a mesma se mostra muito atual no contexto da regulamentação do assunto, principalmente no Brasil.

Nesse sentido, em [2] é apresentada uma metodologia diferente para quantificação da conformidade da tensão em regime permanente, comparativamente à metodologia utilizada pelo PRODIST. Nesse trabalho (na verdade uma norma técnica), são utilizados indicadores estatísticos do tipo percentil para avaliação dos níveis de tensão em regime permanente, através dos quais uma amostra de registros de tensão dividida em 100 partes iguais é utilizada para composição dos indicadores $P_{99\%}$ (percentil 99%) e $P_{1\%}$ (percentil 1%), para avaliação de sobre e subtensão, respectivamente.

Conforme descrito em [5], a definição de faixas de conformidade baseadas nos percentis $P_{1\%}$, $P_{50\%}$ e $P_{99\%}$, assim como de limites para os percentis $P_{1\%}$ e $P_{99\%}$, considera o impacto e o monitoramento de quaisquer eventos que venham a atingir os níveis de tensão em regime permanente em espaços mais curtos de tempos, na medida em que certos níveis podem ser considerados aceitáveis.

Nesse contexto, os protocolos de medição de tensão em regime permanente são descritos na IEC 6100-4-30 [1] no que se refere à obtenção da magnitude da tensão, do registro de 10 minutos. Em [7] são apresentadas as nuances do protótipo aqui apresentado associadas as particularidades presentes na regulamentação brasileira, assim como em [8], onde são apresentados os resultados do desenvolvimento de um voltímetro digital e por fim em [9], onde são apresentados os resultados de testes de calibração em um medidor desenvolvido objetivando a detecção de consumo ilegal de energia.

1.3 – Estrutura da dissertação

Além das considerações iniciais aqui apresentadas, esse trabalho foi estruturado em outros 4 capítulos, conforme apresentado a seguir:

2 – Indicadores de conformidade da tensão em regime permanente

Neste capítulo são conceituados os protocolos de medição de tensão em regime permanente descritos na IEC 6100-4-30 [1] no que se refere à obtenção da magnitude da tensão, do registro de 10 minutos, bem como a composição dos indicadores de conformidade da tensão em regime permanente (DRP e DRC) descritos pelo módulo 8 do PRODIST [2].

Nesse contexto, também é apresentada uma proposta de indicadores baseados em percentis, a exemplo de AS 61000.3.100 [2], como uma opção aos indicadores de conformidade da tensão em regime permanente utilizados atualmente no Brasil.

3 – Avaliação de medidores de tensão em regime permanente

Neste capítulo é apresentado um caderno de testes que visa a calibração de medidores de faturamento, para consumidores de baixa tensão (Grupo B), no que diz respeito às novas obrigações estabelecidas na revisão dos Módulos 6 e 8 do PRODIST. Nesse contexto, são apresentados os resultados dos testes realizados em quatro medidores disponíveis no mercado e no protótipo desenvolvido.

4 – Desenvolvimento de um medidor de tensão em regime permanente

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento de um protótipo de medidor de baixo custo utilizando-se um ESP32 DEVKIT V1 da Espressif Systems[®], o qual é parte de uma série de microcontroladores de baixo custo desenvolvidos pela empresa, contendo um processador Xtensa[®] Dual-Core 32-bit LX6, com um clock máximo de 240 MHz, memória RAM de 520 Kbytes e Flash de 4 MB, além de conexão WiFi e Bluetooth.

5 – Conclusão

Por fim, são apresentadas as considerações finais, bem como o resumo dos resultados obtidos nos testes de calibração realizados, aos quais foram submetidos 4 medidores disponíveis no mercado e o protótipo desenvolvido.

2 – Indicadores de conformidade da tensão em regime permanente

Neste capítulo são conceituados os protocolos de medição de tensão em regime permanente que — conforme descrito no módulo 5 do PRODIST [4] — devem obedecer ao estabelecido na IEC 6100-4-30 [1] no que se refere à obtenção da magnitude da tensão e do registro de 10 minutos, bem como a composição dos indicadores de conformidade da tensão em regime permanente (DRP e DRC) descritos pelo módulo 8 do PRODIST [3].

Nesse contexto, também é apresentada uma proposta de indicadores baseados em percentis, a exemplo de AS 61000.3.100 [2], como uma opção aos indicadores de conformidade da tensão em regime permanente utilizados atualmente no Brasil.

2.1 – Magnitude da tensão e agregação de 10 minutos

I. Magnitude da tensão em regime permanente

Conforme descrito na IEC 6100-4-30 [1], são definidas classes de equipamentos (A e S) que descrevem diferentes metodologias de processamento. No que diz respeito à obtenção da magnitude de tensão em regime permanente, para ambas as classes, essa é definida como a raiz quadrada da média do quadrado das amostras de tensão dentro da janela adotada, conforme ilustrado pela equação (1), na qual para sistemas operando com frequência nominal de 50 Hz deve ser adotada uma janela de 10 ciclos da frequência fundamental e para 60 Hz (caso brasileiro), uma janela de 12 ciclos.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^{i=n} v_i^2 \right)} \quad (1)$$

Em que:

- n = quantidade de amostras de tensão na janela de tempo considerada;
- v_i = amostra da tensão instantânea;
- V_{rms} = tensão eficaz ou magnitude da tensão.

II. Leitura de 10 minutos

Para composição dos indicadores de conformidade da tensão em regime permanente, a partir da equação (1), é obtida uma leitura de 10 minutos que corresponde à raiz da média do quadrado das medições consecutivas da magnitude da tensão realizadas em uma janela de 10 minutos, conforme ilustrado pela equação (2). Este valor representa uma das 1008 leituras de tensão necessárias para composição dos indicadores DRP e DRC.

$$V_{10min} = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^{j=n} (V_{rms j})^2 \right)} \quad (2)$$

Em que:

- n = quantidade de medições consecutivas da magnitude da tensão;
- $V_{rms j}$ = medição da magnitude da tensão;
- V_{10min} = Registro ou leitura de 10 minutos da tensão.

III. Expurgo obrigatório de leituras

Conforme disposto no item no módulo 8 do PRODIST [3], para obtenção das 1008 leituras de tensão necessárias para composição dos indicadores de conformidade da tensão em regime permanente, em função da ocorrência de variações temporárias de tensão ou de interrupções de longa duração, resumidas nas regiões destacadas na Figura 1, a leitura deve ser expurgada e substituída por um igual número de amostras consecutivas.

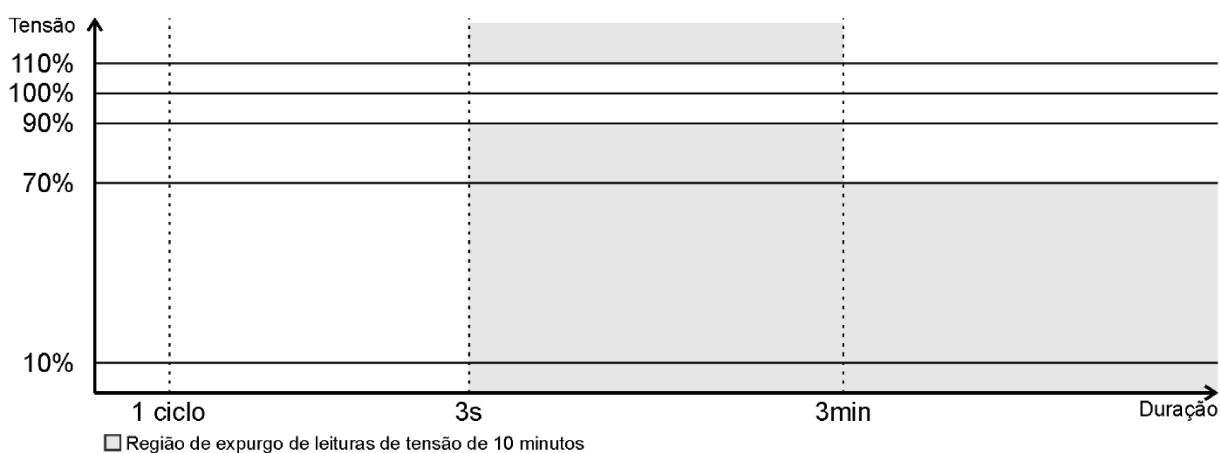


Figura 1 – Obrigatoriedade de expurgo de leituras de tensão

2.2 – Registro de Interrupções de Curta e Longa duração

Conforme descrito no módulo 5 do PRODIST [4], os medidores implementados para atendimento às medições amostrais de tensão, dada a ocorrência de interrupções de curta e longa duração resumidas na Figura 2, devem realizar o registro dessas, armazenando data e hora de início e fim dos últimos 100 eventos observados.

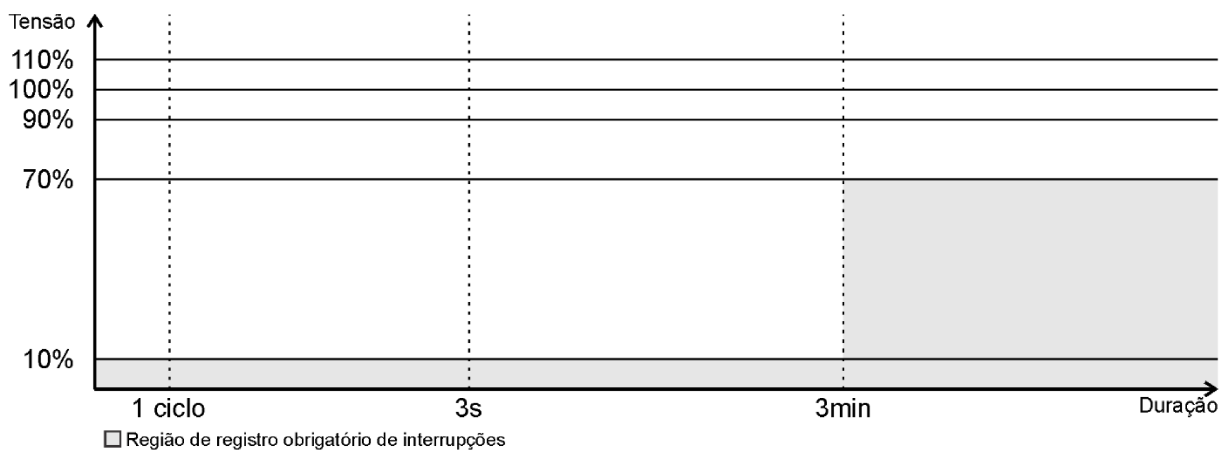


Figura 2 – Obrigatoriedade de registro de interrupções

Quanto ao cálculo da magnitude da tensão para o registro de interrupções, a IEC 6100-4-30 [1] define que o cálculo deve ser realizado pela equação (3), em que, dada a classe do equipamento, devem ser adotadas diferentes janelas de cálculo.

$$V_{rms \text{ 1 ou } 1/2 \text{ ciclo}} = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^{i=n} v_i^2 \right)} \quad (3)$$

Em que:

- n = quantidade de amostras de tensão na janela de tempo considerada;
- v_i = amostra da tensão instantânea;
- $V_{rms \text{ 1 ou } 1/2 \text{ ciclo}}$ = tensão eficaz ou magnitude da tensão.

Considerando equipamentos Classe A, conforme descrito na IEC 6100-4-30 [1], deve ser adotada uma janela de amostragem de $\frac{1}{2}$ ciclo e para equipamentos Classe S, adotar 1 ou $\frac{1}{2}$ ciclo para o cálculo do valor eficaz da tensão.

A depender do tamanho da janela elementar de cálculo do valor eficaz da tensão, surgem alguns problemas quanto à obtenção da magnitude da tensão durante o evento de interrupção, conforme ilustrado na Figura 3.

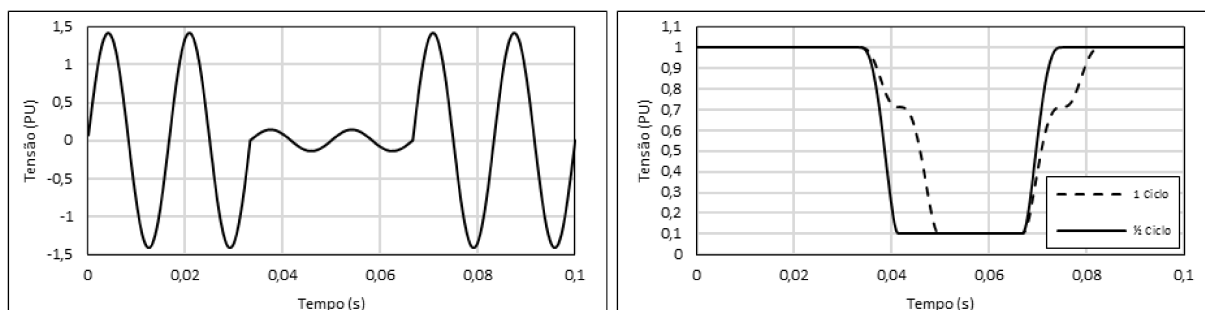


Figura 3 – Cálculo do valor eficaz considerando-se janelas de 1 e 1/2 ciclo

O evento mostrado na Figura 3 trata de um afundamento da tensão com 2 ciclos de duração. Nesse cenário, um medidor que utilize janelas de cálculo de valor eficaz com 1 ciclo de duração, comparado com outro que utilize janelas de $\frac{1}{2}$ de duração, apresenta resultados distintos, conforme mostrado na Tabela 1, a qual mostra uma grande diferença quanto à duração obtida em cada uma das situações.

Tabela 1 – Comparativo entre a janelas de 1 e $\frac{1}{2}$ ciclo

Duração [s]	Janela de 1 ciclo [s]	Erro [%]	Janela de $\frac{1}{2}$ ciclo [s]	Erro [%]
0,03333	0,01667	50	0,025	25%

2.3 – Indicadores DRP e DRC

I. Cálculo dos indicadores

A composição dos indicadores de conformidade, seja para o ponto de medição permanente ou para atendimento de reclamação, é realizada a partir de 1008 leituras de tensão obtidas ao longo de, no mínimo, 168 horas consecutivas, dado que podem ser necessários intervalos adicionais de agregação se configurado o expurgo obrigatório de leituras.

Nesse contexto, conforme disposto no módulo 8 do PRODIST [3], cada uma das leituras deve ser classificada segundo faixas (adequada, precária e crítica) definidas em função da tensão de referência do ponto de conexão, conforme ilustrado na Figura 4.

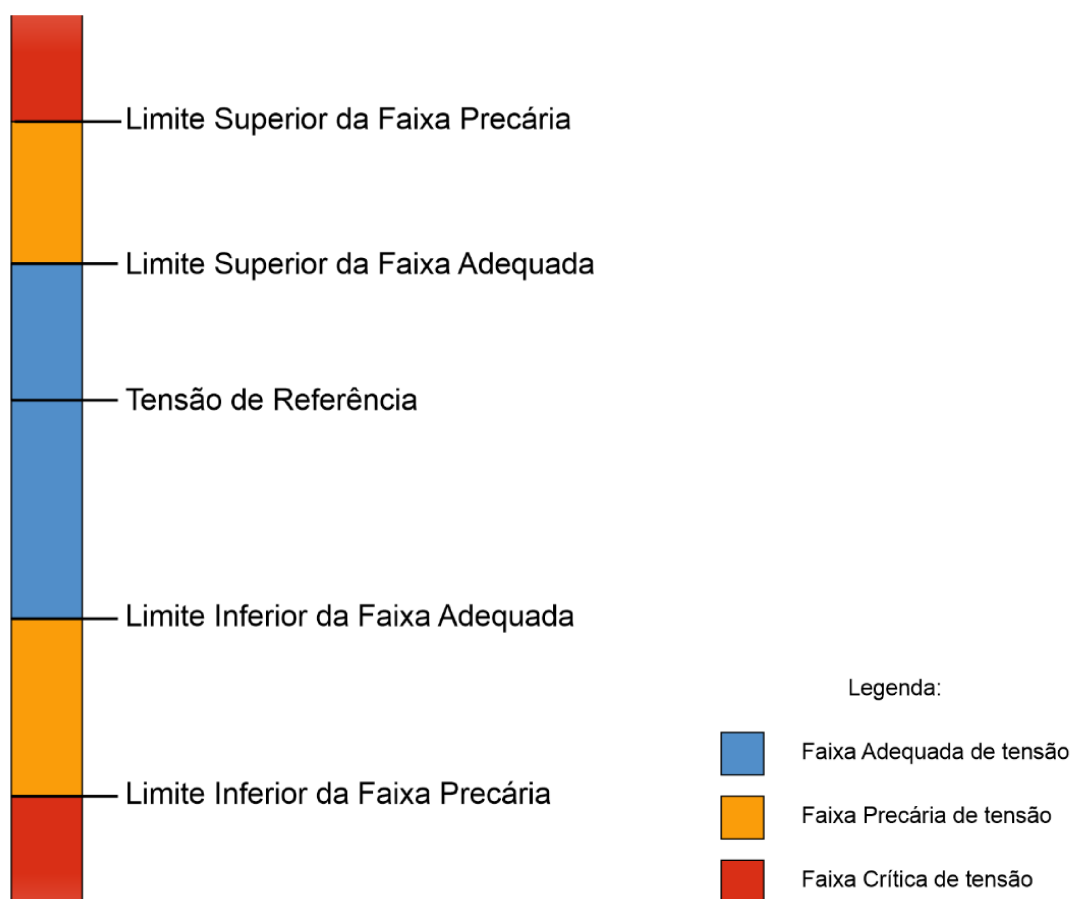


Figura 4 – Faixas Adequada, precária e crítica de tensão

A cada conjunto de 1008 leituras válidas de tensão, é contabilizado o número de leituras na faixa precária (NLP) e crítica (NLC) a partir dos limites estabelecidos para cada nível de tensão, os quais estão resumidos no Apêndice A.

A partir do número de leituras associados a cada faixa, são, então, calculados os indicadores de duração relativa da transgressão para tensão precária e crítica descritos a seguir:

$$DRP = \left(\frac{NLP}{1008} \right) \times 100 [\%] \quad (4)$$

$$DRC = \left(\frac{NLC}{1008} \right) \times 100 [\%] \quad (5)$$

Em que:

- DRP = duração relativa da transgressão para tensão precária;
- DRC = duração relativa da transgressão para tensão crítica;
- NLP = número de leituras de tensão de 10 minutos registradas na faixa precária;
- NLC = número de leituras de tensão de 10 minutos registradas na faixa crítica;

Conforme destacado anteriormente, com a implementação da Resolução Normativa nº 871, o processo de medição amostral passa a ser realizado em regime permanente, sendo que para os usuários com medição permanente, cada conjunto de 1008 leituras válidas compõe um indicador DRP e um DRC .

II. Exemplo de aplicação

Na Figura 5 é apresentado um exemplo de medição de tensão em regime permanente de um sistema operando com tensão nominal de 127 Volts.

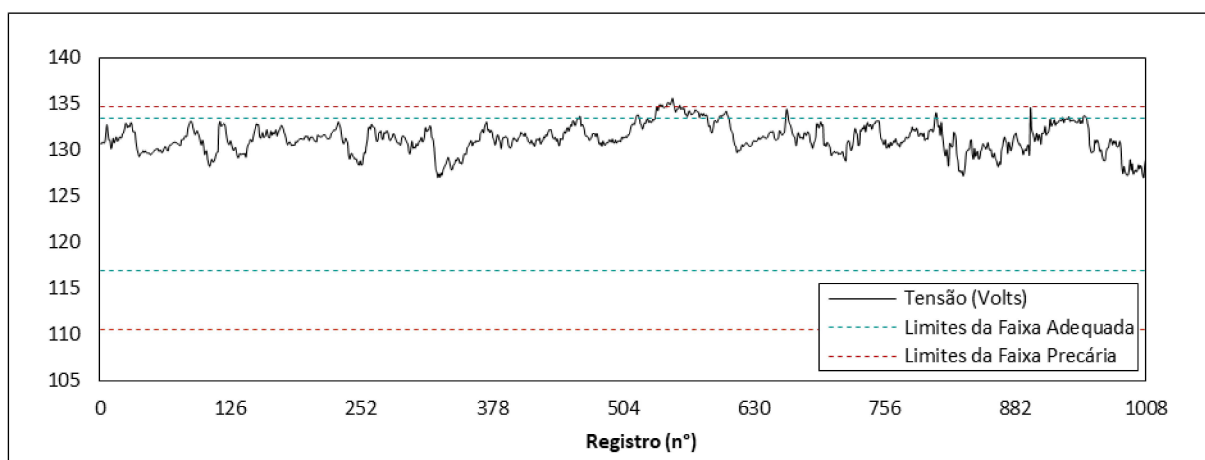


Figura 5 – Medição de tensão em regime permanente

Para cada faixa de tamanho 0,01 pu de tensão em relação à nominal, foram quantificadas as amostras descritas desde 0,8 pu a 1,20 pu e, então, construído o histograma de tensão apresentado na Figura 6, a fim de tornar mais clara a quantificação de amostras correspondentes a cada faixa descrita.

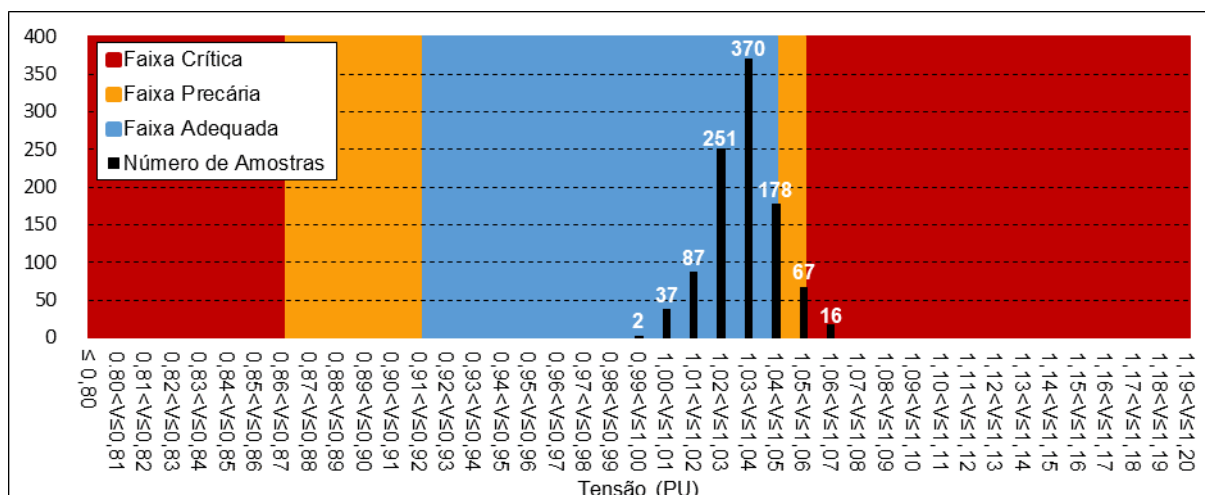


Figura 6 – Histograma de tensão

A partir dos limites estabelecidos no PRODIST [3] como ilustrado pelo histograma de tensão, foram contabilizados o número de leituras associadas a faixa precária (NLP) e na crítica (NLC) de tensão, descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Numero de leituras associadas as faixas crítica e precária

Faixa	Precária	Crítica
Leituras	67	16

A partir do número de leituras na faixa precária (NLP) e na crítica (NLC), são, então, calculados o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e o para tensão crítica (DRC); ambos apresentados a seguir, através das expressões (4) e (5), respectivamente.

$$DRP = \frac{67}{1008} \times 100 = 6,65 \% \quad (6)$$

$$DRC = \frac{16}{1008} \times 100 = 1,59 \% \quad (7)$$

2.3.1 – Indicadores baseados em percentis

Em [2] é apresentada uma metodologia baseada em percentis de tensão, valores que dividem uma amostra ou conjunto em 100 partes iguais, como o 50º percentil ($P_{50\%}$) que corresponde à mediana e o 25º ($P_{25\%}$) e 75º ($P_{75\%}$) percentis que definem o primeiro e o quarto quartil, respectivamente.

Semelhante ao disposto no PRODIST [3], para os indicadores em percentis de tensão também são definidas faixa de operação da tensão, divididas entre inferior, adequada e superior, delimitadas por limites respectivamente para os indicadores $P_{1\%}$, $P_{50\%}$ e $P_{99\%}$, conforme ilustrado na Figura 7.

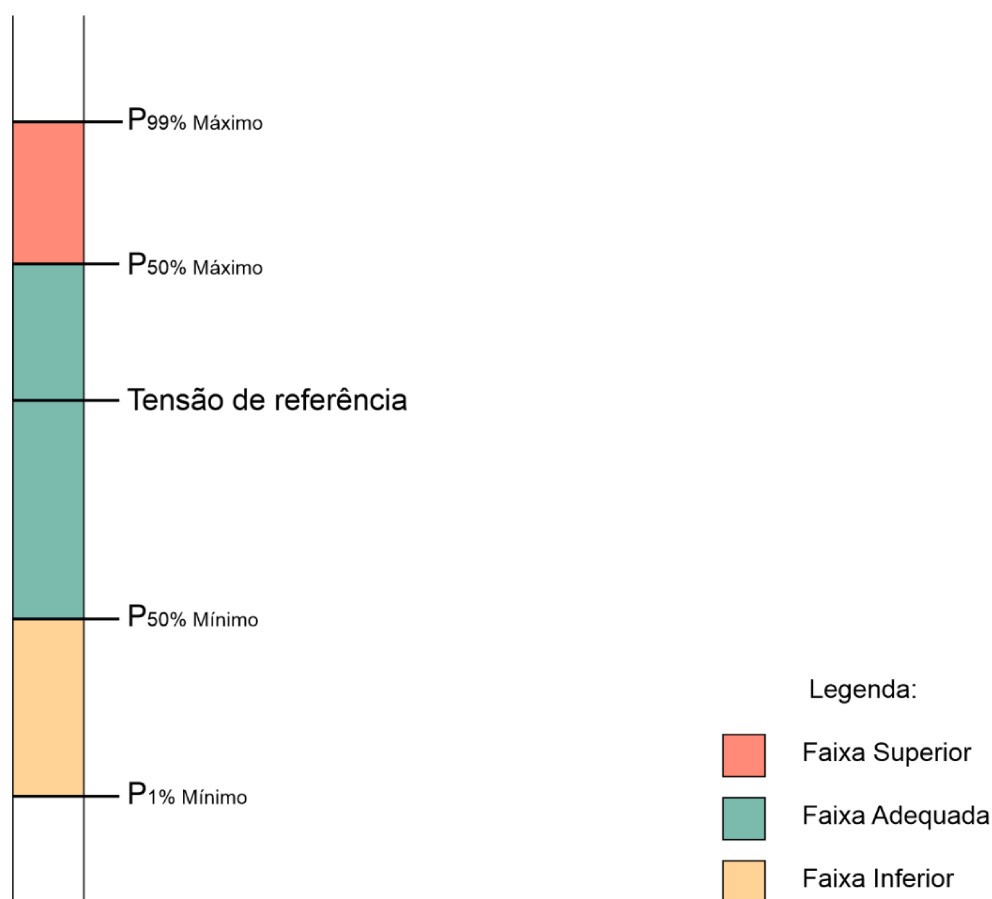


Figura 7 – Faixas Superior, adequada e inferior de tensão

A faixa Adequada determina os limites para $P_{50\%}$, ou seja, para mediana das 1008 leituras de tensão. Já as faixas Superior e Inferior determinam, respectivamente, o valor máximo de $P_{99\%}$ e o valor mínimo de $P_{1\%}$. Todavia, os limites estabelecidos em [2] não condizem com os padrões de tensão regulamentados no Brasil.

Nesse contexto, considerando uma amostra de N valores a posição de cada percentil é descrita como:

$$N_i = \frac{i \times (N + 1)}{100} \quad (8)$$

Em que:

- N_i = posição do percentil;
- i = índice;
- N = quantidade de valores dentro de um conjunto.

Para os indicadores $P_{1\%}$, $P_{50\%}$ e $P_{99\%}$, em um conjunto de 1008 leituras, temos que:

$$N_1 = \frac{1 \times (1008 + 1)}{100} = 10,09^{\circ} \quad (9)$$

$$N_{50} = \frac{50 \times (1008 + 1)}{100} = 504,50^{\circ} \quad (10)$$

$$N_{99} = \frac{99 \times (1008 + 1)}{100} = 998,91^{\circ} \quad (11)$$

Para esses casos, quando a posição dos percentis não é um número inteiro, o valor desejado não será necessariamente correspondente a algum já existente no conjunto.

Nesse contexto, é realizada a extração da parte inteira do resultado obtido de N_i descrita como $[N_i]$, dado que o resultado corresponde ao $[N_i]$ -ésimo menor valor do conjunto e o valor seguinte ao $([N_i] + 1)$ -ésimo menor, a partir dos quais é, então, calculado P_i conforme descrito em (12).

$$P_{i\%} = V_{[N_i]} + (V_{[N_i]+1} - V_{[N_i]}) \times (N_i - [N_i]) \quad (12)$$

Em que:

- P_i = percentil i ;
- N_i = posição do percentil i ;
- $[N_i]$ = máximo $\{x \in \mathbb{Z} \mid x \leq N_i\}$;
- V_j = j -ésimo menor valor do conjunto
- i = índice.

Para o 1º ($P_{1\%}$), 50º ($P_{50\%}$) e 99º ($P_{99\%}$) percentis, considerando uma amostra de 1008 leituras válidas de tensão, a equação (12) pode ser reescrita, substituindo (9) e (11), como (13) e (15) respectivamente.

$$P_{1\%} = V_{10} + (V_{11} - V_{10}) \times (0,09) \quad (13)$$

$$P_{50\%} = V_{504} + (V_{505} - V_{504}) \times (0,50) \quad (14)$$

$$P_{99\%} = V_{998} + (V_{999} - V_{998}) \times (0,91) \quad (15)$$

Para o exemplo da Figura 5, os resultados obtidos para os 1º ($P_{1\%}$), 50º ($P_{50\%}$) e 99º ($P_{99\%}$) percentis são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Indicadores percentis

Indicador	$P_{1\%}$	$P_{50\%}$	$P_{99\%}$
Resultados	127,36	131,19	134,86

Cabe ainda destacar que, diferentemente dos indicadores DRP e DRC, os indicadores baseados em percentil possibilitam a rápida identificação do tipo de problema (sobretensão ou subtensão) verificado no ponto de medição. No caso dos indicadores DRP e DRC, as distribuidoras necessitam da análise da memória de massa das medições para identificação do tipo de problema.

2.3.2 – Comparativo entre indicadores

Assim como descrito em [5], tratando-se da análise da qualidade da energia elétrica, destacam-se problemas relacionados a distorções harmônicas, flutuação de tensão, desequilíbrio, variações transitórias, etc. Já a análise de nível de tensão em regime permanente, dada sua simplicidade em relação aos demais temas citados, não é tratada devidamente considerando sua importância, no que diz respeito a vida útil de equipamentos, eficiência e principalmente segurança.

O módulo 8 do PRODIST [3] define um limite de 0,5% para o DRC, o que é aproximadamente 50 minutos. Se a violação se dá na faixa superior de tensão, significa que um equipamento que opere em uma tensão inferior a 2,3kV passou aproximadamente 1 hora, ao longo de 168 horas operando em uma tensão no mínimo 6% superior a adequada, reduzindo a vida útil deste. No caso contrário, dada a violação da faixa inferior de tensão, vários

equipamentos, a exemplo de máquinas elétricas tem perda de rendimento, acarretamento em maiores custos de operação.

Assim sendo, uma das possíveis deficiências do módulo 8 do PRODIST [3] recai sobre a grande margem que os indicadores DRP e DRC proporcionam para violação dos limites da faixa adequada de operação.

Em [2], conforme descrito anteriormente, é apresentada uma série de inovações. A definição de uma faixa de tensão média $P_{50\%}$, traz mais praticidade quando da definição de limites para operação adequada da tensão, garantindo maleabilidade tanto em horários de pico de carga, quanto fora deste. Ao mesmo tempo, a definição de limites para os percentis $P_{99\%}$ e $P_{1\%}$, prevê o impacto e o monitoramento de quaisquer eventos que venham a atingir os níveis de tensão em regime permanente em espaços mais curtos de tempos, na medida em que certos níveis podem ser considerados aceitáveis. A simples análise dos valores dos indicadores $P_{99\%}$ e $P_{1\%}$, permite a rápida identificação do tipo de problema (sobretensão ou subtensão). Comparando os indicadores percentis com as faixas utilizadas na definição conforme ilustrado na Figura 8, o percentil $P_{99\%}$ está na faixa superior de tensão definida aqui considerando os limites da faixa precária descrita no módulo 8 do PRODIST [3], acima de 1,06 vezes a tensão de referência, indicando que pelo menos 1% das amostras estão transgredindo os limites superiores de tensão, o que, em comparação, já é superior ao limite estabelecido de 0,5% para o indicador DRC.

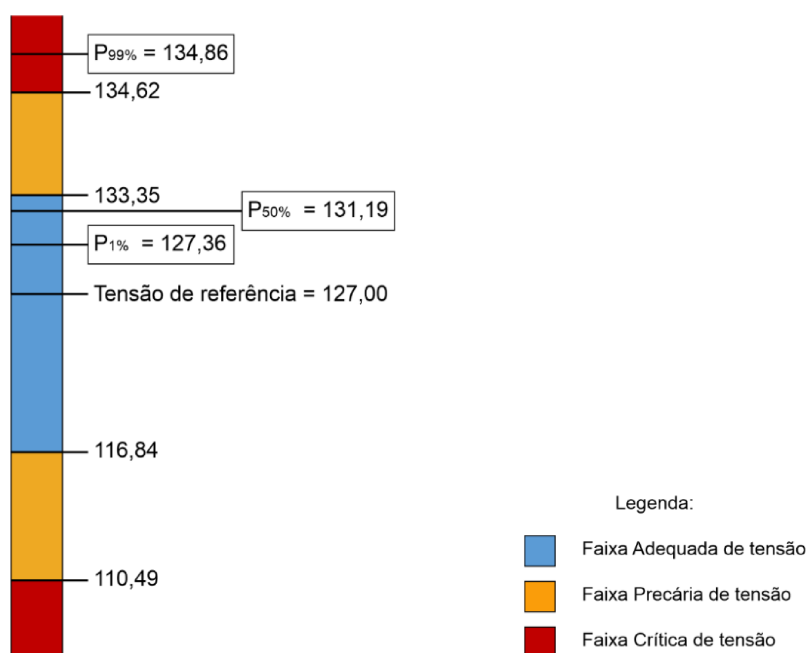


Figura 8 – Comparativo entre os indicadores percentis e faixas de tensão delimitadas conforme faixas adequada, precária e críticas do PRODIST

Para fins de comparação, foi realizada a análise de um conjunto de 272 amostras — apresentadas na Figura 9 — onde todas são referentes a sistemas operando com tensão nominal de 127 Volts.

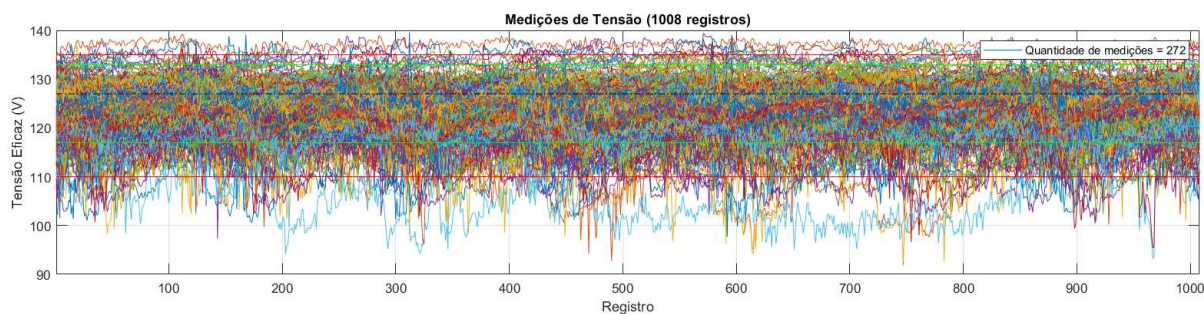


Figura 9 – Medições de tensão realizadas para composição de indicadores de conformidade de níveis de tensão

A partir do número de leituras na faixa precária (NLP) e na crítica (NLC) relacionados a cada uma das amostras, foram, então, calculados o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e para tensão crítica (DRC) para cada uma delas, sendo constatado que em 136 foram violados os limites de DRP e em 64 delas foram violados os limites de DRC, conforme apresentado na Figura 10.

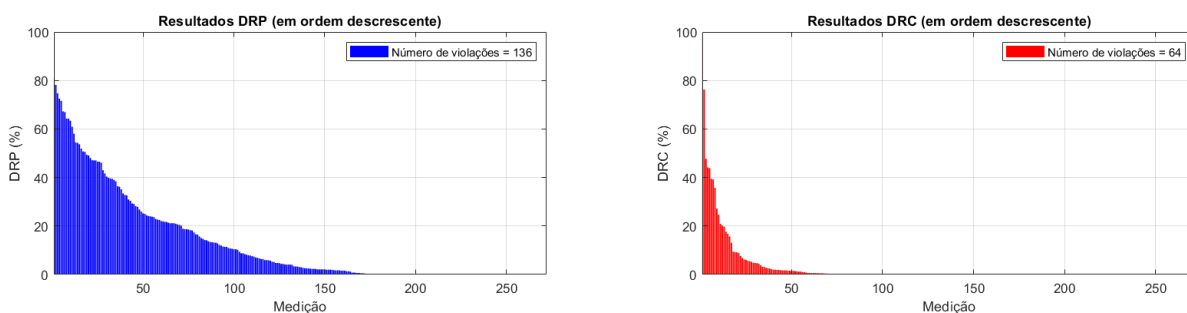


Figura 10 – Indicadores DRP e DRC obtidos a partir da amostra avaliada

Comparando os indicadores percentis com as faixas utilizadas na definição, foi definido para o percentil $P_{99\%}$ limite igual a faixa precária superior de 1,06 vezes a tensão de referência, e para o indicador $P_{1\%}$ foi definido igual a faixa precária inferior de 0,87 vezes a tensão de referência, onde houve violação do percentil $P_{99\%}$ em 18 casos e do percentil $P_{1\%}$ em 37 casos, conforme resultados apresentados na Figura 11.

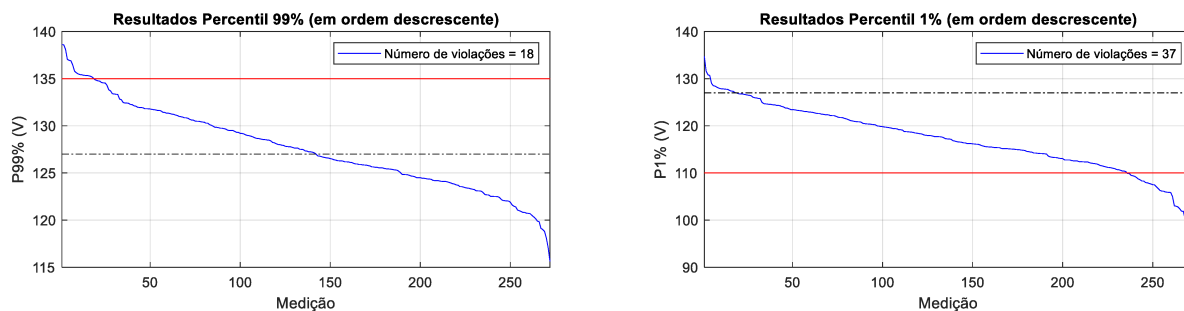


Figura 11 – Indicadores percentis obtidos a partir da amostra avaliada

Da análise de ambos os indicadores, fica clara a violação dos limites da faixa crítica de tensão. Todavia, conforme já mencionado, os indicadores DRP e DRC não apresentam distinção entre problemas de sub e sobretensão.

Da análise dos indicadores $P_{99\%}$ e $P_{1\%}$, fica claro que para a amostra analisada, a maior parte das violações são de subtensão, o que partindo do ponto de vista de uma análise amostral, considerando que todas as amostras, a exemplo, pertencem a um mesmo conjunto, pode se concluir que é necessário a realização de obras para melhoria da rede, visto que no horário de ponta, devido ao maior carregamento, ocorre a redução natural dos níveis de tensão em regime permanente, notadamente nos circuitos secundários de baixa tensão, os quais não possuem quaisquer recursos de regulação de tensão.

Outro ponto importante, é quando da violação dos limites regulatórios, a distribuidora deve compensar o titular na unidade consumidora, na medida em que essa é a forma de evitar que se tenha uma concessão extremamente cara, embora perfeita, visto que todos os custos para a manutenção dessa são revertidos na tarifa. Nesse contexto, o PRODIST [3] estabelece o pagamento de compensações quando da violação dos limites para indicadores DRP e DRC individuais, conforme descrito a seguir:

$$Comp_{Tensão} = \left[\left(\frac{DRP - DRP_{Limite}}{100} \right) \times K_1 + \left(\frac{DRC - DRC_{Limite}}{100} \right) \times K_2 \right] \times EUSD \quad (16)$$

Onde:

$k_1 = 0$, se $DRP \leq DRP_{limite}$

$k_1 = 3$, se $DRP > DRP_{limite}$

$k_2 = 0$, se $DRC \leq DRC_{limite}$

$k_2 = 7$, para consumidores atendidos em Baixa Tensão, se $DRC > DRC_{limite}$

$k_2 = 5$, para consumidores atendidos em Média Tensão, se $DRC > DRC_{limite}$

$k_2 = 3$, para consumidores atendidos em Alta Tensão, se $DRC > DRC_{limite}$

Do ponto de vista da compensação, conforme descrito, não importa se violada por exemplo a faixa crítica superior ou inferior, apenas interessa a magnitude dos indicadores e o tipo do consumidor, baixa, média ou alta, quando da violação das faixas críticas de tensão.

Diante do apresentado, pode-se concluir pela necessidade de atualização da metodologia de avaliação dos níveis de tensão. Conforme apresentado, os indicadores DRP e DRC, por si só, não apresentam distinção entre problemas de sub e sobretensão. Porém, os recursos dispendidos para melhoria de rede em casos de subtensão são majoritariamente superiores aos recursos dispendidos para correção de problemas de sobretensão, os quais, na maioria das vezes, estão associados a simples ajustes em dispositivos de regulação de tensão. De qualquer forma, o advento da mini e microgeração distribuída por fonte fotovoltaica tem modificado esse cenário, sendo cada vez mais comuns as violações de tensão por sobretensão que requerem melhorias de rede nas mesmas magnitudes daquelas realizadas para solucionar problemas de subtensão (divisão de circuitos, recondutoramento, realocação de transformadores de distribuição, etc).

3 – Avaliação de medidores de tensão em regime permanente

Para a realização de testes de calibração em medidores de faturamento com recursos de medição de tensão, foi elaborado um caderno de testes para aplicação em medidores de faturamento de baixa tensão (Grupo B), o qual considera as novas obrigações estabelecidas na revisão dos Módulos 6 e 8 do PRODIST.

À luz da IEC 61000-4-30 [1], foram desenvolvidos 4 módulos de ensaio objetivando a avaliação do cálculo da grandeza básica (tensão de 10 minutos), registro de interrupção, expurgo de leituras e cálculo dos indicadores DRP e DRC, conforme descrito a seguir.

3.1 – Estrutura de realização dos testes

Os testes de calibração foram realizados utilizando um padrão de tensão, devidamente calibrado e certificado, representado pela fonte programável CSW5500 da California Instruments, utilizando-se do arranjo laboratorial ilustrado na Figura 12.

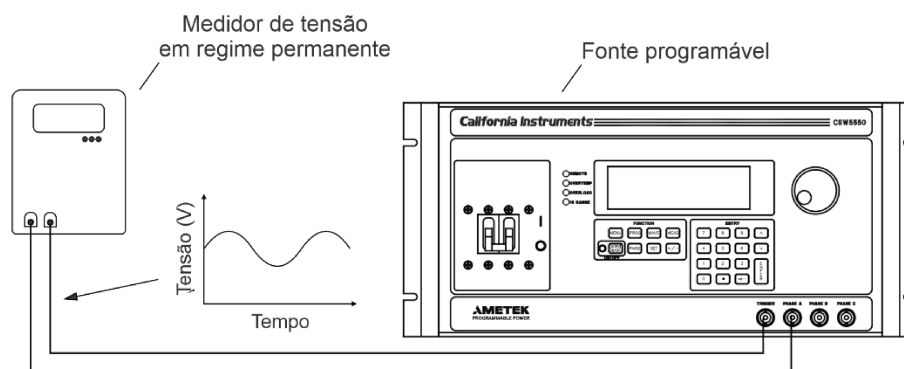


Figura 12 – Montagem laboratorial para realização dos testes de calibração

Ao total, foram realizados 10 testes, divididos em 4 módulos, resumidos na Tabela 4:

Tabela 4 – Módulos realizados

Nº	Módulos
I	Tensão eficaz agregada de 10 minutos
II	Registros de interrupção de curta e longa duração
III	Expurgos de registros de tensão de 10 minutos quando da ocorrência de variações temporárias de tensão ou de interrupções de longa duração
IV	Valores calculados dos indicadores DRP e DRC (sem expurgos)

3.2 – Testes realizados

3.2.1 – Módulo I: Tensão eficaz agregada de 10 minutos

Para o Módulo I, foi realizada a calibração da grandeza básica através de 5 testes específicos, sendo que os 3 primeiros testes realizados — apresentados na Tabela 5 — consideram tensões fixas puramente senoidais, localizadas nas faixas adequada, precária e crítica, respectivamente, em relação à tensão de referência de 127 V.

Tabela 5 – Testes I.1, I.2 e I.3: Tensões fixas não distorcidas

Teste \ Fase	I.1	I.2	I.3
A	125,80	112,60	92,20
B	120,30	116,80	136,90
C	130,40	133,70	105,60

O 4º Teste é composto por uma tensão de magnitude variável e ciclo de repetição de 20 segundos, conforme descrito na Tabela 6 e ilustrada na Figura 13.

Tabela 6 – Teste I.4: Tensão senoidal com amplitude variável

Intervalo (s)	Tensão (V)	Intervalo (s)	Tensão (V)	Intervalo (s)	Tensão (V)
0 – 2	108,00	8 – 10	134,00	14 – 16	127,00
2 – 4	114,00	10 – 12	139,00	16 – 18	114,00
4 – 6	121,00	12 – 14	134,00	18 – 20	114,00

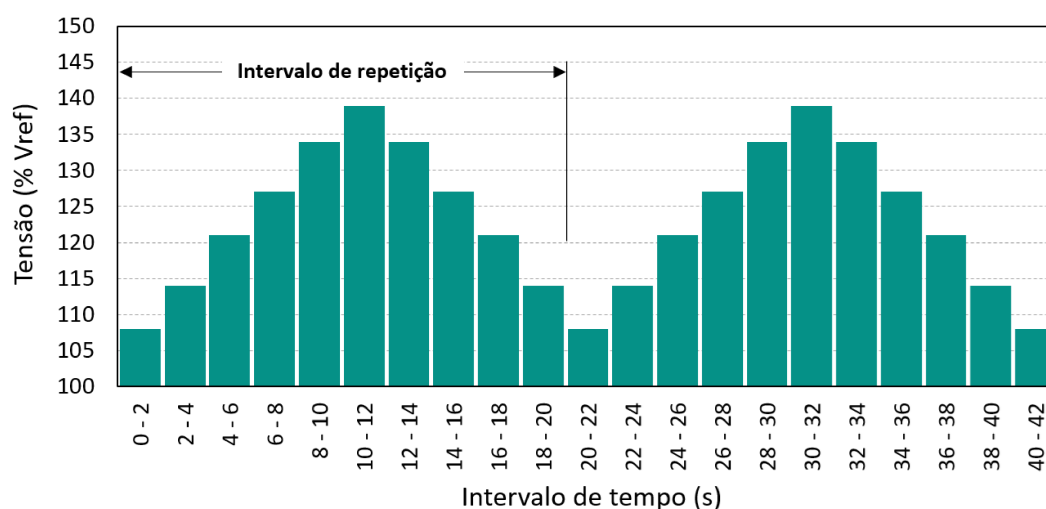


Figura 13 – Testes I.4: Tensão senoidal com amplitude variável

O 5º teste considera a sobreposição de frequências harmônicas ao sinal fundamental de tensão, resultando uma tensão distorcida, conforme descrito na Tabela 7:

Tabela 7 – Teste I.5: Tensões distorcidas

Fase	Ordem Harmônica	Amplitude (V)	Ângulo (°)	Valor 10 min Padrão (V)
A	h1 (60 Hz)	120,63	0	125,08
	h3 (180 Hz)	12,72	0	
	h5 (300 Hz)	30,54	0	
B	h1 (60 Hz)	126,66	-120	130,08
	h3 (180 Hz)	15,24	0	
	h5 (300 Hz)	25,39	120	
C	h1 (60 Hz)	129,02	120	131,08
	h3 (180 Hz)	10,35	0	
	h5 (300 Hz)	20,68	-120	

A seguir, na Figura 14, é apresentado o comportamento da tensão instantânea ao longo da realização do teste:

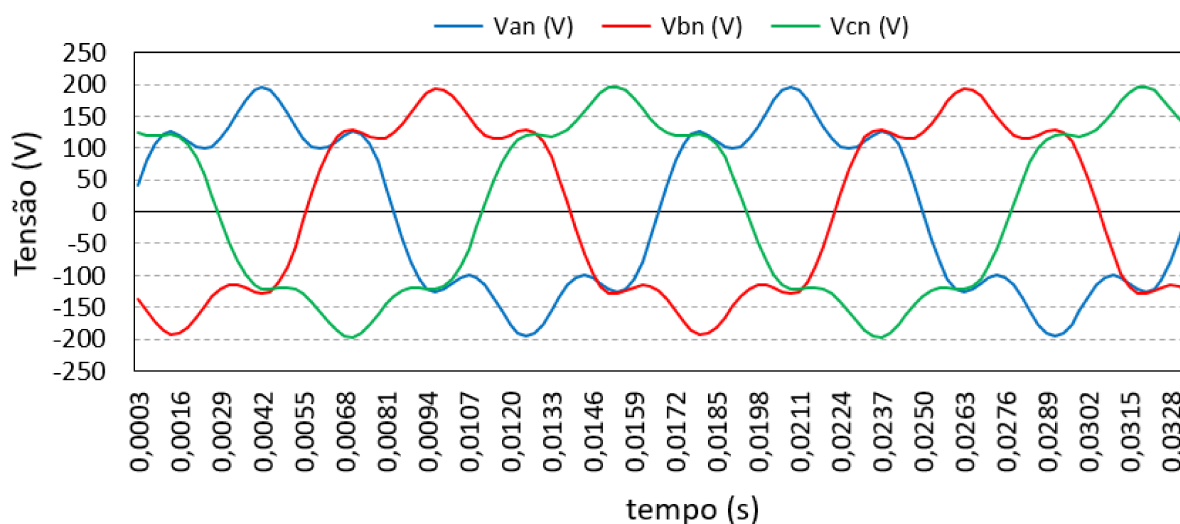


Figura 14 – Teste I.5: Tensões distorcidas

No cenário descrito, foram considerados aprovados os medidores que apresentaram um erro máximo de $\pm 1\%$ em relação ao valor de tensão padrão.

3.2.2 – Módulo II: Registros de interrupção de curta e longa duração

Este módulo é relacionado ao registro das interrupções de curta e longa duração e encontra-se dividido em três testes distintos, visando a avaliação do registro de interrupções momentâneas, temporárias de tensão e de longa duração, sendo considerados aprovados os medidores que registrarem um erro máximo de 250 ms (15 ciclos) em relação à duração da interrupção gerada pelo padrão de comparação.

Este módulo de testes consiste em 3 eventos de interrupção, a fim de verificar o registro correto destes eventos, sendo considerados aprovados os medidores que registrarem um erro máximo de ± 250 ms (15 ciclos) em relação à duração da interrupção gerada pelo padrão de comparação quanto à duração obtida de cada evento de interrupção, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Calibração do registro de interrupções

Teste	Fase	Duração Padrão
II.1	A	1.166,67 ms
II.2	A	4,400 s
II.3	A	4,000 min

Nas figuras 15, 16 e 17 são apresentados os comportamentos da tensão ao longo da realização dos testes.

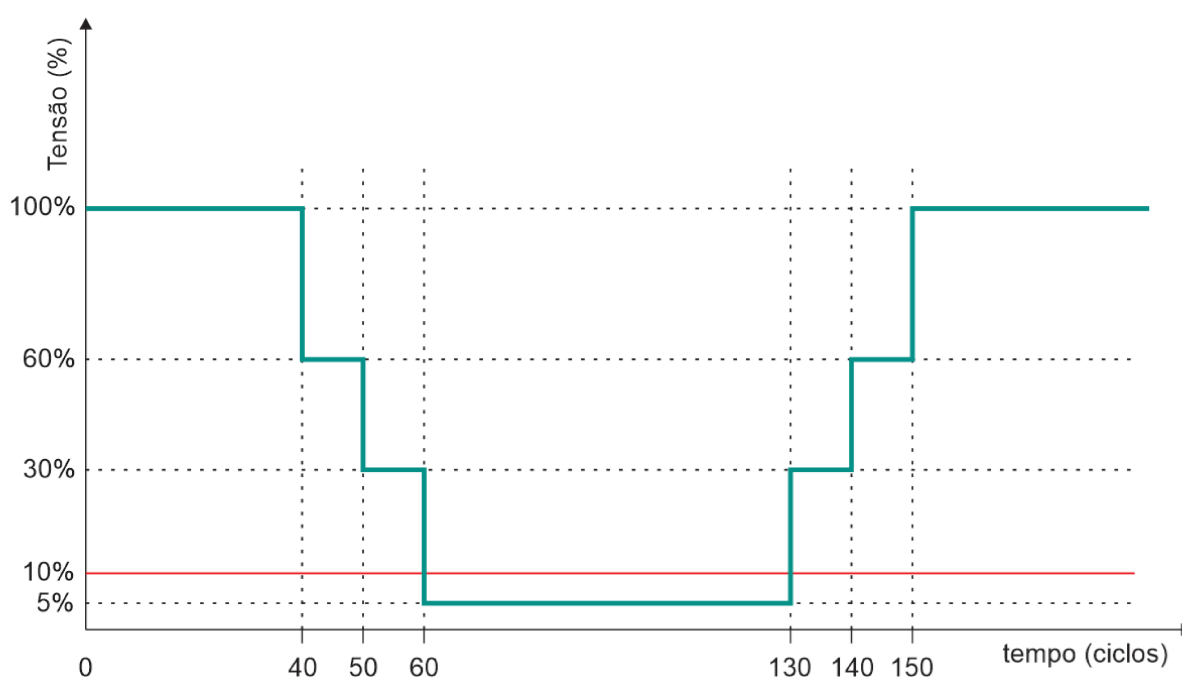


Figura 15 – Teste II.1: Interrupção momentânea de tensão

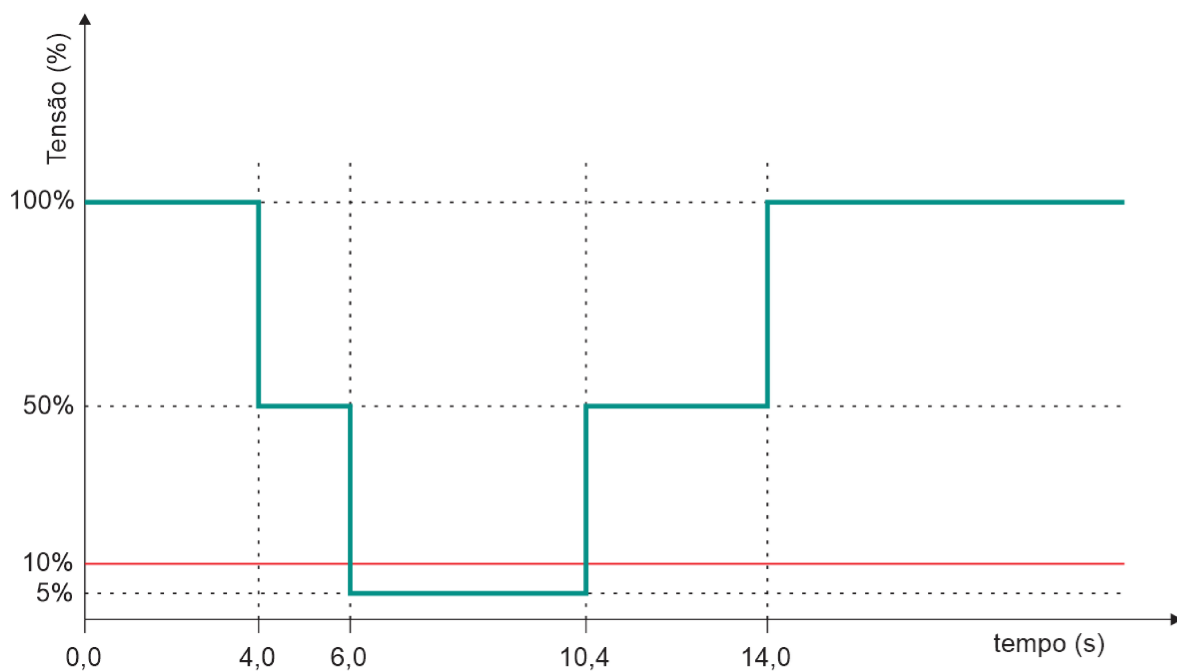


Figura 16 – Teste II.2: Interrupção temporária de tensão.

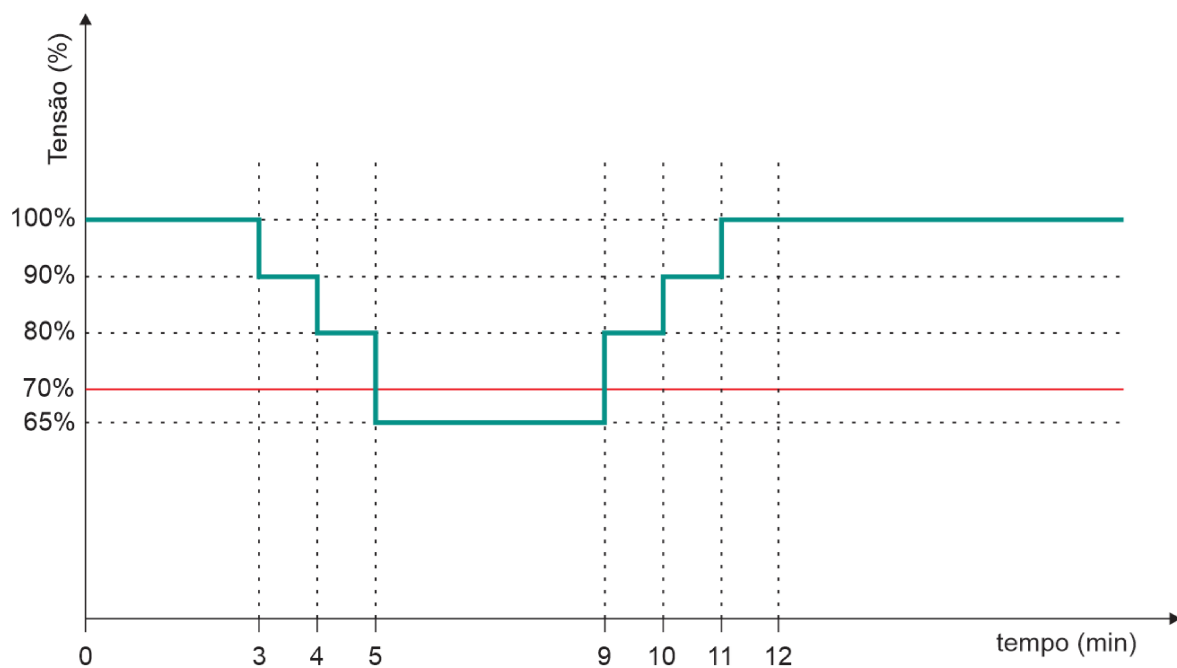


Figura 17 – Teste II.3: Interrupção de longa duração

3.2.3 – Módulo III: Expurgos de registros de tensão de 10 minutos quando da ocorrência de variações temporárias de tensão ou de interrupções de longa duração

Este módulo de testes contempla os critérios de expurgo de amostras de tensão de 10 minutos. O referido teste considera um total de 5 amostras de tensão de 10 minutos, conforme descrito na Figura 18. Dos cinco valores de tensão considerados, apenas três se enquadram nas condições de expurgo definidas pelo módulo 8 do PRODIST [3], em função de variações temporárias de tensão ou da incidência de interrupções de curta e longa duração.

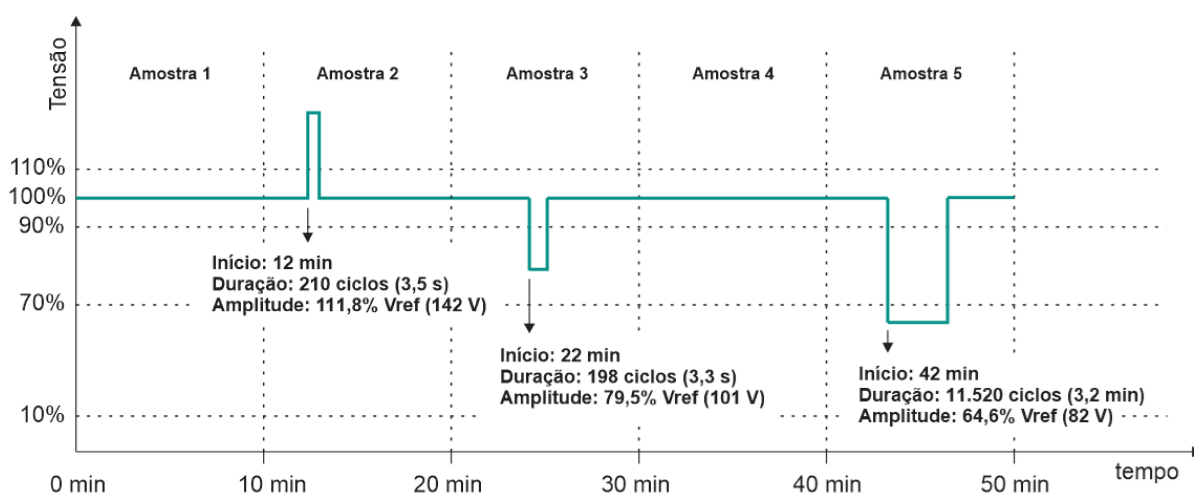


Figura 18 – Calibração do expurgo de leituras

3.2.4 – Módulo IV: Valores calculados dos indicadores DRP e DRC (sem expurgos)

Este módulo de testes, descrito na Figura 19, consiste no cálculo dos indicadores de conformidade da tensão (DRP e DRC). Nesse teste específico, foi considerado o modo de calibração, que substitui o valor agregado de 10 min por valores agregados de tensão de 3 segundos. Esse modo de testes viabiliza a realização do teste em ambiente controlado, já que os 1008 registros podem ser obtidos em menos de 1 hora.

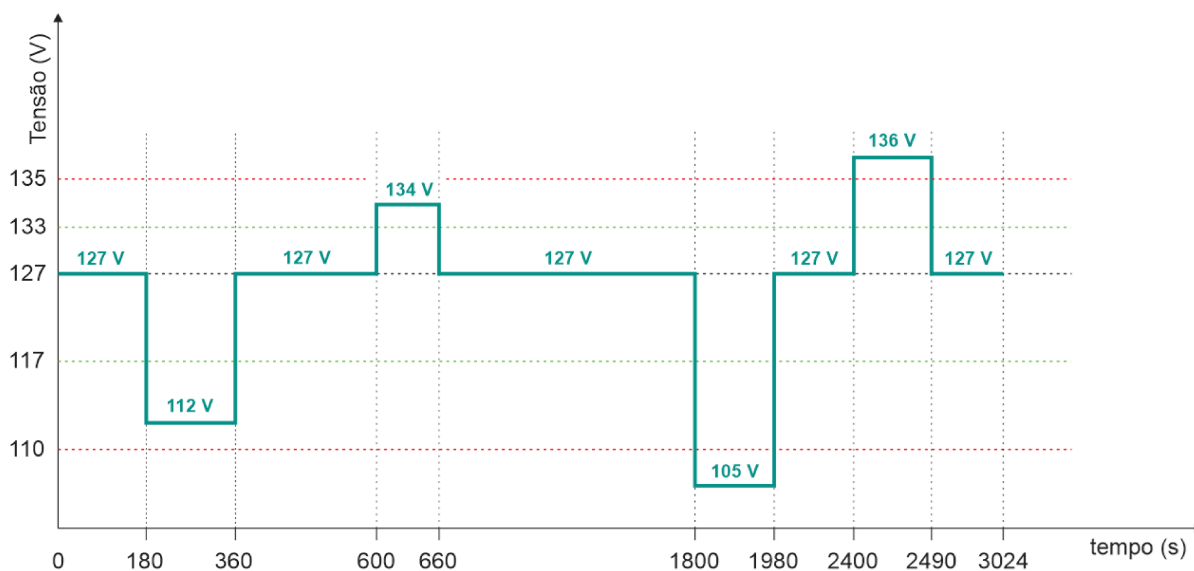


Figura 19 – Calibração do cálculo dos indicadores DRP e DRC

É considerado aprovado o medidor que apresentar diferença absoluta entre os valores padrão e calculado — para os indicadores DRP e DRC — de, no máximo, $\pm 0,20\%$ absolutos (o que equivale a aproximadamente 2 registros de tensão de 3 segundos, para mais ou para menos), sendo esperado o resultado descrito na Tabela 9:

Tabela 9 – Resultados esperados da calibração do cálculo dos indicadores DRP e DRC

Indicadores	DRP	DRC
Resultado padrão	7,94%	8,93%

3.2 – Resultados dos Testes de Calibração

À luz da IEC 61000-4-30 [1], foram desenvolvidos 4 módulos de ensaio — resumidos na Tabela 10 — objetivando a avaliação do cálculo da grandeza básica (tensão de 10 minutos), registro de interrupção, expurgo de leituras e cálculo dos indicadores DRP e DRC.

Tabela 10 – Resumo dos testes realizados

Teste	Descrição
I.1	Calibração da grandeza básica – Tensões fixas senoidais localizadas na faixa adequada
I.2	Calibração da grandeza básica – Tensões fixas senoidais localizadas na faixa precária
I.3	Calibração da grandeza básica – Tensões fixas senoidais localizadas na faixa crítica
I.4	Calibração da grandeza básica – Tensão senoidal variável
I.5	Calibração da grandeza básica – Tensão fixa com distorção harmônica
II.1	Registro de interrupções momentâneas de tensão
II.2	Registro de interrupções temporárias de tensão
II.3	Registro de interrupções de longa duração
III.1	Análise dos expurgos de registros de tensão de 10 minutos quando da ocorrência de variações temporárias de tensão ou de interrupções de longa duração
IV.1	Calibração dos valores calculados dos indicadores DRP e DRC (sem expurgos)

Os testes de calibração foram realizados em 4 medidores de diferentes fabricantes e modelos, nomeados como A.1, A.2, A.3 e A.4 a fim de preservar a identidade dos fabricantes, além do medidor de baixo custo desenvolvido neste trabalho (apresentado no próximo tópico). Os resultados dos testes são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Medidores aprovados por teste realizado

Medidor	I.1	I.2	I.3	I.4	I.5	II.1	II.2	II.3	III.1	IV.1
A.1	•	•	•	•	•			•	•	•
A.2	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
A.3	•	•	•	•	•					
A.4	•	•	•		•			•		
UFU	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•

• – Medidor aprovado

Para o primeiro módulo de testes que visava a calibração da grandeza básica, representada pelo registro de tensão eficaz agregado de 10 minutos, apenas o medidor A.4 violou o limiar de $\pm 1\%$ em relação à tensão padrão para o teste I.4, quando sob uma tensão de magnitude variável e ciclo de repetição de 20 segundos.

No segundo módulo de testes, visando a calibração do registro das interrupções de curta e longa duração, foram considerados aprovados os medidores que registrarem um erro máximo de 250 ms (15 ciclos). Nesse contexto, apenas os medidores A.2 e UFU foram aprovados em todos os testes realizados; o que evidencia a dificuldade quanto à detecção de eventos muito pequenos, proveniente tanto de problemas relacionados à amostragem de sinais ou mesmo à janela de cálculo conforme destacado anteriormente e ilustrado na Figura 3.

No terceiro módulo de testes, visando a calibração dos critérios de expurgo de amostras de tensão de 10 minutos, apenas os medidores A.1, A.2 e UFU foram aprovados. O que evidencia que também há dificuldade quanto à detecção de eventos maiores, visto que a situação destacada na Figura 3 é minimizada quanto maior a duração do evento.

Por fim, no quarto e último módulo, visando a realização de testes para efeito de calibração dos valores registrados para os indicadores de conformidade de tensão (DRP e DRC), apenas os medidores A.1, A.2 e UFU foram aprovados.

Os resultados expõem a insuficiência dos medidores disponíveis no mercado, quando sequer conseguem atender o objetivo principal de registros dos indicadores DRP e DRC e, aprofundando-se nas análises, fica visível a clara dificuldade quanto a registro de interrupções, destacando-se o medidor A.3, aprovado apenas nos testes visando a calibração da grandeza básica. Verificou-se que a quase totalidade dos medidores de faturamento de energia elétrica utiliza uma mesma família de *chips* metrológicos, os quais são incompatíveis com alguns dos requisitos estabelecidos pela Resolução ANEEL nº 871, de 11 de fevereiro de 2020, a exemplo dos registros de interrupção com duração inferior a 1 segundo.

4 – Desenvolvimento de um medidor de tensão em regime permanente

O desenvolvimento do medidor foi realizado utilizando-se um ESP32 DEVKIT V1 da Espressif Systems®, o qual é parte de uma série de microcontroladores de baixo custo desenvolvidos pela empresa, contendo um processador Xtensa® Dual-Core 32-bit LX6, com um clock máximo de 240 MHz, memória RAM de 520 Kbytes e Flash de 4 MB, além de conexão WiFi e Bluetooth.

Todavia, conforme destacado a seguir, foi realizada a implementação do medidor em ambiente *Simulink* visando a construção inicial dos algoritmos de amostragem e processamento dos sinais de tensão.

4.1 – Modelagem em ambiente *Simulink*

Com o auxílio do *Simulink* foi realizada a modelagem do medidor e implementação dos algoritmos necessários a implementação de um modelo físico, com o auxílio da ferramenta MATLAB Function, apresentada na Figura 20, que através do Simulink dá acesso ao ambiente de modelagem MATLAB, ampliando ainda mais o leque de possibilidades que o software disponibiliza.

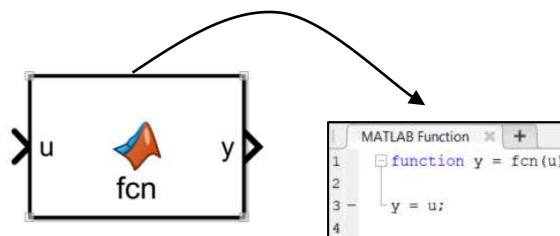


Figura 20 – Ferramenta MATLAB function

A modelagem se deu com a implementação de um medidor monofásico, dividido em 4 funções:

- V1 – Cálculo da tensão eficaz em uma janela de 1 ciclo;
- V12 – Cálculo da tensão eficaz em uma janela de 12 ciclos;
- Registro – Registro de interrupções de curta e longa duração;
- DRP e DRC – Cálculo e expurgo de leituras de 10 minutos e apuração dos indicadores de conformidade dos níveis de tensão.

A divisão em funções é uma forma de facilitar a implementação do modelo físico, visto que é possível encapsular um código e chamá-lo apenas quando necessário, tornando o projeto mais organizado e de fácil entendimento.

O resultado final da modelagem consta apresentado na Figura 21 e os códigos utilizados na implementação desse constam nos Apêndices B, C, D e E.

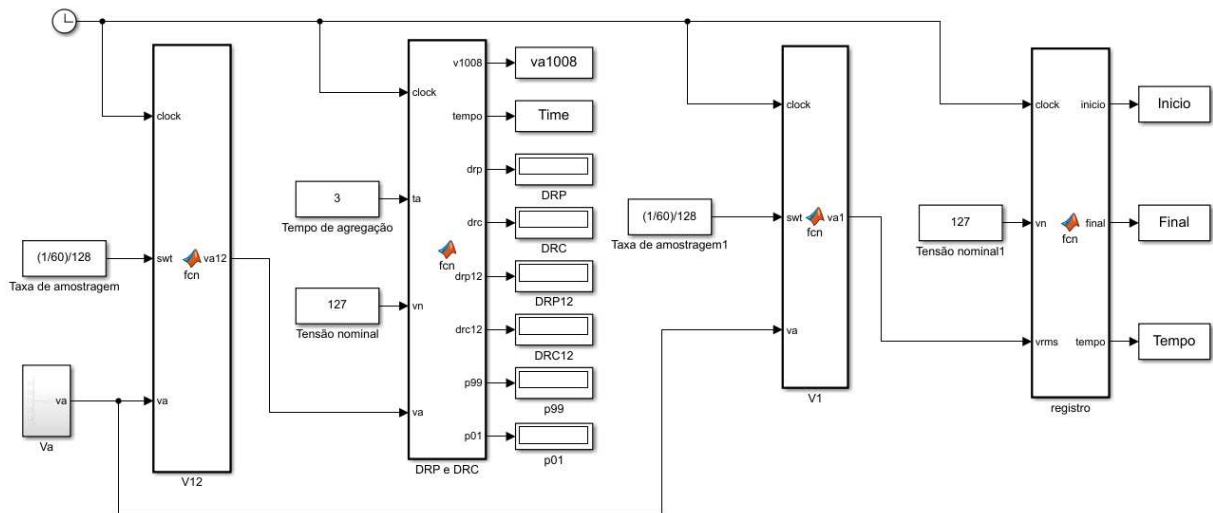


Figura 21 – Modelagem em ambiente *simulink* de um medidor para atendimento aos requisitos de medição amostral de tensão no âmbito do PRODIST

Inicialmente, para condução da modelagem foi construído um bloco para geração de eventos, a fim de realizar tanto a apuração dos indicadores DRP e DRC, quanto o registro de interrupções de curta e longa duração, conforme ilustrado na Figura 22.

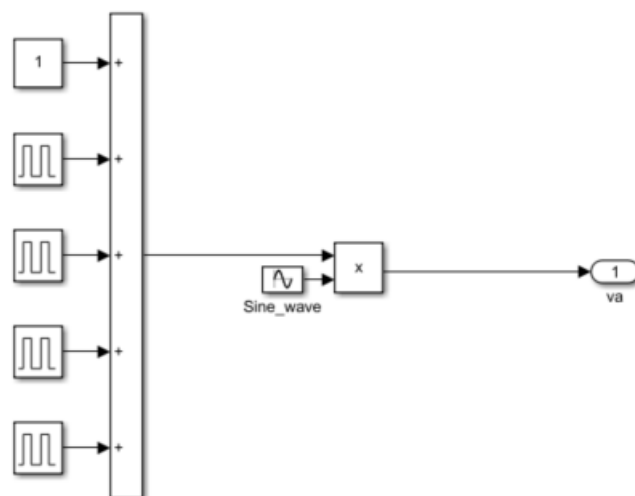


Figura 22 – Arranjo utilizado para geração de sinais

Para sincronização da simulação, foi realizada a utilização da função clock, implementada no intuito de simular o clock do microcontrolador utilizado na implementação do medidor, conforme ilustrado na Figura 23.

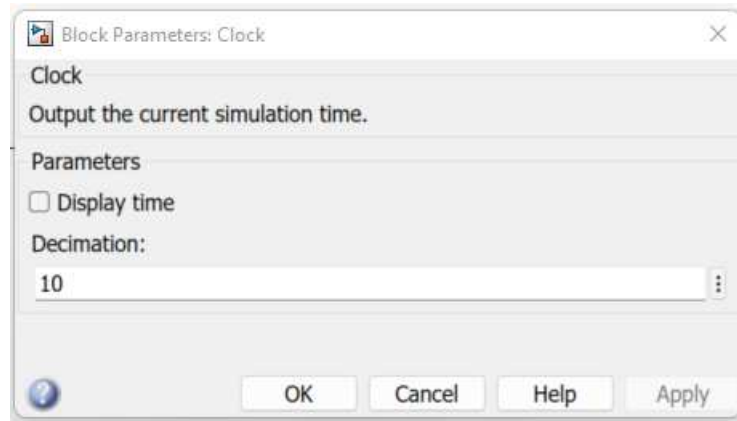


Figura 23 – Função Clock

O Clock é o responsável por gerar a base de tempo necessária para realização das instruções dentro de um microcontrolador, como a sincronização do serviço de interrupção.

Quanto ao cálculo dos valores eficazes da tensão em janelas de 12 e 1 ciclo para atendimento respectivamente dos indicadores de conformidade e registro de interrupções foram realizadas em duas funções que se diferenciam apenas pela janela de integração, conforme ilustrado na Figura 24.

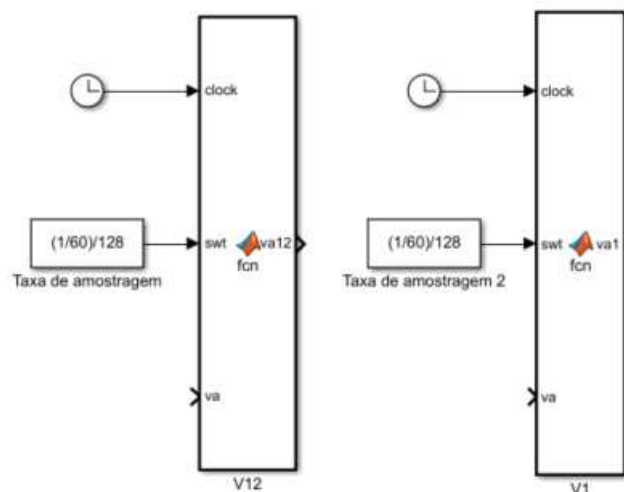


Figura 24 – Cálculo do valor eficaz da tensão em janelas de 12 ciclos (V12) e 1 ciclo (V1)

Os códigos utilizados na implementação dos blocos V12 e V1 constam nos Apêndices D e E respectivamente.

Na Figura 25 é apresentado o módulo implementado para realização do registro de interrupções de curta e longa duração. Quando à detecção de eventos, ele armazena o início, fim e duração desses, considerando as 100 últimas interrupções e caso ultrapasse esse volume, ele inicia o processo de substituir os eventos mais antigos.

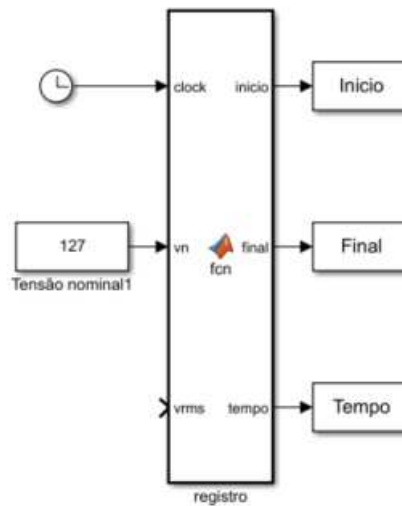


Figura 25 – Módulo implementado para realização do registro de interrupções de curta e longa durações

Por fim, foi realizada a implementação do módulo utilizada na apuração dos indicadores DRP e DRC, conforme ilustrado na Figura 26.

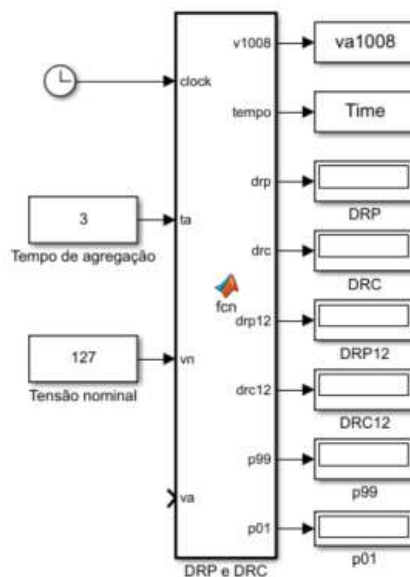


Figura 26 – Módulo implementado para apuração dos indicadores de conformidade da tensão em regime permanente

O modelo proposto realiza a aquisição das 1008 leituras válidas de tensão, considerando os critérios obrigatórios de expurgo e então realiza o cálculo dos indicadores DRP e DRC, bem como o armazenamento dos 12 últimos valores de DRP e DRC cálculos e adicionalmente, foi realizada a implementação dos indicadores $P_{1\%}$, e $P_{99\%}$.

A modelagem proposta consegue atender a todos os requisitos necessários a novas alterações no que diz respeito à medição amostral. Entretanto, não reflete as dificuldades relacionadas à implementação em um modelo físico, visto que o *Simulink* dispõe de capacidade de processamento e armazenamento de informações muito superiores ao que um microcontrolador pode entregar. Todavia, a implementação em ambiente simulado facilita muito a construção de um modelo físico, visto que possibilita a construção prévia dos algoritmos necessários.

4.2 – Amostragem e adequação de sinais

Para amostragem do sinal de tensão, foi implementado o circuito de aquisição dos sinais de tensão mostrado na Figura 27, constituído por um sensor diferencial de tensão. O *offset* do sinal amostrado pode ser ajustado de forma a compatibilizar a máxima tensão CA de entrada desejada com a máxima tensão de entrada permitida pelo ADC (3,3 V).

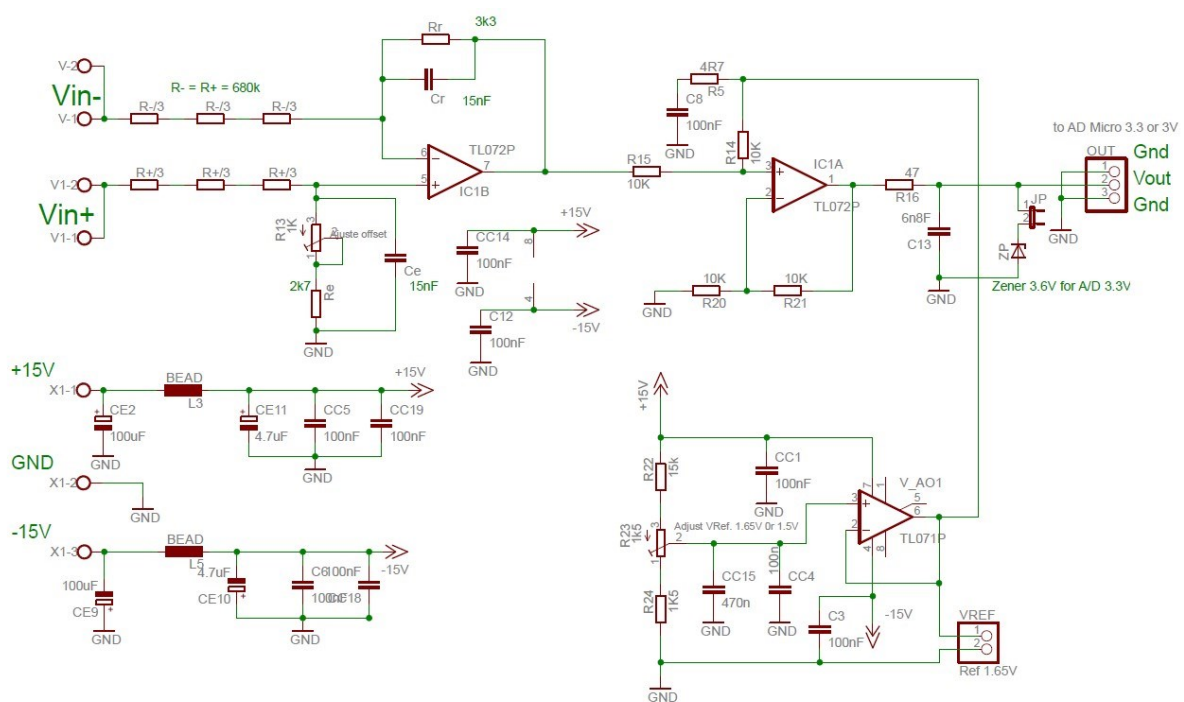


Figura 27 – Sensor diferencial de tensão.

Em seguida, é realizada a aquisição do sinal pelo ADC do módulo ESP32, que, como qualquer outro, apresenta uma resposta não-linear, fazendo-se necessário o ajuste que foi realizado através de um sinal periódico de rampa com frequência de 1 Hz, partindo das tensões mínima e máxima de sensibilização. Com o auxílio de um osciloscópio, foi obtida a forma de onda do sinal de entrada e a convertendo para a Resolução de 12 bits do ESP32 foram obtidos os resultados apresentados na Figura 28.

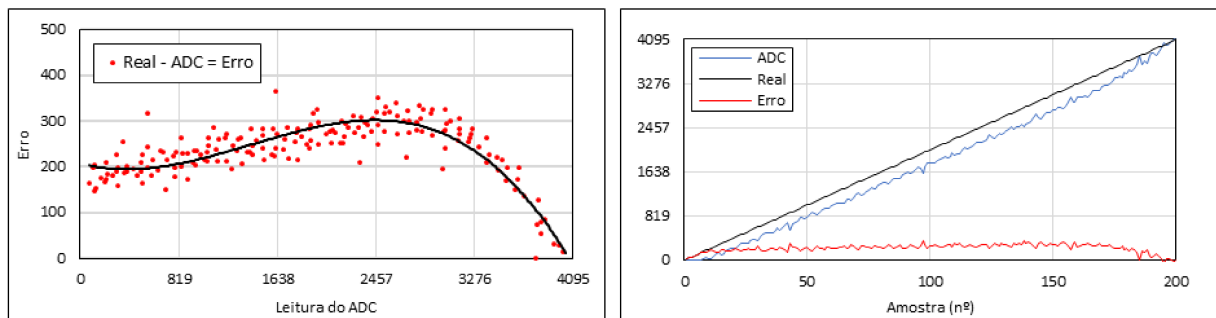


Figura 28 – Comparativo entre o Sinal Real e a Leitura realizada pelo ESP32

A partir do erro associado a cada medição, é possível obter uma equação para este, via regressão polinomial, viabilizando a correção das leituras conforme descrito a seguir, garantindo, assim, a precisão desejada, dada a aplicação do projeto a ser implementado.

$$L_C = L_R + E(L_R) \quad (17)$$

$$E(Y) = \sum_0^n k_n \times (Y^n) \quad (18)$$

Em que:

- L_C = leitura corrigida.
- L_R = leitura obtida pelo ADC.
- $E(Y)$ = equação obtida via regressão polinomial para o erro.
- K_n = Constantes do polinômio de grau n .

Nesse contexto, foi obtida uma equação para este, a fim de realizar o ajuste das leituras obtidas, conforme descrito na equação abaixo:

$$E(X) = -0,0000000246X^3 + 0,0001045078X^2 - 0,0702943844X + 207 \quad (19)$$

Para amostragem do sinal de tensão, foi adotada uma frequência de 10 kHz, sincronizada via serviço de interrupção, como ilustrado na Figura 29.

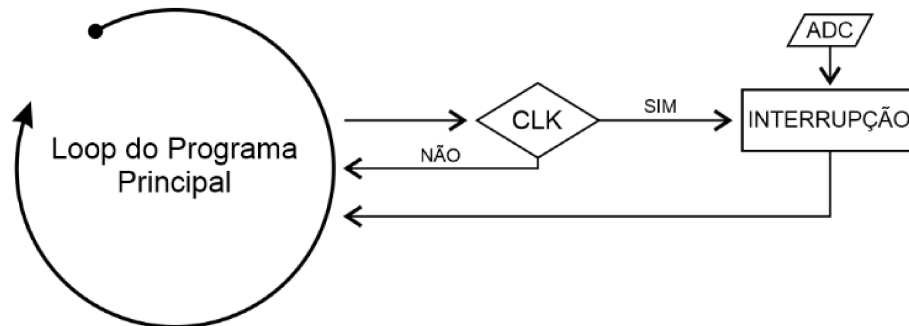


Figura 29 – Rotina de processamento do medidor

Nesse contexto, o serviço de interrupção é a forma como é sinalizada para CPU o momento de execução de uma sub-rotina ou instrução, o que, no âmbito na amostragem de sinais, é a forma como são extraídas as amostras e fora dele é então realizado o processamento dos dados.

Dessa forma, durante o serviço de interrupção são calculados os valores eficazes (RMS) da tensão, tanto para uma janela de 12 ciclos quanto para a janela de $\frac{1}{2}$ ciclo, para ambos os casos, retornando um novo valor apenas ao final de cada janela. De forma síncrona, são avaliados os critérios de expurgo e registro de interrupção, ao mesmo tempo em que é calculada a leitura de 10 minutos, conforme ilustrado na Figura 30.

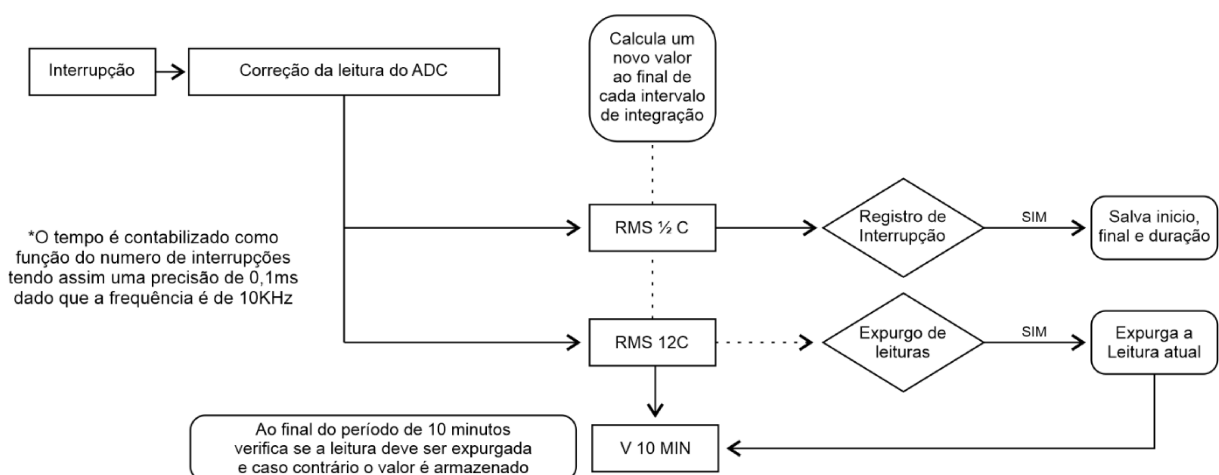


Figura 30 – Rotina de processamento durante a interrupção

4.4 – Cálculo dos indicadores DRP e DRC e registro de interrupções

Durante os serviços de interrupção, todos os valores obtidos — incluindo as leituras de tensão marcadas com hora e data, e início e fim das interrupções — são armazenados em *Arrays* e processadas assincronamente no *loop* do programa principal, que armazena todas essas informações em um módulo externo de memória.

Quanto ao cálculo do DRP e DRC, o medidor foi desenvolvido considerando tensões inferiores a 2,3 kV. Dessa maneira, dadas as faixas de operação, ele obtém número de leituras que estão na faixa precária (NLP) e na crítica (NLC) — como ilustra a Figura 31 — fora do serviço de interrupção e então calcula os indicadores individuais assim como em (3) e (4), para cada conjunto de 1008 leituras válidas.

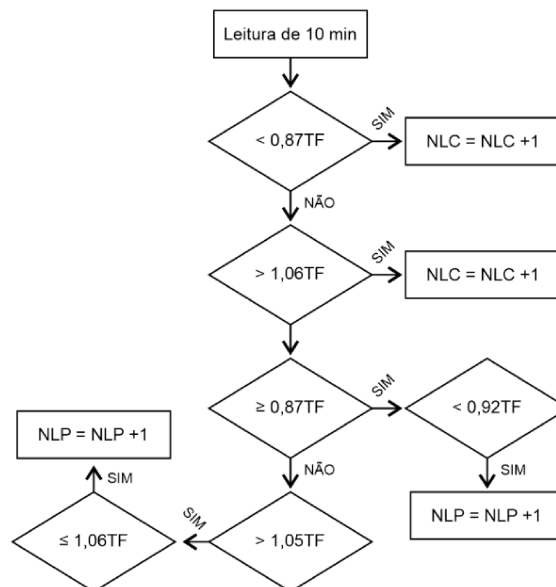


Figura 31 – Obtenção de NLP e NLC

Em um display LCD, o medidor disponibiliza a última leitura de tensão de 10 minutos obtida, além dos últimos doze valores de DRP e DRC obtidos e, no módulo de armazenamento, disponibiliza ainda um relatório (memória de massa) contendo as 1008 leituras, os valores de DRP e DRC e também os atributos dos últimos 100 registros de interrupção, organizados conforme indicado na Tabela 12. Além disso, para fins de calibração, com o objetivo de redução do tempo de ensaio em laboratório, o equipamento possui um modo de teste que considera valores agregados de tensão de 3 segundos ao invés de 10 minutos, possibilitando a calibração do cálculo dos indicadores DRP e DRC (contemplando 1008 amostras de tensão) em apenas 50,4 minutos ao invés de 168 horas.

Tabela 12 – Organização dos resultados obtidos

DRP [%]	3,968	DRP [%]	5,95
V_{\max}	135,7	V_{\min}	105,40
Leituras de tensão:			
Registro	Data	Hora	$V_{10\min}$
1	01/01/2021	12:10:00	126,90
2	01/01/2021	12:20:00	127,00
...
Registro de interrupções:			
Evento	Data	Hora	Duração
1	01/01/2021	17:10:15	0,2166 s
2	03/01/2021	14:40:37	3,2700 s
...

4.4 – Protótipo final

Conforme já destacado, o desenvolvimento do medidor foi realizado utilizando-se um ESP32 DEVKIT V1 da *Espressif Systems*[®], destacado na Figura 32, o qual é parte de uma série de microcontroladores de baixo custo desenvolvidos pela empresa.



Figura 32 – Imagem ilustrativa do ESP 32

A escolha do módulo foi feita tanto pela relação custo-benefício, quanto pela facilidade de implementação de projetos utilizando-se o ESP32, visto que esse é compatível com a IDE, ou ambiente de desenvolvimento, do Arduino, uma plataforma de prototipagem de hardware

muito popular que conta com uma IDE muito amigável ao usuário, além de ser repleta de funcionalidades que auxiliam no desenvolvimento, conforme ilustrado na Figura 33.

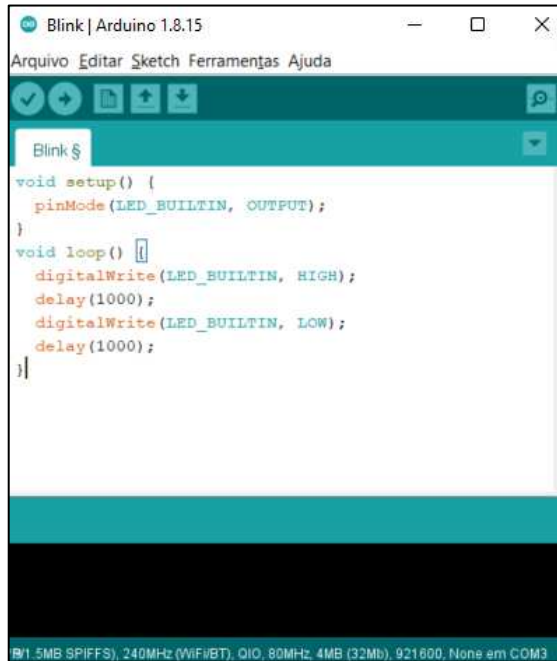


Figura 33 – IDE do Arduino

Para o armazenamento das 1008 leituras de tensão, bem como o registro de interrupções, foi utilizado o módulo SD apresentado na Figura 34, o qual permite a integração com um cartão SD, facilitando a extração das informações.

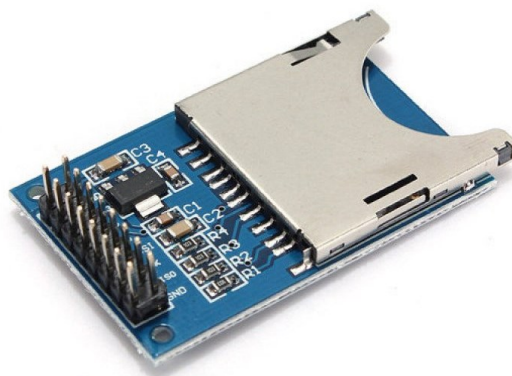


Figura 34 – Módulo SD

Para visualização das informações, como os 12 últimos registros de interrupção e a última leitura de tensão foi utilizado um display LCD 16x2, conforme ilustrado na Figura 35.



Figura 35 – Display LCD 16x2

A Figura 36 mostra a sequência de telas apresentadas no display do medidor, considerando-se apenas um canal de tensão (medidor monofásico), conforme protótipo construído.

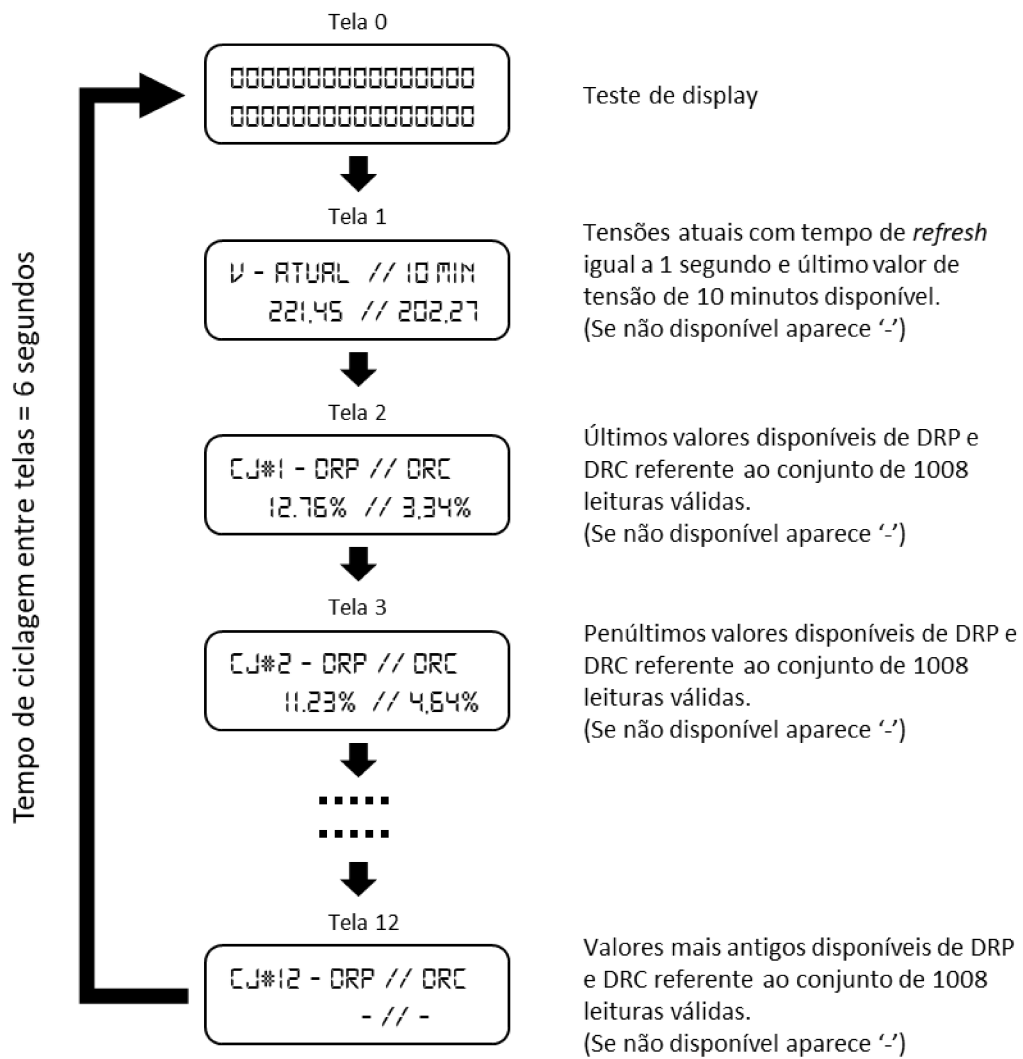


Figura 36 – Sequência de telas apresentadas no display do protótipo de medidor

O protótipo desenvolvido é apresentado na Figura 37, em que, além dos itens apresentados anteriormente, também faz parte do projeto o sensor diferencial de tensão apresentado anteriormente na Figura 27, as ponteiros para leitura de tensão e, por fim, uma fonte simétrica para alimentação tanto do circuito de adequação de sinais, quanto do próprio ESP32 e demais periféricos aqui destacados.

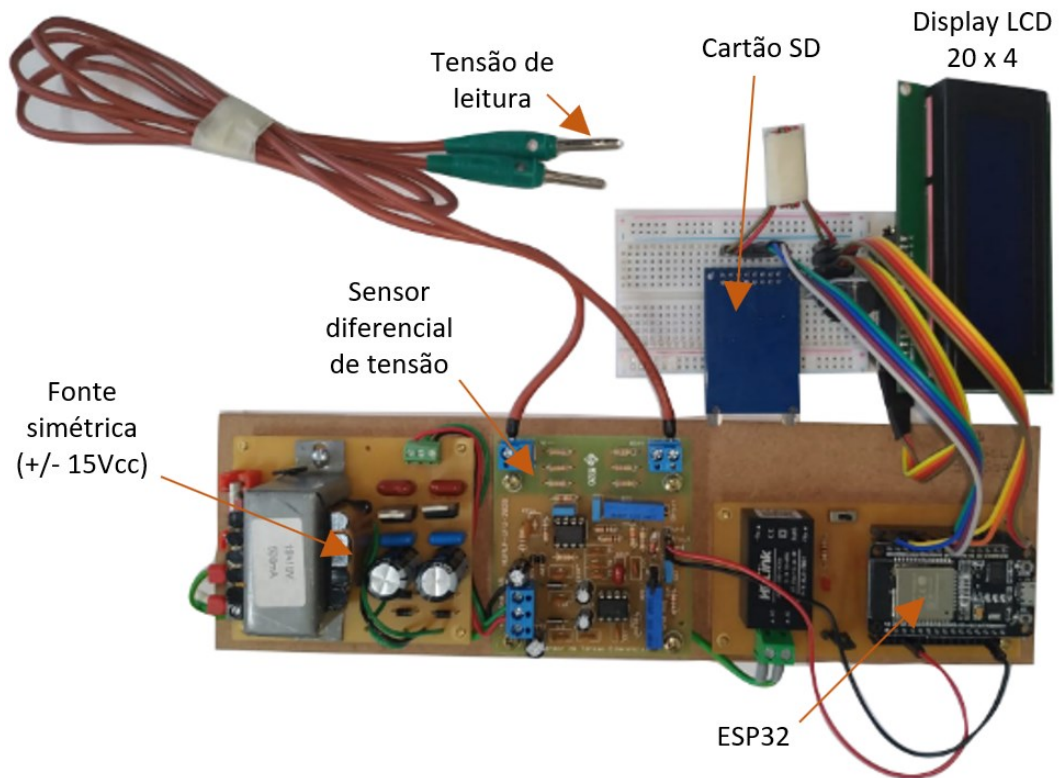


Figura 37 – Foto do protótipo desenvolvido.

Com o propósito de verificar se o protótipo desenvolvido está em concordância com sua proposta de atendimento aos módulos 8 [3] e 5 [4] do PRODIST, dada a publicação da Resolução ANEEL nº 871, de 11 de fevereiro de 2020, foram realizados os mesmos testes de calibração destacados anteriormente. A diferença é que, como o protótipo é monofásico, foram realizadas algumas adequações para realização completa do caderno proposto e os resultados serão apresentados a seguir.

4.5 – Resultados dos testes de calibração no protótipo desenvolvido

Para verificação das funcionalidades básicas do medidor, ele foi submetido ao mesmo caderno de testes utilizado para os demais equipamentos, sendo considerados os mesmos limites para cada um dos testes realizados. Nesse contexto, cabe destacar que, como trata-se de protótipo monofásico, os testes foram realizados apenas para 1 fase.

Para o Módulo I, foram realizados os 5 testes descritos anteriormente, sendo aceito um erro de $\pm 1\%$, em que os resultados obtidos são apresentados na Tabela 13 e o medidor situou-se abaixo do limite proposto, com um erro máximo de 0,87% para o teste I.3.

Tabela 13 – Módulo I: Tensões fixas não distorcidas

Teste	$V_{10\text{min}}$ padrão	Valor obtido	Erro (%)
I.1	125,80	126,00	0,16
I.2	112,60	113,20	0,53
I.3	92,20	93,00	0,87
I.4	123,90	124,60	0,56
I.5	125,08	125,10	0,016

Para o Módulo II, que consiste em 3 eventos de interrupção, a fim de verificar o registro correto desses eventos, foi aceita uma diferença máxima de ± 250 ms quanto à duração obtida de cada evento de interrupção. Nesse contexto, para fins de calibração, o equipamento envia para a saída serial a duração do último registro de interrupção detectado, sendo que os resultados obtidos são apresentados na Tabela 14. Em todos os casos, obteve-se um erro absoluto abaixo do limite estabelecido (250 ms). Todavia, é possível notar a dificuldade quanto à detecção de eventos muito pequenos, observada no evento 1, para o qual registrou-se a maior diferença dentre todos os casos.

Tabela 14 – Módulo II: Registro de interrupções

Evento	Duração padrão	Duração registrada	Diferença
II.1	1.166,67 ms	1320,00 ms	153,33 ms
II.2	4,400 s	4,390 s	10,00 ms
II.3	4,000 min	3,9998 min	12,00 ms

Para o módulo III, que contempla os critérios de expurgo de amostras de tensão de 10 minutos, foram consideradas um total de 5 amostras de tensão de 10 minutos, conforme descrito na Tabela 15. Dos cinco valores de tensão considerados, apenas três se enquadram nas

condições de expurgo definidas pelo módulo 8 do PRODIST [4], em função de variações temporárias de tensão ou da incidência de interrupções de curta e longa duração. Para fins de calibração, o medidor envia para a janela serial um aviso de registro expurgado, assim como a totalização de registros expurgados desde o início da medição, realizando corretamente os expurgos nesse contexto.

Tabela 15 – Módulo III:Expurgo de leituras de 10 minutos

Nº	Variação da tensão	Duração	Expurgo	Resultado
1	-	-	Não	Não
2	111,8%	3,5 s	Sim	Sim
3	79,5%	3,3 s	Sim	Sim
4	-	-	Não	Não
5	64,6%	3,2 min	Sim	Sim

Para o módulo IV, que contempla o cálculo dos indicadores de conformidade da tensão (DRP e DRC), foi considerado um modo de calibração que substitui o valor agregado de 10 minutos por valores agregados de tensão de 3 segundos, possibilitando a realização do teste em ambiente controlado e em muito menos tempo, já que os 1008 registros podem ser obtidos em menos de 1 hora. As tensões geradas pelo padrão de tensão (fonte programável) consideraram variações de tensão conforme indicado na Tabela 16.

Tabela 16 – Módulo IV: Indicadores de conformidade

Patamar de tensão	Tensão (V)	Duração
1 – Faixa precária	112	180 s
2 – Faixa precária	134	60 s
3 – Faixa crítica	105	180 s
4 – Faixa crítica	136	90 s

Para esse teste, especificamente, foi considerado um erro máximo admissível de $\pm 0,2\%$, o que equivale a 2 registros a mais ou a menos de tensão. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 17, na qual é possível observar que o medidor foi capaz de efetuar corretamente o cálculo dos indicadores DRP e DRC, com erros em consonância com os limites estabelecidos.

Tabela 17 – Resultados do Módulo IV

DRP padrão	DRP Registrado	Erro	DRC padrão	DRC Registrado	Erro
7,94%	7,74%	0,2 %	8,93%	8,73%	0,2 %

4.6 – Comparativo entre medidores

Conforme constatado, diferentemente dos demais medidores avaliados, o protótipo de medidor foi aprovado em todos os testes de calibração aplicados, principalmente no que se refere ao registro de interrupções de curta e longa duração, em que o ESP32 demonstrou eficiência e facilidade quanto à execução da instrução de registro.

Comparando o módulo com demais *chips* comumente utilizados na amostragem de sinais de tensão, são encontradas diversas diferenças — desde a resolução até a capacidade de processamento — que interferem diretamente no resultado final de um projeto. Todavia, destaca-se a diferença quanto à metodologia empregada na codificação de sinais analógicos em digitais, sendo que, dentre os medidores anteriormente apresentados, foi constatado que, em sua grande maioria, utilizam o implemento de um conversor Delta-Sigma, cuja operação é descrita na Figura 38.



Figura 38 – Diagrama de operação de um conversor Delta-Sigma

O modulador converte um sinal analógico e produz um trem de pulsos em alta frequência, que passa por um filtro digital gerando um sinal de maior resolução que, por fim, passa por um decimador, o qual realiza o processo de *oversampling* agrupando os bits e melhorando a reconstrução do sinal original, na medida em que reduz o impacto de ruídos e distorções.

Já o ESP32 conta com um conversor SAR, como o ilustrado na Figura 39, em que o resistor (R), o capacitor (C) e a chave (Ch) têm a função de coletar uma amostra e mantê-la por um período de tempo suficiente quando a chave é aberta novamente até que o conversor DAC produza um sinal aproximado do coletado e, então, seja registrada a amostra.

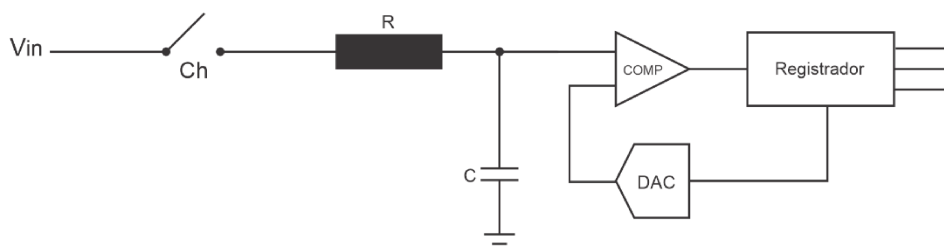


Figura 39 – Diagrama de de operação de um conversor SAR

Em resumo, um conversor SAR faz uma “fotografia” do sinal a cada período de tempo, enquanto um conversor Delta-Sigma retorna um valor médio do sinal amostrado, conforme ilustrado na Figura 40.

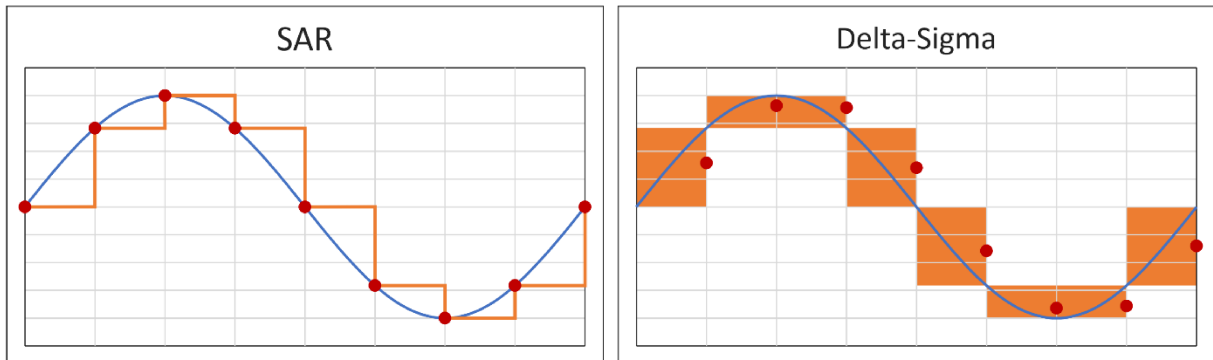


Figura 40 – Metodologias de amostragem de sinais

Ambas as metodologias têm suas vantagens e desvantagens, mas o conversor Delta-Sigma apresenta uma alta latência; ou seja, o tempo entre a amostragem e o sinal gerado a partir desse, quando em comparação com o conversor SAR, o que — apesar de permitir uma maior resolução — pode interferir no registro de interrupções com durações inferiores a 1 segundo.

Por fim, cabe destacar que os medidores avaliados, via-de-regra, utilizam uma mesma família de *chips* metrológicos, comumente aplicados para fins de faturamento energia elétrica, que não se adequam as novas obrigações dispostas na Resolução Normativa nº 871. Nesse contexto, se faz necessário a implementação de novos *hardwares*, a exemplo do ESP32, visto que — conforme evidenciado nos testes de calibração — ao aproveitar a mesma estrutura implementada para o faturamento de energia elétrica, na maioria dos casos não será possível atender as novas obrigações do processo de medição amostral dos indicadores de conformidade de nível de tensão.

5 – Conclusões

A Resolução Normativa ANEEL nº 871, de 11 de fevereiro de 2020, trouxe novas obrigações associadas à medição amostral de tensão em regime permanente, as quais essas buscam adicionar mais robustez ao processo de monitoramento dos níveis de tensão, na medida em que o volume informações disponíveis será muito maior, visto que a medição amostral de tensão em regime permanente passa a ser realizada utilizando-se sistemas de medição permanente em substituição ao modelo anterior, no qual o processo era realizado por um período de 7 dias em forma de rodízio entre as diferentes unidades consumidoras. Além disso, também foi estabelecida a obrigatoriedade de registros dos 12 últimos valores obtidos para os indicadores DRP e DRC, bem como das últimas 100 interrupções de curta e longa duração.

Nesse contexto, este trabalho apresentou a fundamentação teórica necessária ao atendimento de todas as novas exigências estabelecidas pelo Órgão Regulador, bem como propôs um caderno de testes de calibração, contemplando todas as exigências associadas aos módulos 5 [4] e 8 [2] do PRODIST; desde a obtenção da grandeza base (tensão eficaz de 10 minutos), passando pelo registro de interrupções de curta e longa duração, pelo expurgo obrigatório de leituras de tensão de 10 minutos, até a consolidação do cálculo dos indicadores de conformidade da tensão em regime permanente.

Os testes de calibração foram realizados em 4 medidores diferentes, além do medidor desenvolvido no âmbito deste trabalho, e os resultados apresentaram, de forma geral, desvios significativos, principalmente no que diz respeito ao registro de interrupções de curta e longa duração, sendo que apenas 1 medidor comercialmente disponível foi aprovado em todos os testes relacionados.

Ressalta-se que um dos medidores testados foi reprovado inclusive no teste de calibração da grandeza básica (tensão de 10 minutos).

Além disso, quanto ao teste visando a calibração dos critérios de expurgo de amostras de tensão de 10 minutos, apenas 2 medidores foram aprovados. Isso evidencia, também, que há dificuldade quanto à detecção de eventos maiores, visto que a situação destacada na Figura 3, relacionada a janela de integração de $\frac{1}{2}$ ou 1 ciclo, é minimizada quanto maior a duração do evento.

O único medidor aprovado em todos os testes de calibração apresenta um hardware muito superior ao necessário para o atendimento das novas obrigações dispostas na Resolução ANEEL nº 871/2020 e, conseqüentemente, um custo muito maior, inviabilizando a utilização do mesmo pela maioria das distribuidoras.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo apresentar o desenvolvimento de um medidor de tensão de baixo custo, capaz de atender integralmente às novas obrigações regulatórias. Nesse sentido, estima-se que o custo do equipamento desenvolvido represente algo em torno de 25% do custo de um medidor de faturamento de energia elétrica para atendimento à Resolução ANEEL nº 871/2020 e, aproximadamente, de até 2% do custo de um medidor de parâmetros da qualidade da energia elétrica, equipamento que contempla a medição de todos os fenômenos da qualidade da energia elétrica e não apenas da tensão em regime permanente.

O desempenho do protótipo desenvolvido foi avaliado através do mesmo conjunto de testes de calibração aplicado aos demais medidores e os resultados obtidos demonstraram a factibilidade do atendimento às novas regras estabelecidas pela ANEEL, ainda que utilizados recursos de baixo custo.

Por fim, destaca-se a necessidade, tanto da atualização do processo de monitoramento, como da metodologia de avaliação dos níveis de tensão. Conforme apresentado, os indicadores DRP e DRC não possibilitam a identificação do tipo de problema (sobre ou subtensão).

Ao mesmo tempo, a definição de uma faixa de tensão média $P_{50\%}$, traz mais praticidade quando da definição de limites para operação adequada da tensão, garantindo maleabilidade tanto em horários de pico quanto em situações de menor carregamento da rede. Adicionalmente, os indicadores $P_{99\%}$ e $P_{1\%}$ possibilitam, por si só, a correta identificação do tipo de problema existente no ponto de medição.

5.1 – Trabalhos futuros

- Realizar a implementação dos indicadores baseados em percentis junto ao protótipo desenvolvido e realizar uma campanha de medições a fim de avaliar o desempenho e a aplicabilidade da metodologia apresentada em relação a vigente.
- Desenvolver um método de análise estatística dos indicadores de conformidade da tensão em regime permanente baseados em percentis, ou adequar o modelo atual aos indicadores propostos, a fim de complementar a metodologia apresentada.

Referências bibliográficas

- [1] Electromagnetic compatibility (EMC): Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods, IEC 61000-4-30, 2ª Edição, 2008.
- [2] Electromagnetic compatibility (EMC): Part 3.100: Limits-Steady state voltage limits in public electricity systems, AS 61000.3.100, 1ª Edição, 2011
- [3] ANEEL, *Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*, Procedimentos de Distribuição – PRODIST, 2021. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf
- [4] ANEEL, *Módulo 5 – Qualidade da Energia Elétrica*, Procedimentos de Distribuição – PRODIST, 2021. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_4.pdf
- [5] R. A. Barr, P. Wong and A. Baitch. **New concepts for steady state voltage standards**. 2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2012, pp. 678-681. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2012.6381268>
- [6] A. Huber-Ruf, **Voltage Standardization**. in Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. XLVI, pp. 199-215, January-December 1927. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1927.5061354>
- [7] Lincoln Társio; José Rubens Macedo Jr. **Desenvolvimento de um medidor de baixo custo para atendimento aos requisitos de medição amostral de tensão no âmbito do PRODIST**. In: ANAIS DA XIV CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2021, Online. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2021. Disponível em: <<https://proceedings.science/cbqee-2021/papers/desenvolvimento-de-um-medidor-de-baixo-custo-para-atendimento-aos-requisitos-de-medicao-amostal-de-tensao-no-ambito-do-?lang=pt-br>> Acesso em: 20 set. 2021. <https://doi.org/10.17648/cbqee-2021-130602>
- [8] Jatin Arora, Gagandeep, et al. **Design and development of digital voltmeter using different techniques**. IEEE International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE) – Coimbatore, India, 2014. <https://doi.org/10.1109/ICGCCEE.2014.6922298>
- [9] L. Bartolomei, A. Mingotti, et. al. "Performance evaluation of an energy meter for low-voltage system monitoring". XXII World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO 2018). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1065/5/052032>
-

Apêndice A – Faixas de operação da tensão em regime permanente dispostas no módulo 8 do PRODIST

Item 1: Tensão de Ref. (TR) igual ou superior a 230 kV

Adequada	$0,95 TR \leq V_{10min} \leq 1,05 TR$
Precária	$0,93 TR \leq V_{10min} < 0,95 TR;$ $1,05 TR < V_{10min} \leq 1,07 TR$
Crítica	$V_{10min} < 0,93 TR$ ou $V_{10min} > 1,07 TR$

Item 2: Tensão de Ref. (TR) igual ou superior a 69 kV e inferior a 230 kV

Adequada	$0,95 TR \leq V_{10min} \leq 1,05 TR$
Precária	$0,90 TR \leq V_{10min} < 0,95 TR;$ $1,05 TR < V_{10min} \leq 1,07 TR$
Crítica	$V_{10min} < 0,90 TR$ ou $V_{10min} > 1,07 TR$

Item 3: Tensão de Ref. (TR) superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV

Adequada	$0,93 TR \leq V_{10min} \leq 1,05 TR$
Precária	$0,90 TR \leq V_{10min} < 0,93 TR$
Crítica	$V_{10min} < 0,90 TR$ ou $V_{10min} > 1,05 TR$

Item 4: Tensão de Ref. (TR) igual ou inferior a 2,3 kV

Adequada	$0,92 TR \leq V_{10min} \leq 1,05 TR$
Precária	$0,87 TR \leq V_{10min} < 0,92 TR;$ $1,05 TR < V_{10min} \leq 1,06 TR$
Crítica	$V_{10min} < 0,87 TR$ ou $V_{10min} > 1,06 TR$

Apêndice B – Código de implementação dos indicadores DRP e DRC em ambiente *Simulink*

```
function [v1008,tempo,drp,drc,drp12,drc12,p99,p01] = fcn(clock,ta,vn,va)

persistent aux sp ag tm sk ak tw twdrp twdrc twp90 twp01 flagEvento
flagExpurg flagRetorn flagConclu inicEvento;

if isempty(sp)
    flagExpurg = 0; %Flag de evento de sub ou sobre tensão
    flagEvento = 0; %Flag de obrigatoriedade de expurgo
    flagRetorn = 0; %Flag de obrigatoriedade de expurgo de amostra
    anterior
    flagConclu = 0; %Flag de expurgo concluído
    inicEvento = 0; %Inicio do evento de sub ou sobre tensão

    ag = 1:floor(ta/0.2); %amostras agregadas
    ag(1:floor(ta/0.2)) = 0;
    ak = 1; %contador agregado

    sp = 1:1008; %1008 amostras para DRP e DRC
    sp(1:(1008)) = vn;
    sk = 1; %contador 1008

    tm = 1:1008; %horario da amostra
    tm(1:1008) = 0;
    tw = 1;

    twdrp = [ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ];
    twdrc = [ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ];
    twp90 = [ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ];
    twp01 = [ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ];

    aux = 1:1008;
end

%algoritmo de expurgo sobre temp
if (va >= 1.1*vn && flagEvento == 0 && flagExpurg == 0)
    flagEvento = 1;
    flagExpurg = 0;
    inicEvento = clock;
elseif (va <= 1.1*vn && va >= 0.9*vn && flagEvento == 1 && flagExpurg ==
0)
    if (clock - inicEvento < 3)
        flagEvento = 0;
        flagExpurg = 0;
        inicEvento = 0;
    elseif (round(clock - inicEvento) < 180)
        flagEvento = 1;
        flagExpurg = 1;
    else
        flagEvento = 0;
        flagExpurg = 0;
        inicEvento = 0;
    end
end
elseif (va <= 1.1*vn && va >= 0.9*vn && flagEvento == 1 && flagExpurg ==
1 && flagConclu == 1)
    flagEvento = 0;
    flagExpurg = 0;
```



```
    inicEvento = 0;
    flagConclu = 0;
end

%algoritmo de expurgo sub temp
if (va <= 0.9*vn && flagEvento == 0 && flagExpurg == 0)
    flagEvento = 1;
    flagExpurg = 0;
    inicEvento = clock;
elseif (va <= 0.7*vn && flagEvento == 1 && flagExpurg == 0)
    if (clock - inicEvento >= 180)
        flagEvento = 1;
        flagExpurg = 1;
    end
elseif (va >= 0.9*vn && va <= 1.1*vn && flagEvento == 1 && flagExpurg ==
0)
    if (clock - inicEvento < 3)
        flagEvento = 0;
        flagExpurg = 0;
        inicEvento = 0;
    elseif (round(clock - inicEvento) < 180)
        flagEvento = 1;
        flagExpurg = 1;
    else
        flagEvento = 0;
        flagExpurg = 0;
        inicEvento = 0;
    end
elseif (va >= 0.9*vn && va <= 1.1*vn && flagEvento == 1 && flagExpurg ==
1 && flagConclu == 1)
    flagEvento = 0;
    flagExpurg = 0;
    inicEvento = 0;
    flagConclu = 0;
end

%amostras agregadas
if (clock >= ak*0.2)
    ag(2:floor(ta/0.2)) = ag(1:(floor(ta/0.2)-1));
    ag(1)= va;
    ak = ak + 1;
end

% 1008 amostras do calculo de DRP e DRC
if (clock >= sk*ta && flagExpurg == 0)
    tm(2:1008) = tm(1:1007);
    tm(1)= sk*ta;

    sp(2:1008) = sp(1:1007);
    sp(1)= sum(ag)/floor(ta/0.2);

    sk = sk + 1;
    tw = tw + 1;

    if (flagEvento == 1)
        flagRetorn = 1;
    else
        flagRetorn = 0;
    end

elseif (clock >= sk*ta && flagExpurg == 1)%expurgo de amostra
```

```
sk = sk + 1;%pula esta amostra

if (flagRetorn == 1)
tm(1:1007) = tm(2:1008);
tm(1008)= vn;

sp(1:1007) = sp(2:1008);
sp(1008)= vn;

flagRetorn = 0;
tw = tw - 1;
end

flagConclu = 1;

end

v1008 = sp;
tempo = tm;

drp = sum(sp(:) >= 0.87*vn & sp(:)< 0.92*vn)/10.08 + sum(sp(:)> 1.05*vn &
sp(:)<= 1.06*vn)/10.08;
drc = sum(sp(:) < 0.87*vn | sp(:)> 1.06*vn)/10.08;

if (tw == 1009) %função de registro dos ultimos 12 valores de DRP, DRC,
p99% e p1%

tw = 1;
flagRetorn = 0;

twdrp(2:12) = twdrp(1:11);
twdrp(1) = drp;
twdrc(2:12) = twdrc(1:11);
twdrc(1) = drc;

aux = sort(sp, 'descend');
twp90(2:12) = twp90(1:11);
twp90(1) = aux(11) + (aux(10) - aux(11))*(0.99*1008 - 997);
twp01(2:12) = twp01(1:11);
twp01(1) = aux(998) + (aux(997) - aux(998))*(0.01*1008 - 10);

end

drp12 = twdrp;
drc12 = twdrc;
p99 = twp90;
p01 = twp01;
```

Apêndice C – Código de implementação do registro de interrupções em ambiente *Simulink*

```
function [inicio, final, tempo] = fcn(clock,vn,vrms)

persistent FlagEvCurta InicEvCurta FlagEvLonga InicEvLonga Ini Fim;

if isempty(Fim)
    FlagEvCurta = 0;
    InicEvCurta = 0;
    FlagEvLonga = 0;
    InicEvLonga = 0;
    Ini = 1:100;
    Ini(1:100) = 0;
    Fim = 1:100;
    Fim(1:100) = 0;
end

%algoritmo: Evento de até 180 segundos
if (vrms <= 0.1*vn && FlagEvCurta == 0)
    FlagEvCurta = 1;
    InicEvCurta = clock;
elseif (vrms >= 0.1*vn && FlagEvCurta == 1 && (clock - InicEvCurta) <=
180)
    Ini(2:(100)) = Ini(1:(99));
    Ini(1) = InicEvCurta;
    Fim(2:(100)) = Fim(1:(99));
    Fim(1) = clock;
    FlagEvCurta = 0;
    InicEvCurta = 0;
elseif ((clock - InicEvCurta) >= 180)
    FlagEvCurta = 0;
    InicEvCurta = 0;
end

%algoritmo: Evento de mais de 180 segundos
if (vrms <= 0.7*vn && FlagEvLonga == 0)
    FlagEvLonga = 1;
    InicEvLonga = clock;
elseif (vrms >= 0.7*vn && FlagEvLonga == 1 && (clock - InicEvLonga) >
180)
    Ini(2:(100)) = Ini(1:(99));
    Ini(1) = InicEvLonga;
    Fim(2:(100)) = Fim(1:(99));
    Fim(1) = clock;
    FlagEvLonga = 0;
    InicEvLonga = 0;
elseif (vrms >= 0.7*vn && FlagEvLonga == 1 && (clock - InicEvLonga) <=
180)
    FlagEvLonga = 0;
    InicEvLonga = 0;
end

inicio = Ini;
final = Fim;
tempo = Fim - Ini;
```

Apêndice D – Código de implementação do cálculo do valor eficaz da tensão em janela de 12 ciclos

```
function val2 = fcn(clock,swt,va)

persistent ns st dta ;

if isempty(st)
st = swt;
ns = 1;
dta = 1:(128*12);
dta(1:(128*12)) = 0;
end

if (clock >= ns*st)

dta(1:(128*12-1)) = dta(2:(128*12));

dta((128*12))= va*va;

ns = ns + 1;

end

val2 = sqrt(sum(dta)/(128*12));
```

Apêndice E – Código de implementação do cálculo do valor eficaz da tensão em janela de 1 ciclo

```
function val1 = fcn(clock,swt,va)

persistent ns st dta ;

if isempty(st)
st = swt;
ns = 1;
dta = 1:(128);
dta(1:(128)) = 0;
end

if (clock >= ns*st)

dta(1:(128-1)) = dta(2:(128));

dta((128))= va*va;

ns = ns + 1;

end

val12 = sqrt(sum(dta)/(128));
```

Apêndice F – Código de implementação do medidor de tensão em regime permanente

```
//CS>>D5, MOSI>>D23, SCK>>D18 and MISO>>D19.
#include "FS.h"
#include "SD.h"
#include <SPI.h>

//SCL>>D22 SDA>>D21
#include "RTClib.h"//https://github.com/adafruit/RTClib

//SCL>>D22 SDA>>D21
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#include <time.h>

RTC_DS3231 rtc;

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);

volatile int VN = 127; // tensão nominal da rede
volatile int agrTME = 3000;// 15 PARA 3 SEGUNDOS E 3000 PARA 10 MINUTOS
volatile int sampleTME = 100; // sample time 0.0001*1000000

//RTC
struct tm data;
volatile int turnOnDay = 1612137600;
char data_formatada[64];
//SD card
#define SD_CS 5
String dataMessage;
String dataLogName;
int dataLogNumber = 1;
//Auxiliar
volatile float aux;
volatile float aux1;
volatile float aux2;
volatile float aux3;
volatile float aux4;
```

```
volatile int why;
bool tela = true;
bool evento = false;
bool dados = false;
//memoria de massa
volatile int dayR;
volatile int milisec;
//DRP e DRC
volatile int NLP;
volatile int NLC;
volatile int Vmax;
volatile int Vmin;
//Flag registros
volatile int FlagEvCurta = 0;
volatile int InicEvCurta = 0;
volatile int FlagEvLonga = 0;
volatile int InicEvLonga = 0;
volatile int IntEvregist = 0;
volatile int interruptStart[101];
volatile int interruptEnded[101];
volatile int interruptWhenn[101];
//Expurgos
volatile int flagExpurg = 0; //Flag de evento de sub ou sobre tensão
volatile int flagEvento = 0; //Flag de obrigatoriedade de expurgo
volatile int flagRetorn = 0; //Flag de obrigatoriedade de expurgo de amostra
anterior
volatile int flagConclu = 0; //Flag de expurgo concluido
volatile int flagNumber = 0; //Numero de registros expurgados
volatile int inicEvento = 0; //Inicio do evento de sub ou sobre tensão
volatile int rmsEXPURGO = 0; //Tensão avaliada - Atualiza a cada 0.2
segundos
//Calculo RMSs
volatile int sampleINS = 0; // amostra de tensão
volatile int sampleSUM = 0; // Somatório para calculo do valor RMS
volatile int sampleNUM = 0; // Numero de amostras somadas (redundância)
volatile int sampleRMS = 0; // RMS da janela de 12 ciclos
volatile int registSUM = 0; // Somatório para calculo do valor RMS
volatile int registNUM = 0; // Numero de amostras somadas (redundância)
volatile int registRMS = 0; // RMS da janela de 1/2 ciclo
volatile int agrSUM = 0; // Somatório para calculo do valor Agregado de
10m/3s
```

```
volatile int agrNUM = 0; // numero de amostras agregadas (redundância)
volatile int agrRMS = 0; // valor agregado de 10m/3s
volatile int numrgtVAL = 0; //Registros válidos
volatile int numrgtTOT = 0; //Registros totais
volatile int sampleIND[1008]; //1008 Registros
volatile int sampleWHE[1008]; //1008 Registros
//timers...
volatile int timerLCD = 0; //contador para atualização do LCD
volatile int timer12C = 0; //contador de amostras de 0.2 segundos
volatile int timer01C = 0; //contador de amostras de 1/2 ciclo
//interrupção
hw_timer_t * timer = NULL;
portMUX_TYPE timerMux = portMUX_INITIALIZER_UNLOCKED;

// >>>>Write to the SD card (DON'T MODIFY THIS FUNCTION)<<<<
void writeFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) {
    //Serial.printf("Writing file: %s\n", path);
    File file = fs.open(path, FILE_WRITE);
    if(!file) {
        //Serial.println("Failed to open file for writing");
        return;
    }
    if(file.print(message)) {
        //Serial.println("File written");
    } else {
        //Serial.println("Write failed");
    }
    file.close();
}

// >>>>Write to the SD card (DON'T MODIFY THIS FUNCTION)<<<<

// >>>>Append data to the SD card (DON'T MODIFY THIS FUNCTION)<<<<
void appendFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message) {
    //Serial.printf("Appending to file: %s\n", path);
    File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
    if(!file) {
        //Serial.println("Failed to open file for appending");
        return;
    }
    if(file.print(message)) {
        //Serial.println("Message appended");
    }
}
```



```
    } else {
        //Serial.println("Append failed");
    }
    file.close();
}
// >>>>Append data to the SD card (DON'T MODIFY THIS FUNCTION)<<<<

void logSDCard() {
    dataLogName = "/dataLogSerie" + String(dataLogNumber) + ".txt";
    appendFile(SD, dataLogName.c_str(), dataMessage.c_str());
}

void HalfCicle(){
if (registNUM >= 83){
    registRMS = sqrt(registSUM/(registNUM))*100;
    registSUM = 0;
    registNUM = 0;
    timer01C++;
    if (agrTME < 3000 && timer01C >= 1807 && FlagEvCurta < 1 && FlagEvLonga
< 1){timer01C = timer01C - 1807;}// zera o contador a cada 03 sec
    else if (agrTME > 15 && timer01C >= 72289 && FlagEvCurta < 1 &&
FlagEvLonga < 1){timer01C = timer01C - 72289;}// zera o contador a cada 10
min

    if (registRMS <= 10*VN && FlagEvCurta == 0){
        FlagEvCurta = 1;
        InicEvCurta = timer01C;
    }
    else if (registRMS >= 10*VN && FlagEvCurta == 1 && (timer01C -
InicEvCurta) <= 21686){
        interruptStart[IntEvregist] = InicEvCurta;
        interruptEnded[IntEvregist] = timer01C;
        interruptWhenn[IntEvregist] = numrgtTOT;
        IntEvregist++;
        if(IntEvregist > 100){
            for(int i = 0; i < 100; i++){
                interruptStart[i] = interruptStart[i+1];
                interruptEnded[i] = interruptEnded[i+1];
                interruptWhenn[i] = interruptWhenn[i+1];
            }
            interruptStart[100] = 0;
        }
    }
}
```

```
        interruptEnded[100] = 0;
        interruptWhenn[100] = 0;
        IntEvregist = 100;
    }
    evento = true;
    FlagEvCurta = 0;
    InicEvCurta = 0;
}
else if ((timer01C - InicEvCurta) >= 21686){
    FlagEvCurta = 0;
    InicEvCurta = 0;
}
//evlonga
if (registRMS <= 70*VN && FlagEvLonga == 0){
    FlagEvLonga = 1;
    InicEvLonga = timer01C;
}
else if (registRMS >= 70*VN && FlagEvLonga == 1 && (timer01C -
InicEvLonga) > 21686){
    interruptStart[IntEvregist] = InicEvLonga;
    interruptEnded[IntEvregist] = timer01C;
    interruptWhenn[IntEvregist] = numrgtTOT;
    IntEvregist++;
    if(IntEvregist > 100){
        for(int i = 0; i < 100; i++){
            interruptStart[i] = interruptStart[i+1];
            interruptEnded[i] = interruptEnded[i+1];
            interruptWhenn[i] = interruptWhenn[i+1];
        }
        interruptStart[100] = 0;
        interruptEnded[100] = 0;
        interruptWhenn[100] = 0;
        IntEvregist = 100;
    }
    evento = true;
    FlagEvLonga = 0;
    InicEvLonga = 0;
}
else if (registRMS >= 70*VN && FlagEvLonga == 1 && (timer01C -
InicEvLonga) <= 21686){
    FlagEvLonga = 0;
```

```
    InicEvLonga = 0;
}
if (IntEvregist > 99){IntEvregist = 0;}
}
}

void TwelveCicles(){
    if (sampleNUM >= 2000){
        sampleRMS = sqrt(sampleSUM/(sampleNUM))*100;
        sampleSUM = 0;
        sampleNUM = 0;
        agrSUM = agrSUM + sampleRMS*sampleRMS/10000;// agregação para o AGR de
10m/3c
        agrNUM++;
        if (sampleRMS >= 110*VN && flagEvento == 0 && flagExpurg == 0 && agrTME
> 15){
            flagEvento = 1;
            flagExpurg = 0;
            inicEvento = timer12C;}
        else if (sampleRMS <= 110*VN && sampleRMS >= 90*VN && flagEvento == 1
&& flagExpurg == 0){
            if (timer12C - inicEvento < 15){
                flagEvento = 0;
                flagExpurg = 0;
                inicEvento = 0;}
            else if ((timer12C - inicEvento) < 900){
                flagEvento = 1;
                flagExpurg = 1;}
            else{
                flagEvento = 0;
                flagExpurg = 0;
                inicEvento = 0;}}
        else if (sampleRMS <= 110*VN && sampleRMS >= 90*VN && flagEvento == 1
&& flagExpurg == 1 && flagConclu == 1){
            flagEvento = 0;
            flagExpurg = 0;
            inicEvento = 0;
            flagConclu = 0;}
        if (sampleRMS <= 90*VN && flagEvento == 0 && flagExpurg == 0 && agrTME
> 15){
            flagEvento = 1;
```

```
flagExpurg = 0;
inicEvento = timer12C;}
else if (sampleRMS <= 70*VN && flagEvento == 1 && flagExpurg == 0){
    if (timer12C - inicEvento >= 900){
        flagEvento = 1;
        flagExpurg = 1;}}
    else if (sampleRMS >= 90*VN && sampleRMS <= 110*VN && flagEvento ==
1 && flagExpurg == 0){
    if (timer12C - inicEvento < 15){
        flagEvento = 0;
        flagExpurg = 0;
        inicEvento = 0;}
    else if ((timer12C - inicEvento) < 900){
        flagEvento = 1;
        flagExpurg = 1; }
    else{
        flagEvento = 0;
        flagExpurg = 0;
        inicEvento = 0;}}
    else if (sampleRMS >= 90*VN && sampleRMS <= 110*VN && flagEvento == 1
&& flagExpurg == 1 && flagConclu == 1){
        flagEvento = 0;
        flagExpurg = 0;
        inicEvento = 0;
        flagConclu = 0;
    }
    if (agrNUM >= agrTME){
        agrRMS = sqrt(agrSUM/(agrNUM))*100;
        agrSUM = 0;
        agrNUM = 0;

        if (flagExpurg == 0){
            sampleIND[numrgtVAL] = agrRMS;
            numrgtTOT++;
            sampleWHE[numrgtVAL] = numrgtTOT;
            numrgtVAL++;
            if (flagEvento == 1){
                flagRetorn = 1;}
            else{
                flagRetorn = 0;}
            if(numrgtVAL>1007){
```

```
        dados = true;
        timerAlarmDisable(timer);}}
else if (flagExpurg == 1){
    flagNumber++;
    numrgtTOT++;
    if (flagRetorn == 1){
        numrgtVAL--;
        sampleIND[numrgtVAL] = 0;
        sampleWHE[numrgtVAL] = 0;}
    evento = true;
    flagConclu = 1;}
    }
    timer12C++;if (timer12C >= 18000 && flagEvento < 1){timer12C = timer12C
- 18000;}
    }
}

void IND(){
    NLP = 0;
    NLC = 0;
    Vmax = sampleIND[0];
    Vmin = sampleIND[0];
    for(int i = 0; i < numrgtVAL; i++){
        if (Vmax < sampleIND[i]){Vmax = sampleIND[i];}
        if (Vmin > sampleIND[i]){Vmin = sampleIND[i];}
        if (sampleIND[i] < 87*VN || sampleIND[i] > 106*VN){
            NLC++;
        }
        if (sampleIND[i] >= 87*VN && sampleIND[i] < 92*VN){
            NLP++;
        }
        if (sampleIND[i] > 105*VN && sampleIND[i] <= 106*VN){
            NLP++;
        }
    }
}

void logInterrupt(){
    dataMessage = " \r\n";
    logSDCard();
    if(agrTME > 15){
        dataMessage = "Registro\tData Inicio\tHora Inicio\tDuração\r\n";
```

```

logSDCard();
for(int j = 0; j < IntEvregist; j++){
    aux = (interruptStart[j])*83*0.0001;
    dayR = 600*interruptWhenn[j]+turnOnDay+aux;
    time_t tt = dayR;
    data = *gmtime(&tt);
    strftime(data_formatada, 64, "%d/%m/%Y\t%H:%M:%S", &data);
    aux = (interruptEnded[j] - interruptStart[j])*83*0.0001;
    dataMessage
String(j+1)+"\t"+String(data_formatada)+"\t"+String(aux)+"\r\n";
    logSDCard();
}
}
else if(agrTME < 3000){
    dataMessage = "Registro\tData Inicio\tHora Inicio\tDuração\r\n";
    logSDCard();
    for(int j = 0; j < IntEvregist; j++){
        aux = (interruptStart[j])*83*0.0001;
        dayR = 3*interruptWhenn[j]+turnOnDay+aux;
        time_t tt = dayR;
        data = *gmtime(&tt);
        strftime(data_formatada, 64, "%d/%m/%Y\t%H:%M:%S", &data);
        aux = (interruptEnded[j] - interruptStart[j])*83*0.0001;
        dataMessage
String(j+1)+"\t"+String(data_formatada)+"\t"+String(aux)+"\r\n";
        logSDCard();
    }
}
}
void SRL(){
    if(evento && !dados){
        if ( IntEvregist <1 ){
            aux = aux = interruptEnded[0] - interruptStart[0];;
            aux = aux*83*0.0001;
        }
        else{
            aux = interruptEnded[IntEvregist-1] - interruptStart[IntEvregist-1];
            aux = aux*83*0.0001;
        }
        Serial.print("Ultima interrupção: ");
        Serial.println(aux);
    }
}

```



```
aux = aux/100;
lcd.print(aux,1);
lcd.setCursor(11, 1);
lcd.print("V");
lcd.setCursor(12, 1);
lcd.print(" ");
lcd.setCursor(13, 1);
aux = sampleIND[numrgtVAL-1];
//aux = agrRMS;
aux = aux/100;
lcd.print(aux,1);
lcd.setCursor(19, 1);
lcd.print("V");
lcd.setCursor(0, 3);
aux = agrRMS;
aux = aux/100;
lcd.print(aux,1);
tela = !tela;
}
else{
  IND();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Indi.  DRP      DRC ");
  lcd.setCursor(5, 1);
  aux = 100*NLP;
  aux = aux/1008;
  lcd.print(aux,3);
  lcd.setCursor(11, 1);
  lcd.print("%");
  lcd.setCursor(12, 1);
  lcd.print(" ");
  lcd.setCursor(13, 1);
  aux = 100*NLC;
  aux = aux/1008;
  lcd.print(aux,3);
  lcd.setCursor(19, 1);
  lcd.print("%");

  tela = !tela;
}
timerLCD = timerLCD - 30000;}
```