

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

GABRIEL TEIXEIRA GRAZIANO DE OLIVEIRA

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE VARIAÇÕES DE TENSÃO DE
CURTA DURAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018

GABRIEL TEIXEIRA GRAZIANO DE OLIVEIRA

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE VARIAÇÕES DE TENSÃO DE
CURTA DURAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Profº. Dr. André Sanches Fonseca Sobrinho

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

Sistema de monitoramento de variações de tensão de curta duração em redes de distribuição de energia

por

Gabriel Teixeira Graziano de Oliveira

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia de Controle e Automação” e aprovado em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Cornélio Procópio, 20/10/2018

Profº.Dr André Sanches Fonseca Sobrinho
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profª.Drª Gabriela Shiguemoto
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profº.Dr Luís Fernando Caparroz Duarte
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

OLIVEIRA, G. T. G. Sistema de monitoramento de variações de tensão de curta duração em redes de distribuição de energia. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

O elevado nível de automação dos equipamentos elétricos modernos, com controle baseado em microprocessadores, fez com que estes se tornassem muito mais sensíveis à variações na tensão distribuída pela rede elétrica. Problemas dessa natureza têm consequências que vão de defeitos simples em eletrodomésticos até a interrupção completa de máquinas industriais, ocasionando enormes prejuízos. Entre os principais tipos de ocorrências estão as variações de tensão de curta duração, caracterizadas por sua duração e amplitude, e que podem ser interrupções completas, afuntamentos ou elevações da tensão nominal da rede. Com isso, este trabalho tem como objetivo propor o desenvolvimento de um sistema robusto, de baixo custo, que possibilite a detecção das variações de tensão de curta duração. Além disso, as informações referentes a cada ocorrência serão salvas e disponibilizadas online para consulta pelas concessionárias de energia. Todos os materiais a serem utilizados, assim como a metodologia que será empregada, estão detalhados nesta proposta.

Palavras-chave: Variações de tensão de curta duração. Qualidade de energia elétrica. Sistemas Embarcados

ABSTRACT

OLIVEIRA, G. T. G. . 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

The high level of automation in the modern electric equipment, with microprocessor-based control, made them more sensitive to fluctuations in the supply voltage. This type of problem can have consequences ranging from simple failures in home appliances to the complete interruption of a production line, causing a significant economic impact. Among the most common types of voltage fluctuations are the Short-Duration Voltage Variations, defined by its magnitude (interruption, sag or swell) and duration (instantaneous, momentary or temporary). Thus, the objective of this paper is to propose the development of a robust, low-cost system, that performs the detection of the Shor-Duration Voltage Variations. In addition, all the information about the voltage variation events is going to be saved and released online for consultation by the energy providers. All the materials that are going to be used, as well as the methodology applied, are explained in this proposal.

Keywords: Short-Duration Voltage Variation. Power Quality. Embedded Systems.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	- Faixa de operação da tensão em relação à tensão de referência	15
FIGURA 2	- Exemplo de Afundamento de Tensão	16
FIGURA 3	- Variação da tensão eficaz durante evento de interrupção	18
FIGURA 4	- Variação da tensão instantânea durante evento de interrupção	18
FIGURA 5	- Variação da tensão instantânea durante evento de afundamento	19
FIGURA 6	- Variação da tensão instantânea durante evento de afundamento	19
FIGURA 7	- Variação da tensão eficaz durante evento de elevação	20
FIGURA 8	- Variação da tensão instantânea durante evento de elevação	20
FIGURA 9	- Fluxograma apresentando a sequência de atividades feitas pelo sistema .	22
FIGURA 10	- Estrutura do equipamento	23
FIGURA 11	- Placa de desenvolvimento Cerebot MX7cK	24
FIGURA 12	- Diagrama do circuito da placa Cerebot MX7cK	25
FIGURA 13	- Configuração de pinos do circuito integrado ADE7758	25
FIGURA 14	- Placa para aquisição dos sinais de tensão	26
FIGURA 15	- Topologia da comunicação SPI - Um mestre e um escravo	27
FIGURA 16	- Topologia da comunicação SPI - Um mestre para um ou mais escravos .	28
FIGURA 17	- IRQ	29
FIGURA 18	- Camadas do protocolo TCP/IP	32
FIGURA 19	- Estrutura da pilha TCP/IP da Microchip comparada com a arquitetura TCP/IP	33
FIGURA 20	- Rede com protocolo TCP/IP e padrão Ethernet	34
FIGURA 21	- Ethernet	34
FIGURA 22	- Hercules	35
FIGURA 23	- CDT	36
FIGURA 24	- VDT	37
FIGURA 25	- FA	37
FIGURA 26	- Variador de Tensão Monofásico TDGC2-0,5	38
FIGURA 27	- Ligação do dispositivo para realização dos testes de variação de tensão .	39
FIGURA 28	- Interrupção momenâneo de Tensão - 1.515 s	40
FIGURA 29	- Interrupção Temporária de Tensão - 8.580 s	41
FIGURA 30	- Afundamento momenâneo de Tensão - 0.195 s	41
FIGURA 31	- Afundamento momenâneo de Tensão - 2.025 s	42
FIGURA 32	- Afundamento momenâneo de Tensão - 2.730 s	42
FIGURA 33	- Afundamento Temporário de Tensão - 3.840 s	42
FIGURA 34	- Afundamento Temporário de Tensão - 4.110 s	43
FIGURA 35	- Elevação Momentânea de Tensão - 0.105 s	43
FIGURA 36	- Elevação Momentânea de Tensão - 0.330 s	44
FIGURA 37	- Elevação Momentânea de Tensão - 0.735 s	44
FIGURA 38	- Elevação Momentânea de Tensão - 2.336 s	44
FIGURA 39	- Elevação Momentânea de Tensão - 2.940 s	45
FIGURA 40	- Elevação Temporária de Tensão - 3.792 s	45
FIGURA 41	- Multiplos eventos na fase A - 4 eventos	46

FIGURA 42 – Multiplos eventos na fase A - 9 eventos	46
FIGURA 43 – Multiplos eventos na fase A - 6 eventos	47
FIGURA 44 – Multiplos eventos na fase B - 10 eventos	47
FIGURA 45 – Multiplos eventos na fase B - 7 eventos	48
FIGURA 46 – Multiplos eventos na fase C - 3 eventos	48
FIGURA 47 – Multiplos eventos na fase C - 10 eventos	49
FIGURA 48 – Multiplos eventos todas as fases - 10 eventos	49
FIGURA 49 – Teste do aparelho na rede elétrica	50

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	- Limites para redes 127/220V	15
TABELA 2	- Variações de Tensão de Curta Duração	17
TABELA 3	- Características elétricas e físicas	23
TABELA 4	- Fatores de conversão para cálculo da tensão RMS	30
TABELA 5	- Timers utilizados para classificação das VTCD	31
TABELA 6	- Especificação Técnica - Variador de Tensão Monofásico TDGC2-0,5 ..	39
TABELA 7	- Variáveis apresentadas nos testes	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 PROBLEMA	11
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivo Geral	12
1.2.2 Objetivos Específicos	12
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	12
2 NORMAS E REGRAS PARA CLASSIFICAÇÃO DE VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO	14
2.1 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO	14
2.1.1 Faixa de Operação da Tensão	14
2.1.2 Amplitude e Duração de eventos de VTCDs	15
2.2 EVENTOS DE VTCDS	17
2.2.1 Interrupção de Tensão	17
2.2.2 Afundamento de Tensão	18
2.2.3 Elevação de Tensão	19
3 ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO	21
3.1 PROPOSTA DO TRABALHO	21
3.2 FUNCIONAMENTO DO PROTÓTIPO	21
3.3 MICROCONTROLADOR PIC32MX795F512L	23
3.4 PLACA DE MEDição TRIFÁSICA	25
3.4.1 Interface de Comunicação	27
3.5 LÓGICA DO FIRMWARE	28
3.5.1 Aquisição da frequência e da tensão RMS da rede elétrica	28
3.5.2 Classificação dos eventos de VTCD	30
4 TROCA DE DADOS	32
4.1 ARQUITETURA DA REDE	32
4.1.1 Protocolo TCP/IP	32
4.1.2 Comunicação Ethernet	33
4.2 TRANSMISSÃO DE DADOS	34
4.3 MENSAGENS	35
4.3.1 Configure Date and Time - CDT	35
4.3.2 Verify Date and Time - VDT	36
4.3.3 FA, FB e FC	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES	38
5.2 TESTES DE EVENTOS DE VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO ..	40
5.2.1 Interrupção de Tensão	40
5.2.2 Afundamento Momentâneo de Tensão	41
5.2.3 Afundamento Temporário de Tensão	42
5.2.4 Elevação Momentânea de Tensão	43
5.2.5 Elevação Temporária de Tensão	45

5.2.6 Testes para múltiplos eventos - buffer rotativo	45
5.3 TESTE NA REDE ELÉTRICA	49
6 CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Amplamente debatido nas últimas décadas, o tema da qualidade de energia tem ganho ainda mais importância nos dias atuais. Com processos industriais cada vez mais automatizados, a operação e o controle eficiente das máquinas se tornam gradativamente mais suscetíveis a falhas na energia distribuída pela rede elétrica.

O conceito de qualidade de energia pode ter diferentes definições. Uma concessionária define qualidade como o grau de confiança em seu sistema de distribuição, enquanto fabricantes de equipamentos de carga definem qualidade como as características da energia fornecida pela rede que permitem o funcionamento correto de seus produtos. Quando considera-se o ponto de vista do consumidor, alteração na qualidade pode ser dada por qualquer problema manifestado em desvios na corrente, tensão ou frequência que resultem em falha ou mau funcionamento dos equipamentos do cliente (DUGAN et al., 2002).

Desta maneira, problemas de qualidade de energia afetam diretamente não só indústrias e estabelecimentos comerciais, como também consumidores comuns. Por conta do aumento gradativo da complexidade das funções que as cargas elétricas desempenham no controle de processos, mesmo equipamentos domésticos como relógios digitais, máquinas de lavar e fornos microondas são suscetíveis a variações no energia proveniente da rede elétrica (POMILIO; DECKMANN, 2017).

Faz-se necessário então um monitoramento constante da qualidade da energia elétrica. Caso não identificados e resolvidos de maneira rápida, problemas de qualidade de energia podem ocasionar redução da vida útil de equipamentos como transformadores, motores e equipamentos eletrônicos em geral. Estudos mostram que os prejuízos em empresas brasileiras com interrupções de tensão pode chegar a R\$500 mil (POMILIO; DECKMANN, 2017; MELO, 2008).

Para que seja possível fazer uma análise mais técnica do tema, muitas vezes o conceito de qualidade de energia é demasiadamente vago. A taxa de energia fornecida pela rede (potência) é proporcional ao produto da corrente pela tensão. Como uma concessionária de

energia tem controle apenas sobre a tensão que é fornecida, o conceito de qualidade de tensão se faz mais apropriado e é comumente utilizado para definir os parâmetros de qualidade no fornecimento de energia elétrica (DUGAN et al., 2002).

Desta maneira, o desenvolvimento de um equipamento que possibilite a medição da qualidade da energia elétrica através do controle da qualidade da tensão fornecida pelas concessionárias de energia seria de interesse não só do consumidor, mas também de indústrias e das próprias empresas distribuidoras, podendo fornecer informações que possibilitem uma economia significativa e uma melhora geral do serviço.

1.1 PROBLEMA

Devido à grande importância do tema da qualidade da energia elétrica e do impacto causado por variações de tensão, diversos trabalhos abordam esse assunto. Ramasamy et al. (2005) descreve um dispositivo para compensação de afundamentos de tensão chamado Restaurador Dinâmico de Tensão (do inglês *Dynamic Voltage Restorer - DVR*). Esse dispositivo atua injetando uma tensão trifásica em série e em sincronia com a tensão da rede de distribuição, atenuando os efeitos de afundamentos de tensão em equipamentos e cargas mais sensíveis.

Fitzer (2002) descreve uma técnica de detecção de afundamentos de tensão para um Restaurador Dinâmico de Tensão utilizando um método de matriz de espaço de estados, mais rápido que alguns métodos mais antigos, como transformada de Fourier e PLL.

Fonseca (1999) propõe um método para o cálculo de afundamento de tensão pela análise da amplitude e do tempo de duração dos afundamentos em função da posição de falta nas linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição. Além disso, descreve a execução de um processo de estimativa de afundamentos através de um método estatístico estocástico.

Ferreira et al. (2009) apresenta um sistema de detecção e classificação de distúrbios de qualidade de energia elétrica através da decomposição do sinal da tensão. São utilizadas ferramentas de estatística para a classificação dos diferentes tipos de ocorrências e uma rede neural artificial para a implementação do algoritmo. O sistema é capaz de detectar distúrbios como elevações de tensão, afundamentos de tensão, harmônicos, entre outros.

Através das referências bibliográficas apresentadas nesta seção, e de outros trabalhos presentes na literatura, percebe-se a existência de diversas técnicas para a detecção e correção de distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica. Este trabalho busca contribuir para o tema com o desenvolvimento de um sistema eficiente e de baixo custo para detecção de variações de tensão de curta duração.

Como diferencial, a detecção será feita com um microcontrolador PIC e um circuito integrado ADE7758. Além disso, as informações completas sobre o tipo e data das ocorrências estarão disponíveis online para consulta pelas concessionárias de energia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de detecção de variações de tensão de curta duração em redes de distribuição de energia elétrica, mantendo as informações relativas a cada ocorrência disponíveis para consulta online por concessionárias de energia e demais usuários da rede.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Definido o objetivo geral do trabalho, pode-se destacar os seguintes pontos como objetivos específicos:

- Programar o circuito integrado ADE7758 para realizar o monitoramento constante da tensão da rede elétrica;
- Configurar uma interface de comunicação serial SPI entre o microcontrolador PIC32MX795F512L e o circuito integrado ADE7758;
- Configurar o microcontrolador PIC32MX795F512L para identificar a ocorrência de eventos de interrupção, afundamento e elevação de tensão, momentâneos ou temporários.
- Configurar o microcontrolador para salvar as informações pertinentes aos eventos de VTCD, como hora e data da ocorrência e tipo de evento;
- Configurar o microcontrolador PIC32MX795F512L para funcionar como um servidor TCP/IP, disponibilizando as informações salvas para consulta pelo usuário através de uma rede Ethernet.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em seis capítulos, iniciando por este capítulo introdutório. No capítulo 2 são mostradas as faixas de classificação para a tensão proveniente da rede elétrica,

assim como a definição de Variações de Tensão de Curta Duração. Cada tipo de evento de VTCD é explicado de acordo com os critérios de magnitude e duração.

No capítulo 3 é feita uma descrição completa do Sistema de Monitoramento de Variações de Tensão de Curta Duração. São apresentados todos os componentes do projeto, como micro-controlador, caixa plástica de proteção, circuito integrado e placa de medição, além de uma explicação sobre a interface de comunicação utilizada.

O capítulo 4 descreve o desenvolvimento da arquitetura da rede de comunicação utilizada. São explicados os conceitos principais do protocolo TCP/IP e do padrão Ethernet, o sistema de transmissão de dados e as mensagens configuradas no sistema para envio e recebimento de dados por parte do usuário.

O capítulo 5 apresenta dos testes feitos com o Sistema de Monitoramento de Variações de Tensão de Curta, ilustrando os resultados obtidos levando-se em conta os diferentes tipos de eventos (duração e magnitude).

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas a partir dos resultados, assim como uma discussão a respeito de ideias trabalhos futuros.

2 NORMAS E REGRAS PARA CLASSIFICAÇÃO DE VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

Neste capítulo serão mostrados os diferentes tipos de variações de tensão de curta duração, assim como as regras definidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para classificar essas variações de acordo com sua magnitude e duração.

2.1 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

As Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) são desvios significativos no valor eficaz da tensão. A duração desse tipo de evento que será considerada neste trabalho é a da norma brasileira, definida em ANEEL (2017) como sendo de um ciclo a três minutos. Outros países e regiões podem apresentar diferenças nessa classificação, como no caso dos EUA, que utiliza a faixa entre meio ciclo e um minuto (POMILIO; DECKMANN, 2017).

Diversas causas podem ser apontadas para explicar a ocorrência de VTCDs, sendo que algumas das principais são condições de falta, energização de grandes cargas que demandam correntes altas de partida, eventos climáticos e conexões frouxas intermitentes nos cabos de energia (ANEEL, 2017; MACHADO et al., 2006). Como grande parte desses eventos não pode ser controlado ou prevenido pelas concessionárias e clientes, não há normas que limitem sua ocorrência. O que existem são normas para classificação desses eventos, de maneira a permitir estudos das possíveis consequências em equipamentos e processos (POMILIO; DECKMANN, 2017).

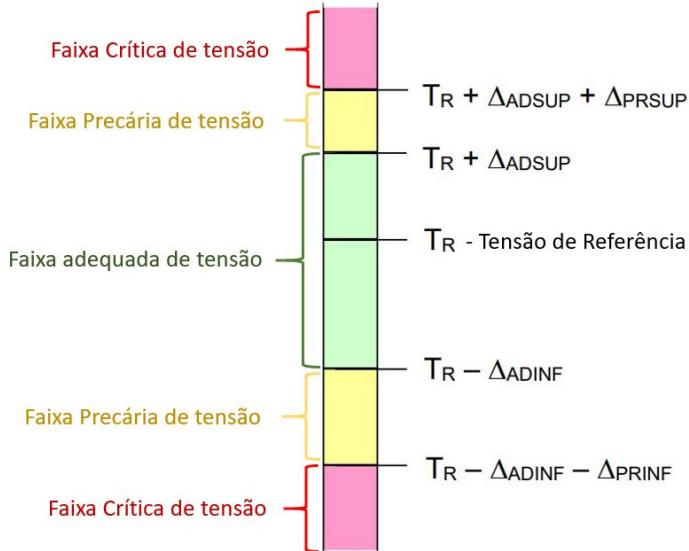
2.1.1 FAIXA DE OPERAÇÃO DA TENSÃO

Quando falamos em variações, é necessário definir qual é o ponto de referência em relação ao qual ocorre essa variação. Nesse caso, a referência é o valor nominal da tensão da rede. O Módulo 8 do PRODIST apresenta a faixa de operação que deve ser atendida para a tensão em regime permanente (ANEEL, 2017; POMILIO; DECKMANN, 2017).

A Figura 1 ilustra essa classificação, onde é definida uma tensão de referência (tensão

nominal da rede), e faixas de operação que variam de acordo com sua distância desse ponto. Na figura, as siglas Δ_{ADSUP} , Δ_{ADINF} , Δ_{PRSUP} e Δ_{PRINF} representam a variação de valores dentro dessas faixas (adequada superior e inferior, precária superior e inferior).

Figura 1: Faixa de operação da tensão em relação à tensão de referência



Fonte: Adaptado de ANEEL (2017)

Na tabela 1 são apresentados os limites das medições (Tensão de Leitura) para redes com tensão nominal de 127 e 220 V, assim como suas respectivas classificações de acordo com as faixas de operação mostradas na Figura 1.

Tabela 1: Limites para redes 127/220V

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) / (110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

Fonte: ANEEL (2017)

2.1.2 AMPLITUDE E DURAÇÃO DE EVENTOS DE VTCDS

Usualmente, as VTCDs referem-se à tensão fase-neutro, podendo ser descritas monofasicamente por dois parâmetros: amplitude e duração. A amplitude (V_e) é definida pelo valor extremo do valor eficaz da tensão, também chamado de tensão remanescente ou residual (V_{res}), em relação à tensão nominal ou tensão de referência (V_{ref}), no ponto de observação e enquanto

durar o evento. Esse valor pode ser expresso em porcentagem ou em valor por unidade (pu), como ilustrado na equação 1 (REDE, 2011).

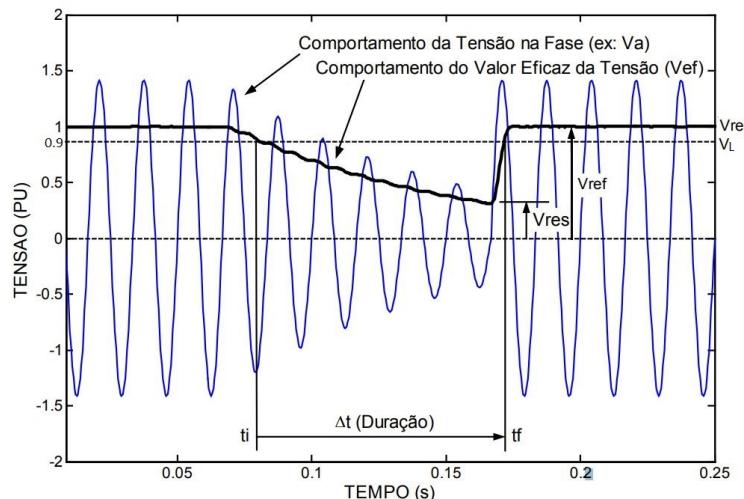
$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}}(pu) \quad \text{ou} \quad V_e\% = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \cdot 100(\%) \quad (1)$$

A duração do evento de VTCD (Δt_e) é caracterizada pelo tempo percorrido entre o momento em que o valor eficaz da tensão ultrapassa um determinado limite (V_L), e o momento em que volta a cruzar esse ponto, podendo ser expresso em segundos ou ciclos (REDE, 2011).

A Figura 2 ilustra um evento de afundamento de tensão com duração $\Delta t_e \cong 92,0 \text{ ms}$ ou 5,52 ciclos. Nela, V_L é o limite de referência a partir do qual se inicia o evento de afundamento (0.9 pu, de acordo com a tabela 2), e V_{ref} representa o valor nominal da tensão (1 pu). Assim, a amplitude do evento será:

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} = \frac{0.32}{1} = 0.32 \text{ pu} \quad \text{ou} \quad V_e\% = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \cdot 100(\%) = 32.0\% \quad (2)$$

Figura 2: Exemplo de Afundamento de Tensão



Fonte: Adaptado de Luna et al. (2005)

A ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, estabelece através do Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, do Prodist, as normas e regulações de qualidade de energia voltadas às redes de distribuição das concessionárias de energia elétrica brasileiras (LUNA et al., 2005). Na tabela 2 é mostrada a definição de cada tipo de evento de VTCD de acordo com esse módulo:

Tabela 2: Variações de Tensão de Curta Duração

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: Aneel (2011)

2.2 EVENTOS DE VTCDS

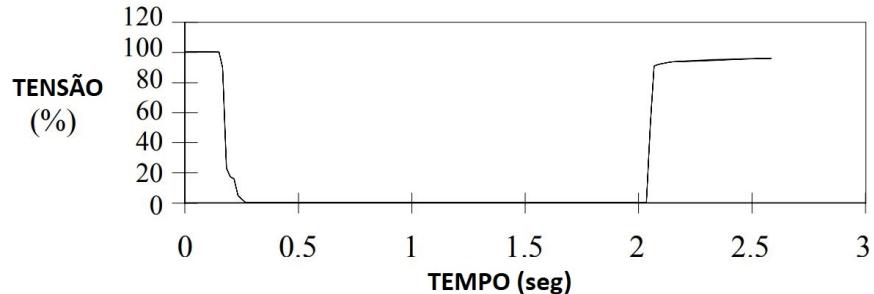
Será apresentada a seguir uma descrição detalhada de cada tipo de evento de variação de tensão de curta duração, de acordo com os conceitos de amplitude e duração.

2.2.1 INTERRUPÇÃO DE TENSÃO

A interrupção ocorre quando a amplitude da tensão desce para um valor menor que 0,1 pu, com uma duração de até três minutos. Algumas de suas principais causas são condições de falhas no equipamento, falhas no sistema de energia e mau funcionamento de controladores (ASSOCIATION et al., 2009).

A Figura 3 ilustra a ocorrência de uma interrupção momentânea, com uma tensão remanescente $V_e = 0,0\%$, e duração $\Delta t_e \cong 2,3s$. Essa variação é mostrada na forma de tensão eficaz, desde o início da interrupção até o reestabelecimento do valor nominal.

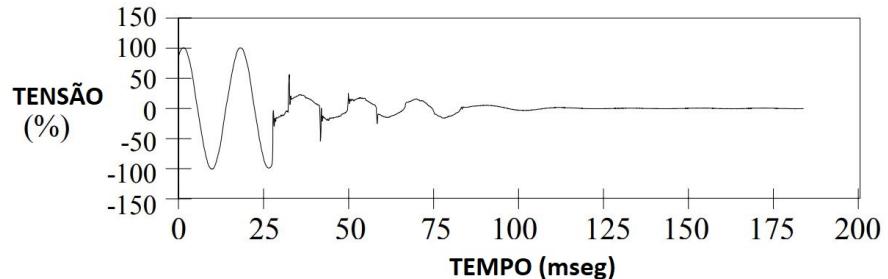
Figura 3: Variação da tensão eficaz durante evento de interrupção



Fonte: Adaptado de Association et al. (2009)

Na Figura 4 é possível observar com mais precisão o momento da ocorrência do evento de interrupção de tensão da Figura 3, mas dessa vez com o valor instantâneo da tensão. É interessante notar que, devido à algumas características de motores de indução presentes no circuito onde ocorreu a interrupção, a tensão instantânea pode demorar alguns milisegundos para se estabilizar em zero após interrupção da fonte de energia (ASSOCIATION et al., 2009).

Figura 4: Variação da tensão instantânea durante evento de interrupção



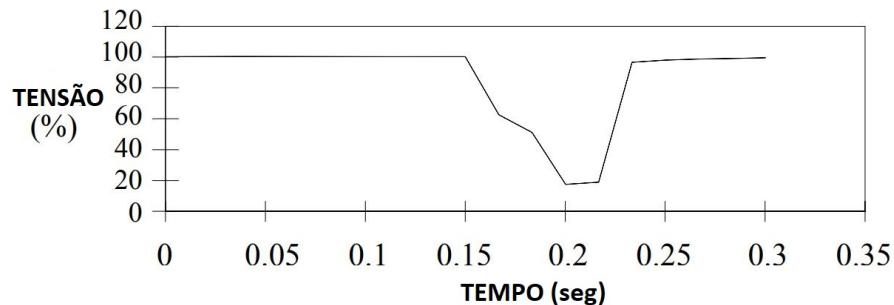
Fonte: Adaptado de Association et al. (2009)

2.2.2 AFUNDAMENTO DE TENSÃO

O afundamento ocorre quando a tensão da rede decai para um valor maior ou igual a 0,1 pu e menor que 0,9 pu da tensão nominal, com duração maior ou igual a um ciclo e inferior a três minutos. Esse evento é geralmente associado a condições de defeito no sistema, comutação de grandes blocos de carga e acionamento de grandes motores (ASSOCIATION et al., 2009).

A Figura 5 ilustra, a partir da tensão eficaz, um evento de afundamento instantâneo, com tensão remanescente $V_e \cong 0,2pu$ e duração $\Delta_e \cong 75,0 ms$.

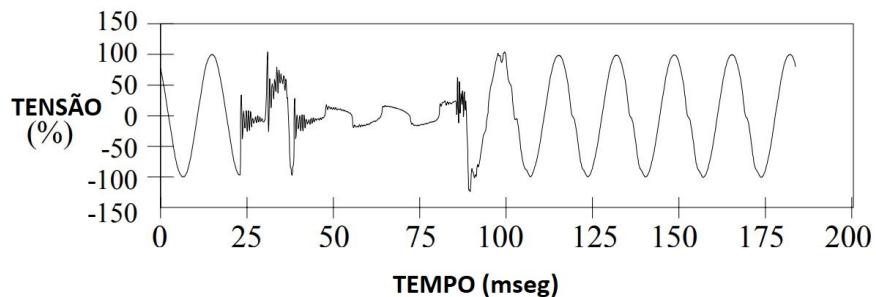
Figura 5: Variação da tensão instantânea durante evento de afundamento



Fonte: Adaptado de Association et al. (2009)

A Figura 6 ilustra o mesmo evento, mas novamente utilizando a tensão instantânea. Com isso, é possível observar uma variação bem menos suave quando comparada à da Figura 5. O completo reestabelecimento da tensão pode levar de 3 a 30 ciclos da rede, dependendo das características do sistema (ASSOCIATION et al., 2009).

Figura 6: Variação da tensão instantânea durante evento de afundamento



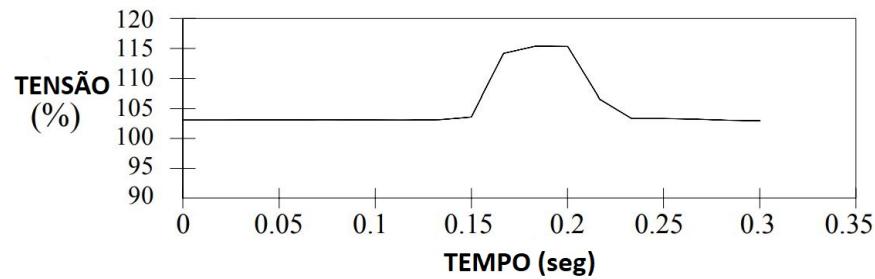
Fonte: Adaptado de Association et al. (2009)

2.2.3 ELEVAÇÃO DE TENSÃO

A elevação de tensão é definida por um aumento na tensão eficaz acima de 1,1 pu, com duração descrita na tabela 2. Assim como no afundamento, sua ocorrência está associada à condições de falhas no sistema, desligamento de grandes cargas ou bancos de capacitores (ASSOCIATION et al., 2009).

A Figura 7 ilustra uma condição de elevação instantânea de tensão. No gráfico é mostrada a variação da tensão eficaz, com tensão remanescente de aproximadamente 1,15 pu.

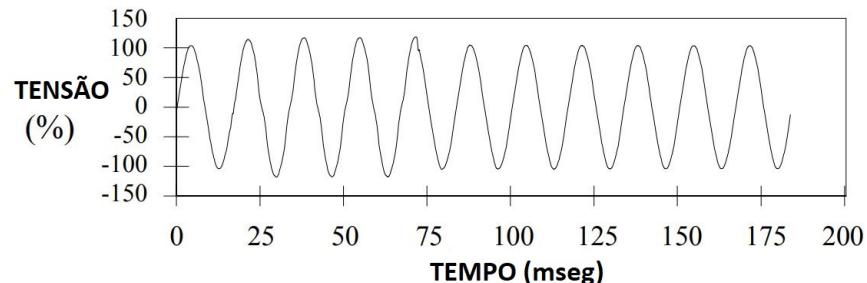
Figura 7: Variação da tensão eficaz durante evento de elevação



Fonte: Adaptado de Association et al. (2009)

A Figura 8 ilustra o mesmo evento de elevação, porém de acordo com a tensão instantânea. Nesse segundo gráfico é possível notar uma pequena diferença entre o início do evento em relação ao gráfico da Figura 8.

Figura 8: Variação da tensão instantânea durante evento de elevação



Fonte: Adaptado de Association et al. (2009)

3 ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO

3.1 PROPOSTA DO TRABALHO

O Sistema de Monitoramento de Variações de Tensão de Curta Duração proposto tem como objetivo fornecer uma ferramenta robusta e de baixo custo, que permita a medição da qualidade da energia elétrica fornecida pelas concessionárias de energia através da detecção da ocorrência de eventos de variação de tensão de curta duração. O sistema faz a coleta da informação diretamente na rede de Baixa Tensão (BT), podendo ser tanto 127V quanto 220V

3.2 FUNCIONAMENTO DO PROTÓTIPO

O equipamento utilizado neste trabalho foi desenvolvido pelo Prof. Dr. André Sanches Fonseca Sobrinho, para sua tese de doutorado, e foi inicialmente projetado para funcionar como uma Unidade de Medição Fasorial Otimizada para Sistemas de Distribuição (SOBRI-NHO, 2016).

Para este projeto, o protótipo foi programado para funcionar na detecção dos eventos de variações de tensão de curta duração, classificando-os e disponibilizando-os online para consulta pelo usuário. Para isso, o dispositivo realiza as seguintes atividades:

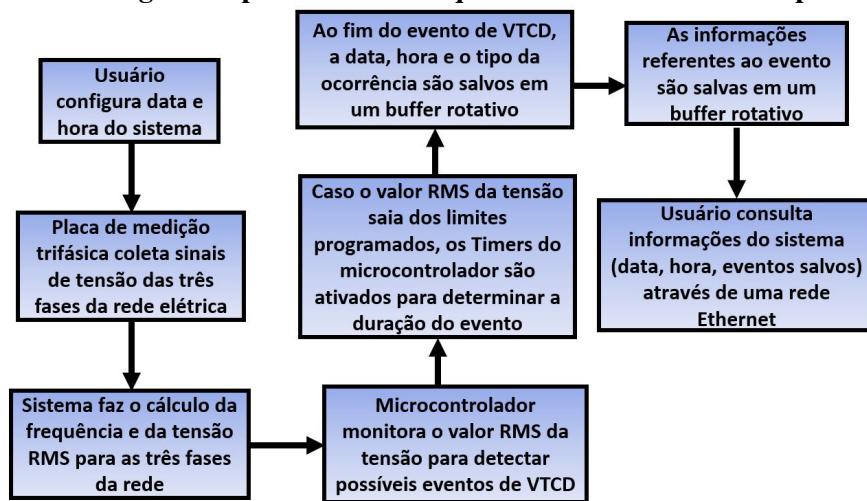
- Configuração do relógio em tempo real do microcontrolador PIC32MX795F512L através de dados fornecidos pelo usuário;
- Coleta dos valores de tensão nas três fases da rede de baixa tensão através da placa de medição trifásica;
- Cálculo da frequência e do valor RMS da tensão em cada fase através do circuito integrado ADE7758;
- Classificação, no caso de ocorrência, dos eventos de VTCD através dos Timers e demais funcionalidades do microcontrolador PIC32MX795F512L. As informações de data e hora

da ocorrência de cada evento são salvas, juntamente com o tipo do evento, na memória flash do microcontrolador.

- Disponibilização das informações salvas pelo sistema em um buffer rotativo para consulta pelo usuário através de uma rede Ethernet.

A figura 9 ilustra um fluxograma com as atividades desempenhadas pelo Sistema de Monitoramento de Variações de Tensão de Curta Duração.

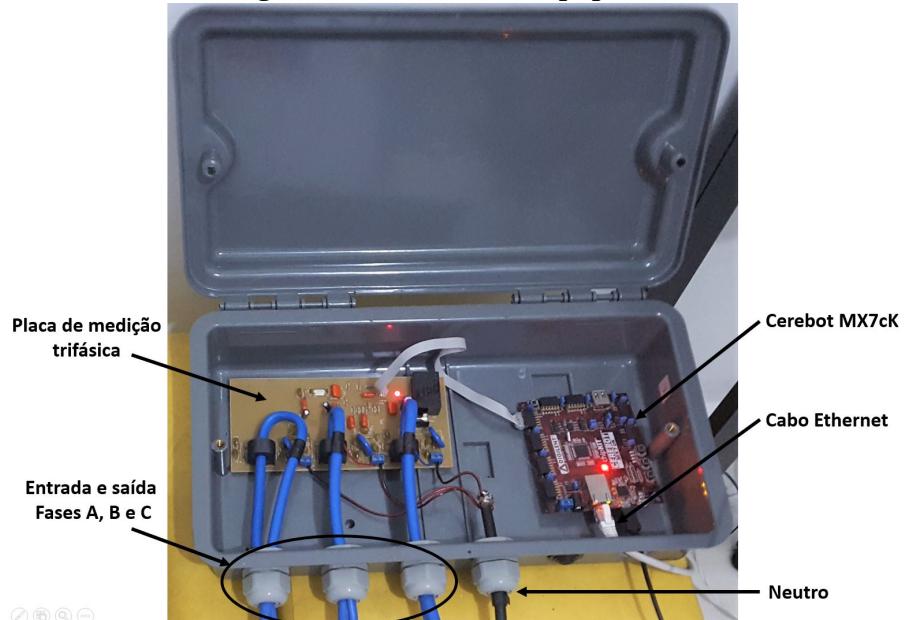
Figura 9: Fluxograma apresentando a sequência de atividades feitas pelo sistema



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 10 pode-se identificar os componentes que integram o protótipo. É possível observar a placa de desenvolvimento Cerebot MX7cK, que conta com um microcontrolador PIC32MX795F512L e uma entrada para conexão Ethernet, as entradas e saídas das três fases de tensão, o neutro e a placa de medição trifásica, que será descrita mais adiante neste capítulo.

Figura 10: Estrutura do equipamento



Fonte: Autoria Própria

A caixa plástica que serve de proteção para o equipamento foi testada em laboratórios certificados, levando-se em conta diversas condições climáticas, penetração de água e névoa salina. Os resultados apresentados foram satisfatórios, mostrando que o dispositivo pode ser instalado em áreas externas (SOBRINHO, 2016). A tabela 3 apresenta as principais especificações do dispositivo, tanto da parte elétrica como da parte mecânica.

Tabela 3: Características elétricas e físicas

Parâmetro	Valor
Corrente máxima (valor RMS) para cada fase	141,42 A
Tensão Máxima (valor RMS) para cada fase	275 V
Consumo do equipamento (alimentado através da fase A)	3,8 VA
Temperatura de operação	-40 °C a 85 °C
Graus de potência (IP) do invólucro mecânico	55 (contra poeira e jatos d'água)
Dimensões do invólucro mecânico	412 mm x 230 mm x 100 mm

Fonte: Sobrinho (2016)

3.3 MICROCONTROLADOR PIC32MX795F512L

Para este trabalho foi utilizado o microcontrolador PIC32MX795F512L, fabricado pela empresa *Microchip Technology Incorporated*, que possui unidade de processamento de 32 bits, 512 kB de memória Flash, 128 kB de memória RAM, frequência de operação de 80 MHz e faixa

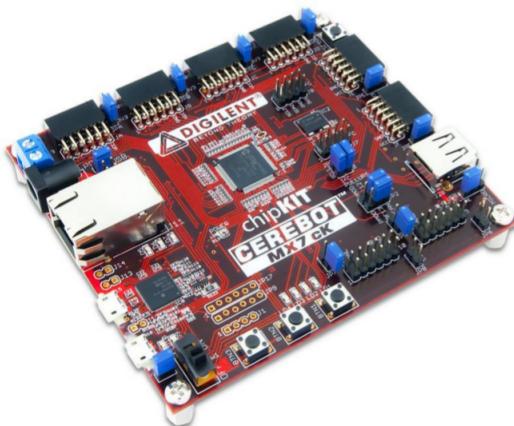
de operação de tensão de 2,3 V a 3,6 V (MICROCHIP TECHNOLOGY INCORPORATED, 2011).

O PIC32MX795F512L conta com 5 Timers de 16 bits, que podem ser combinados em pares para formar Timers de 32 bits. Além disso, o microcontrolador conta com a presença de uma interface para Controle de Acesso ao Meio (MAC) de 10/100 Mbps, que permite a implementação de uma conexão física Ethernet (MICROCHIP TECHNOLOGY INCORPORATED, 2011).

O periférico de calendário e relógio em tempo real, também presente no microcontrolador, permite a contagem do tempo em horas, minutos e segundos, a consulta por dia da semana, dia, mês e ano, além de otimização para uso contínuo da bateria e correção de ano bissexto. O erro apresentado é de aproximadamente $\pm 0,66$ segundos por mês (MICROCHIP TECHNOLOGY INCORPORATED, 2011).

Além das funcionalidades mencionadas, outro módulo deste microcontrolador que é útil para o trabalho é o módulo de interface serial SPI, um protocolo de comunicação serial que será explicado com mais detalhes na seção 6. Esse módulo possui suporte para configurações mestre e escravo, quatro formatos de clock diferentes, suporte para padrão 8, 16 ou 32 bits, entre outros.

Figura 11: Placa de desenvolvimento Cerebot MX7cK

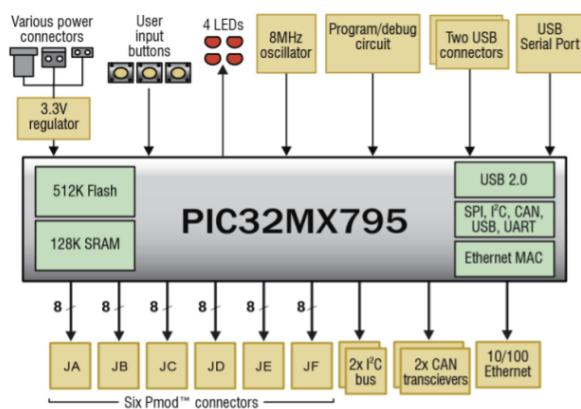


Fonte: Diligent Incorporated (2013)

O microcontrolador PIC32MX795F512L foi utilizado através da placa de desenvolvimento Cerebot MX7cK, que é fabricada pela empresa *Diligent Incorporated*. Essa placa possui 52 pinos de entrada e saída, interface Ethernet 10/100, 5 entradas de interrupção externa e diversos outros periféricos, podendo ser alimentada via USB ou fonte AC-DC externa. (DILIGENT INCORPORATED, 2013). Um diagrama com os principais periféricos da Cerebot MX7cK é

apresentado na figura 12:

Figura 12: Diagrama do circuito da placa Cerebot MX7cK

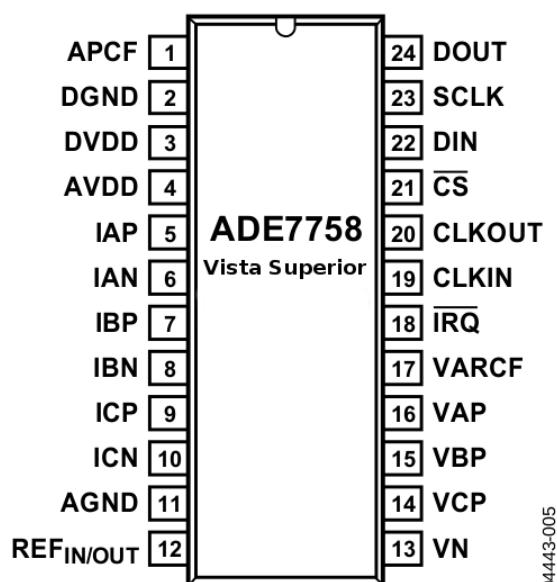


Fonte: **Diligent Incorporated (2013)**

3.4 PLACA DE MEDIÇÃO TRIFÁSICA

O ADE7758, circuito integrado fabricado pela empresa *Analog Devices*, é um medidor de energia elétrica trifásico de alta precisão. Ele conta com uma interface serial compatível com o protocolo SPI, e alimentação de 5V. Esse circuito integrado conta com uma entrada analógica para cada um dos três canais de corrente e três canais de tensão (ANALOG DEVICES, 2011).

Figura 13: Configuração de pinos do circuito integrado ADE7758



Fonte: **Adaptado de Analog Devices (2011)**

O ADE7758 é responsável pela conversão analógico-digital dos sinais lidos pelos três canais de tensão, disponibilizando então o valor RMS da tensão da rede para o microcontrolador.

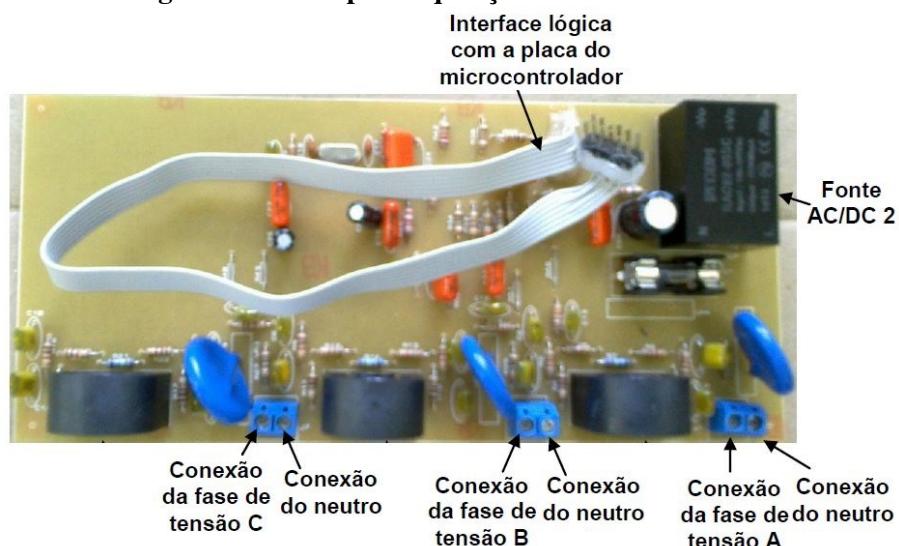
O desenvolvimento da placa de medição trifásica, utilizada neste trabalho para a aquisição dos sinais de tensão, é descrito em Sobrinho (2016). Como é possível observar na Figura 14, esse dispositivo conta com conexões para as três fases de tensão, interface lógica com a placa do microcontrolador, fonte AC/DC e conexão com o neutro da rede.

Através da utilização de divisores resistivos é possível atenuar a tensão de entrada para os limites adequados ao conversor A/D do circuito integrado ADE7758 (SOBRINHO, 2016). A Equação (3) expressa essa relação, onde V_N é a tensão em um dos canais do ADE7758, e V_{IN} é a tensão proveniente de uma das fases da rede trifásica.

$$V_N = \frac{1k\Omega}{1k\Omega + 1M\Omega} V_{IN} = 9,99 \cdot 10^{-4} V_{IN} \quad (3)$$

De acordo com o datasheet do ADE7758, a faixa de operação das entradas analógicas é de $\pm 500mV$ (ANALOG DEVICES, 2011). Desta maneira, a partir da Equação (3) é possível determinar um valor máximo de 500,5V nas entradas de tensão da placa, o que resultará no valor de 500mV na entrada do conversor A/D. Isso permite que tanto tensões com valor RMS de 127 V e 220 V sejam amostradas.

Figura 14: Placa para aquisição dos sinais de tensão



Fonte: Adaptado de Sobrinho (2016)

3.4.1 INTERFACE DE COMUNICAÇÃO

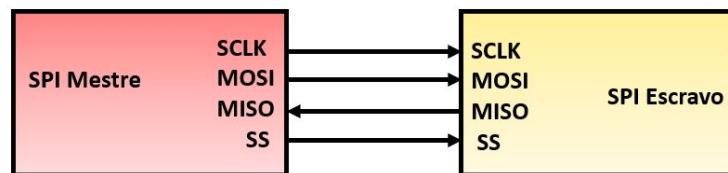
A interface de comunicação utilizada para a troca de dados entre o microcontrolador e o circuito integrado ADE7758 foi a interface de comunicação serial SPI (*Serial Peripheral Interface*), um protocolo de comunicação serial síncrona, desenvolvido pela *Motorola*, que permite a troca de informações entre dispositivos. Sua maior utilização se dá em sistemas embarcados, estabelecendo a comunicação entre microcontroladores e outros periféricos, como conversores A/D, circuitos integrados, EEPROMs seriais, entre outros. (LEENS, 2009; MICROCHIP TECHNOLOGY INCORPORATED, 2011).

O protocolo SPI usa uma topologia mestre-escravo, onde um dispositivo "mestre" se comunica com um ou mais dispositivos "escravos". A comunicação se dá em quatro linhas de sinal (*four wire serial bus*):

- Um sinal de clock (SCLK), enviando pelo dispositivo mestre para um ou mais dispositivos escravos, definindo a sincronização de toda a comunicação entre os dispositivos.
- Uma linha para troca de dados do mestre para o(s) escravo(s), MOSI (Master Out-Slave In).
- Uma linha para troca de dados do(s) escravo(s) para o mestre, MISO (Master In-Slave Out).
- Um sinal de seleção de escravo (SSn), único para cada dispositivo escravo, que é usado para selecionar com qual dispositivo escravo o mestre irá se comunicar.

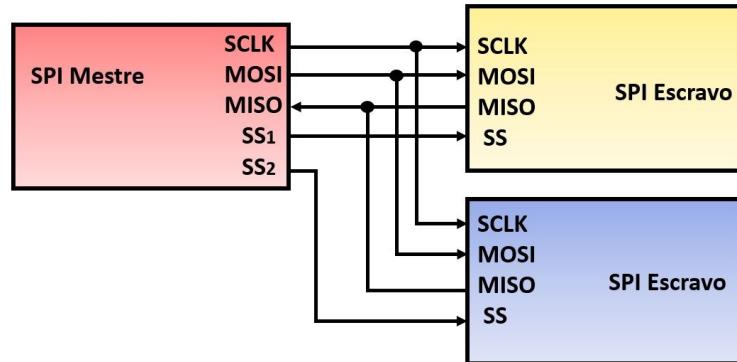
A Figura 15 ilustra a

Figura 15: Topologia da comunicação SPI - Um mestre e um escravo



Fonte: Autoria Própria

Figura 16: Topologia da comunicação SPI - Um mestre para um ou mais escravos



Fonte: Autoria Própria

Como mencionado anteriormente, o microcontrolador PIC32MX795F512L possui quatro interfaces SPI, e a utilizada para este trabalho foi a SPI canal 1. O microcontrolador foi configurado como um dispositivo mestre, enquanto o circuito integrado atua como escravo.

3.5 LÓGICA DO FIRMWARE

Após o completo entendimento de todos os dispositivos que compõem o protótipo, é necessário também entender o funcionamento do seu código, ou seja, do Firmware programado. Essa lógica foi desenvolvida de maneira a utilizar todas as funcionalidades do microcontrolador e do circuito integrado, descritos anteriormente, para atingir os objetivos propostos na seção 1.2.

3.5.1 AQUISIÇÃO DA FREQUÊNCIA E DA TENSÃO RMS DA REDE ELÉTRICA

A primeira atividade desempenhada é o cálculo da frequência de cada uma das fases da tensão. Para isso, é necessário primeiro selecionar, através dos bits 0 e 1 do registrador MMODE do ADE7758, em qual fase da tensão será feita a leitura (A, B ou C) (ANALOG DEVICES, 2011).

O valor da frequência deve então ser lido no registrador FREQ do circuito integrado, que é atualizado a cada quatro períodos da fase selecionada. Como trata-se de uma rede de 60 Hz, o período da fase é de 16 ms e, consequentemente, a leitura desse registrador deve ser feita com um intervalo mínimo de 67 ms. Para que isso seja possível, o Timer2 do microcontrolador foi programado para gerar uma interrupção a cada 100 ms, garantindo a confiabilidade do valor lido. Caso não existam problemas na rede, o valor lido no registrador para uma rede de 60 Hz

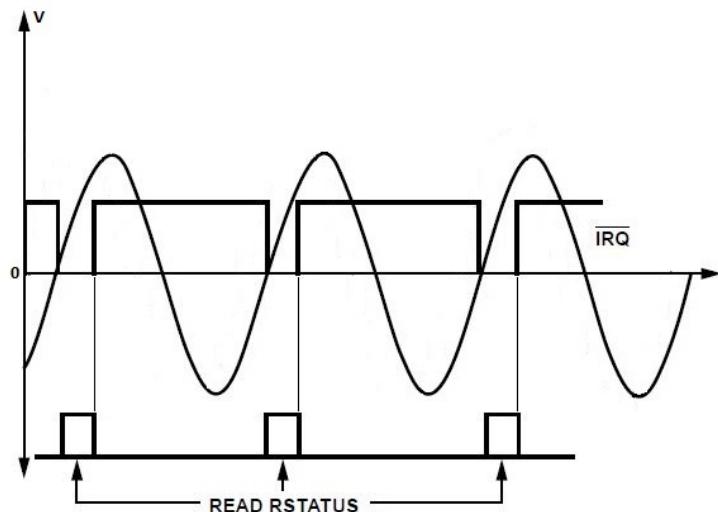
dever ser aproximadamente 960 (ANALOG DEVICES, 2011).

Em seguida, é necessário obter o valor RMS de cada uma das fases da tensão da rede. Esse valor fica armazenado em um dos três registradores de 24 bits disponíveis no ADE7758: AVRMS (0x0D), BVRMS (0x0E) e CVRMS (0x0F). De acordo com o Datasheet, para garantir a estabilidade da medida é recomendável realizar a leitura em sincronia com o início da onda da tensão.

Para que essa sincronia seja possível, o circuito integrado conta com o pino IRQ (pino 18, como mostrado na Figura 13), que, através da configuração do registrador *Mask*, vai para nível lógico baixo para indicar a ocorrência de uma determinada interrupção.

A Figura 17 ilustra esse comportamento de maneira simplificada. Quando o sinal da tensão cruza o eixo x (no início da onda), o valor do pino IRQ vai para nível lógico baixo, indicando a ocorrência desse evento. Para que o valor do pino retorne ao nível lógico alto, é necessária a leitura do registrador RSTATUS.

Figura 17: IRQ



Fonte: Adaptado de Analog Devices (2011)

O último passo para a obtenção do valor RMS da tensão é o escalonamento do sinal. De acordo com Analog Devices (2011), o valor dos registradores de tensão em máxima escala é de 1639101 unidades (rede de 60 Hz), o que equivale a um valor de tensão RMS de aproximadamente 353.91 V. Desta maneira, temos que cada 4.631 unidades lidas no registrador equivalem a 1 mV_{RMS} .

$$\frac{1639101 \text{ unidades}}{353907 \text{ } mV_{RMS}} = \frac{4.631 \text{ unidades}}{1 \text{ } mV} \quad (4)$$

Devido ao elevado valor dos resistores presentes nos divisores resistivos, o valor encontrado na equação 4 não é exato, sendo necessária uma análise manual, com ajuda de um multímetro, para definir os valores corretos para o cálculo. Essa análise foi feita em Sobrinho (2016), e o resultado é apresentado a seguir:

Tabela 4: Fatores de conversão para cálculo da tensão RMS

Valor de conversão para 60 Hz (unidades/mV)		
Fase A	Fase B	Fase C
4,6278	4,7515	4,6527

Fonte: Adaptado de Sobrinho (2016)

O cálculo da tensão RMS é feito da seguinte maneira:

- O registrador RSTATUS é lido para garantir que o pino IRQ estará em nível lógico alto no início da operação.
- O registrador Mask é configurado para gerar uma interrupção no início da onda de tensão da fase selecionada.
- O microcontrolador aguarda a ocorrência da interrupção monitorando o pino RD12, que é conectado ao pino IRQ.
- Após a ocorrência da interrupção, o registrador RSTATUS é lido novamente para resetar o indicador de interrupção.
- É feita a leitura do registrador correspondente à fase de tensão desejada (AVRMS, BVRMS ou CVRMS), para obter o valor RMS da tensão.
- O valor lido é dividido pelo fator de conversão correspondente da tabela 4 para se obter o valor em V_{RMS} .
- O processo é reiniciado para a próxima fase de tensão.

3.5.2 CLASSIFICAÇÃO DOS EVENTOS DE VTCD

Como descrito na seção 3.5.1, o microcontrolador PIC32MX795F512L gera, com o TIMER2, uma interrupção a cada 100 ms, e dentro dessa interrupção são obtidos os valores da frequência e da tensão RMS de cada uma das fases da rede.

Após esse cálculo, é feito o monitoramento do valor de tensão lido. Caso o valor esteja abaixo de 0.9 pu (interrupção ou afundamento) ou acima de 1.1 pu (elevação), o sistema ativará uma interrupção periódica em um dos Timers disponíveis no microcontrolador, como mostra a tabela 5.

Tabela 5: Timers utilizados para classificação das VTCD

-	Fase A	Fase B	Fase C
Timer	3	4	5
Tempo	16 ms	10 ms	15 ms

Fonte: Autoria Própria

Dentro de cada Timer há um contador, que é incrementado a cada ocorrência da interrupção. Quando o valor da tensão correspondente retorna a faixa normal de operação, a interrupção é desabilitada e é feito o cálculo da duração total do evento, que é então classificado como momentâneo ou temporário. Por último, essa informação é salva, juntamente com os valores dos registradores RTCDATE e RTCTIME, em um buffer rotativo, e o contador é zerado para o próximo evento.

Como exemplo, caso a leitura da tensão RMS da Fase A da rede apresente um valor abaixo de 0.9 pu (114.4 V, para uma rede de 127 V_{RMS}), o Timer3 será ativado, gerando uma interrupção a cada 16 ms. Se, após o retorno da tensão para o valor correto, o valor do contador for igual a 01, isso significará que o evento de afundamento teve a duração de 1 ciclo da rede e, de acordo com a tabela 2, será classificado como um evento de Afundamento Momentâneo de Tensão. Essa informação será salva, junto com a hora e a data da ocorrência (valores de RTCDATE e RTCTIME), disponibilizada para o usuário através de uma rede Ethernet, que será explicada com mais detalhes no capítulo 4.

4 TROCA DE DADOS

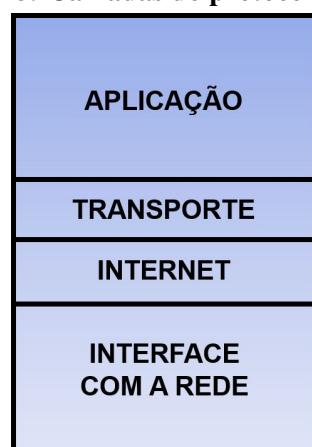
Este capítulo tem como objetivo descrever o sistema de comunicação e de transmissão de dados do sistema de monitoramento de variações de tensão de curta duração. Será explicado o funcionamento da comunicação Ethernet, dos protocolos MAC, TCP e IP, o software Hercules e o protocolo de comunicação SPI.

4.1 ARQUITETURA DA REDE

4.1.1 PROTOCOLO TCP/IP

O protocolo TCP/IP é, na verdade, um conjunto de protocolos que especificam como deve ser feita a transmissão de dados em rede (empacotamento, endereçamento, transmissão, roteamento e recebimento de dados). Seu nome vem de dois dos seus principais protocolos, o Protocolo de Controle da Transmissão (*Transmission Control Protocol - TCP*) e o Protocolo de Internet (*Internet Protocol - IP*), que atuam nas camadas de transporte e internet, respectivamente (TORRES, 2001). A Figura 18 ilustra a arquitetura do TCP/IP, com quatro camadas.

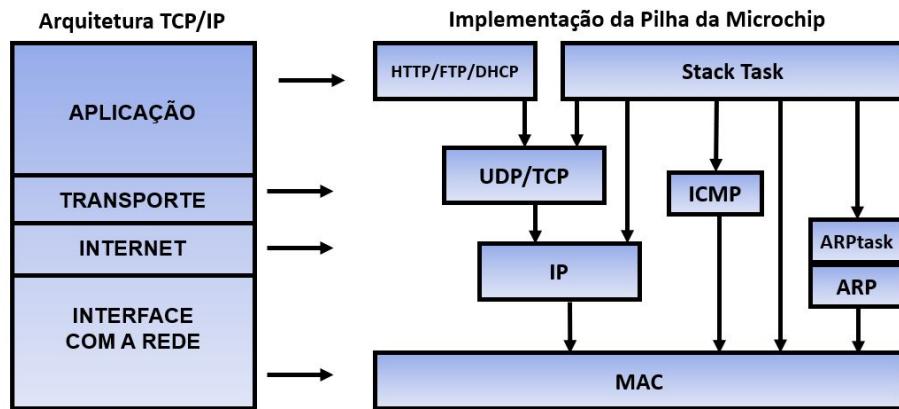
Figura 18: Camadas do protocolo TCP/IP



Fonte: Adaptado de Torres (2001)

Para que seja possível fazer a comunicação do microcontrolador PIC32MX795F512L em uma rede, é necessário implementar o protocolo TCP/IP. Para isso, a empresa Microchip fornece sua própria pilha TCP/IP, chamada de "*Microchip TCP/IP Stack*". O código de configuração das diferentes camadas é colocado em arquivos separados junto com o firmware do protótipo (MICROCHIP TECHNOLOGY INCORPORATED, 2008b).

Figura 19: Estrutura da pilha TCP/IP da Microchip comparada com a arquitetura TCP/IP



Fonte: Adaptado de Microchip Technology Incorporated (2008b)

4.1.2 COMUNICAÇÃO ETHERNET

A arquitetura Ethernet é um conjunto de tecnologias para redes de computadores, utilizada principalmente para redes locais (*Local Area Network - LAN*), que define a forma de transmissão dos dados. O padrão Ethernet recebe dados de protocolos de alto nível, como TCP/IP, e define fisicamente como se dará a transmissão pelos cabos de rede. O protocolo Ethernet é definido pela especificação IEEE 802.3 (TORRES, 2001; SIMMONS, 2008).

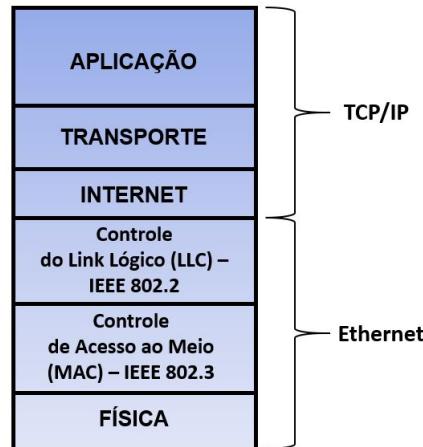
Para que seja possível a configuração de uma rede local, é necessário também uma camada de Controle de Acesso ao Meio (*Media Access Control - MAC*). Essa camada é responsável por garantir o endereçamento dos dados a serem transmitidos, inserindo tanto as informações do dispositivo emissor quanto do dispositivo receptor. Esses dispositivos (placas de rede) possuem o chamado endereço MAC, um endereço único que é gravado fisicamente em uma memória ROM na placa de rede (TORRES, 2001).

Como foi descrito na seção 3.3, o microcontrolador PIC32MX795F512L possui uma interface para Controle de Acesso ao Meio (MAC) de 10/100 Mbps. Além disso, o microcontrolador conta também com um endereço único MAC, programado no momento da fabricação pela empresa Microchip (MICROCHIP TECHNOLOGY INCORPORATED, 2013b).

Desta maneira, o dispositivo proposto neste trabalho possui uma arquitetura de rede

que utiliza o conjunto de protocolos TCP/IP, fornecidos pela própria fabricante, juntamente com um padrão Ethernet para a transmissão física dos dados. A Figura 21 ilustra essa configuração.

Figura 20: Rede com protocolo TCP/IP e padrão Ethernet

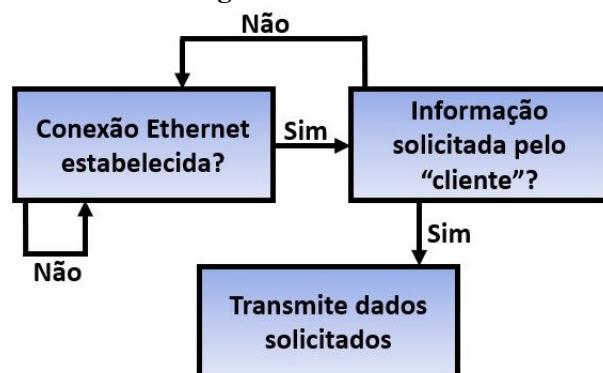


Fonte: Adaptado de Torres (2001)

4.2 TRANSMISSÃO DE DADOS

Para este trabalho, o protótipo do Sistema de Monitoramento de Variações de Tensão de Curta Duração foi configurado como um dispositivo "Servidor", ou seja, um dispositivo que possui um endereço IP fixo e que se conecta com outros dispositivos, chamados de "Clientes", que podem solicitar dados sempre que necessário. Estes dados podem ser a data e hora atuais do sistema, eventos de variação de tensão em cada fase salvos no buffer rotativo, o tipo do evento, entre outros.

Figura 21: Ethernet



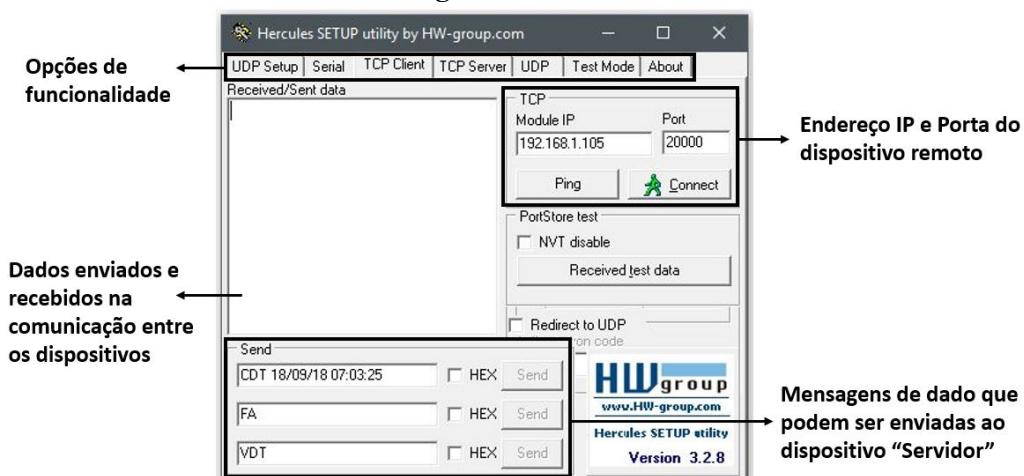
Fonte: Adaptado de Sobrinho (2016)

Para que fosse possível estabelecer uma conexão com o Sistema de Monitoramento

de Variações de Tensão de Curta Duração, configurado como um dispositivo "Servidor" na rede TCP/IP, era necessário configurar também um dispositivo "Cliente". Para isso, foi utilizado o software *Hercules*, desenvolvido pela empresa *HW Group*. Esse software funciona como um terminal TCP/IP, podendo ser configurado tanto como um dispositivo cliente quanto como servidor.

A Figura 22 ilustra a interface do software na opção "TCP Client". É possível observar as diferentes opções de uso (cliente e servidor TCP, Serial, UDP, etc.), o campo com mensagens de dados que são enviadas na comunicação, dados enviados como resposta e a Porta e o endereço IP do dispositivo remoto.

Figura 22: Hercules



Fonte: Autoria Própria

4.3 MENSAGENS

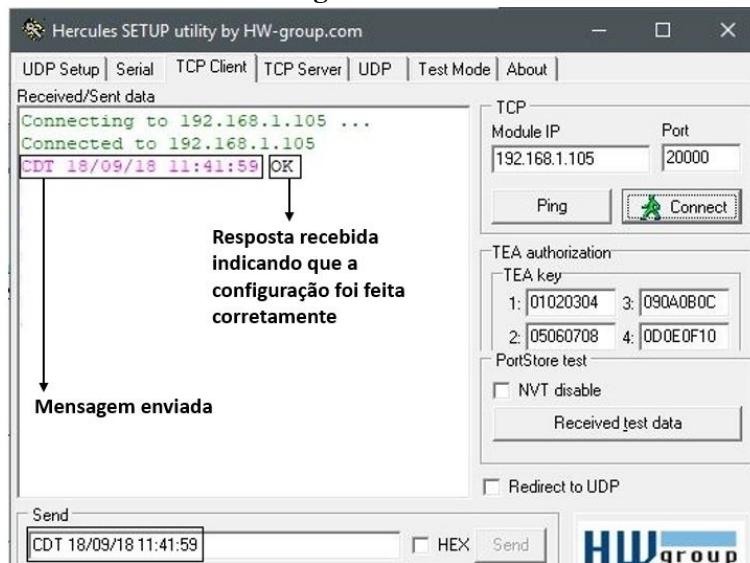
Para possibilitar a troca de informações entre o usuário e o sistema, foram configuradas algumas mensagens padrão que serão explicadas a seguir. Essas mensagens servem tanto para o envio de dados e configurações do microcontrolador, como hora e data, como para a solicitação de informações quando necessário, como no caso da ocorrência de eventos.

4.3.1 CONFIGURE DATE AND TIME - CDT

O objetivo dessa mensagem é permitir ao usuário configurar os registradores RTC-DATE e RTCTIME do microcontrolador PIC32MX795F512L, ajustando a hora e a data do periférico de calendário e relógio em tempo real, descrito na seção 3.3. Caso a configuração

seja feita de maneira correta, o sistema enviará a mensagem "OK" como resposta, como ilustra a Figura 23.

Figura 23: CDT



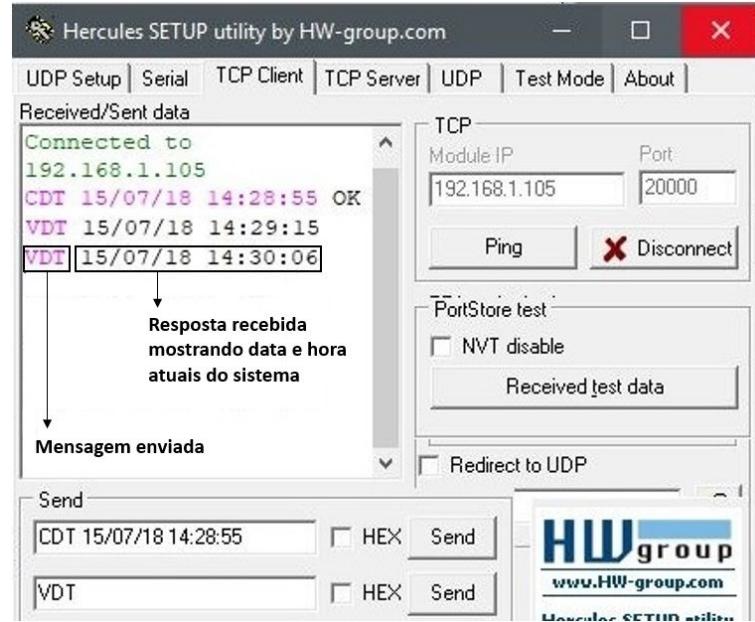
Fonte: Autoria Própria

A mensagem deve iniciar com os caracteres "CDT", em caixa alta, indicando a operação que o microcontrolador deverá realizar, seguido por dia e hora, nos formatos dd/mm/aaaa e hh:mm:ss.

4.3.2 VERIFY DATE AND TIME - VDT

Caso seja necessário verificar a hora e data atuais do sistema, o usuário deverá utilizar a mensagem VDT, que retorna os valores dos registradores RTCDATE e RTCTIME do microcontrolador. Na Figura 24 é possível verificar um exemplo dessa mensagem.

Figura 24: VDT

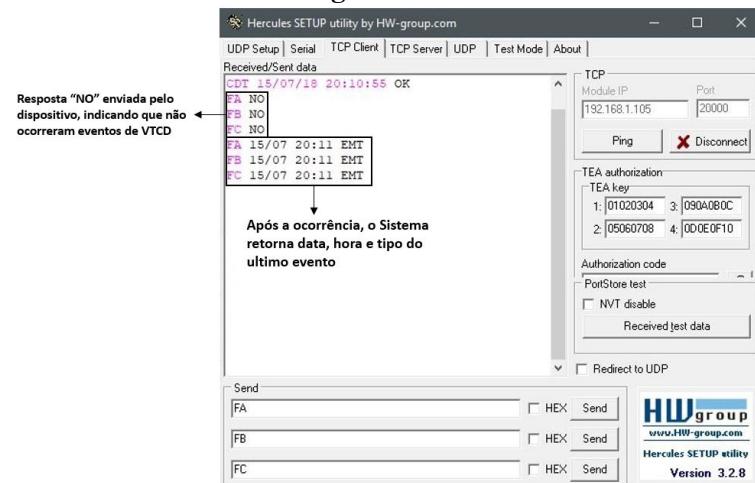


Fonte: Autoria Própria

4.3.3 FA, FB E FC

Por último, as mensagens FA, FB e FC servem para verificação da ocorrência de eventos de variações de tensão de curta duração em cada uma das fases da tensão. Caso não tenham ocorrido eventos na fase requisitada, o sistema retornará a mensagem "NO". Caso contrário, será mostrado a data, hora e tipo do último evento salvo.

Figura 25: FA



Fonte: Autoria Própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos testes realizados no Sistema de Monitoramento de Variações de Tensão de Curta Duração. O comportamento do sistema foi analisado tanto para a magnitude dos eventos (interrupções, afundamentos e elevações de tensão) quanto para sua duração (momentâneos e temporários), como descrito na tabela 2.

5.1 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES

Este trabalho foi desenvolvido de maneira remota, na cidade de São José dos Campos, paralelamente à realização do estágio curricular obrigatório, não sendo possível o acesso aos laboratórios da Universidade. Desta maneira, para realizar os testes de variações de tensão necessários, foi utilizado um variador de tensão monofásico, da marca JNG, modelo TDGC2-0,5 e capacidade de 0,5 kVA.

Figura 26: Variador de Tensão Monofásico TDGC2-0,5



Fonte: Autoria Própria

Tabela 6: Especificação Técnica - Variador de Tensão Monofásico TDGC2-0,5

Modelo	Tensão Nominal Entrada	Potencia Nominal	Tensão de Saída	Corrente Nominal de Saída
TDGC2-0,5	127Vca	0,25kVA	0 ~ 140Vca	2 A
TDGC2-0,5	220Vca	0,5kVA	0 ~ 250Vca	2 A

Fonte: JNG (2017)

Os terminais de entrada do variador de tensão foram conectados à rede doméstica de 220V, e os terminais de saída foram conectados ao neutro e à entrada da fase A do protótipo. Para que fosse possível realizar testes em todas as fases, as conexões foram curto-circuitadas, recebendo todas o mesmo valor de tensão. A imagem 27 ilustra como foram feitas as ligações para a realização do trabalho.

Figura 27: Ligação do dispositivo para realização dos testes de variação de tensão**Fonte: Autoria Própria**

Os resultados observados na interface do software *Hercules*, descrito na seção 4.2, foram comparados com os valores de diferentes variáveis presentes no firmware do dispositivo, através do software *MPLAB IDE*.

Tabela 7: Variáveis apresentadas nos testes

Variável	Função
j	Número de eventos salvos no buffer rotativo da fase A
k	Número de eventos salvos no buffer rotativo da fase B
l	Número de eventos salvos no buffer rotativo da fase C
temp	Duração do último evento salvo
VARMS	Tensão na fase A

Fonte: Autoria Própria

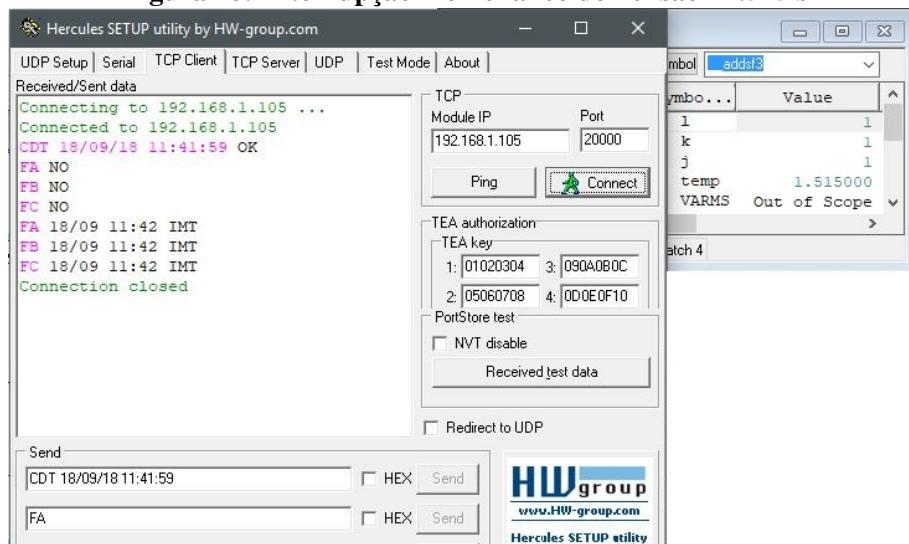
5.2 TESTES DE EVENTOS DE VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

Esta seção apresentará os resultados dos testes para os diferentes eventos, realizados no Sistema de Monitoramento de Variações de Tensão de Curta Duração com o auxílio de um variador de tensão monofásico.

5.2.1 INTERRUPÇÃO DE TENSÃO

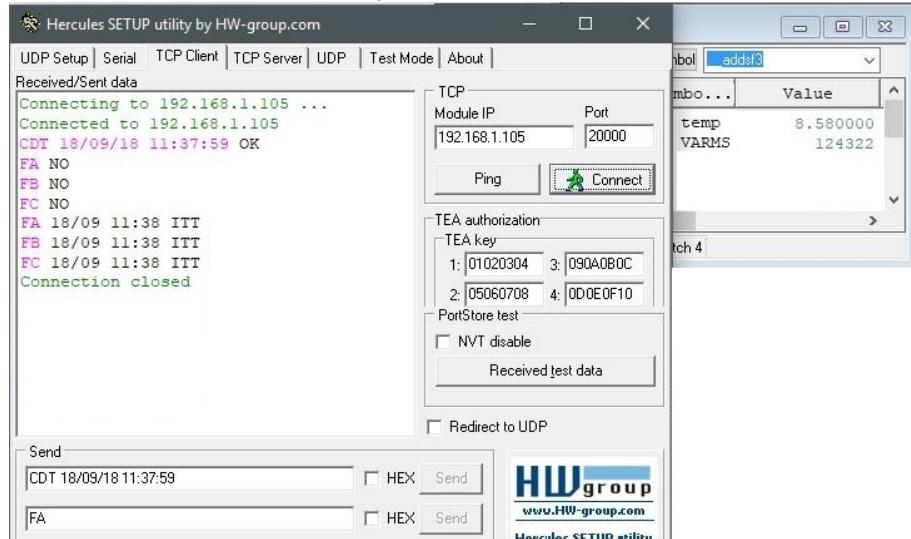
Os testes a seguir foram feitos para eventos de interrupção de tensão, ou seja, eventos em que a tensão remanescente fique abaixo de 0.1 p.u.. Além disso, foram testados eventos de interrupção momentânea de tensão, com duração igual ou inferior a três segundos, e eventos de interrupção temporária de tensão, com duração superior a três segundos e inferior a um minuto. As Figuras 28 e 29 ilustram os resultados desses testes.

Figura 28: Interrupção momenâneo de Tensão - 1.515 s



Fonte: Autoria Própria

Figura 29: Interrupção Temporária de Tensão - 8.580 s

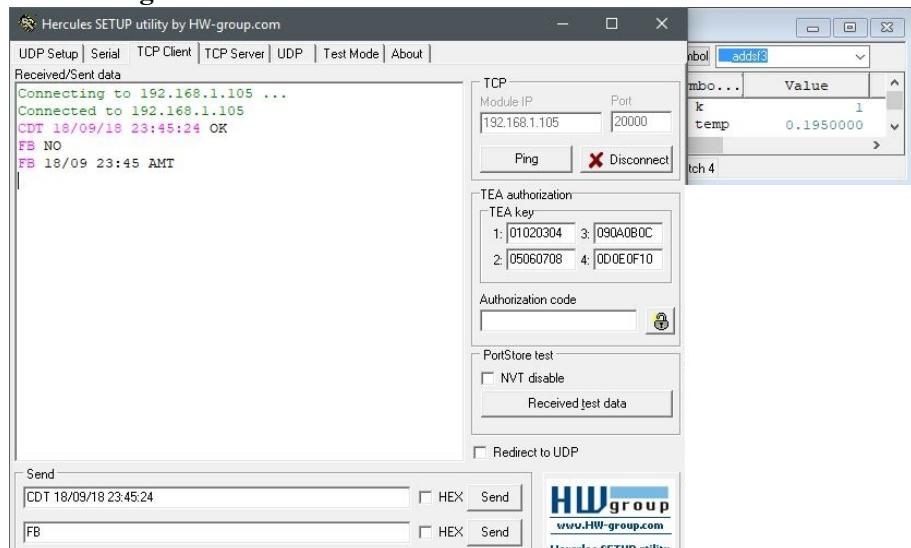


Fonte: Autoria Própria

5.2.2 AFUNDAMENTO MOMENTÂNEO DE TENSÃO

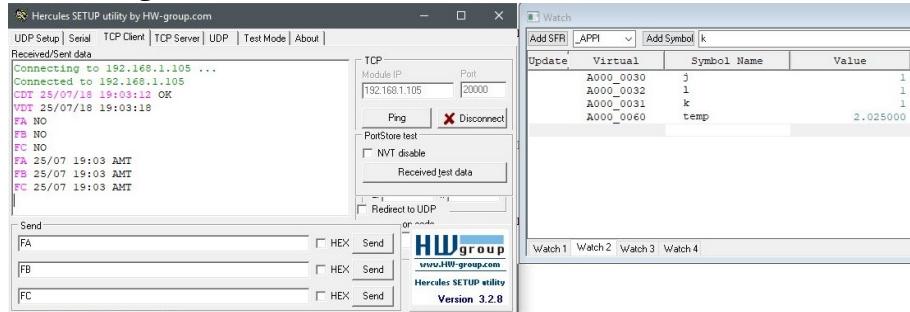
As figuras abaixo ilustram os testes de afundamento momentâneo de tensão, com duração superior ou igual a um ciclo (0.016 s) e inferior ou igual a três segundos e magnitude entre 0.1 e 0.9 p.u..

Figura 30: Afundamento momenâneo de Tensão - 0.195 s



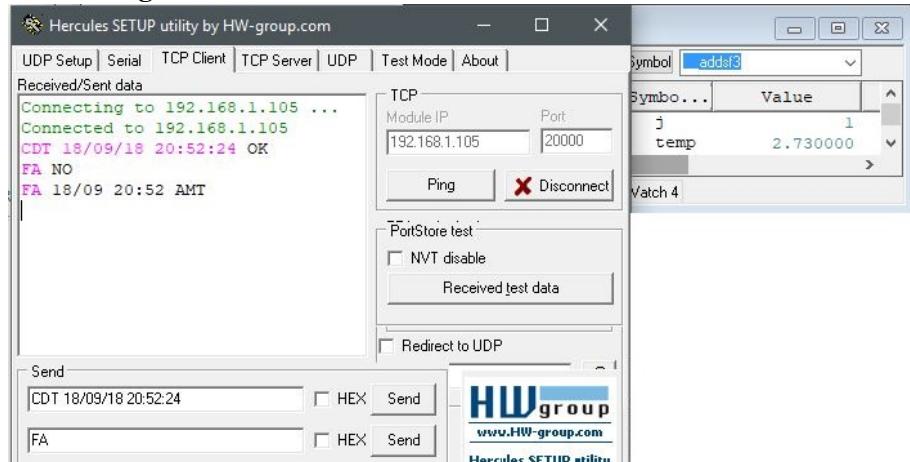
Fonte: Autoria Própria

Figura 31: Afundamento momenâneo de Tensão - 2.025 s



Fonte: Autoria Própria

Figura 32: Afundamento momenâneo de Tensão - 2.730 s

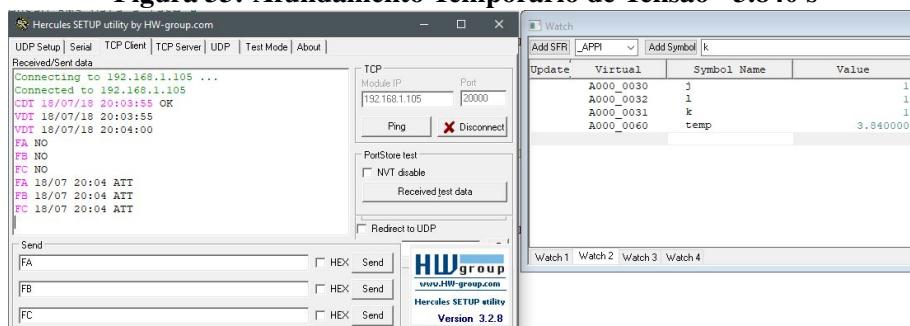


Fonte: Autoria Própria

5.2.3 AFUNDAMENTO TEMPORÁRIO DE TENSÃO

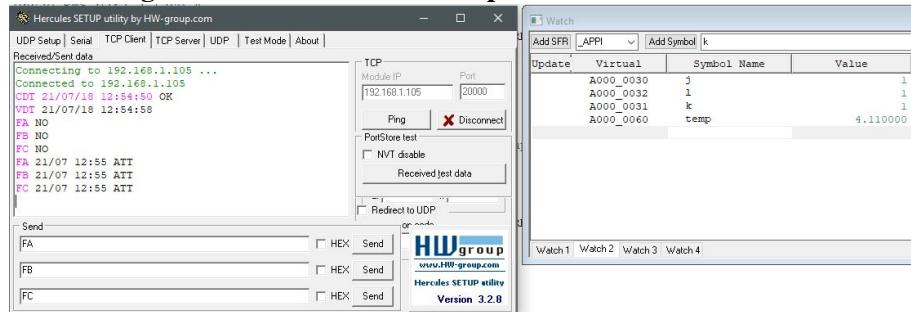
As Figuras 33 e 34 ilustram os testes de afundamento temporário de tensão feitos com o dispositivo. Nesse caso, a duração deve ser superior a três segundos e inferior a um minuto.

Figura 33: Afundamento Temporário de Tensão - 3.840 s



Fonte: Autoria Própria

Figura 34: Afundamento Temporário de Tensão - 4.110 s

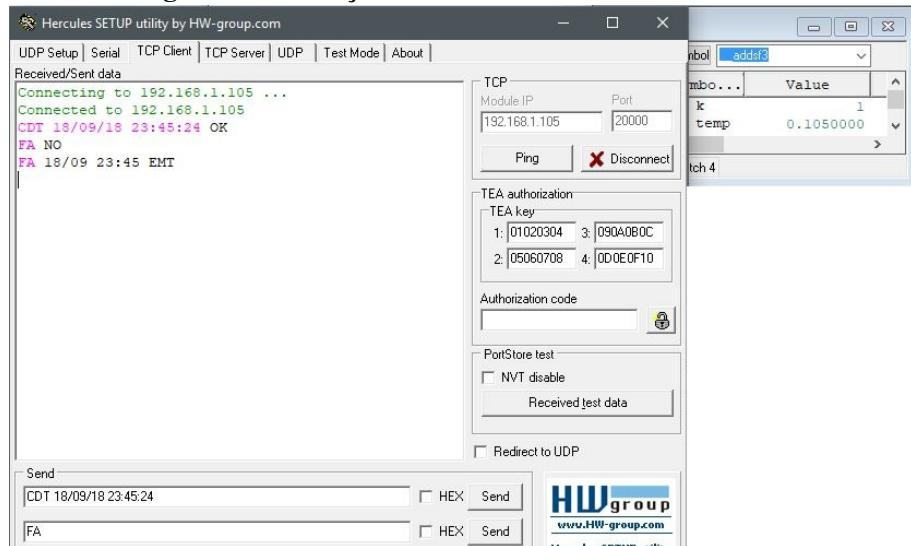


Fonte: Autoria Própria

5.2.4 ELEVAÇÃO MOMENTÂNEA DE TENSÃO

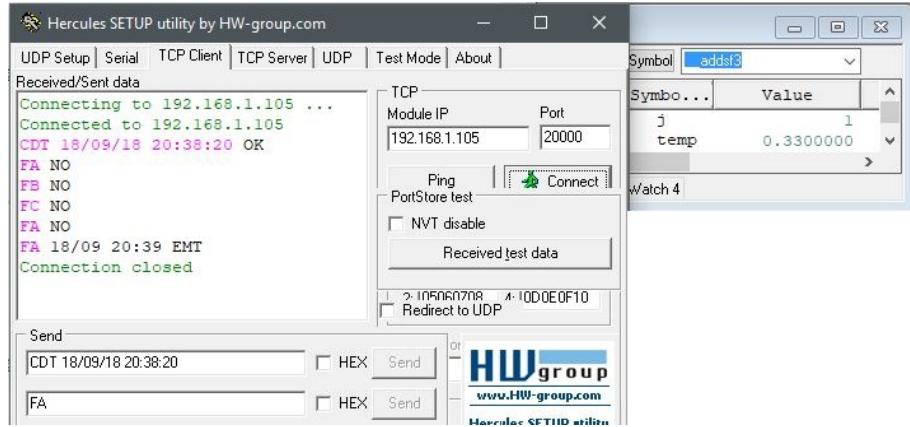
Os testes apresentados a seguir foram feitos para eventos de elevação momentânea de tensão. Nesses casos, a tensão remanescente deve estar acima de 1.1 p.u., e a duração deve ser superior ou igual a um ciclo (0.016 s) e inferior ou igual a três segundos.

Figura 35: Elevação Momentânea de Tensão - 0.105 s



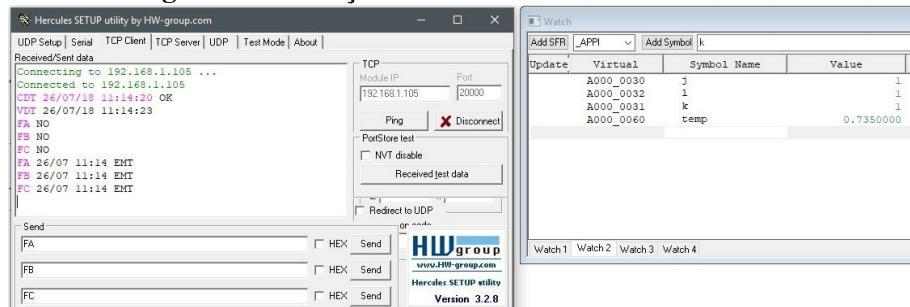
Fonte: Autoria Própria

Figura 36: Elevação Momentânea de Tensão - 0.330 s



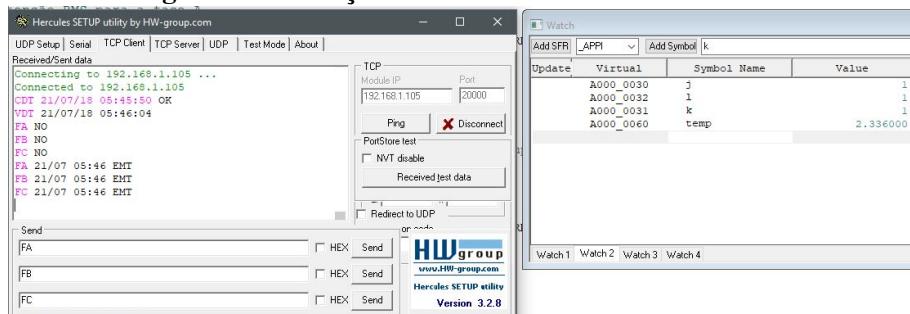
Fonte: Autoria Própria

Figura 37: Elevação Momentânea de Tensão - 0.735 s



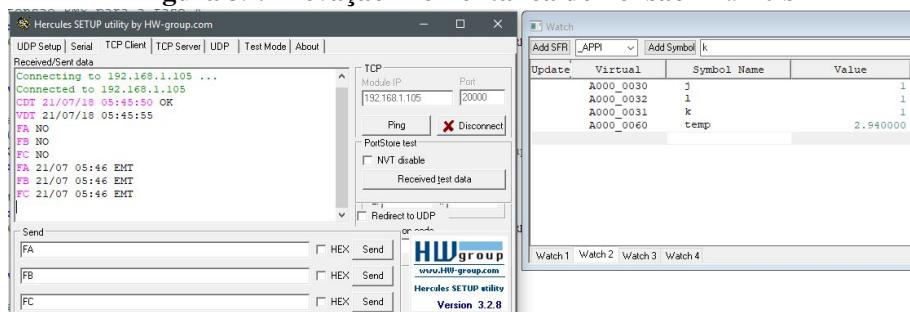
Fonte: Autoria Própria

Figura 38: Elevação Momentânea de Tensão - 2.336 s



Fonte: Autoria Própria

Figura 39: Elevação Momentânea de Tensão - 2.940 s

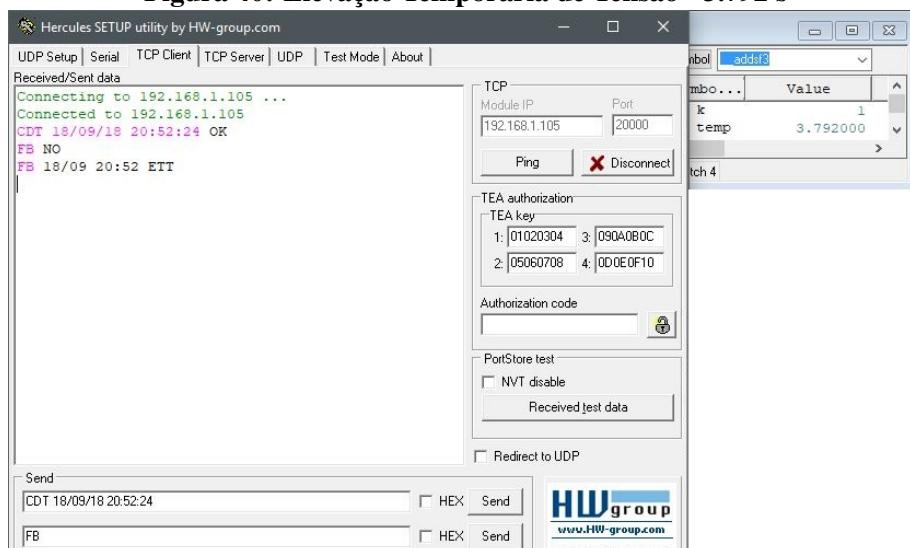


Fonte: Autoria Própria

5.2.5 ELEVAÇÃO TEMPORÁRIA DE TENSÃO

A Figura 40 ilustra um teste de elevação temporária de tensão, onde a duração deve ser igual ou superior a três segundos e inferior a um minuto.

Figura 40: Elevação Temporária de Tensão - 3.792 s



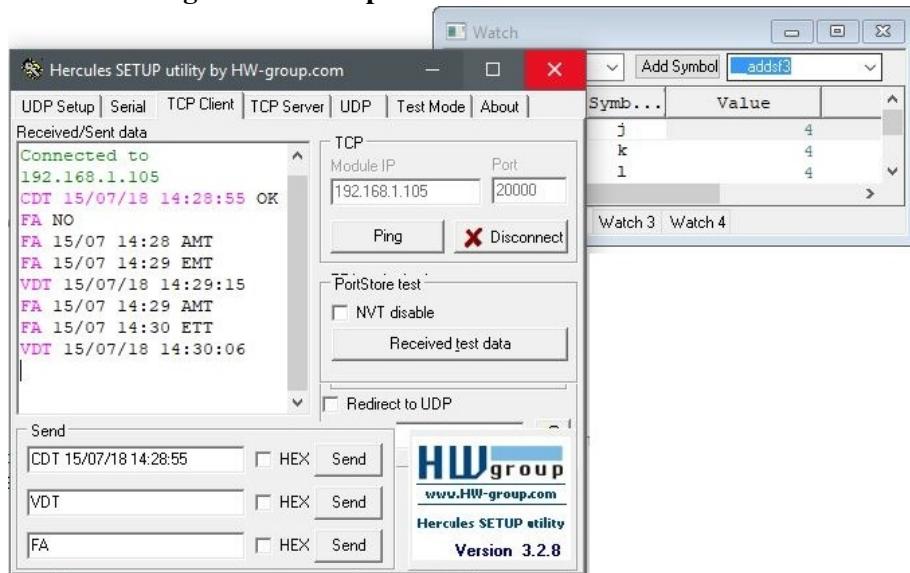
Fonte: Autoria Própria

5.2.6 TESTES PARA MÚLTIPLOS EVENTOS - BUFFER ROTATIVO

Os testes mostrados nas imagens abaixo foram feitos para analisar o comportamento do sistema na ocorrência de múltiplos eventos de variações de tensão de curta duração (interrupções, afundamentos e elevações) em sequência. Além disso, o objetivo era também mostrar o funcionamento do buffer rotativo, que salva um número pré-determinado de eventos (hora, data e tipo do evento).

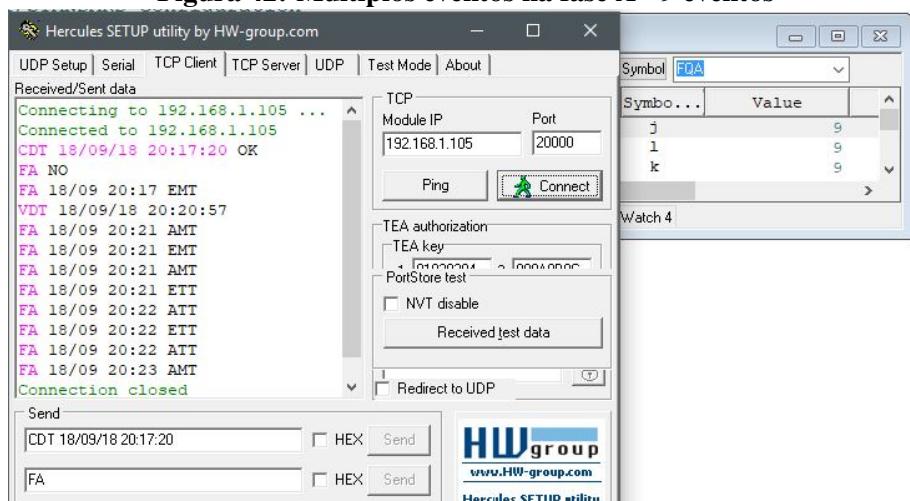
Para facilitar a realização dos testes, o número de eventos máximo para cada fase foi limitado para cerca de 10 eventos. Porém, a memória do microcontrolador permite o armazenamento de aproximadamente 5000 eventos por fase. Caso o número máximo seja atingido, os novos eventos começarão a ser salvos no lugar dos eventos mais antigos.

Figura 41: Multiplos eventos na fase A - 4 eventos



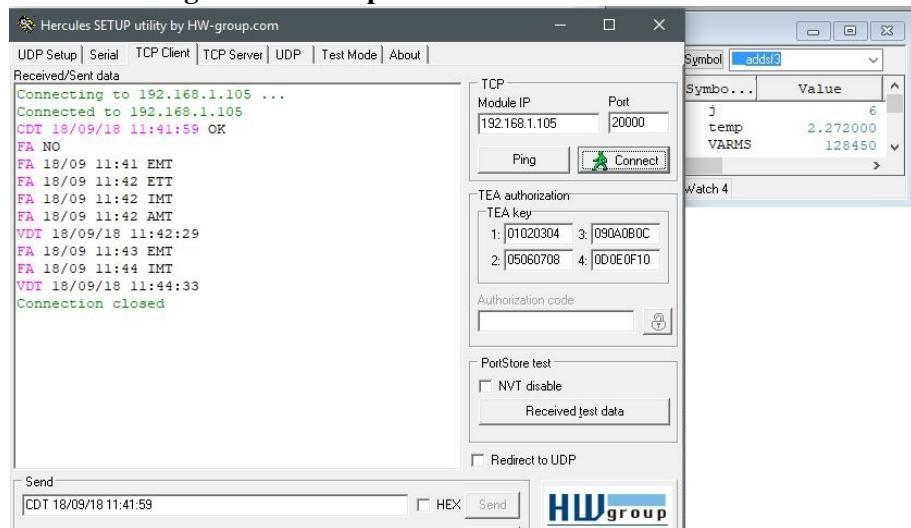
Fonte: Autoria Própria

Figura 42: Multiplos eventos na fase A - 9 eventos



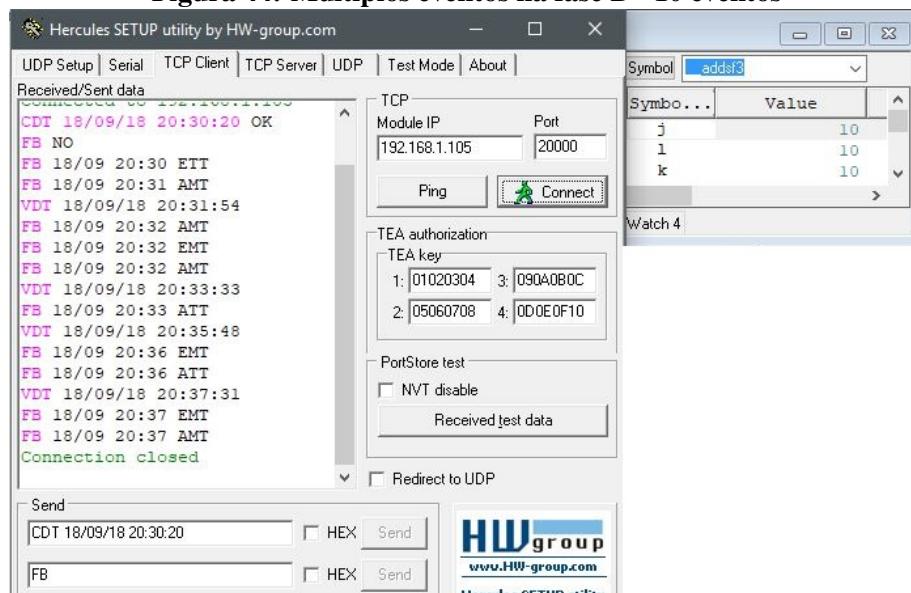
Fonte: Autoria Própria

Figura 43: Multiplos eventos na fase A - 6 eventos



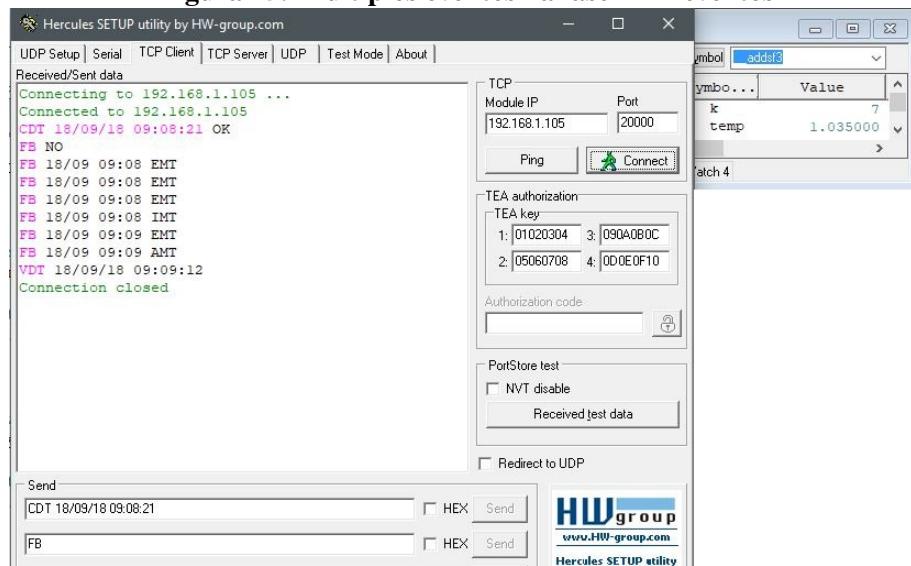
Fonte: Autoria Própria

Figura 44: Multiplos eventos na fase B - 10 eventos



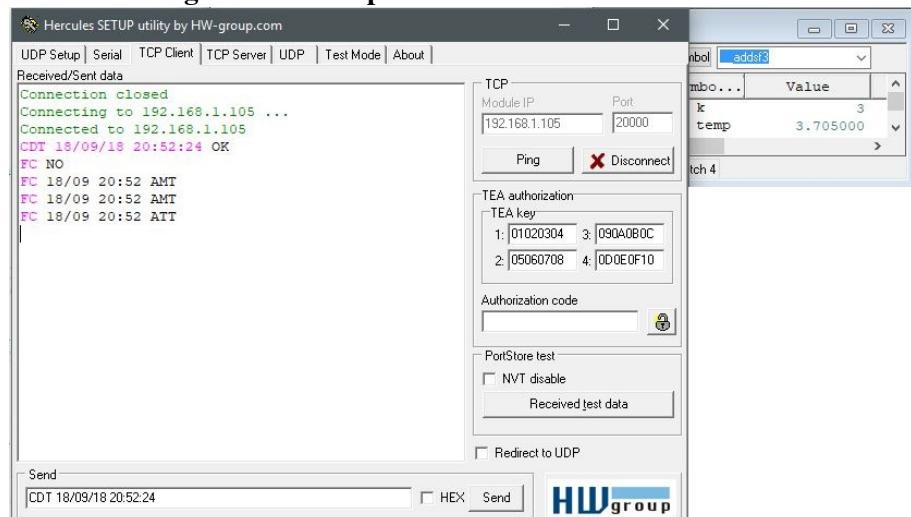
Fonte: Autoria Própria

Figura 45: Multiplos eventos na fase B - 7 eventos



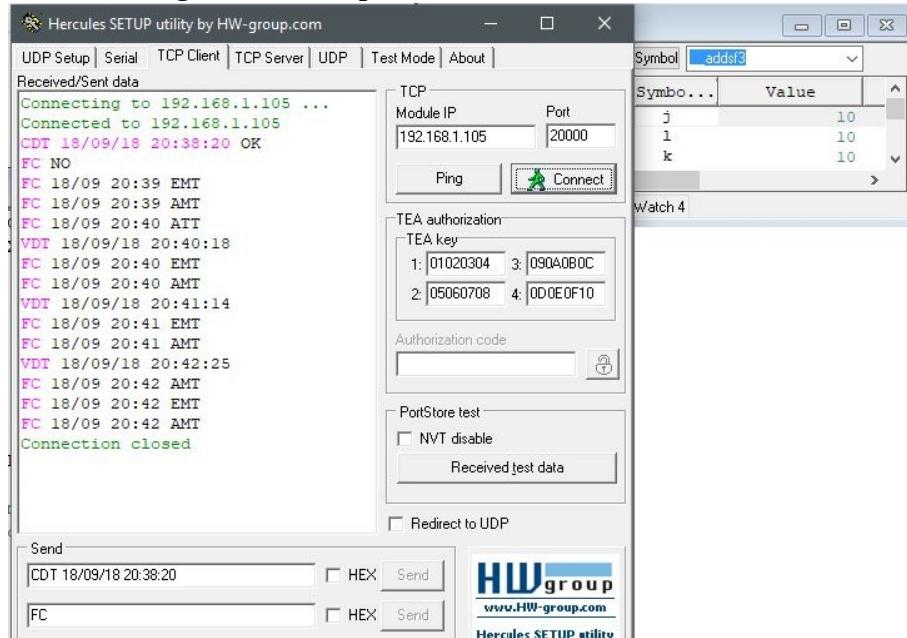
Fonte: Autoria Própria

Figura 46: Multiplos eventos na fase C - 3 eventos



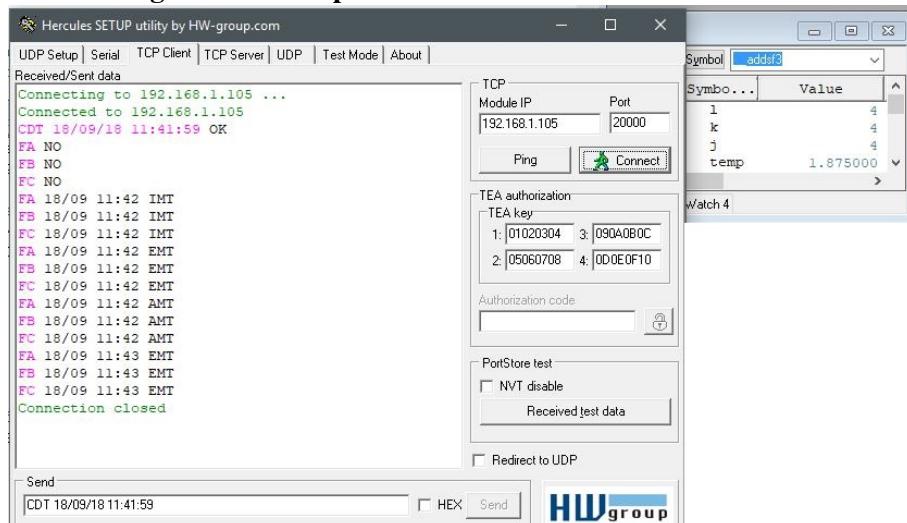
Fonte: Autoria Própria

Figura 47: Multiplos eventos na fase C - 10 eventos



Fonte: Autoria Própria

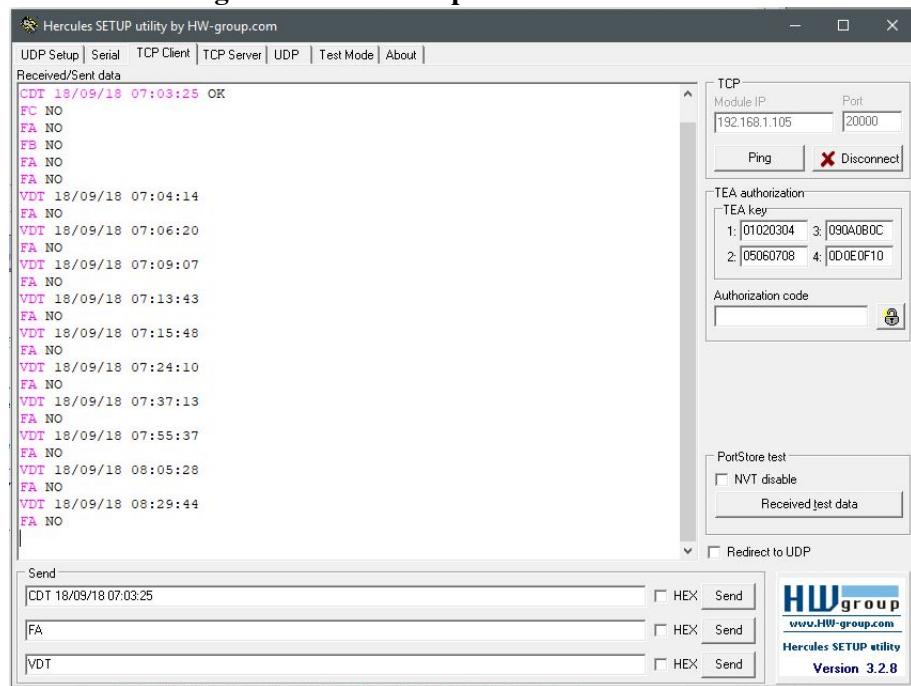
Figura 48: Multiplos eventos todas as fases - 10 eventos



Fonte: Autoria Própria

5.3 TESTE NA REDE ELÉTRICA

A Figura 49 ilustra um teste realizado diretamente na rede elétrica, sem o auxílio do variador de tensão monofásico. Através da checagem de hora do sistema com a mensagem VDT, é possível ver que o teste durou cerca de uma hora e meia.

Figura 49: Teste do aparelho na rede elétrica**Fonte: Autoria Própria**

6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho, como descrito na seção 1.2, era desenvolver um sistema capaz de detectar a ocorrência de todos os eventos de variações de tensão de curta duração descritos na tabela 2, salvando essa informação, juntamente com a data e a hora da ocorrência de cada evento, e disponibilizando-a online para o usuário através de uma rede Ethernet.

A partir dos resultados apresentados no capítulo 5, é possível afirmar que esse objetivo foi atingido de maneira satisfatória, assim como os objetivos específicos também mostrados na seção 1.2. Esses resultados, obtidos através dos testes realizados com o protótipo e um aparelho variador de tensão monofásico, mostram que o sistema é capaz de detectar e diferenciar eventos de interrupção, afundamento e elevação de tensão, assim como classificá-los de acordo com sua duração.

A comunicação entre o microcontrolador e o circuito integrado ADE7758, realizada através do protocolo de comunicação serial SPI descrito na seção , funcionou perfeitamente. A configuração das interrupções para cada uma das fases da rede e a leitura dos valores de tensão e frequência medidos pelo circuito integrado tiveram seu funcionamento comprovado nos testes do capítulo 5.

Os testes também mostraram que o sistema teve um bom desempenho para todos os tipos de eventos de VTCDs, sendo capaz de identificar interrupções, afundamentos e elevações. A classificação desses eventos quanto a sua duração também foi feita de maneira satisfatória, mesmo nos casos em que a duração foi muito próxima dos limiares.

A capacidade do sistema de salvar data e hora de cada ocorrência pode ser comprovada com a utilização do software *Hercules*. As mensagens CDT e VDT, descritas na seção 4.3, mostram isso. Os testes também comprovam o funcionamento do buffer rotativo, que salva um determinado número de eventos na memória do microcontrolador.

Por último, os testes realizados com o protótipo e o software *Hercules* também demonstraram o correto funcionamento da rede Ethernet em conjunto com a arquitetura TCP/IP. As respostas do dispositivo, configurado como "servidor", às requisições do terminal "TCP

Client, demonstram isso.

Após a conclusão deste trabalho, é possível destacar diversos pontos que podem ser explorados em trabalhos futuros:

- Um estudo aprofundado da classificação de severidade de VTCDs, definida pela Aneel. Essa severidade é calculada pela frequência de ocorrência de eventos de VTCD em um determinado período de tempo, levando-se em conta também os critérios de agregação de eventos consecutivos por faixas de amplitude e duração. A partir desse levantamento, é possível fazer uma correlação entre a sensibilidade de cargas conectadas à rede elétrica e a importância de cada evento de VTCD.
- Expandir o funcionamento do sistema de detecção para outros tipos de problemas de qualidade de energia, como harmônicos, variações de tensão de longa duração, flutuações na rede, etc.
- Conectar o sistema a um banco de dados, permitindo assim salvar as informações relativas ao eventos de VTCDs mesmo após o desligamento do dispositivo.
- Realizar testes individuais mais complexos em cada uma das fases da rede elétrica, permitindo uma análise mais detalhada da resposta do sistema para diferentes eventos de VTCDs ocorrendo simultaneamente em fases diferentes.
- Estudar uma configuração diferente para o sistema, com o microcontrolador programado como um cliente na rede TCP/IP, recebendo os eventos após sua ocorrência (e não requisitando a informação).
- Estudar a utilização de um microcontrolador de menor custo para o protótipo, tendo em vista que o uso de um modelo da família PIC32MX foi justificado no trabalho...

REFERÊNCIAS

- ANALOG DEVICES. Poly Phase Multifunction Energy Metering IC with Per Phase Information - ADE7758 Datasheet.** United States of America, 2011. Rev. E.
- ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) - Módulo 8 - Qualidade de Energia.** Brasília, 2017.
- ASSOCIATION, I. S. et al. 1159-2009. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality Industrial and Commercial Applications.** New York: IEEE Press, 2009.
- DILIGENT INCORPORATED. Cerebot MX7cK Board Reference Manual.** United States of America, 2013. Rev B.
- DUGAN, R. C. et al. Electrical power systems quality.** United States of America: McGraw-Hill, 2002.
- FERREIRA, D. D. et al.** Sistema automático de detecção e classificação de distúrbios elétricos em qualidade da energia elétrica. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática**, SciELO Brasil, v. 20, n. 1, p. 53–62, 2009.
- FITZER, C.; BARNES, M.; GREEN, P.** Voltage sag detection technique for a dynamic voltage restorer. In: **IEEE. Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the.** United States of America, 2002. v. 2, p. 917–924.
- FONSECA, V. R. d. C.** Cálculo estocástico do afundamento de tensão. **PPGEE-11199. PUC-MG**, Belo Horizonte, 1999.
- JNG. VARIADOR DE TENSÃO - Modelos: TDGC/TSCG.** São Paulo - SP, 2017.
- LEENS, F.** An introduction to i 2 c and spi protocols. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, IEEE, v. 12, n. 1, p. 8–13, 2009.
- LUNA, E. K. et al.** Uma contribuição ao estudo de vtcds aplicado a equipamentos eletrônicos alimentados por conversor ca-cc. [sn], 2005.
- MACHADO, R. N. d. M. et al.** Detecção, classificação e quantificação automática de variações de tensão de curta duração para aplicação em análise de pós-operação em sistemas de energia elétrica. Universidade Federal do Pará, 2006.
- MELO, M. O. B. C. de.** Avaliação do impacto da qualidade de energia elétrica na produção industrial: proposta de metodologia. **Produto & Produção**, v. 9, n. 3, 2008.
- MICROCHIP TECHNOLOGY INCORPORATED. The Microchip TCP/IP Stack.** United States of America, 2008b. Rev. C.
- MICROCHIP TECHNOLOGY INCORPORATED. PIC32MX5XX/6XX/7XX Family Data Sheet - High-Performance, USB, CAN and Ethernet 32-bit Flash Microcontrollers.** United States of America, 2011. Rev. E.

MICROCHIP TECHNOLOGY INCORPORATED. **Section 35 - Ethernet Controller DS60001155 Datasheet.** United States of America, 2013b. Rev. C.

POMILIO, J. A.; DECKMANN, S. Avaliação da qualidade da energia elétrica. **available in <http://www.fee.unicamp.br/dse/antenor/it012>,** 2017.

RAMASAMY, A. K. et al. Dynamic voltage restorer for voltage sag compensation. In: IEEE. **Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International Conference on.** United States of America, 2005. v. 2, p. 1289–1294.

REDE, P. de. Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da rede básica. **ONS,** Submódulo 2.8, Brasil, 2011.

SIMMONS, M. **Ethernet Theory of Operation.** United States of America, 2008. AN1120.

SOBRINHO, A. S. F. **Desenvolvimento de uma unidade de medição fasorial otimizada para sistemas de distribuição.** Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016.

TORRES, G. **Rede de Computadores. Edição Especial.** [S.l.]: Editora Axcel Books, 2001.