

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: Prof. Dr. André Sanches Fonseca
Sobrinho

CORNÉLIO PROCÓPIO

2018



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia de Controle e Automação



FOLHA DE APROVAÇÃO

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 apresentado às 15:30hs do dia 23/10/2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação no programa de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). André Sanches Fonseca Sobrinho - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Kleber Romero Felizardo - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Luis Fernando Caparroz Duarte - (Membro)

RESUMO

OLIVEIRA, G. T. G. Sistema de monitoramento de variações de tensão de curta duração em redes de distribuição de energia. 58 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 um aumento da complexidade das funções que cargas elétricas desempenham no controle dos processos, fez com que estes se tornassem 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, afundamentos ou elevações da tensão nominal da rede. Com isso, este trabalho tem como objetivo desenvolver 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 e clientes.

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

ABSTRACT

OLIVEIRA, G. T. G. . 58 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 an increase in the complexity of the functions that electric charges perform in the control of processes, 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 (momentary or temporary). Thus, the objective of this paper is the development of a robust, low-cost system, that performs the detection of the Short-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 and clients.

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	14
FIGURA 2	– Exemplo de Afundamento de Tensão	15
FIGURA 3	– Variação da tensão eficaz durante evento de interrupção	17
FIGURA 4	– Variação da tensão instantânea durante evento de interrupção	17
FIGURA 5	– Variação da tensão instantânea durante evento de afundamento	18
FIGURA 6	– Variação da tensão instantânea durante evento de afundamento	18
FIGURA 7	– Variação da tensão eficaz durante evento de elevação	19
FIGURA 8	– Variação da tensão instantânea durante evento de elevação	19
FIGURA 9	– Estrutura do equipamento	21
FIGURA 10	– Placa de desenvolvimento Cerebot MX7cK	22
FIGURA 11	– Diagrama do circuito da placa Cerebot MX7cK	23
FIGURA 12	– Placa para aquisição dos sinais de tensão	23
FIGURA 13	– Configuração de pinos do circuito integrado ADE7758	24
FIGURA 14	– Parte do esquemático da placa de medição trifásica	24
FIGURA 15	– Topologia da comunicação SPI - Um mestre e um escravo	26
FIGURA 16	– Topologia da comunicação SPI - Um mestre para um ou mais escravos .	26
FIGURA 17	– Esquemático da interface de comunicação e dos acopladores ópticos ...	27
FIGURA 18	– Face inferior da placa de medição trifásica	28
FIGURA 19	– Fluxograma apresentando a sequência de atividades feitas pelo sistema .	29
FIGURA 20	– IRQ	30
FIGURA 21	– Fluxograma do firmware da função getAVRMS	31
FIGURA 22	– Fluxograma da rotina de tratamento da interrupção do TIMER2	32
FIGURA 23	– Fluxograma da rotina de tratamento da interrupção do TIMER3	33
FIGURA 24	– Camadas do protocolo TCP/IP	35
FIGURA 25	– Estrutura da pilha TCP/IP da Microchip comparada com a arquitetura TCP/IP	36
FIGURA 26	– Rede com protocolo TCP/IP e padrão Ethernet	37
FIGURA 27	– Ethernet	37
FIGURA 28	– Hercules	38
FIGURA 29	– CDT	39
FIGURA 30	– VDT	40
FIGURA 31	– FA	40
FIGURA 32	– Variador de Tensão Monofásico TDGC2-0,5	41
FIGURA 33	– Ligação do dispositivo para realização dos testes de variação de tensão .	42
FIGURA 34	– Interrupção momentânea de Tensão - 1.515 s	43
FIGURA 35	– Interrupção Temporária de Tensão - 8.580 s	43
FIGURA 36	– Afundamento momentâneo de Tensão - 0.195 s	44
FIGURA 37	– Afundamento momentâneo de Tensão - 2.025 s	44
FIGURA 38	– Afundamento momentâneo de Tensão - 2.730 s	45
FIGURA 39	– Afundamento Temporário de Tensão - 3.840 s	45
FIGURA 40	– Afundamento Temporário de Tensão - 4.110 s	45
FIGURA 41	– Elevação Momentânea de Tensão - 0.105 s	46

FIGURA 42	– Elevação Momentânea de Tensão - 0.330 s	46
FIGURA 43	– Elevação Momentânea de Tensão - 0.735 s	47
FIGURA 44	– Elevação Momentânea de Tensão - 2.336 s	47
FIGURA 45	– Elevação Momentânea de Tensão - 2.940 s	47
FIGURA 46	– Elevação Temporária de Tensão - 3.792 s	48
FIGURA 47	– Múltiplos eventos na fase A - 4 eventos	49
FIGURA 48	– Múltiplos eventos na fase A - 9 eventos	49
FIGURA 49	– Múltiplos eventos na fase A - 6 eventos	50
FIGURA 50	– Múltiplos eventos na fase B - 10 eventos	50
FIGURA 51	– Múltiplos eventos na fase B - 7 eventos	51
FIGURA 52	– Múltiplos eventos na fase C - 3 eventos	51
FIGURA 53	– Múltiplos eventos na fase C - 10 eventos	52
FIGURA 54	– Múltiplos eventos todas as fases - 10 eventos	52
FIGURA 55	– Teste do aparelho na rede elétrica	53

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Limites para redes 127/220V	14
TABELA 2	– Variações de Tensão de Curta Duração	16
TABELA 3	– Características elétricas e físicas	21
TABELA 4	– Fatores de conversão para cálculo da tensão RMS	30
TABELA 5	– Timers utilizados para classificação das VTCD	32
TABELA 6	– Especificação Técnica - Variador de Tensão Monofásico TDGC2-0,5 ..	41
TABELA 7	– Variáveis apresentadas nos testes	42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 PROBLEMA	10
1.2 OBJETIVOS	11
1.2.1 Objetivo Geral	11
1.2.2 Objetivos Específicos	11
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	11
2 NORMAS E REGRAS PARA CLASSIFICAÇÃO DE VARIAÇÕES DE TENSÃO	
DE CURTA DURAÇÃO	13
2.1 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO	13
2.1.1 Faixa de Operação da Tensão	13
2.1.2 Amplitude e Duração de eventos de VTCDS	14
2.2 EVENTOS DE VTCDS	16
2.2.1 Interrupção de Tensão	16
2.2.2 Afundamento de Tensão	17
2.2.3 Elevação de Tensão	18
3 SISTEMA DE DETECÇÃO DE VTCDS	20
3.1 PROPOSTA DO TRABALHO	20
3.2 DESCRIÇÃO DO HARDWARE UTILIZADO	20
3.2.1 Microcontrolador PIC32MX795F512L	21
3.2.2 Placa de Medição Trifásica	23
3.2.3 Interface de Comunicação	25
3.3 FIRMWARE	28
3.3.1 Aquisição da tensão RMS da rede elétrica	29
3.3.2 Classificação dos eventos de VTCD	32
3.3.3 Buffer rotativo	34
4 TROCA DE DADOS	35
4.1 ARQUITETURA DA REDE	35
4.1.1 Protocolo TCP/IP	35
4.1.2 Comunicação Ethernet	36
4.2 TRANSMISSÃO DE DADOS	37
4.3 MENSAGENS	38
4.3.1 Configure Date and Time - CDT	38
4.3.2 Verify Date and Time - VDT	39
4.3.3 FA, FB e FC	40
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES	41
5.2 TESTES DE EVENTOS DE VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO	42
5.2.1 Interrupção de Tensão	43
5.2.2 Afundamento Momentâneo de Tensão	44
5.2.3 Afundamento Temporário de Tensão	45
5.2.4 Elevação Momentânea de Tensão	46

5.2.5 Elevação Temporária de Tensão	47
5.2.6 Testes para múltiplos eventos - buffer rotativo	48
5.3 TESTE NA REDE ELÉTRICA	52
6 CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Amplamente debatido nas últimas décadas, o tema da qualidade de energia tem ganhado 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 na 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 (POMILIO; DECKMANN, 2017).

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. Meena et al. (2011) apresenta um método para detecção em tempo real de afundamentos e elevações de tensão de curta duração através do monitoramento da tensão RMS em redes de distribuição de energia monofásicas. O algoritmo proposto foi modelado e testado no software *Matlab*.

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 do firmware de um sistema de detecção de variações de tensão de curta duração, utilizando como hardware o protótipo feito em Sobrinho (2016).

Como diferencial, a detecção será feita com um microcontrolador PIC e um circuito integrado ADE7758, e as informações completas sobre o tipo e data das ocorrências estarão

disponíveis online para consulta.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento do firmware para um sistema de detecção de variações de tensão de curta duração (VTCD) 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:

- Configurar 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;
- Programar 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 variações de tensão de curta duração, 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 (VTCD). Cada tipo de evento de VTCD é explicado de acordo com os critérios de amplitude 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 hardware, como microcontrolador, caixa plástica de proteção, circuito integrado e placa de medição, assim como o desenvolvimento do firmware e 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.

No capítulo 5 são apresentados os testes feitos com o Sistema de Monitoramento de Variações de Tensão de Curta Duração, ilustrando os resultados obtidos levando-se em conta os diferentes tipos de eventos (duração e amplitude).

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas a partir dos resultados mostrados no capítulo 5, assim como uma discussão a respeito de ideias para 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

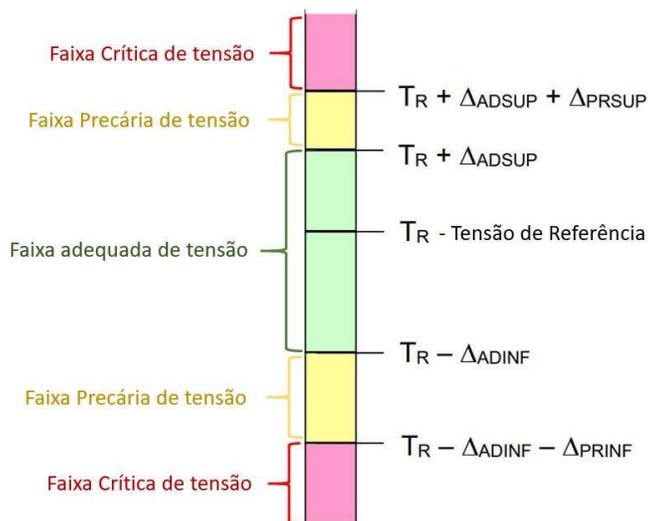
As Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) são desvios significativos no valor eficaz da tensão. Diversas causas podem ser apontadas para explicar a ocorrência desses eventos, sendo que algumas das principais são condições de falta, energização de grandes cargas que demandam correntes altas de partida, 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 ou 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).

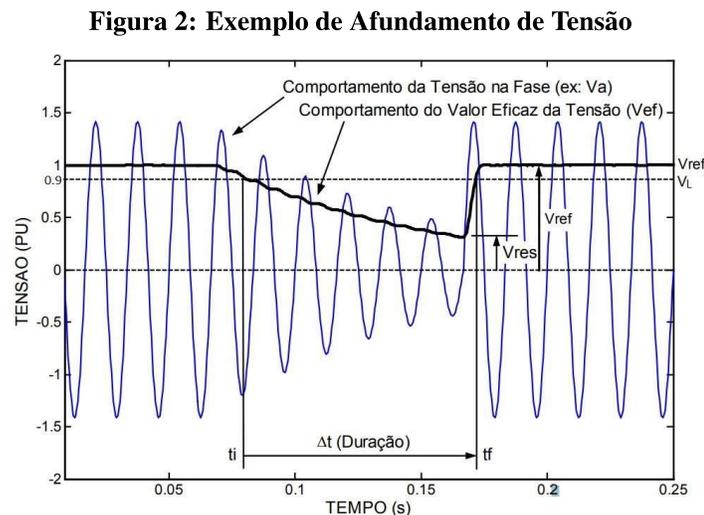
$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}}(pu) \quad \text{ou} \quad V_e\% = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \cdot 100(\%) \quad (1)$$

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 classificação para duração que será considerada neste trabalho é a da norma brasileira, definida em ANEEL (2017) como sendo de um ciclo da rede, no mínimo, a três minutos, no máximo. 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).

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:

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



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 Momentâneo 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

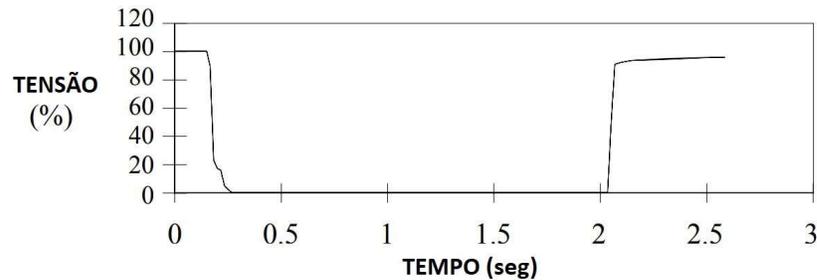
Será apresentada a seguir uma descrição detalhada de cada tipo de evento de variação de tensão de curta duração, de acordo com os conceitos de amplitude e duração.

2.2.1 INTERRUPÇÃO DE TENSÃO

A interrupção ocorre quando a amplitude da tensão atinge 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 (IEEE STD 1159-2009, 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.

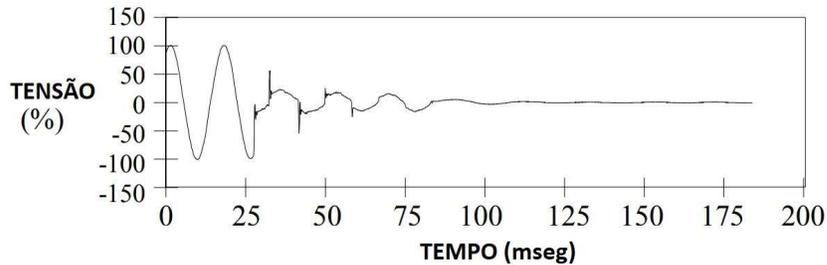
Figura 3: Variação da tensão eficaz durante evento de interrupção



Fonte: Adaptado de IEEE Std 1159-2009 (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 (IEEE STD 1159-2009, 2009).

Figura 4: Variação da tensão instantânea durante evento de interrupção



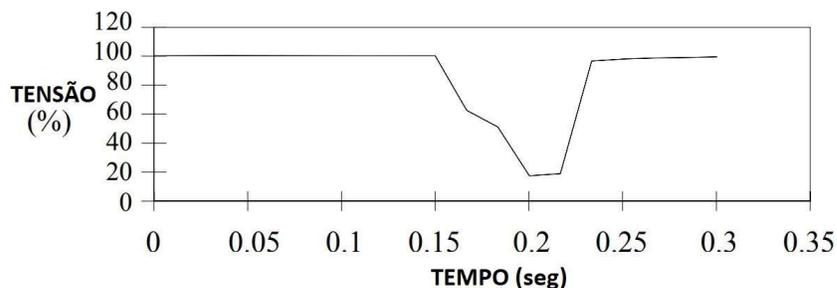
Fonte: Adaptado de IEEE Std 1159-2009 (2009)

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 (IEEE STD 1159-2009, 2009).

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

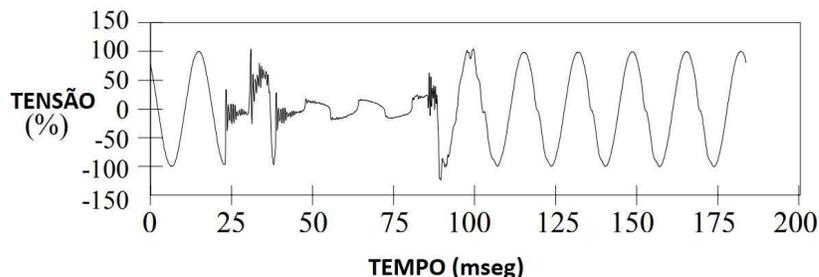
Figura 5: Variação da tensão instantânea durante evento de afundamento



Fonte: Adaptado de IEEE Std 1159-2009 (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 (IEEE STD 1159-2009, 2009).

Figura 6: Variação da tensão instantânea durante evento de afundamento

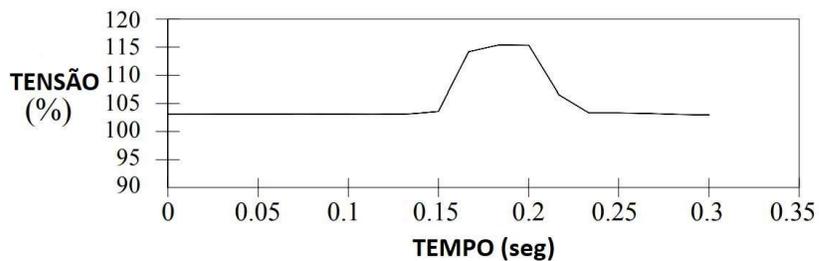


Fonte: Adaptado de IEEE Std 1159-2009 (2009)

2.2.3 ELEVAÇÃO DE TENSÃO

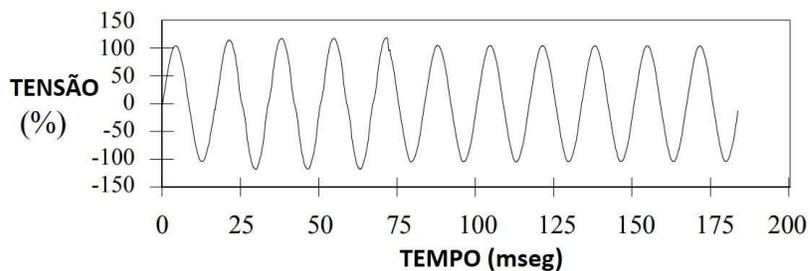
A elevação de tensão é definida por um aumento na tensão eficaz acima de 1,1 pu, com duração descrita na tabela 2. Assim como no afundamento, sua ocorrência está associada à condições de falhas no sistema, desligamento de grandes cargas ou bancos de capacitores (IEEE STD 1159-2009, 2009).

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 IEEE Std 1159-2009 (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 IEEE Std 1159-2009 (2009)

3 SISTEMA DE DETECÇÃO DE VTCDS

3.1 PROPOSTA DO TRABALHO

Como descrito na seção 1.2 do capítulo 1, o foco deste trabalho é o desenvolvimento do firmware para um sistema de detecção de variações de tensão de curta duração em redes de distribuição de energia, utilizando o hardware desenvolvido em Sobrinho (2016).

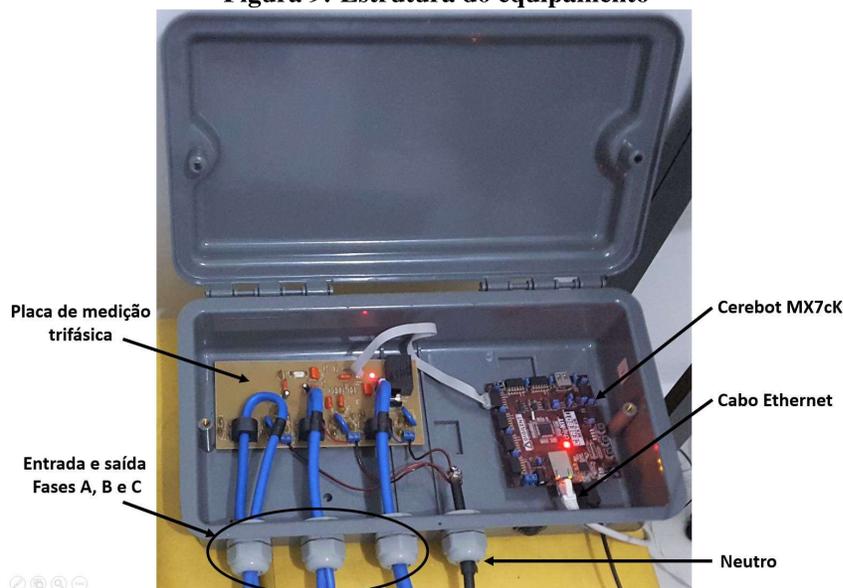
O Sistema de Monitoramento de Variações de Tensão de Curta Duração proposto tem como objetivo fornecer uma ferramenta robusta e de baixo custo, que permita a medição da qualidade da energia elétrica fornecida pelas concessionárias de energia através da detecção da ocorrência de eventos de variação de 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 DESCRIÇÃO DO HARDWARE UTILIZADO

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

Entre as principais vantagens para a utilização deste equipamento estão sua robustez e o baixo custo de seus componentes. Sobrinho (2016) mostra que, em uma versão final do produto, a placa de desenvolvimento Cerebot MX7cK (que será descrita mais adiante neste capítulo), pode ser substituída por componentes mais baratos e que desempenham apenas as funcionalidades necessárias. Além disso, seu uso permitiu que o foco deste trabalho fosse dado ao desenvolvimento do firmware do sistema.

Na Figura 9 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 9: 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)

3.2.1 MICROCONTROLADOR PIC32MX795F512L

O protótipo conta com um 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

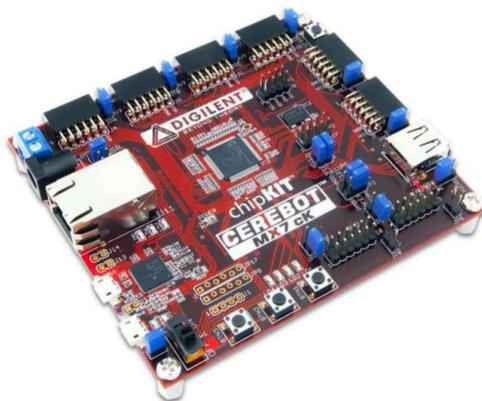
de operação de tensão de 2,3 V a 3,6 V (MICROCHIP TECHNOLOGY INCORPORATED, 2011).

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 10: Placa de desenvolvimento Cerebot MX7cK

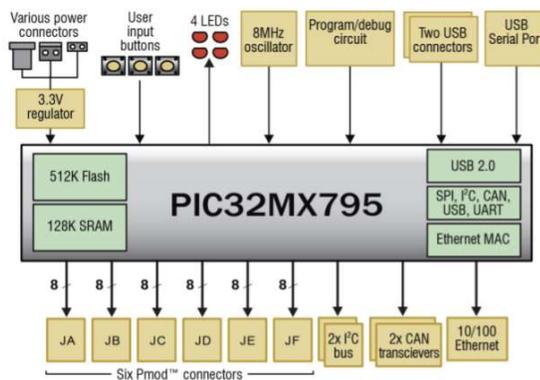


Fonte: Diligent Incorporated (2013)

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 11:

Figura 11: Diagrama do circuito da placa Cerebot MX7cK

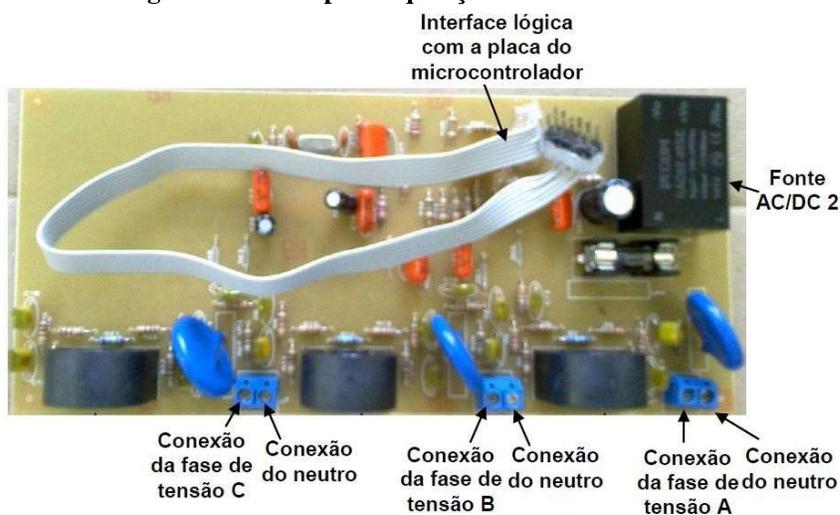


Fonte: Diligent Incorporated (2013)

3.2.2 PLACA DE MEDIÇÃO TRIFÁSICA

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 12, 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.

Figura 12: Placa para aquisição dos sinais de tensão

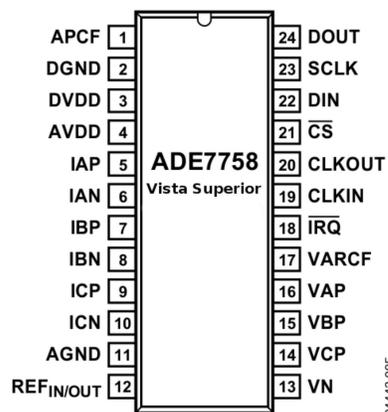


Fonte: Adaptado de Sobrinho (2016)

O ADE7758, circuito integrado fabricado pela empresa *Analog Devices*, é um medidor

de energia elétrica trifásico de alta precisão, com interface serial compatível com o protocolo SPI, alimentação de 5V e entrada analógica para cada um dos três canais de corrente e três canais de tensão (ANALOG DEVICES, 2011). Esse circuito integrado é responsável pela conversão analógico-digital dos sinais lidos pelos três canais de tensão, disponibilizando então o valor eficaz da tensão da rede para o microcontrolador.

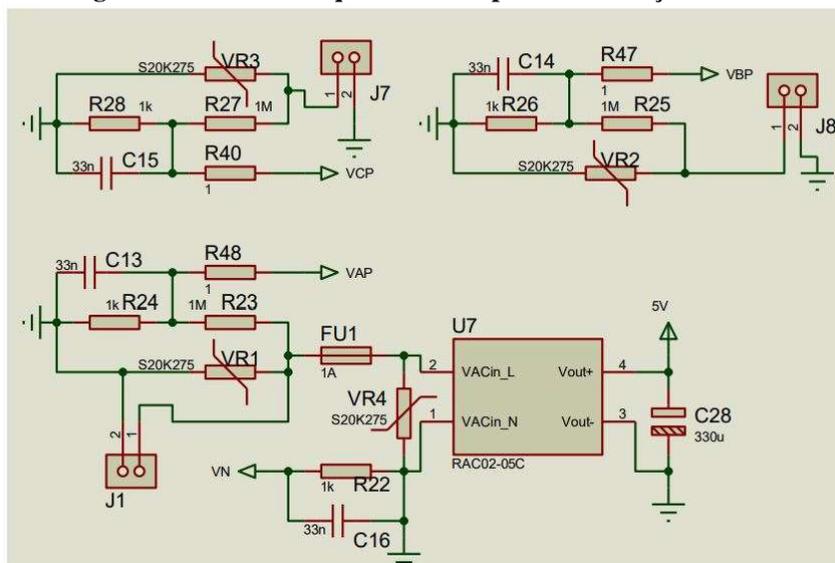
Figura 13: Configuração de pinos do circuito integrado ADE7758



Fonte: Adaptado de Analog Devices (2011)

A Figura 14 ilustra o esquemático dos circuitos que realizam a interface entre os canais de tensão do circuito integrado ADE7758 e os sinais de tensão provenientes da rede elétrica na placa de medição trifásica.

Figura 14: Parte do esquemático da placa de medição trifásica



Fonte: Sobrinho (2016)

Os conectores J1, J7 e J8 conectam as três fases da tensão à placa, e os divisores resistivos R23/R24, R25/R26 e R27/R28 fazem a atenuação da tensão de entrada para os limites adequados ao conversor A/D do circuito integrado. Os capacitores presentes nas saídas dos divisores funcionam, em conjunto com os resistores, como filtros *anti-aliasing* (SOBRINHO, 2016).

A Equação (3) expressa essa relação de atenuação, 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.

Na Figura 14 é possível observar também uma fonte AC/DC modelo RAC02-05SC e seu circuito de proteção. Segundo Sobrinho (2016), o objetivo deste componente é alimentar individualmente o circuito integrado ADE7758 pois, para seu correto funcionamento, o sinal *Ground DC* da fonte AC/DC deve ser acoplado diretamente ao sinal "Neutro" da rede elétrica.

3.2.3 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).

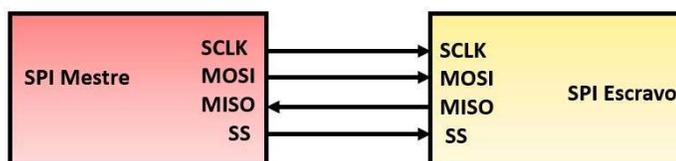
O protocolo SPI usa uma topologia mestre-escravo, onde um dispositivo "mestre" envia e requisita dados de um ou mais dispositivos "escravos". A comunicação se dá em quatro linhas de sinal (*four wire serial bus*):

- 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.

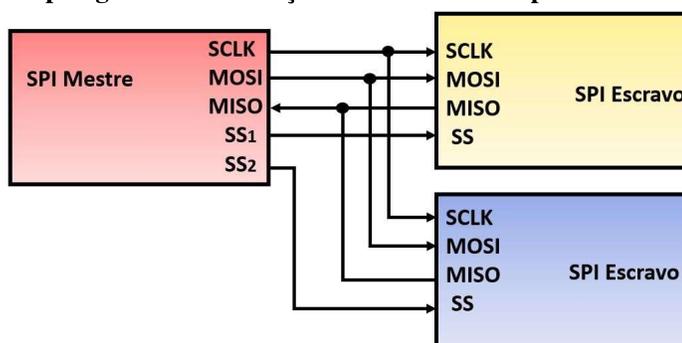
A Figura 15 ilustra a configuração da interface de comunicação SPI, com suas quatro linhas de sinal, em um sistema com um mestre e um escravo, enquanto na Figura 16 é possível ver como se dá a expansão dessa configuração para múltiplos dispositivos escravos.

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



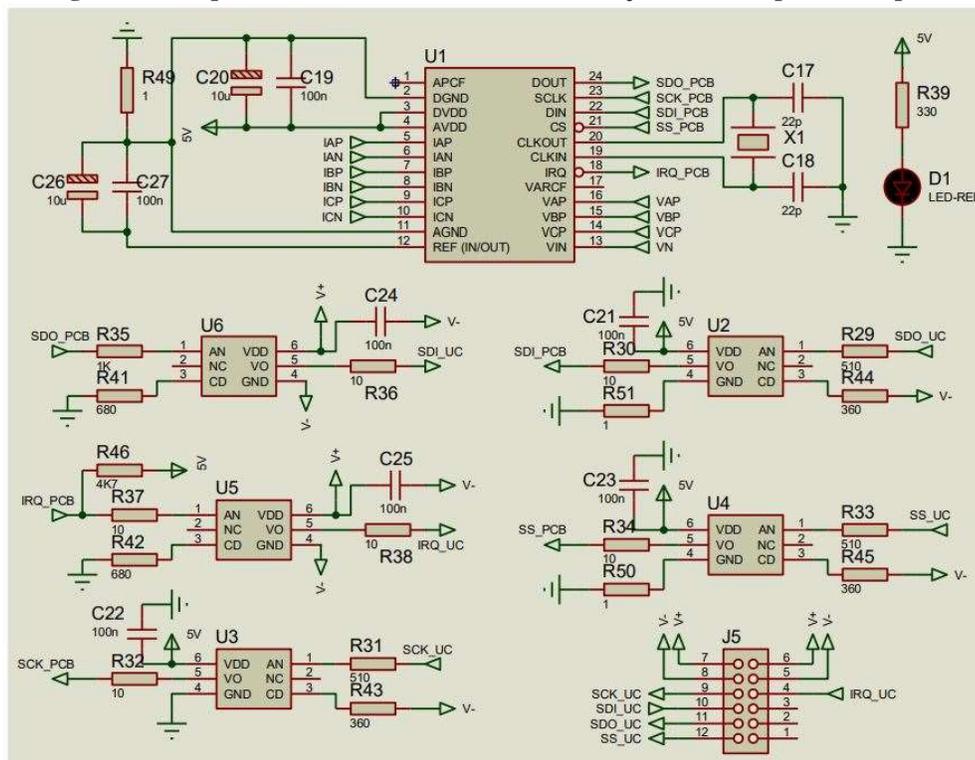
Fonte: Autoria Própria

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.

Sobrinho (2016) explica que a interface de comunicação entre a placa de medição trifásica e a placa do microcontrolador foi eletricamente desacoplada através de acopladores

ópticos. Isso foi feito para evitar danos nos componentes da placa do microcontrolador, cujo sinal *Ground DC* é também proveniente da porta USB e da conexão Ethernet de um computador, utilizado para a programação do microcontrolador.

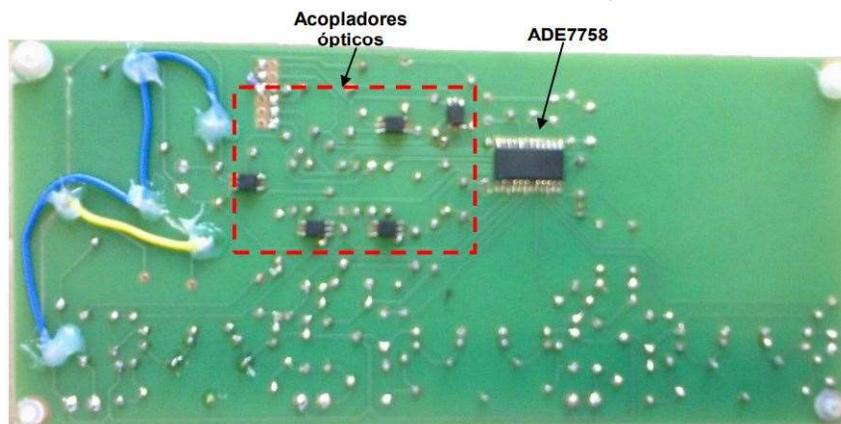
Figura 17: Esquemático da interface de comunicação e dos acopladores ópticos



Fonte: (SOBRINHO, 2016)

A Figura 17 ilustra o esquemático dos acopladores ópticos (U2 a U6) e a interface de comunicação SPI entre o circuito integrado ADE7758 (U1) e a placa do microcontrolador (J5). As características desses acopladores garantem sua utilização nos sinais da comunicação SPI (SCLK, MOSI, MISO e SS). Um quinto acoplador foi utilizado junto ao sinal gerado pelo pino IRQ do circuito integrado ADE7758, que será explicado na seção 3.3.1 (SOBRINHO, 2016).

Figura 18: Face inferior da placa de medição trifásica



Fonte: (SOBRINHO, 2016)

Na Figura 18 é possível observar a face inferior da placa de medição trifásica, assim como os acopladores ópticos mencionados anteriormente e o circuito integrado ADE7758.

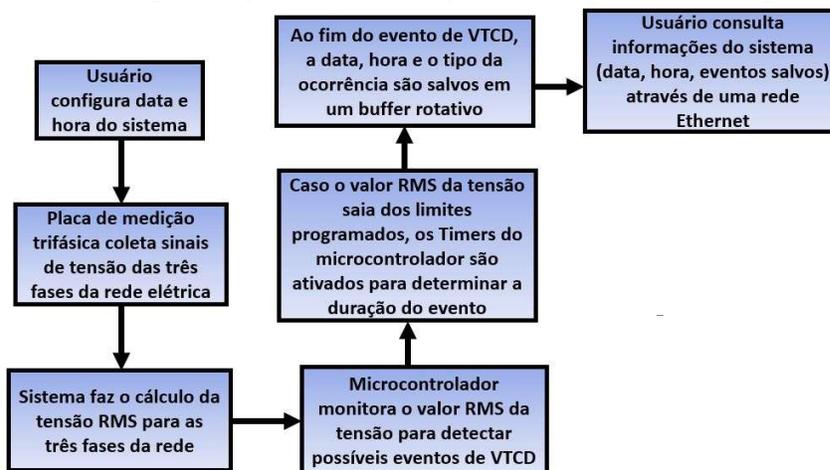
3.3 FIRMWARE

O firmware do dispositivo foi desenvolvido de maneira que o protótipo realiza-se a 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 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 eventos são salvas, juntamente com o tipo do evento, na memória RAM do microcontrolador.
- Disponibilização das informações salvas pelo sistema em um buffer rotativo para consulta pelo usuário através de uma rede Ethernet.

A figura 19 ilustra um fluxograma com as atividades desempenhadas pelo Sistema de Monitoramento de Variações de Tensão de Curta Duração.

Figura 19: Fluxograma apresentando a sequência de atividades feitas pelo sistema



Fonte: Autoria Própria

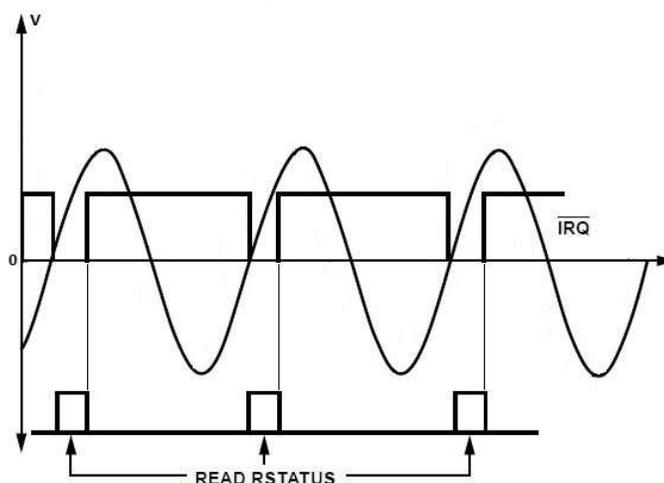
3.3.1 AQUISIÇÃO DA TENSÃO RMS DA REDE ELÉTRICA

O valor eficaz da tensão das três fases da rede fica armazenado em um dos registradores de 24 bits disponíveis no ADE7758: AVRMS (0x0D), BVRMS (0x0E) e CVRMS (0x0F). Uma interrupção com o TIMER2 foi então programada para ocorrer a cada 100 ms, tempo necessário para garantir a confiabilidade dos valores lidos nos registradores (ANALOG DEVICES, 2011). Na rotina de tratamento da interrupção são calculados os valores eficazes das três fases da tensão.

De acordo com o Datasheet do ADE7758, para garantir a estabilidade da medida é recomendável realizar a leitura em sincronia com o início da onda da tensão. Para que isso 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 20 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 20: 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)

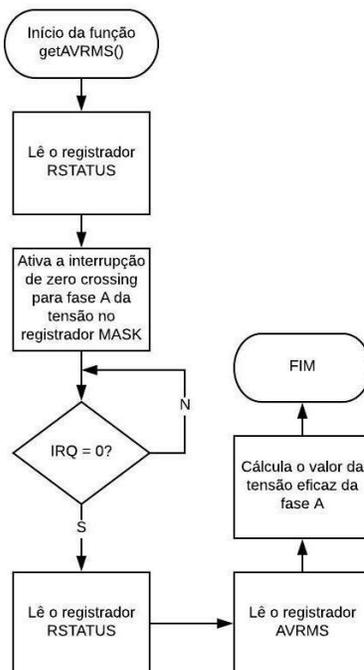
O cálculo da tensão RMS é feito da seguinte maneira:

- 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 (*zero crossing*).
- O sistema aguarda a ocorrência da interrupção monitorando o pino IRQ, que é conectado ao pino RD12 do microcontrolador.
- 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.

A partir dos passos descritos acima, foram desenvolvidas três funções, uma para cada fase da tensão, que calculam os valores de tensão eficaz: getAVRMS, getBVRMS e getCVRMS. A Figura 21 ilustra o funcionamento da função getAVRMS.

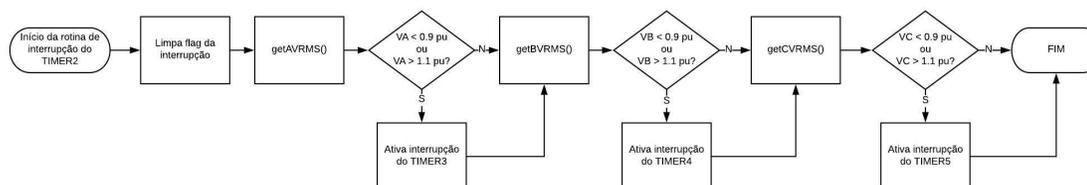
Figura 21: Fluxograma do firmware da função getAVRMS



Fonte: Autoria própria

Assim, o funcionamento completo da rotina de tratamento da interrupção do TIMER2 é ilustrado na Figura 22.

Figura 22: Fluxograma da rotina de tratamento da interrupção do TIMER2



Fonte: Autoria própria

3.3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS EVENTOS DE VTCD

Após o cálculo da tensão eficaz das três fases da tensão, é feito o monitoramento do valor 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 no Timer 3, 4 ou 5, dependendo da fase em que ocorrer o evento. A periodicidade da interrupção gerada por cada um dos timers, assim como sua respectiva fase, são apresentados na 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

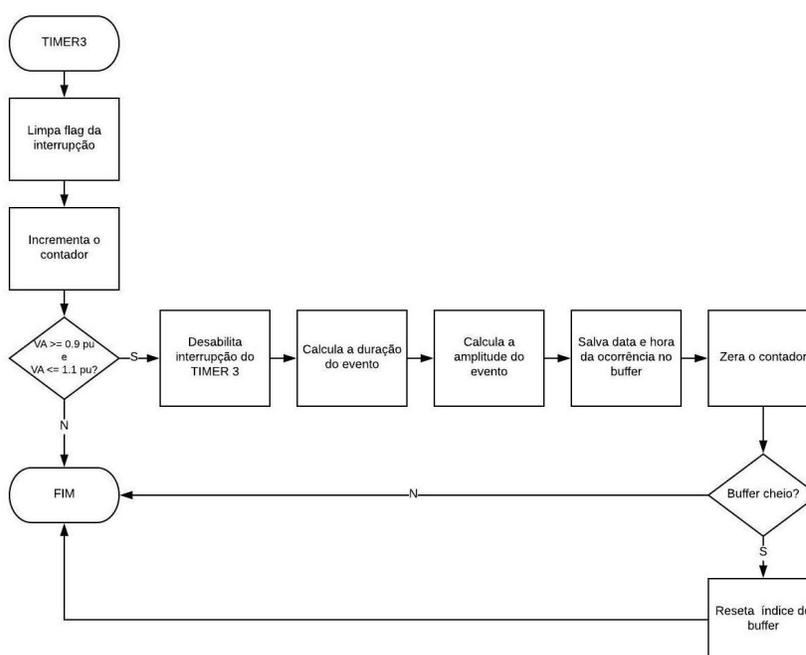
O período de interrupção dos Timers 3, 4 e 5 foi escolhido de maneira a permitir uma verificação do limite inferior de duração de afundamentos e elevações momentâneas, que é de um ciclo da rede. Nesse caso, para uma rede de 60 Hz, um ciclo leva aproximadamente 16.67 ms.

Na rotina de tratamento de cada uma das interrupção há um contador, que é incrementado sempre que uma nova interrupção é gerada. Assim, se ao final do evento o valor do contador for igual a 1, não é possível classificar essa ocorrência como um evento de VTCD. Cada interrupção possui uma periodicidade diferente para evitar possíveis atrasos no processamento.

Quando o valor da tensão retorna a faixa normal de operação, a interrupção do respectivo Timer 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 (que será explicado com mais detalhes na seção 3.3.3), e o contador é zerado para o próximo evento.

A Figura 23 ilustra o funcionamento da rotina de tratamento da interrupção do TIMER3.

Figura 23: Fluxograma da rotina de tratamento da interrupção do TIMER3



Fonte: Autoria própria

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 no buffer, juntamente com a hora e a data da ocorrência (valores de RTCDATE e RTCTIME) e disponibilizada para o usuário através de uma rede Ethernet, que será explicada com mais detalhes no capítulo 4.

3.3.3 BUFFER ROTATIVO

Para que fosse possível armazenar os dados dos eventos de variações de tensão de curta duração, foi desenvolvido um buffer rotativo, ou seja, um sistema que salva as informações necessárias na memória do microcontrolador e, quando o limite dessa memória é atingido, substitui as informações mais antigas por ocorrências novas.

Essas informações são salvas na memória RAM do microcontrolador, que possui capacidade de 128 kB. De acordo com os testes realizados, o sistema é capaz de salvar aproximadamente 5000 eventos por fase, cada um contendo data, hora e classificação de acordo com amplitude e duração.

Os eventos salvos no buffer podem ser acessados sempre que necessário pelo usuário através de uma rede Ethernet, que será descrita com detalhes no capítulo 4.

Todo o código fonte desenvolvido para este trabalho pode ser acessado em Oliveira (2018).

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 24 ilustra a arquitetura do TCP/IP, com quatro camadas.

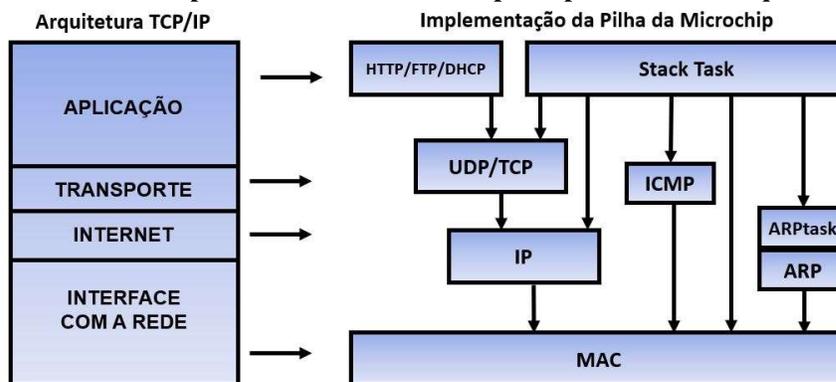
Figura 24: Camadas do protocolo TCP/IP



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



Fonte: Adaptado de Microchip Technolgy 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).

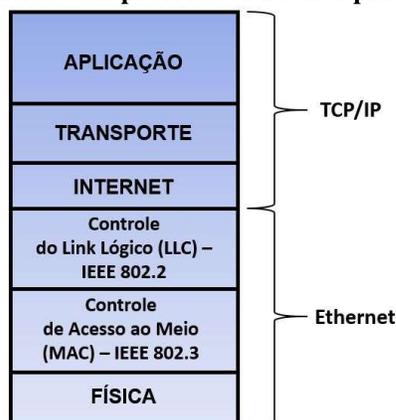
Para que seja possível a configuração de uma rede local, é necessário também uma camada de Controle de Acesso ao Meio (*Media Access Control - MAC*). Essa camada é responsável por garantir o endereçamento dos dados a serem transmitidos, inserindo tanto as informações do dispositivo emissor quanto do 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 3.2.1, 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 27 ilustra essa configuração.

Figura 26: Rede com protocolo TCP/IP e padrão Ethernet

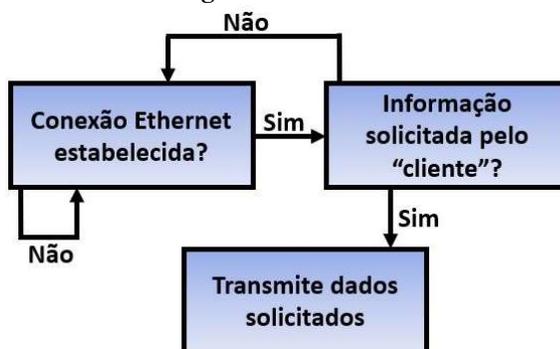


Fonte: Adaptado de Torres (2001)

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 27: Ethernet

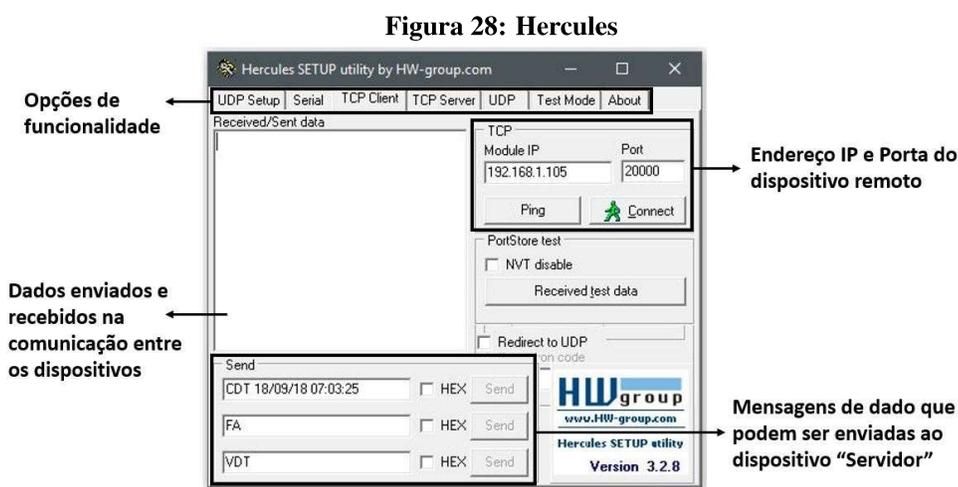


Fonte: Adaptado de Sobrinho (2016)

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 28 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.



Fonte: Autoria Própria

4.3 MENSAGENS

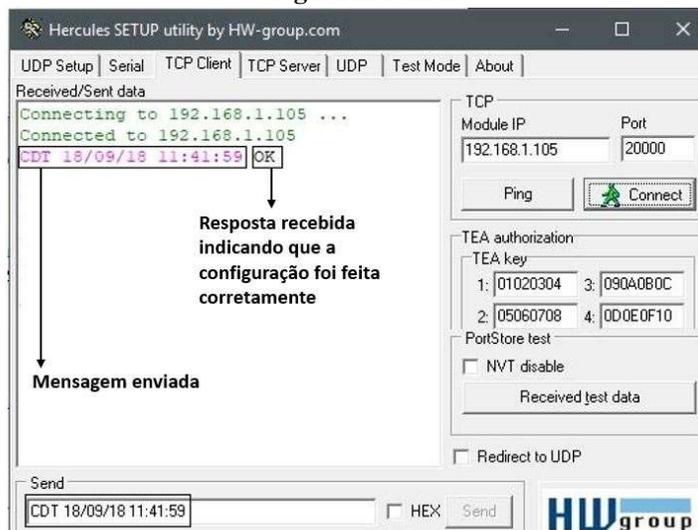
Para possibilitar a troca de informações entre o usuário e o sistema, foram configuradas algumas mensagens padrão que serão explicadas a seguir. Essas mensagens servem tanto para o envio de dados e configurações do microcontrolador, como hora e data, como para a solicitação de informações quando necessário, 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 3.2.1. Caso a configuração

seja feita de maneira correta, o sistema enviará a mensagem "OK" como resposta, como ilustra a Figura 29.

Figura 29: CDT



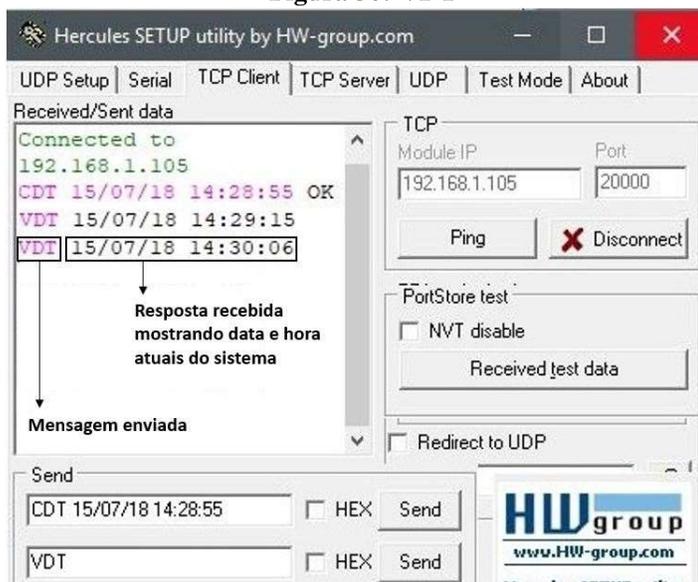
Fonte: Autoria Própria

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 formados 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 30 é possível verificar um exemplo dessa mensagem.

Figura 30: VDT

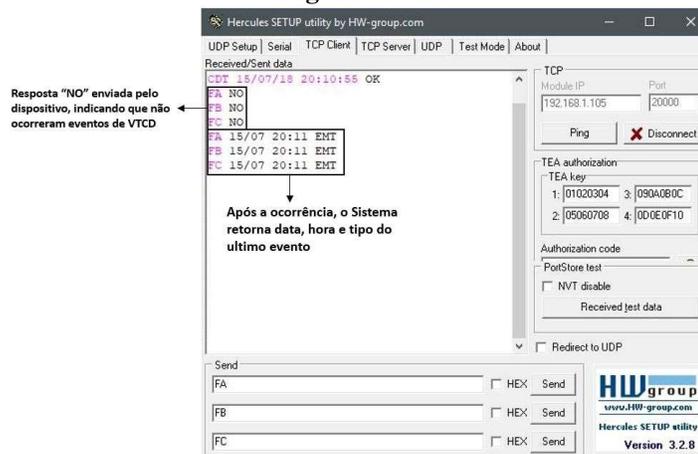


Fonte: Autoria Própria

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 31: 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 amplitude 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

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 32: Variador de Tensão Monofásico TDGC2-0,5



Fonte: Aatoria 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	127V _{ca}	0,25kVA	0 ~ 140V _{ca}	2 A
TDGC2-0,5	220V _{ca}	0,5kVA	0 ~ 250V _{ca}	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 33 ilustra como foram feitas as ligações para a realização do trabalho.

Figura 33: Ligação do dispositivo para realização dos testes de variação de tensão



Fonte: Autoria Própria

Na tabela 7 são mostrados os significados de algumas variáveis do código fonte do dispositivo que aparecem na janela *Watch* do software *MPLAB IDE* nos resultados abaixo.

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

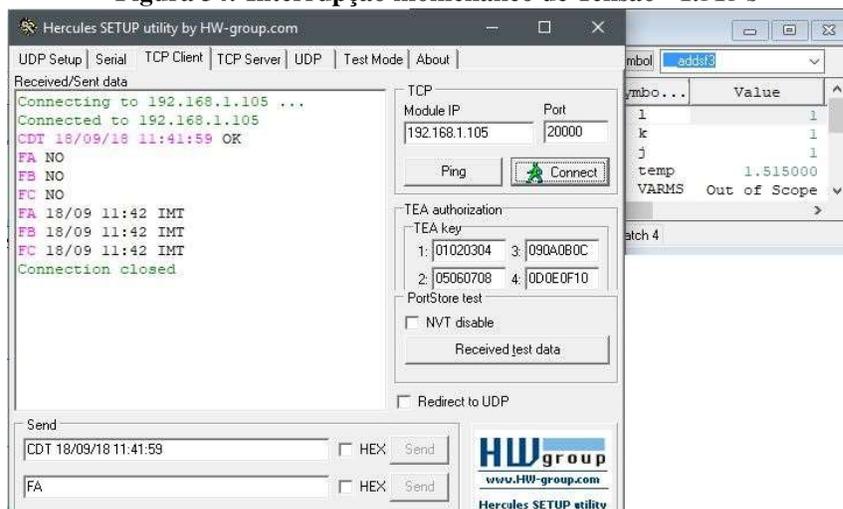
5.2 TESTES DE EVENTOS DE VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

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

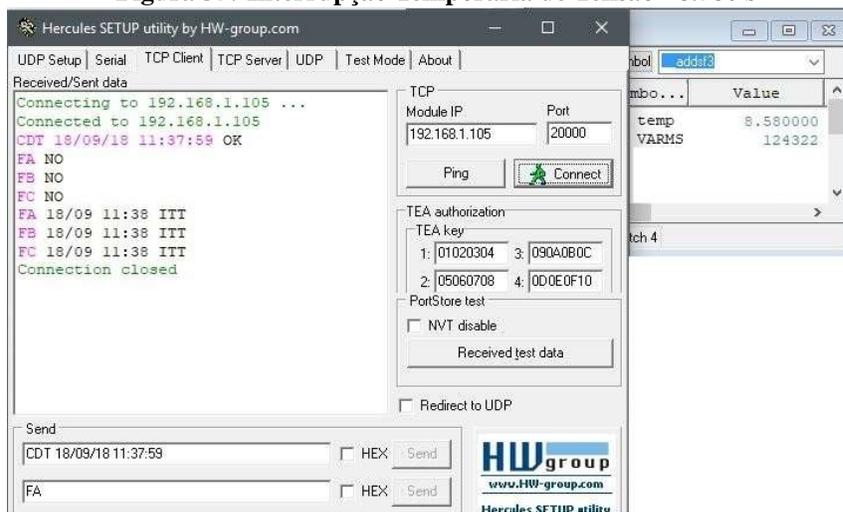
Os testes a seguir foram feitos para eventos de interrupção de tensão, ou seja, eventos em que a tensão remanescente fique abaixo de 0.1 p.u.. Além disso, foram testados eventos de interrupção momentânea de tensão, com duração igual ou inferior a três segundos e eventos de interrupção temporária de tensão, com duração superior a três segundos e inferior a um minuto. As Figuras 34 e 35 ilustram os resultados desses testes.

Figura 34: Interrupção momentânea de Tensão - 1.515 s



Fonte: Autoria Própria

Figura 35: Interrupção Temporária de Tensão - 8.580 s

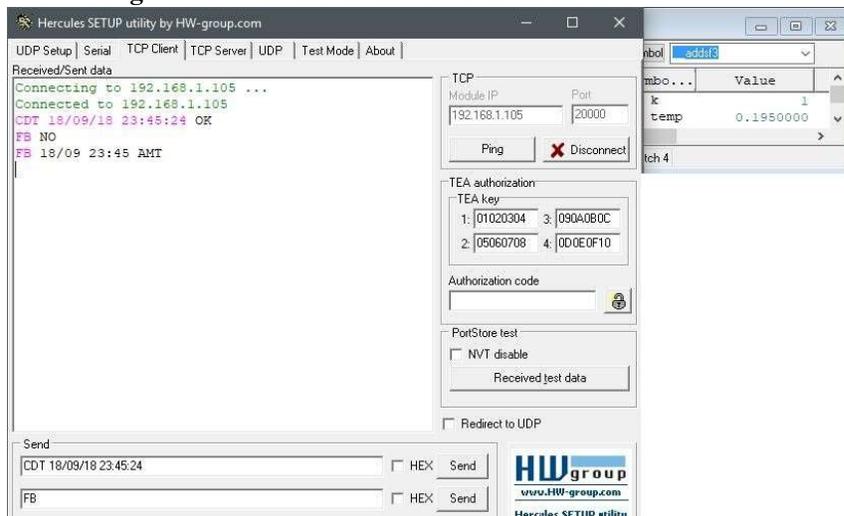


Fonte: Autoria Própria

5.2.2 AFUNDAMENTO MOMENTÂNEO DE TENSÃO

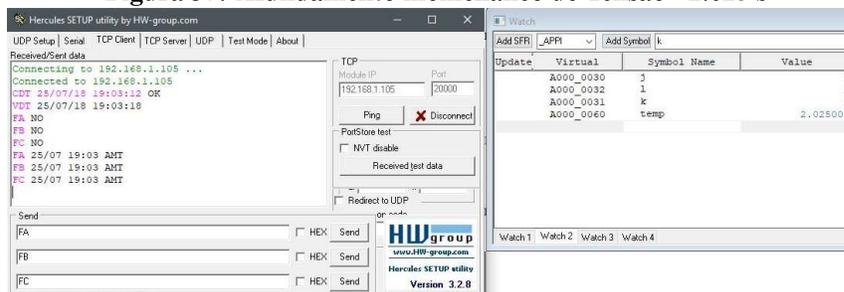
As figuras abaixo ilustram os testes de afundamento momentâneo de tensão, com duração superior ou igual a um ciclo (0.016 s) e inferior ou igual a três segundos e magnitude entre 0.1 e 0.9 p.u..

Figura 36: Afundamento momentâneo de Tensão - 0.195 s



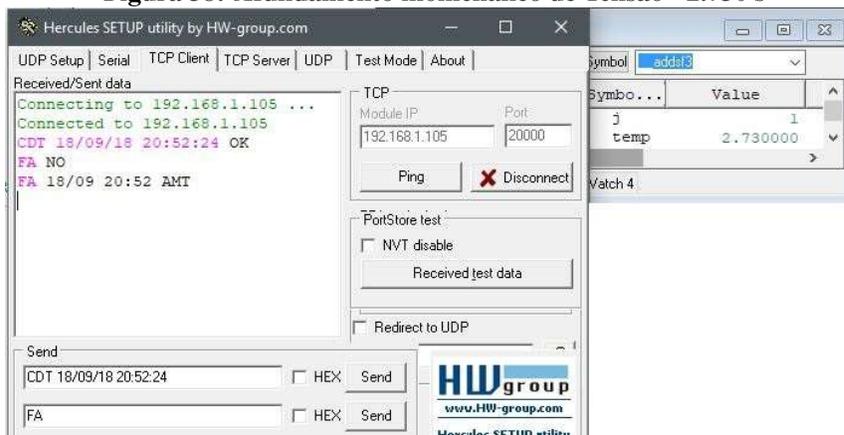
Fonte: Aatoria Própria

Figura 37: Afundamento momentâneo de Tensão - 2.025 s



Fonte: Aatoria Própria

Figura 38: Afundamento momentâneo de Tensão - 2.730 s

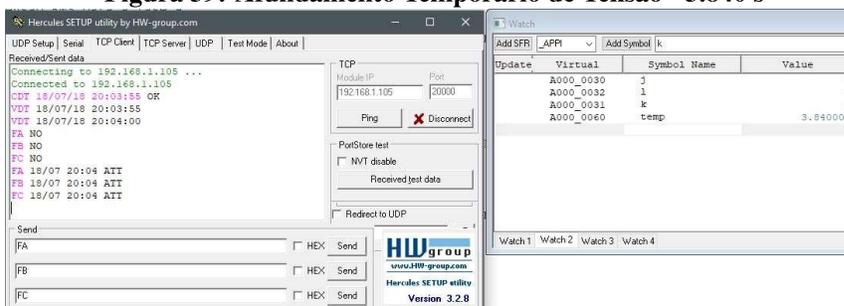


Fonte: Autoria Própria

5.2.3 AFUNDAMENTO TEMPORÁRIO DE TENSÃO

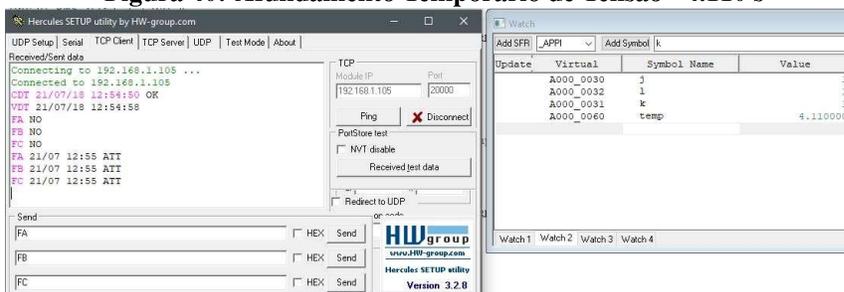
As Figuras 39 e 40 ilustram os testes de afundamento temporário de tensão feitos com o dispositivo. Nesse caso, a duração deve ser superior a três segundos e inferior a um minuto.

Figura 39: Afundamento Temporário de Tensão - 3.840 s



Fonte: Autoria Própria

Figura 40: Afundamento Temporário de Tensão - 4.110 s

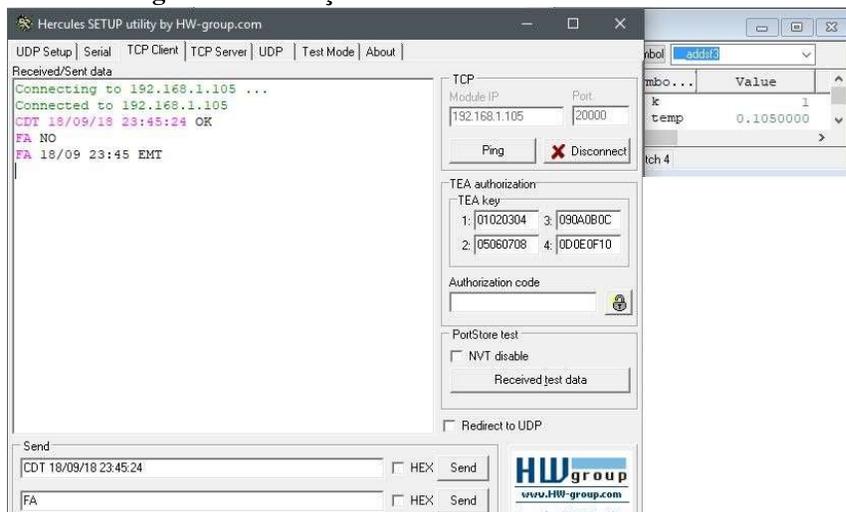


Fonte: Autoria Própria

5.2.4 ELEVAÇÃO MOMENTÂNEA DE TENSÃO

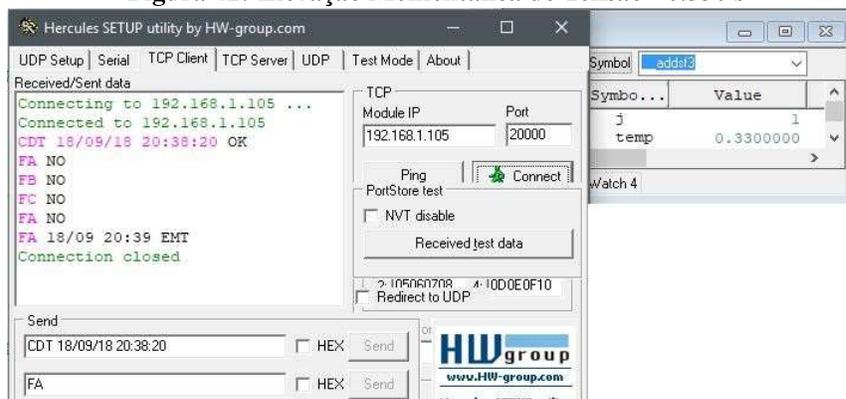
Os testes apresentados a seguir foram feitos para eventos de elevação momentânea de tensão. Nesses casos, a tensão remanescente deve estar acima de 1.1 p.u., e a duração deve ser superior ou igual a um ciclo (0.016 s) e inferior ou igual a três segundos.

Figura 41: Elevação Momentânea de Tensão - 0.105 s



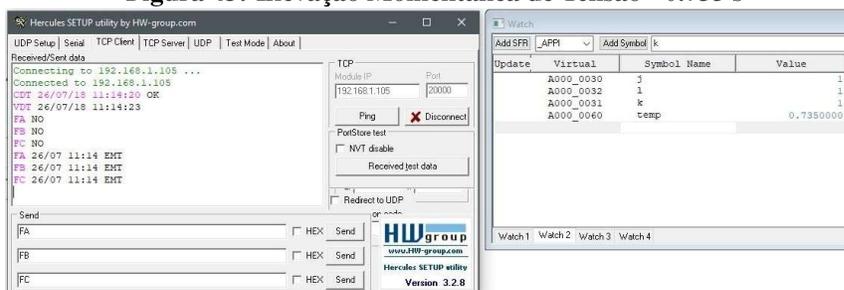
Fonte: Autoria Própria

Figura 42: Elevação Momentânea de Tensão - 0.330 s



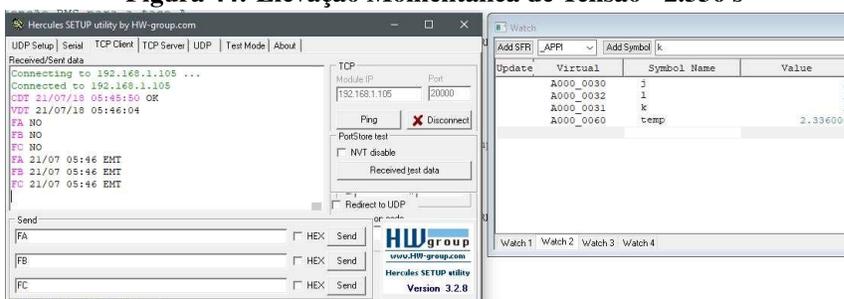
Fonte: Autoria Própria

Figura 43: Elevação Momentânea de Tensão - 0.735 s



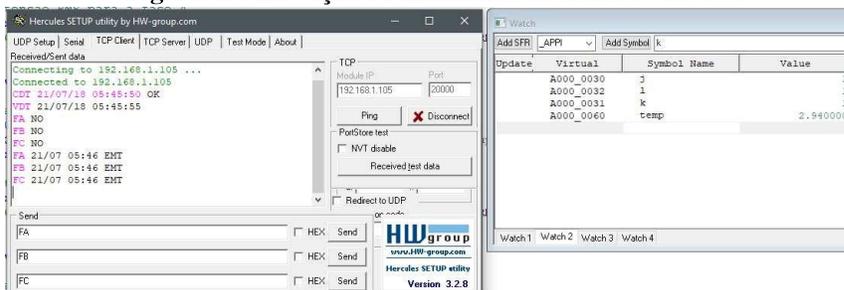
Fonte: Autoria Própria

Figura 44: Elevação Momentânea de Tensão - 2.336 s



Fonte: Autoria Própria

Figura 45: Elevação Momentânea de Tensão - 2.940 s

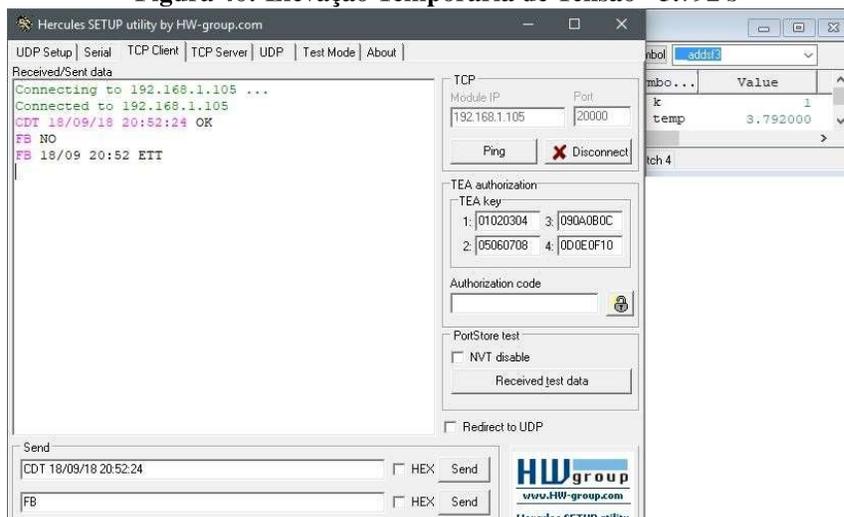


Fonte: Autoria Própria

5.2.5 ELEVAÇÃO TEMPORÁRIA DE TENSÃO

A Figura 46 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 46: Elevação Temporária de Tensão - 3.792 s



Fonte: Autoria Própria

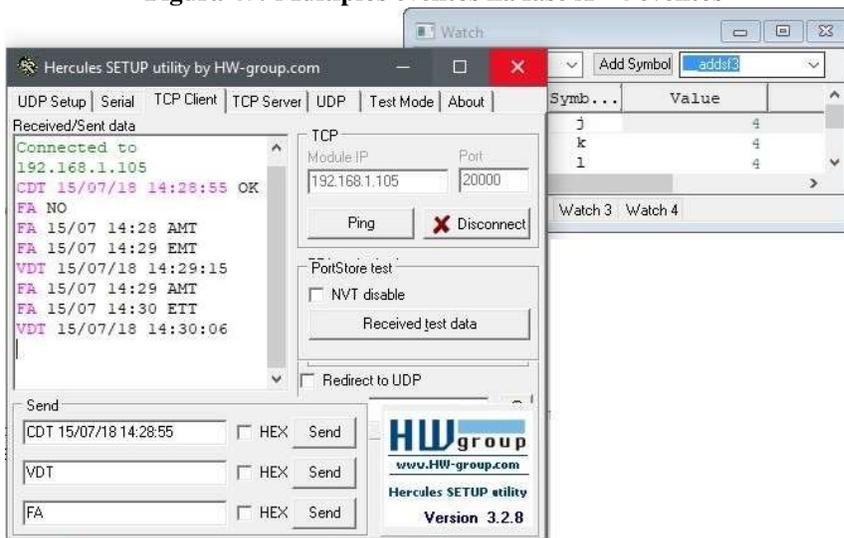
5.2.6 TESTES PARA MÚLTIPLOS EVENTOS - BUFFER ROTATIVO

Os testes apresentados nas imagens abaixo foram feitos para analisar o comportamento do sistema na ocorrência de múltiplos eventos de variações de tensão de curta duração em sequência. Além disso, o objetivo era também mostrar o funcionamento do buffer rotativo, que salva os dados de cada ocorrência (hora, data e tipo do evento).

Por conveniência, o número de eventos máximo que poderiam ser armazenados no buffer durante os testes foi limitado a 10 eventos por fase, mas a capacidade do sistema permite aproximadamente 5000, como descrito na seção 3.3.3.

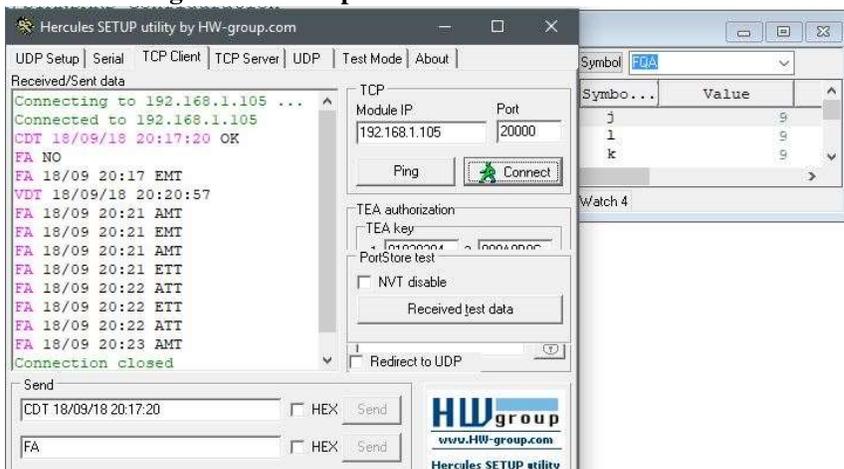
Como mencionado na seção 4.3.3, sempre que um comando FA, FB ou FC é enviado pelo terminal, o dispositivo retornará o evento mais recente salvo na memória.

Figura 47: Múltiplos eventos na fase A - 4 eventos



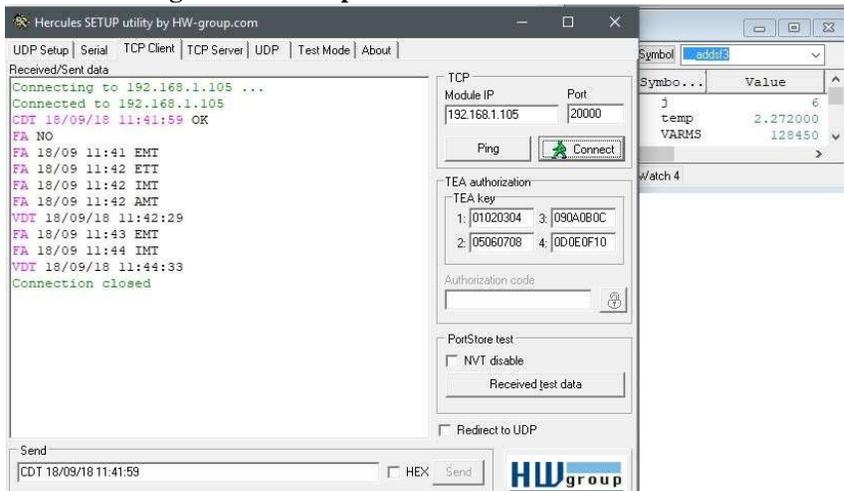
Fonte: Autoria Própria

Figura 48: Múltiplos eventos na fase A - 9 eventos



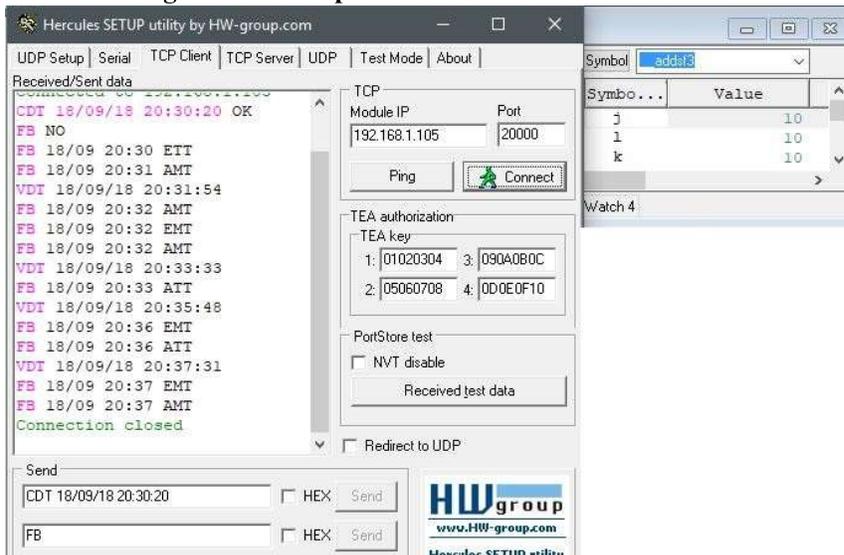
Fonte: Autoria Própria

Figura 49: Multiplos eventos na fase A - 6 eventos



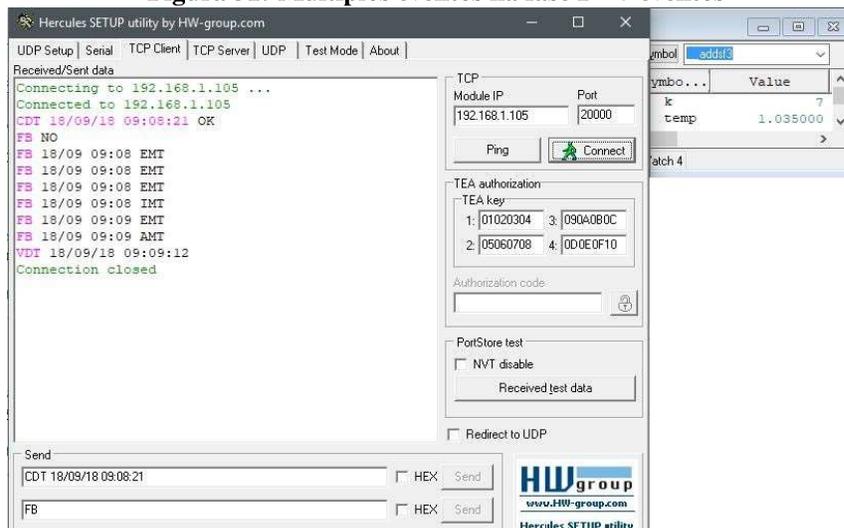
Fonte: Autoria Própria

Figura 50: Multiplos eventos na fase B - 10 eventos



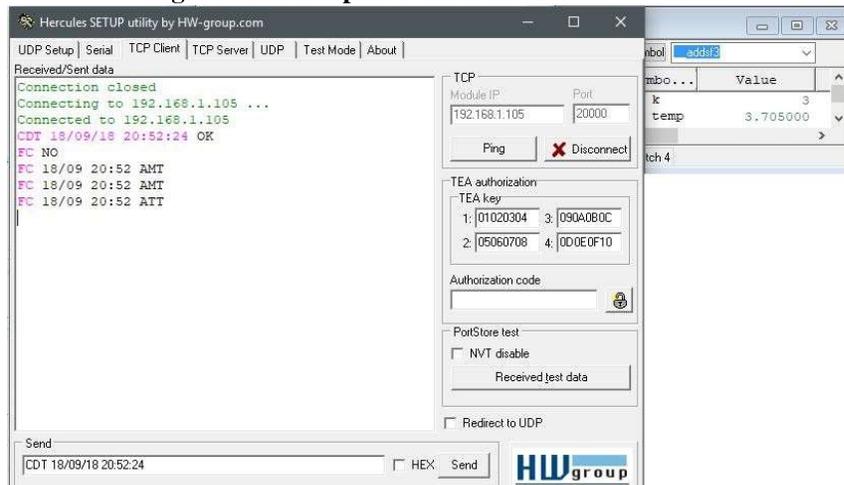
Fonte: Autoria Própria

Figura 51: Múltiplos eventos na fase B - 7 eventos



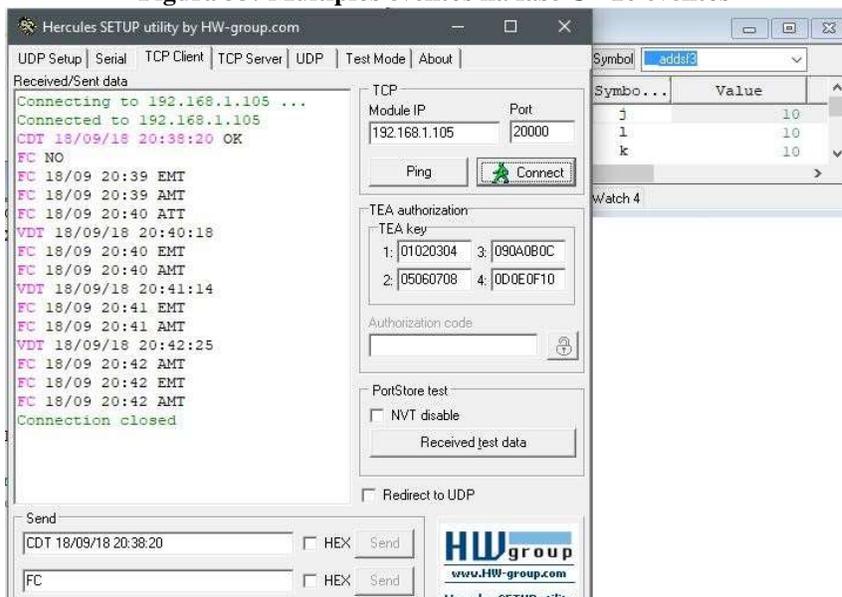
Fonte: Autoria Própria

Figura 52: Múltiplos eventos na fase C - 3 eventos



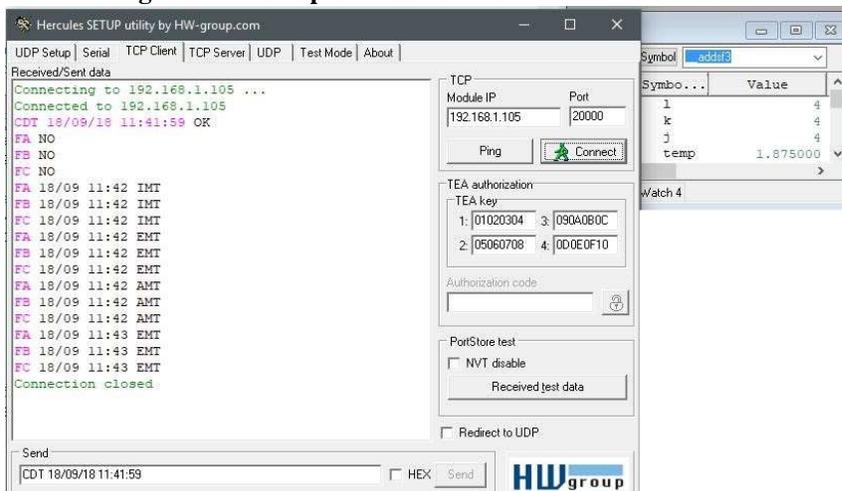
Fonte: Autoria Própria

Figura 53: Múltiplos eventos na fase C - 10 eventos



Fonte: Autoria Própria

Figura 54: Múltiplos eventos todas as fases - 10 eventos

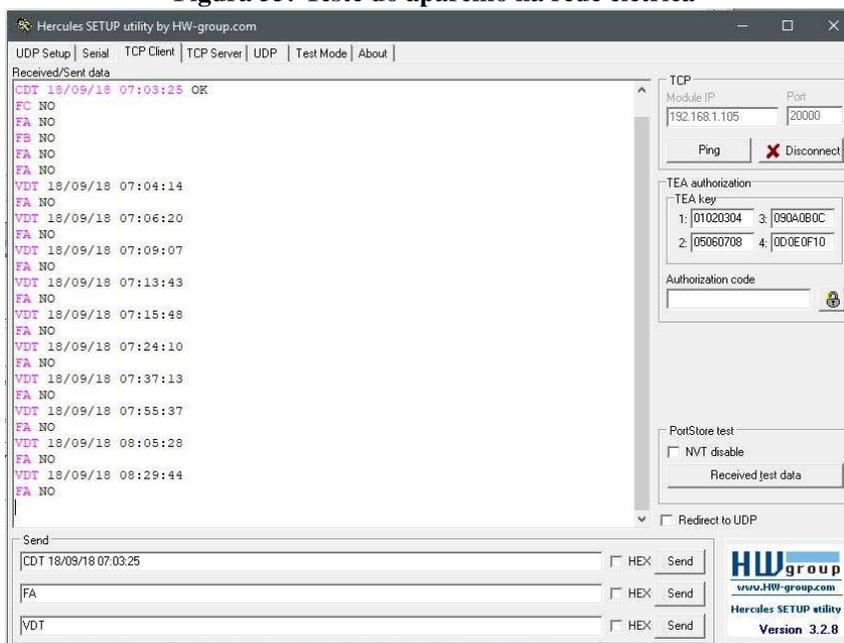


Fonte: Autoria Própria

5.3 TESTE NA REDE ELÉTRICA

A Figura 55 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 55: Teste do aparelho na rede elétrica



Fonte: Autoria Própria

6 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho, como descrito na seção 1.2, foi desenvolver o firmware para 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 corretamente. A configuração das interrupções para cada uma das fases da rede e a leitura dos valores de tensão 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. As respostas do sistema às mensagens FA, FB e FC mostram também o correto funcionamento do buffer rotativo.

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.

Apesar de o sistema ter, no geral, funcionado de maneira correta, foram identificados alguns problemas que devem ser solucionados para trabalhos futuros. Como descrito na seção 3.3.1, o sistema aguarda 100 ms entre as operações de leitura dos registradores de tensão do circuito integrado ADE7758. Isso significa que o valor eficaz da tensão das três fases da rede só é atualizado 10 vezes por segundo, uma taxa menor do que a necessária para uma rede de 60 Hz. Como consequência, essa diferença pode ocasionar erros na classificação da duração dos eventos de VTCD.

Outro ponto é referente a alimentação da placa de medição trifásica, que é proveniente da mesma rede que está sendo monitorada. Desta maneira, os eventos de VTCD podem ocasionar problemas no funcionamento do dispositivo, como um desligamento durante um evento de interrupção e a perda das informações salvas no buffer rotativo, já que este utiliza a memória RAM do microcontrolador.

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 aos 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 por uma necessidade elevada de processamento e memória para os cálculos fasoriais em Sobrinho (2016), mas acabou se mostrando acima da capacidade necessária para este 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.
- 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 Automatica**, 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.
- IEEE STD 1159-2009. **1159 - 2009 -IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality Industrial and Commercial Applications**. [S.l.]: New York: IEEE Press, 2009.
- 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.
- MEENA, P.; RAO, K. U.; DEEKSHIT, R. A simple method for real-time detection of voltage sags and swells in practical loads. **EPE journal**, v. 21:3, p. 33–40, 2011.
- 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.

OLIVEIRA, G. T. G. de. **TCC Code**. 2018. Disponível em: www.github.com/GrazianoGabriel/TCC_Code.

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

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.