

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, 20/09/2018

---

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

O nível elevado 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. . 43 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	- Funcionamento básico da primeira abordagem proposta .....	14
FIGURA 2	- Interrupção momentânea de tensão .....	18
FIGURA 3	- Afundamento instantâneo de tensão .....	19
FIGURA 4	- Elevação instantânea de tensão .....	20
FIGURA 5	- Estrutura do equipamento .....	22
FIGURA 6	- Configuração de pinos do ADE7758 .....	23
FIGURA 7	- Placa para aquisição dos sinais de tensão .....	24
FIGURA 8	- Placa de desenvolvimento Cerebot MX7cK .....	25
FIGURA 9	- Diagrama do circuito da placa Cerebot MX7cK .....	26
FIGURA 10	- Estrutura de comunicação do protocolo SPI .....	27
FIGURA 11	- Camadas do protocolo TCP/IP .....	28
FIGURA 12	- Estrutura da pilha TCP/IP da Microchip comparada com a arquitetura TCP/IP .....	29
FIGURA 13	- Rede com protocolo TCP/IP e padrão Ethernet .....	30
FIGURA 14	- Ethernet .....	30
FIGURA 15	- Variador de Tensão Monofásico TDGC2-0,5 .....	32
FIGURA 16	- Ligação do dispositivo para realização dos testes de variação de tensão ..	32
FIGURA 17	- Interrupção momenâneo de Tensão - 1.515 s .....	33
FIGURA 18	- Interrupção Temporária de Tensão - 8.580 s .....	33
FIGURA 19	- Afundamento momenâneo de Tensão - 2.025 s .....	34
FIGURA 20	- Afundamento momenâneo de Tensão - 2.730 s .....	34
FIGURA 21	- Afundamento momenâneo de Tensão - 0.195 s .....	35
FIGURA 22	- Afundamento Temporário de Tensão - 3.840 s .....	35
FIGURA 23	- Afundamento Temporário de Tensão - 4.110 s .....	35
FIGURA 24	- Elevação Momentânea de Tensão - 0.105 s .....	36
FIGURA 25	- Elevação Momentânea de Tensão - 0.330 s .....	36
FIGURA 26	- Elevação Momentânea de Tensão - 0.735 s .....	37
FIGURA 27	- Elevação Momentânea de Tensão - 2.336 s .....	37
FIGURA 28	- Elevação Momentânea de Tensão - 2.940 s .....	37
FIGURA 29	- Elevação Temporária de Tensão - 3.792 s .....	38
FIGURA 30	- Multiplos eventos na fase A - 4 eventos .....	38
FIGURA 31	- Multiplos eventos na fase A - 9 eventos .....	39
FIGURA 32	- Multiplos eventos na fase A - 6 eventos .....	39
FIGURA 33	- Teste do aparelho na rede elétrica .....	40

## **LISTA DE TABELAS**

TABELA 1	– Variações de Tensão de Curta Duração .....	17
TABELA 2	– Características elétricas e físicas .....	23
TABELA 3	– Especificação Técnica - Variador de Tensão Monofásico TDGC2-0,5 ..	31

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1 PROBLEMA .....	10
1.2 OBJETIVOS .....	11
1.2.1 Objetivo Geral .....	11
1.2.2 Objetivos Esoecíficos .....	11
1.3 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO .....	11
1.4 METODOLOGIA .....	11
1.5 ETAPAS DO TRABALHO .....	12
1.5.1 Revisão Bibliográfica .....	12
1.5.2 Definição e estudo das tecnologias .....	12
1.5.3 Aplicação dos conceitos teóricos .....	12
1.5.4 Análise e validação dos resultados .....	14
1.5.5 Elaboração da monografia .....	15
<b>2 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA .....</b>	<b>16</b>
2.1 TIPOS DE EVENTOS .....	17
2.1.1 Interrupção de Tensão ( <i>Interruption</i> ) .....	18
2.1.2 Afundamento de Tensão ( <i>Voltage Sag</i> ) .....	18
2.1.3 Elevação de Tensão ( <i>Voltage Swell</i> ) .....	19
<b>3 ESPECIFICAÇÕES DO PROJETO .....</b>	<b>21</b>
3.1 PROPOSTA DO TRABALHO .....	21
3.2 FUNCIONAMENTO DO PROTÓTIPO .....	21
3.3 PLACA DE MEDAÇÃO TRIFÁSICA .....	23
3.4 MICROCONTROLADOR PIC32MX795F512L .....	24
3.4.1 Interface de Comunicação .....	26
<b>4 TROCA DE DADOS - SISTEMA DE MENSAGENS .....</b>	<b>28</b>
4.1 ARQUITETURA DA REDE .....	28
4.1.1 Protocolo TCP/IP .....	28
4.1.2 Comunicação Ethernet .....	29
4.2 TRANSMISSÃO DE DADOS .....	30
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>31</b>
5.1 VARIADOR DE TENSÃO MONOFÁSICO .....	31
5.2 TESTES PARA EVENTOS DE INTERRUPÇÃO DE TENSÃO .....	33
5.3 TESTES PARA EVENTOS DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO .....	33
5.3.1 Afundamento Momentâneo de Tensão .....	34
5.3.2 Afundamento Temporário de Tensão .....	35
5.4 TESTES PARA EVENTOS DE ELEVAÇÃO DE TENSÃO .....	36
5.4.1 Elevação Momentânea de Tensão .....	36
5.4.2 Elevação Temporária de Tensão .....	38
5.5 TESTES PARA MÚLTIPLOS EVENTOS - BUFFER ROTATIVO .....	38
5.6 TESTE DIRETAMENTE NA REDE ELÉTRICA .....	40
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>41</b>

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>42</b>
--------------------------	-----------

## 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 torna gradativamente mais suscetível 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, qualidade pode ser 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).

Dentre as razões pelas quais o interesse nesse tema tem aumentado, algumas podem ser destacadas como principais. Equipamentos eletrônicos, com controle baseado em microprocessadores, se tornaram muito mais sensíveis à distúrbios de tensão do que eram há dez, vinte anos. Além disso, os dispositivos atuais são quase totalmente conectados em redes. Uma falha em um único componente pode gerar graves consequências para todo o sistema (DUGAN et al., 2002; BOLLEN, 2002).

Para que seja possível fazer uma análise mais técnica do assunto, 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 de baixo custo, 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 gerar 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 ESOECÍFICOS

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 VTCD e salvar informações relativas à data, hora e intensidade de cada 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 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

## 1.4 METODOLOGIA

Como mencionado na seção 1.2, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de detecção de variações de tensão de curta duração. Esse sistema deverá analisar o sinal de onda da tensão proveniente da rede de distribuição de energia elétrica, detectar a ocorrência de variações, classificar cada ocorrência de acordo com as normas vigentes, salvar essa informação (incluindo data e hora) e disponibilizá-la online para consulta.

## 1.5 ETAPAS DO TRABALHO

O trabalho de conclusão de curso será organizado de acordo com as seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica
- Definição e estudo das tecnologias
- Aplicação dos conceitos teóricos
- Análise e validação dos resultados
- Elaboração da monografia

### 1.5.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A primeira etapa será dedicada à busca por referências bibliográficas que tenham relação com o estudo de variações de tensão de curta duração. O objetivo aqui é estudar trabalhos existentes na área, assim como as principais técnicas existentes para a detecção desse tipo de evento e como este trabalho poderá contribuir com o assunto.

### 1.5.2 DEFINIÇÃO E ESTUDO DAS TECNOLOGIAS

Nesta etapa, o objetivo é o estudo prático do funcionamento dos materiais que serão utilizados no trabalho, descritos no capítulo 2. Serão feitos testes com o microcontrolador PIC32MX795F512L (através da placa de desenvolvimento Cerebot MX7cK) e com o circuito integrado ADE7758, visando conhecer melhor suas características, funcionamento e métodos de comunicação entre os dois dispositivos.

Além disso, será feito um estudo quanto a configuração do microcontrolador PIC32MX795F512L como um servidor TCP/IP, com a realização de testes para sua correta operação.

### 1.5.3 APLICAÇÃO DOS CONCEITOS TEÓRICOS

Após o estudo dos materiais que serão utilizados no projeto, a etapa de aplicação dos conceitos teóricos terá como objetivo o desenvolvimento do *firmware* do sistema. Para isso, todas as normas e restrições descritas no capítulo 2 deverão ser levadas em conta para a correta detecção dos eventos de VTCD.

Duas abordagens diferentes serão testadas no projeto. A primeira proposta envolve a utilização das funções de detecção de afundamento e de sobretensão do circuito integrado ADE7758, descritas nas seções ?? e ??, além dos timers e demais periféricos do microcontrolador PIC32MX795F512L.

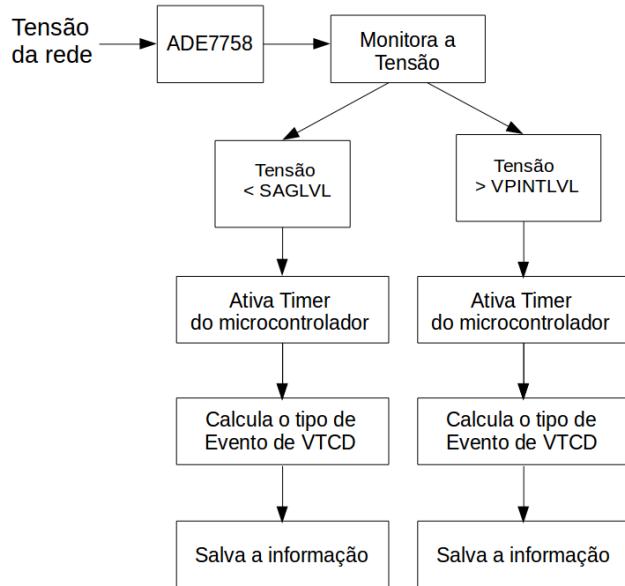
Para a detecção da ocorrência de afundamento de tensão, o registrador SAGLVL deverá ser configurado de acordo com os valores da tabela 1, ativando a interrupção quando o valor da tensão ficar abaixo de 0,9 pu por um período maior que um ciclo. Caso o valor da tensão remanescente seja igual ou menor que 0,1 pu, o evento deve ser tratado como uma interrupção de tensão.

Essa interrupção irá ativar o timer presente no microcontrolador PIC32MX795F512L, que irá permanecer ativo durante a duração do evento. De acordo com o valor final da contagem, o evento de afundamento será enquadrado em uma das categorias de VTCD, também seguindo as normas presentes na tabela 1.

No caso da elevação de tensão, a detecção será feita através da configuração do limite superior no registrador VPINTLVL. Caso a tensão proveniente da rede elétrica ultrapasse esse valor, o Bit 14 do registrador de interrupção é acionado para registrar a ocorrência da sobretensão. O timer do microcontrolador também será acionado, calculando o tempo total do evento e enquadrando-o em uma das categorias de VTCD.

Em ambos os casos, a função de medição de frequência do ADE7758, descrita na seção ??, será utilizada em conjunto com o timer para que seja feita a medição da quantidade de ciclos da rede, permitindo a caracterização completa de todos os eventos possíveis de VTCD.

**Figura 1: Funcionamento básico da primeira abordagem proposta**



**Fonte:** Autoria própria

A segunda abordagem proposta para o desenvolvimento do sistema é a utilização da medição da tensão eficaz, função do ADE7758 descrita na seção ???. A tensão proveniente da rede elétrica terá seu valor RMS constantemente monitorado pelo circuito integrado. O resultado dessa medição deve ser comparado com limites pré-configurados, de acordo com a tabela 1, enquadrando a ocorrência de variação da tensão como interrupção, afundamento ou elevação.

O timer presente no microcontrolador PIC32MX795F512L será acionado em conjunto com a função de medição de frequência do ADE7758, no início do evento. De acordo com a duração total e com o número de ciclos da rede, o evento de VTCD será enquadrado como instantâneo, momentâneo ou temporário.

#### 1.5.4 ANÁLISE E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Após o desenvolvimento do hardware e da programação do sistema, levando em conta as duas abordagens propostas anteriormente, a etapa de análise e validação dos resultados terá como objetivo principal testar cada um dos métodos e analisar qual deles será o mais eficiente para a solução do problema.

Utilizando os laboratórios da UTFPR e um Variac, serão realizados ensaios simulando os diversos tipos de variações de tensão de curta duração na rede elétrica. Cada um dos métodos será testado e analisado de acordo com tempo de resposta, gasto de energia e eficiência na

detecção dos eventos.

#### **1.5.5 ELABORAÇÃO DA MONOGRAFIA**

A última etapada do trabalho consiste na elaboração do trabalho de conclusão de curso, de acordo com as normas para elaboração de trabalhos acadêmicos da UTFPR. Serão apresentados todos os passos do desenvolvimento do projeto, assim como uma análise completa dos resultados.

## 2 QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Variações de tensão de curta duração (VTCD) são desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo. Essas variações podem ser momentâneas ou temporárias, tendo como principais causas condições de falta, energização de grandes cargas que demandam correntes altas de partida e conexões frouxas intermitentes nos cabos de energia (ANEEL, 2011; MACHADO et al., 2006).

Usualmente as VTCD referem-se à tensão fase-neutro, podendo ser descritas monofasicamente por dois parâmetros: amplitude e duração. A amplitude é definida pelo valor extremo do valor eficaz da tensão (também chamado de tensão remanescente) em relação à tensão nominal, no ponto de observação e enquanto durar o evento. Esse valor pode ser expresso em porcentagem ou em valor por unidade (pu) (REDE, 2011).

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

Na Tabela 1 são apresentados os critérios detalhados para a definição de cada tipo de variação de acordo com o módulo 8 do PRODIST, desenvolvido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ANEEL, 2011).

**Tabela 1: 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 um minuto	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a um minuto	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a um minuto	Superior a 1,1 p.u

**Fonte:** Aneel (2011)

Na definição da amplitude das variações de tensão é utilizado o valor eficaz (RMS, da sigla em inglês *root mean square*), também chamado de valor quadrático médio, que é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável.

O valor eficaz da tensão ( $V_{ref}$ ) é representado pela equação 1, sendo  $x(t)$  o sinal variável no tempo e  $T$  seu período.

$$V_{ref} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [x(t)]^2 dt} \quad (1)$$

## 2.1 TIPOS DE EVENTOS

Será apresentada a seguir uma descrição detalhada de cada tipo de evento de variação de tensão de curta duração.

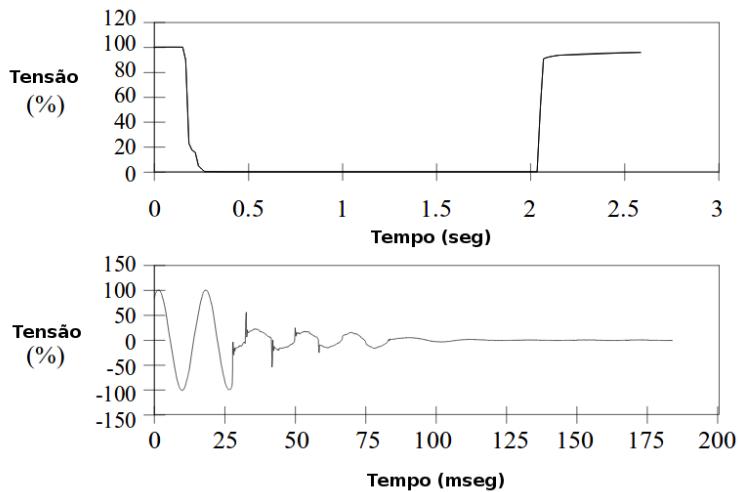
### 2.1.1 INTERRUPÇÃO DE TENSÃO (*INTERRUPTION*)

A interrupção ocorre quando a amplitude da tensão descrece para um valor menor que 0,1 pu, em um período de até 1 minuto. 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 2 ilustra a ocorrência de uma interrupção momentânea, com a tensão caindo para 0 por aproximadamente 2 segundos. O primeiro gráfico apresenta a variação da tensão eficaz (RMS) durante todo o evento, mostrando a queda da tensão para 0 e o reestabelecimento do valor normal após cerca de dois segundos.

O segundo apresenta a variação do valor instantâneo da tensão durante os dois primeiros segundos do evento. É importante notar que os gráficos da figura 2 apresentam escalas diferentes para uma melhor visualização.

**Figura 2: Interrupção momentânea de tensão**



**Fonte:** Adaptado de Association et al. (2009)

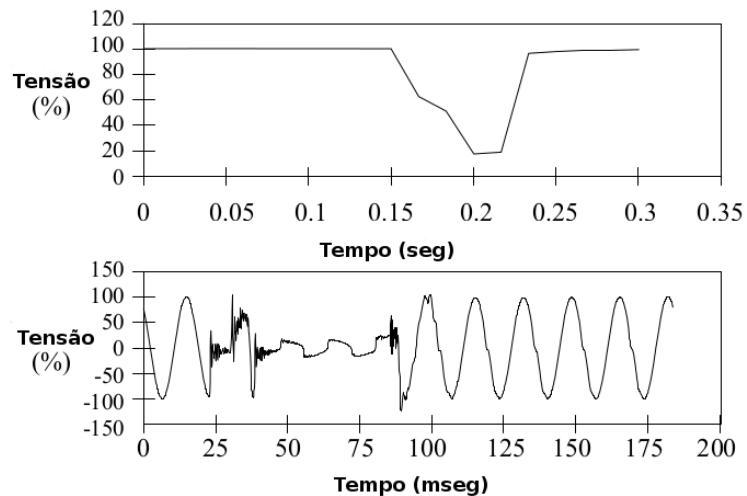
### 2.1.2 AFUNDAMENTO DE TENSÃO (*VOLTAGE SAG*)

O afundamento ocorre quando a tensão decai para um valor entre 0,1 e 0,9 pu (tensão remanescente). 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 3 ilustra um afundamento instantâneo com tensão remanescente de aproximadamente 0,2 pu. No primeiro gráfico, o afundamento é mostrado pela variação da tensão eficaz,

com uma escala em segundos. No gráfico abaixo, a forma de onda completa da tensão (com escala em milisegundos) mostra uma oscilação maior do valor durante a duração do evento.

**Figura 3: Afundamento instantâneo de tensão**



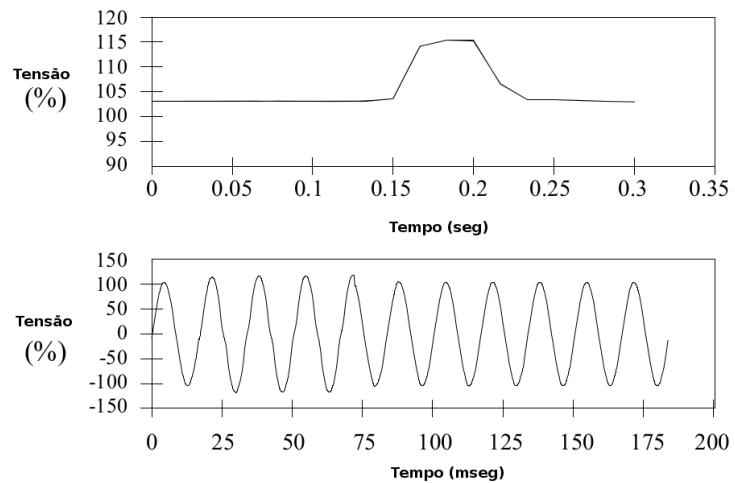
**Fonte:** Adaptado de Association et al. (2009)

### 2.1.3 ELEVAÇÃO DE TENSÃO (*VOLTAGE SWELL*)

A elevação de tensão é definida por um aumento na tensão eficaz acima de 1,1 pu, com duração descrita na tabela 1. 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 10 ilustra uma condição de elevação instantânea de tensão. No gráfico de cima é mostrada a variação da tensão RMS com tensão remanescente de aproximadamente 1,15 pu. O segundo gráfico ilustra a variação no valor instantâneo da tensão.

**Figura 4: Elevação instantânea de tensão**



**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 redes de distribuição 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).

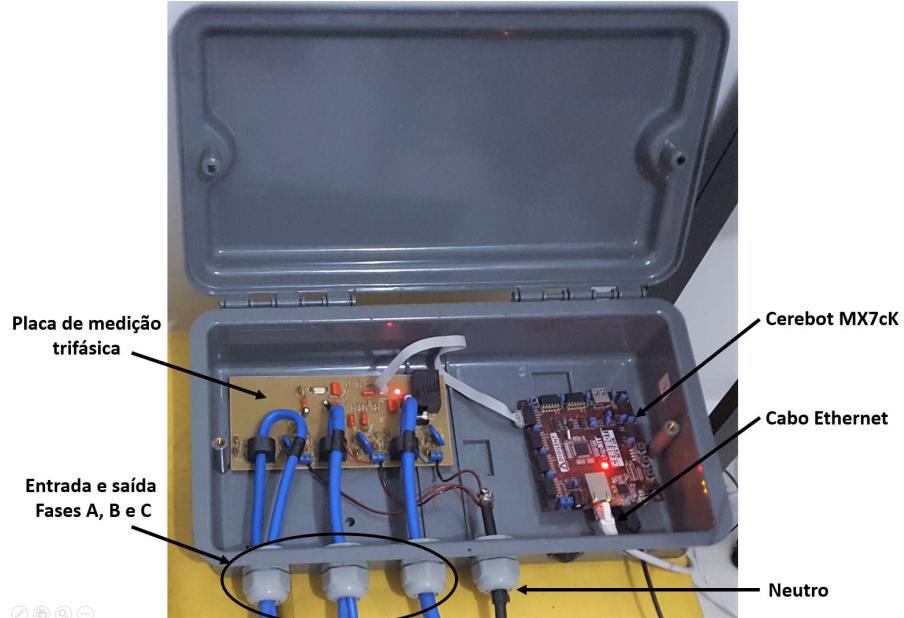
Para este projeto, o protótipo foi programado para funcionar na detecção dos eventos de variações de tensão de curta duração, classificando-os e disponibilizando-os online para consulta pelo usuário. Para isso, o dispositivo realiza as seguintes atividades:

- 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 da interface de comunicação Ethernet.

**Figura 5: Estrutura do equipamento**



**Fonte: Autoria Própria**

Na Figura 5 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.

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 2 apresenta as principais especificações do dispositivo, tanto da parte elétrica como da parte mecânica.

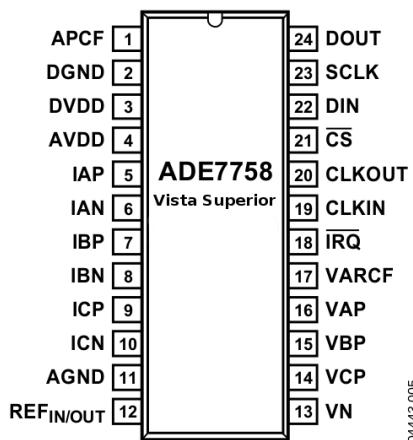
**Tabela 2: Características elétricas e físicas**

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 PLACA DE MEDIÇÃO TRIFÁSICA

O ADE7758, circuito integrado fabricado pela empresa *Analog Devices*, é um medidor de energia elétrica trifásica, de alta precisão, com interface serial e alimentação de 5V. Esse circuito conta com seis entradas analógicas, divididas em dois canais de tensão e corrente, e o canal de tensão conta com três entradas (VAP, VBP e VCP) (ANALOG DEVICES, 2011).

**Figura 6: Configuração de pinos do ADE7758**

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

Esse circuito integrado 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.

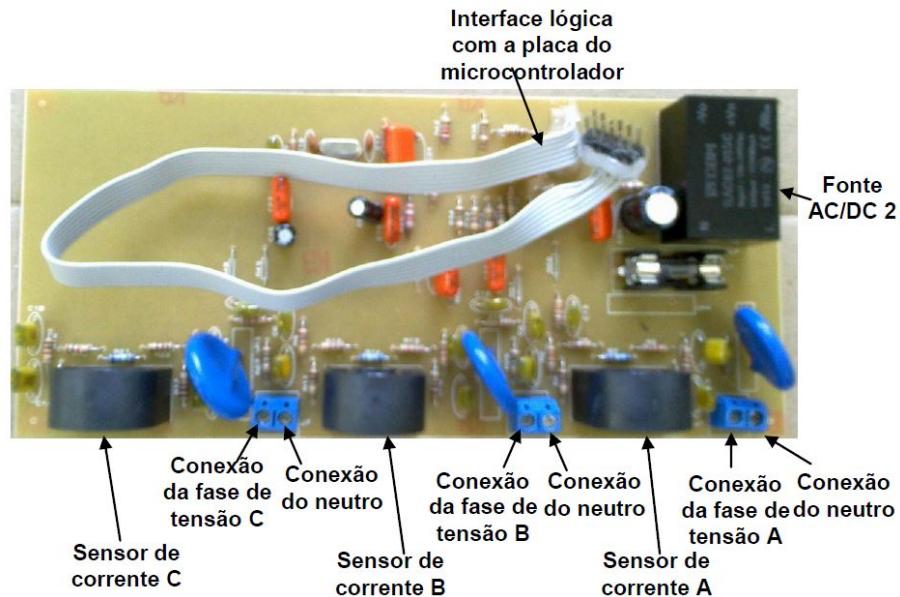
O desenvolvimento da placa de medição trifásica, utilizada neste trabalho para a aquisição dos sinais de tensão, é descrito em Sobrinho (2016). Como é possível observar na Figura 7, esse dispositivo conta com conexões para as três fases de tensão, interface lógica com a placa do microcontrolador, fonte 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 (2) 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.

$$V_N = \frac{1k\Omega}{1k\Omega + 1M\Omega} V_{IN} = 9,99 \cdot 10^{-4} V_{IN} \quad (2)$$

De acordo com o datasheet do CI ADE7758, a faixa aceitável para as entradas analógicas é de  $\pm 500mV$  (ANALOG DEVICES, 2011). Desta maneira, a partir da Equação (2) 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 7: Placa para aquisição dos sinais de tensão**



**Fonte:** Sobrinho (2016)

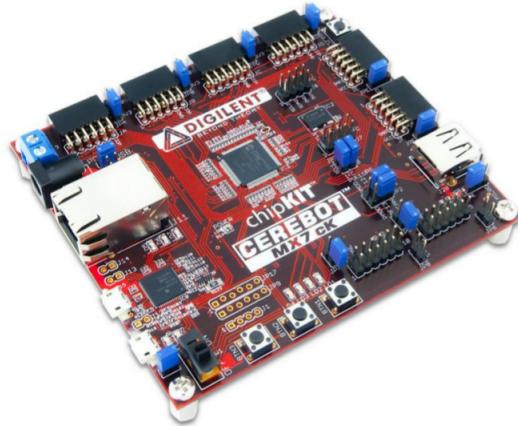
### 3.4 MICROCONTROLADOR PIC32MX795F512L

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 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).

**Figura 8: Placa de desenvolvimento Cerebot MX7cK**

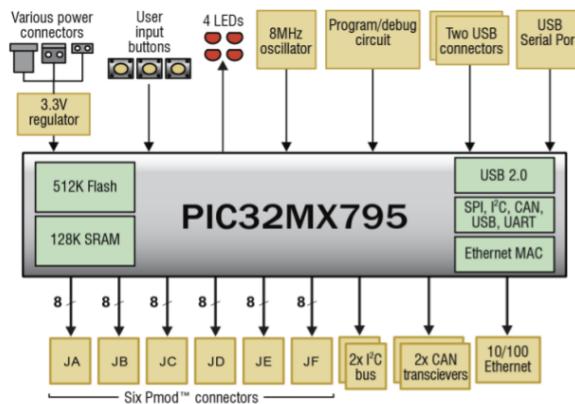


**Fonte:** *Diligent Incorporated (2013)*

O microcontrolador PIC32MX795F512L foi utilizado através da placa de desenvolvimento Cerebot MX7cK, que é fabricada pela empresa *Digilent 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 9:

**Figura 9: Diagrama do circuito da placa Cerebot MX7cK**



**Fonte: Diligent Incorporated (2013)**

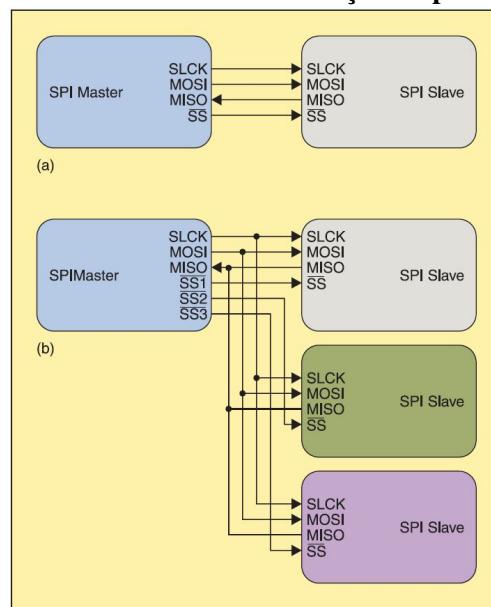
### 3.4.1 INTERFACE DE COMUNICAÇÃO

A comunicação entre o microcontrolador e o circuito integrado ADE7758 foi feita através do protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*), um protocolo de comunicação serial síncrona, desenvolvido pela *Motorola* nos anos de 1980, que permite a troca de informações entre microcontroladores e outros periféricos (LEENS, 2009).

O protocolo SPI usa uma topologia mestre-escravo, sempre com um único mestre. A comunicação se dá em quatro linhas de sinal:

- 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.

**Figura 10: Estrutura de comunicação do protocolo SPI**



**Fonte:** Adaptado de Association el al. (2009)

O microcontrolador PIC32MX795F512L possui quatro interfaces de 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.

## 4 TROCA DE DADOS - SISTEMA DE MENSAGENS

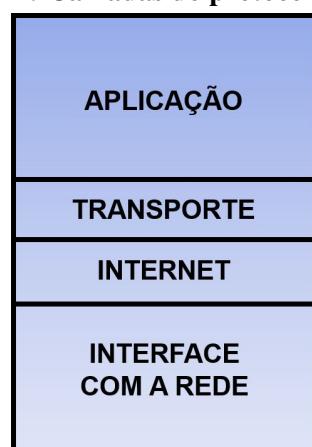
Este capítulo tem como objetivo descrever o sistema de comunicação e de transmissão de dados do sistema de monitoramento de variações de tensão de curta duração. Será explicado o funcionamento da comunicação Ethernet, dos protocolos MAC, TCP e IP, o software Hercules e o protocolo de comunicação SPI.

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

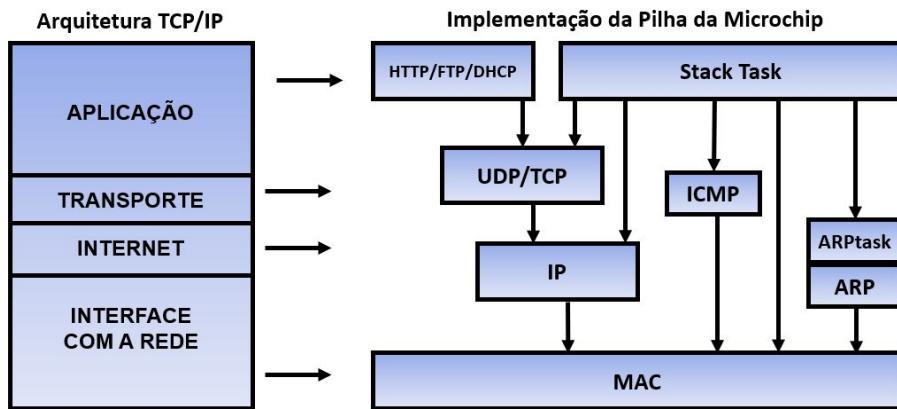
**Figura 11: Camadas do protocolo TCP/IP**



**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 12: 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).

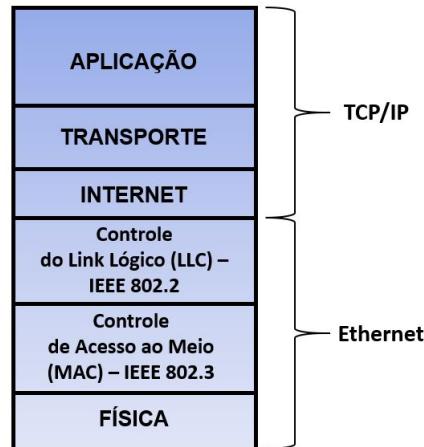
Para que seja possível a configuração de uma rede local, é necessário também uma camada de Controle de Acesso ao Meio (*Media Access Control - MAC*). Essa camada é responsável por garantir o endereçamento dos dados a serem transmitidos, inserindo tanto as informações do dispositivo emissor quanto do 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 3.4, 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 14 ilustra essa configuração.

**Figura 13: Rede com protocolo TCP/IP e padrão Ethernet**

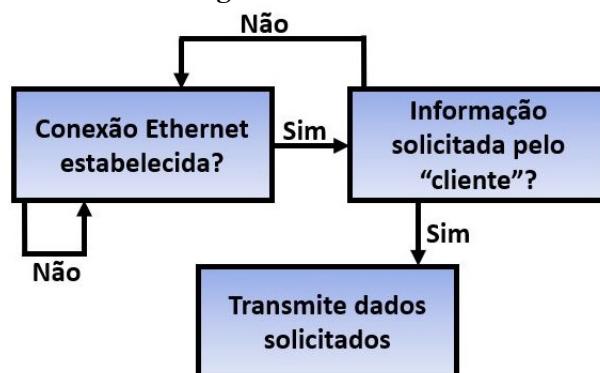


Fonte: Adaptado de Torres (2001)

## 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 configuradas no sistema, a ocorrência de eventos de variação de tensão em cada fase, o tipo do evento, entre outros.

**Figura 14: Ethernet**



Fonte: Adaptado de Sobrinho (2016)

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema de monitoramento de variações de tensão de curta duração proposto neste trabalho foi testado para cada um dos tipos de eventos descritos no capítulo 2, e os resultados desses testes serão apresentados ao longo deste capítulo. O comportamento do sistema foi analisado tanto para a magnitude dos eventos (interrupções, afundamentos e elevações) quanto para sua duração (momentâneos e temporários), como descrito na tabela 1.

### 5.1 VARIADOR DE TENSÃO MONOFÁSICO

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.

**Tabela 3: Especificação Técnica - Variador de Tensão Monofásico TDGC2-0,5**

Modelo	Tensão Nominal Entrada	Potência 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)

**Figura 15: Variador de Tensão Monofásico TDGC2-0,5**



**Fonte:** Autoria Própria

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 16 ilustra como foram feitas as ligações para a realização do trabalho.

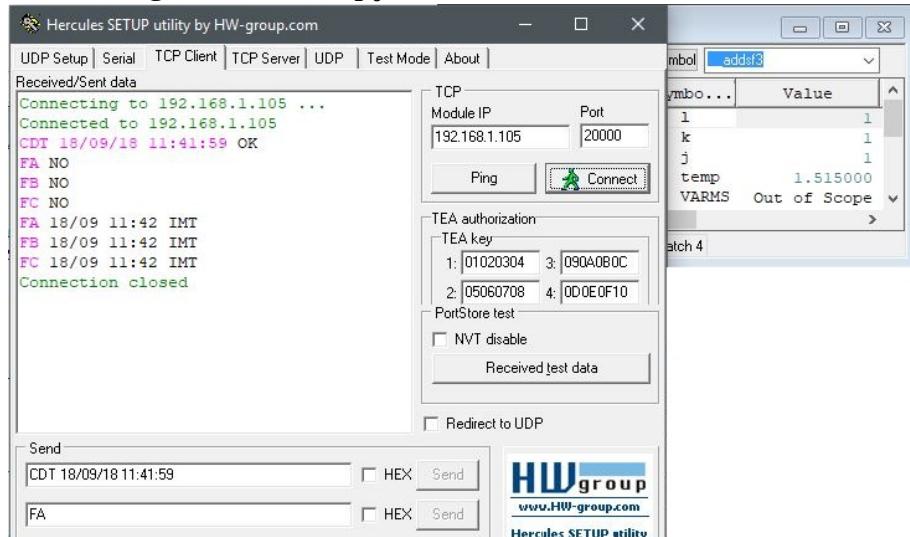
**Figura 16: Ligação do dispositivo para realização dos testes de variação de tensão**



**Fonte:** Autoria Própria

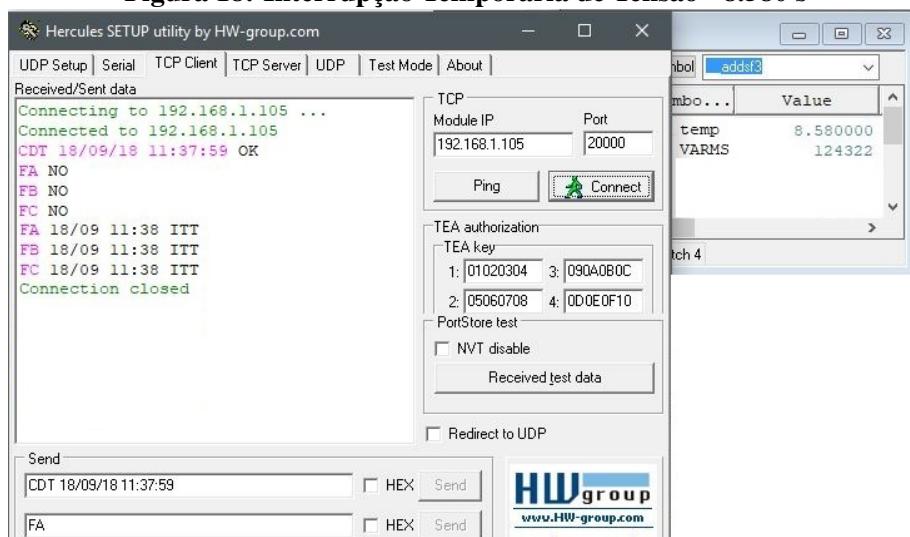
## 5.2 TESTES PARA EVENTOS DE INTERRUPÇÃO DE TENSÃO

**Figura 17: Interrupção momenâneo de Tensão - 1.515 s**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 18: Interrupção Temporária de Tensão - 8.580 s**



Fonte: Autoria Própria

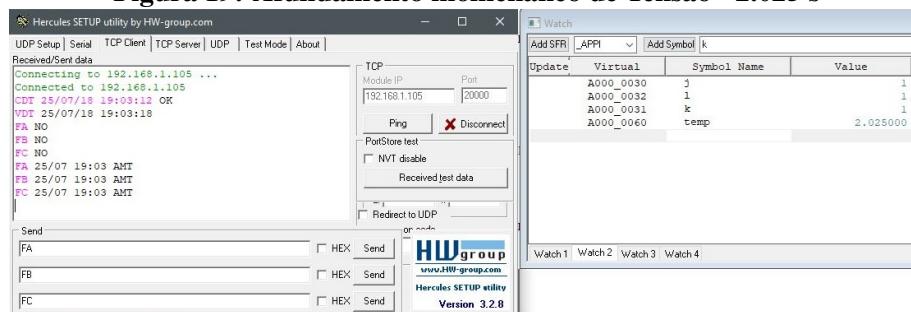
## 5.3 TESTES PARA EVENTOS DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Esta seção apresentará os testes de afundamento de tensão realizados com o auxílio do variador de tensão monofásico.

### 5.3.1 AFUNDAMENTO MOMENTÂNEO DE TENSÃO

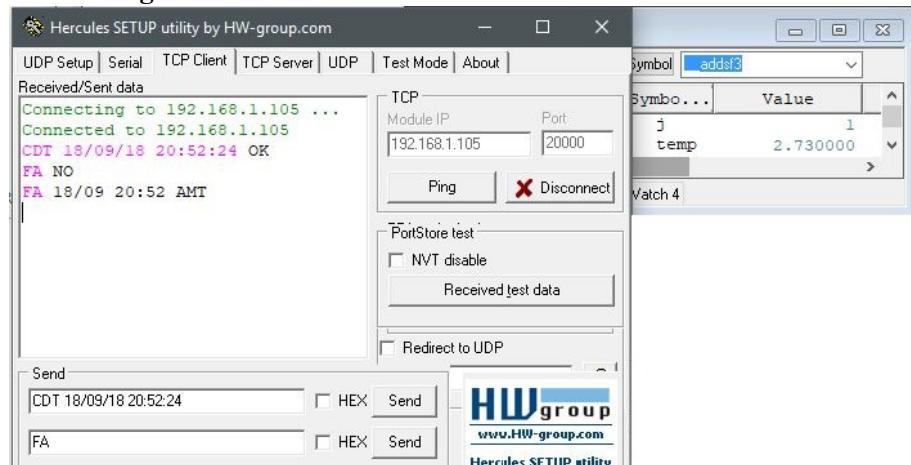
A Figura 19 apresenta um teste de afundamento de tensão momentâneo. A variável temp, visível na janela *Watch* do software MPLABX, mostra a duração do evento, medida pelo firmware do sistema.

**Figura 19: Afundamento momenâneo de Tensão - 2.025 s**



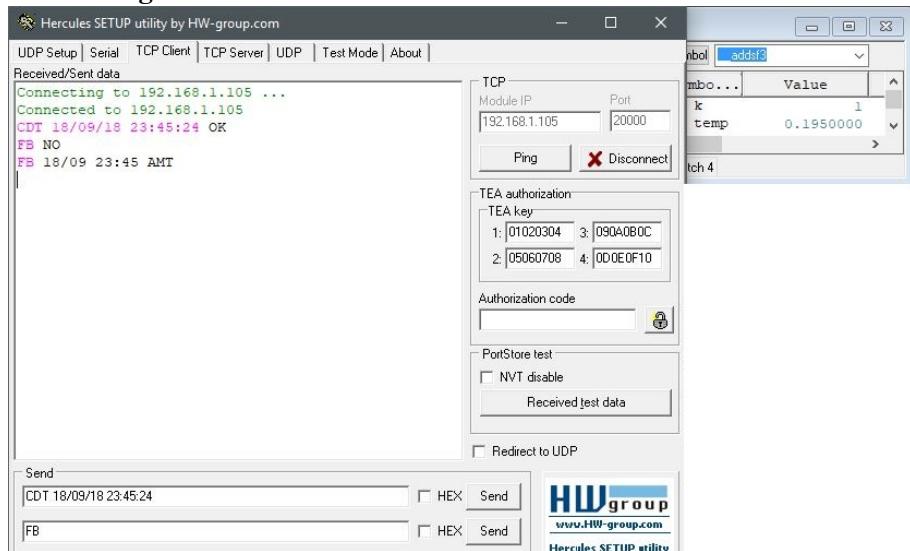
Fonte: Autoria Própria

**Figura 20: Afundamento momenâneo de Tensão - 2.730 s**



Fonte: Autoria Própria

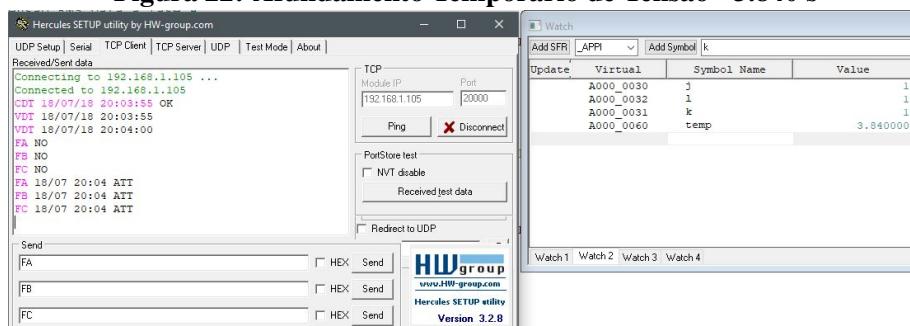
**Figura 21: Afundamento momenâneo de Tensão - 0.195 s**



**Fonte:** Autoria Própria

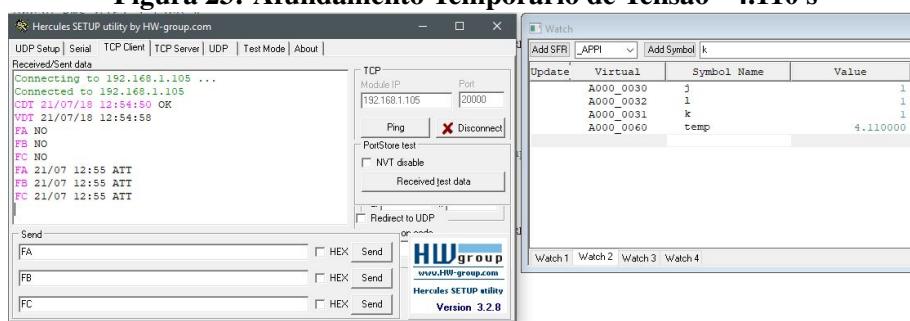
### 5.3.2 AFUNDAMENTO TEMPORÁRIO DE TENSÃO

**Figura 22: Afundamento Temporário de Tensão - 3.840 s**



**Fonte:** Autoria Própria

**Figura 23: Afundamento Temporário de Tensão - 4.110 s**

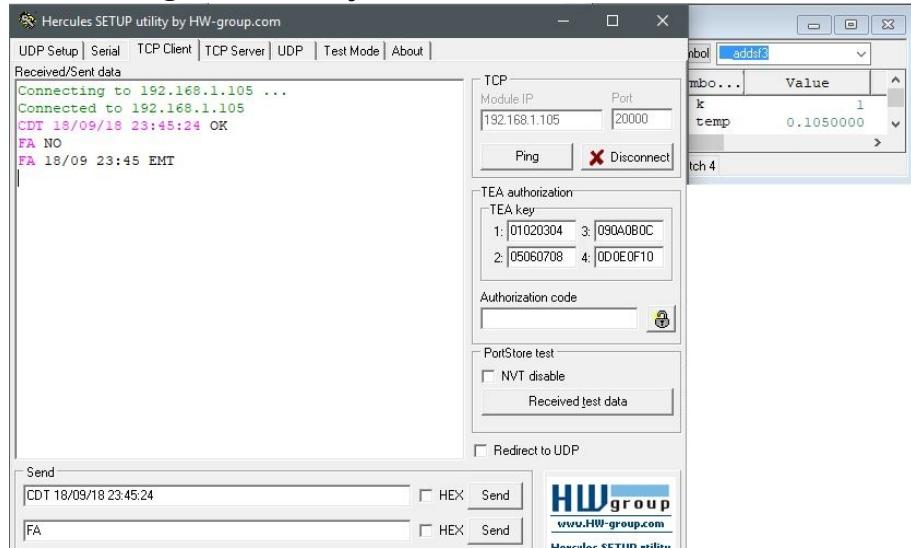


**Fonte:** Autoria Própria

## 5.4 TESTES PARA EVENTOS DE ELEVAÇÃO DE TENSÃO

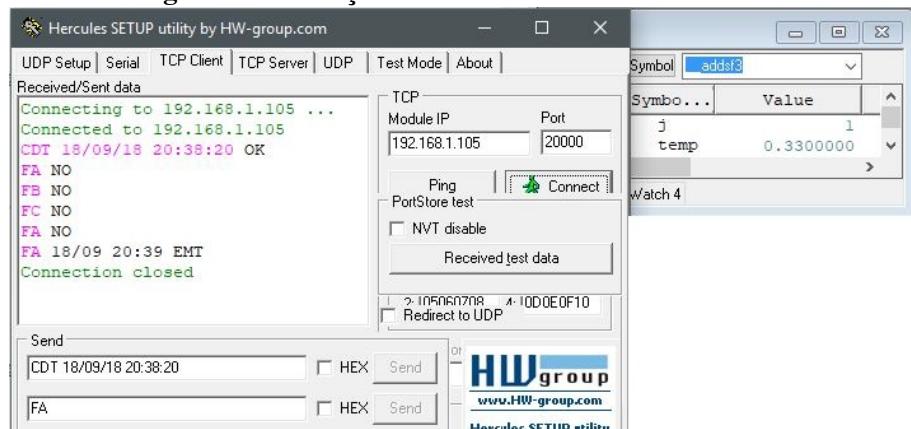
### 5.4.1 ELEVAÇÃO MOMENTÂNEA DE TENSÃO

**Figura 24: Elevação Momentânea de Tensão - 0.105 s**



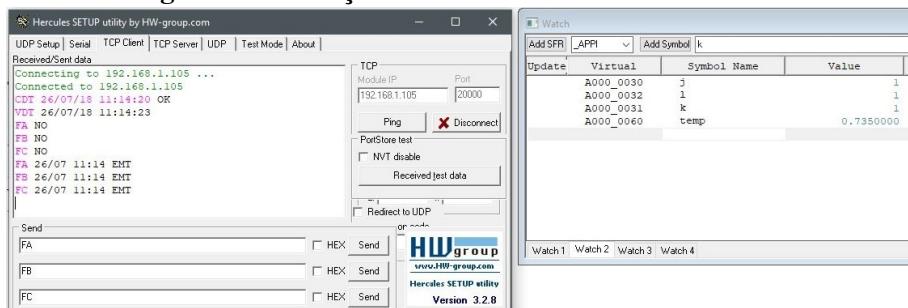
**Fonte: Autoria Própria**

**Figura 25: Elevação Momentânea de Tensão - 0.330 s**



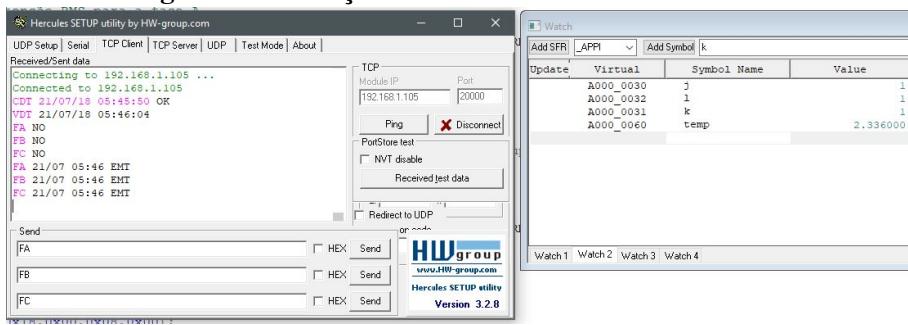
**Fonte: Autoria Própria**

**Figura 26: Elevação Momentânea de Tensão - 0.735 s**



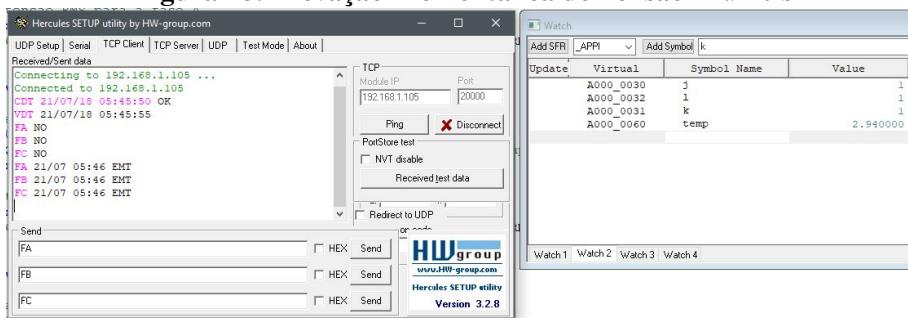
Fonte: Autoria Própria

**Figura 27: Elevação Momentânea de Tensão - 2.336 s**



Fonte: Autoria Própria

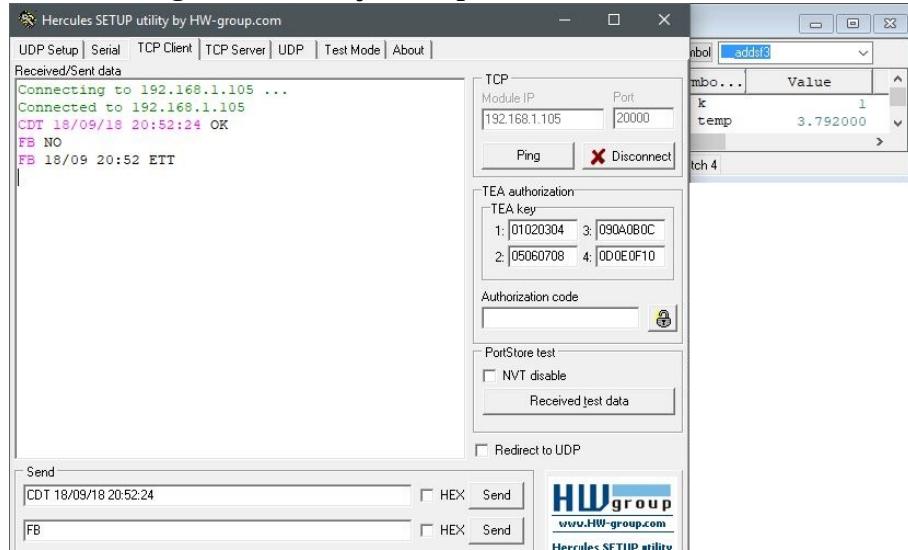
**Figura 28: Elevação Momentânea de Tensão - 2.940 s**



Fonte: Autoria Própria

#### 5.4.2 ELEVAÇÃO TEMPORÁRIA DE TENSÃO

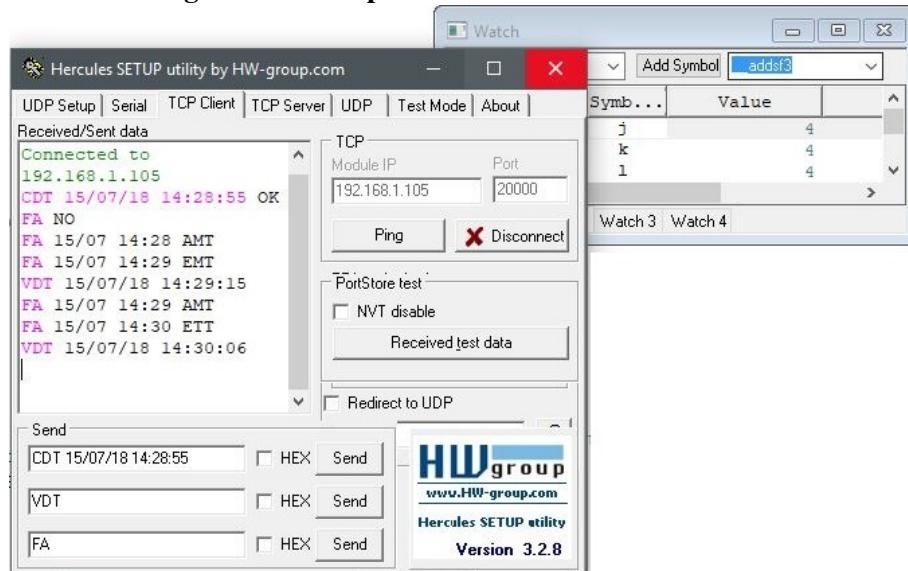
**Figura 29: Elevação Temporária de Tensão - 3.792 s**



Fonte: Autoria Própria

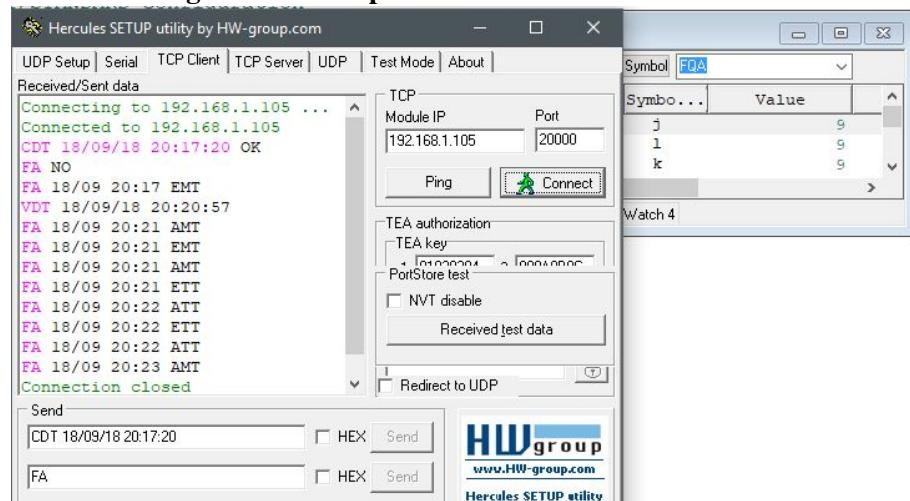
#### 5.5 TESTES PARA MÚLTIPLOS EVENTOS - BUFFER ROTATIVO

**Figura 30: Multiplos eventos na fase A - 4 eventos**



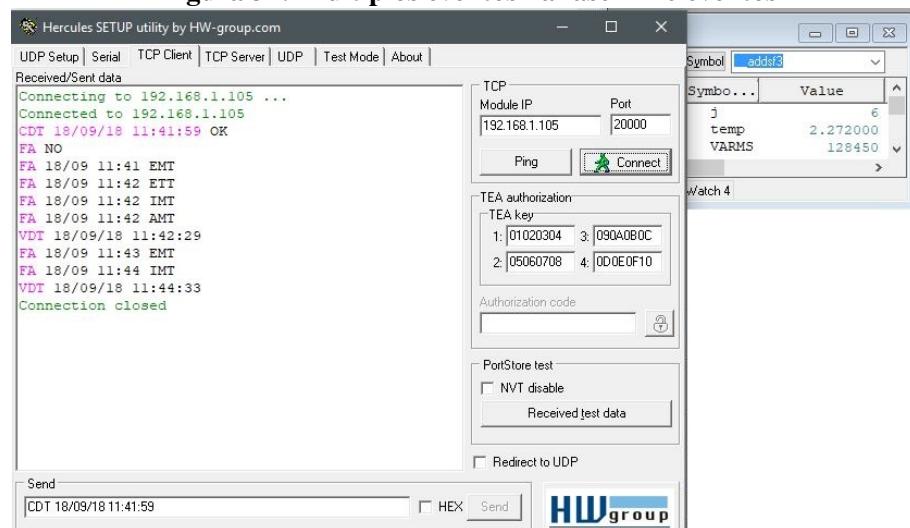
Fonte: Autoria Própria

**Figura 31: Multiplos eventos na fase A - 9 eventos**



**Fonte: Autoria Própria**

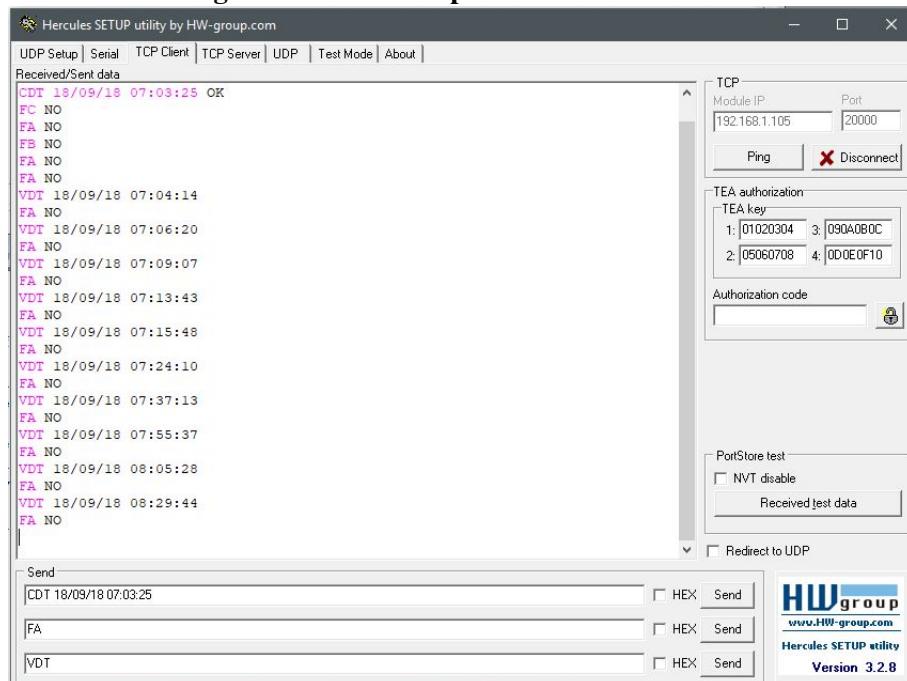
**Figura 32: Multiplos eventos na fase A - 6 eventos**



**Fonte: Autoria Própria**

## 5.6 TESTE DIRETAMENTE NA REDE ELÉTRICA

**Figura 33: Teste do aparelho na rede elétrica**



**Fonte: Autoria Própria**

## **6 CONCLUSÃO**

## 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, 2011.
- ASSOCIATION, I. S. et al. 1159-2009. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality Industrial and Commercial Applications.** New York: IEEE Press, 2009.
- BOLLEN, M. H. J. Understanding Power Quality Problems - Voltage Sags and Interruptions.** United States of America: John Wiley and Sons, 2002. ISBN 0-7803-4713-7.
- 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.**
- 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.
- 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.

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.