

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**

PROPOSTA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017

GABRIEL TEIXEIRA GRAZIANO DE OLIVEIRA

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

Proposta de 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 Bacharel.

Orientador: Prof^o.Dr.Andre Sanches Fonseca
Sobrinho

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017

RESUMO

OLIVEIRA, Gabriel T. G. de. Sistema de monitoramento de variações de tensão de curta duração em redes de distribuição de energia. 22 f. Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Palavras-chave:

ABSTRACT

OLIVEIRA, Gabriel T. G. de. . 22 f. Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Keywords:

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|----------|--|----|
| FIGURA 1 | – Interrupção momentânea de tensão | 11 |
| FIGURA 2 | – Afundamento instantâneo de tensão | 12 |
| FIGURA 3 | – Elevação instantânea de tensão | 13 |
| FIGURA 4 | – Diagrama do circuito da placa de desenvolvimento Cerebot MX7cK ... | 14 |
| FIGURA 5 | – Configuração de pinos do circuito integrado ADE7758 | 15 |
| FIGURA 6 | – Detecção de afundamento de tensão | 16 |
| FIGURA 7 | – Detecção da tensão de pico usando o registrador VPEAK | 17 |
| FIGURA 8 | – Detecção de elevação de tensão | 17 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|--|----|
| TABELA 1 | – Tipos de VTCD | 10 |
| TABELA 2 | – Variações de Tensão de Curta Duração | 13 |
| TABELA 3 | – Cronograma de Execução | 21 |

LISTA DE SIGLAS

VTCD Variações de Tensão de Curta Duração

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 8 |
| 1.1 | PROBLEMA | 9 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 9 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 10 |
| 2.1 | VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO | 10 |
| 2.1.1 | Valor Eficaz da Tensão | 11 |
| 2.1.2 | Interrupção de Tensão (<i>Interruption</i>) | 11 |
| 2.1.3 | Afundamento de Tensão (<i>Voltage Sag</i>) | 12 |
| 2.1.4 | Elevação de Tensão (<i>Voltage Swell</i>) | 12 |
| 2.2 | MICROCONTROLADOR PIC32MX795F512L | 13 |
| 2.3 | CIRCUITO INTEGRADO ADE7758 | 15 |
| 2.3.1 | Detecção de afundamento de tensão de linha | 15 |
| 2.3.2 | Detecção de tensão de pico | 16 |
| 2.3.3 | Detecção de Sobretenção | 17 |
| 2.3.4 | Medição de Frequência | 18 |
| 2.3.5 | Medição de Tensão RMS | 18 |
| 3 | METODOLOGIA | 19 |
| 3.1 | TRABALHO PROPOSTO | 19 |
| 3.1.1 | Abordagem 1 | 19 |
| 3.1.2 | Abordagem 2 | 20 |
| 3.2 | ETAPAS DO TRABALHO | 20 |
| 3.2.1 | Revisão Bibliográfica | 20 |
| 3.2.2 | Definição e estudo das tecnologias | 20 |
| 4 | CRONOGRAMA | 21 |
| | REFERÊNCIAS | 22 |

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 à 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).

1.1 PROBLEMA

1.2 OBJETIVOS

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.

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

- Configurar o microcontrolador PIC32MX795F512L para realizar a comunicação com o circuito integrado ADE7758;
- Programar o circuito integrado ADE7758 para realizar a detecção dos diferentes tipos de variações de tensão de curta duração;
- Configurar o microcontrolador PIC32MX795F512L para funcionar como um servidor TCP/IP, disponibilizando as informações das ocorrências em tempo real.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

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) (ONS, 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 (ONS, 2011).

Na tabela 1 é mostrada uma classificação geral dos tipos de variações de tensão de curta duração, e na tabela 2 são apresentados os critérios detalhados para a definição de cada tipo de variação de acordo com a norma vigente da ONS (ONS, 2011).

Tabela 1: Tipos de VTCD

| Tipo | Duração |
|--------------|------------------------|
| Instantâneos | 0.5 a 30 ciclos |
| Momentâneos | 30 ciclos a 3 segundos |
| Temporários | 3 segundos a 1 minuto |

2.1.1 VALOR EFICAZ DA TENSÃO

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.

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

2.1.2 INTERRUPÇÃO DE TENSÃO (*INTERRUPTION*)

A interrupção ocorre quando a amplitude da tensão decresce 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 1 ilustra a ocorrência de uma interrupção momentânea, com a tensão caindo para 0 durante aproximadamente 2 segundos. O primeiro gráfico apresenta a variação da tensão eficaz (rms) durante todo o evento, enquanto o segundo apresenta a variação do valor instantâneo da tensão durante o início da interrupção.

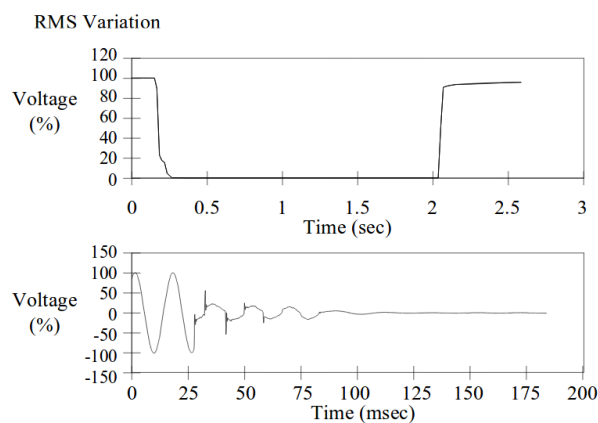


Figura 1: Interrupção momentânea de tensão

Fonte: (ASSOCIATION et al., 2009)

2.1.3 AFUNDAMENTO DE TENSÃO (*VOLTAGE SAG*)

O afundamento ocorre quando a tensão decai para um valor entre 0,1 e 0,9 pu (tensão remanescente de 0,1 a 0,9 pu). Esse evento é geralmente associado às condições de defeito no sistema, comutação de grandes blocos de carga e acionamento de grandes motores (ASSOCIATION et al., 2009).

A figura 2 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.

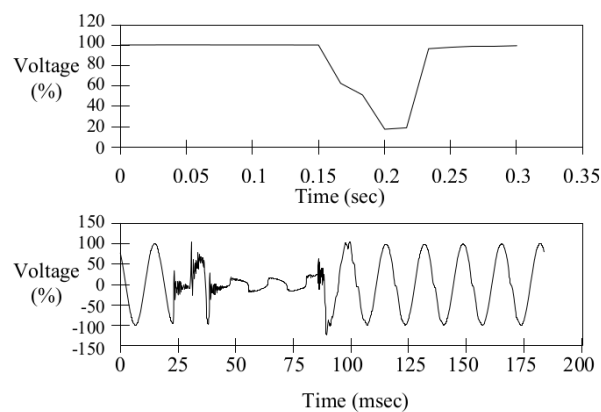


Figura 2: Afundamento instantâneo de tensão

Fonte: (ASSOCIATION et al., 2009)

2.1.4 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 2. Assim como ocorre com o afundamento, sua ocorrência está associada às condições de falhas no sistema, desligamento de grandes cargas ou bancos de capacitores (ASSOCIATION et al., 2009).

A figura 3 ilustra uma condição de elevação instantânea de tensão em um sistema, com dois gráficos indicando as variações da tensão instantânea e da eficaz.

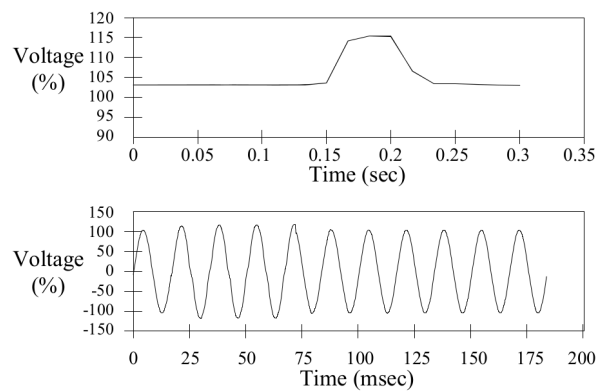


Figura 3: Elevação instantânea de tensão

Fonte: (ASSOCIATION et al., 2009)

Tabela 2: Variações de Tensão de Curta Duração

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

2.2 MICROCONTROLADOR PIC32MX795F512L

Para este trabalho será 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 INCORPORA-

TED, 2011).

O PIC32MX795F512L conta também com 5 Timers de 16 bits, sendo que dois pares podem ser combinados para formar dois Timers de 32 bits (MICROCHIP TECHNOLOGY INCORPORATED, 2011). Será explicado na seção 3 como esses Timers serão utilizados no trabalho.

Outra característica importante desse microcontrolador é a presença de uma interface de controle de acesso ethernet (MAC) de 10/100 Mbps (MICROCHIP TECHNOLOGY INCORPORATED, 2011) que, em conjunto com o periférico relógio em tempo real (também presente no microcontrolador), permitirá configurar o dispositivo para funcionar como um servidor, salvando as informações de tipo, duração e hora das ocorrências de variações na tensão e disponibilizando-as para consulta online.

O microcontrolador PIC32MX795F512L será 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 4:

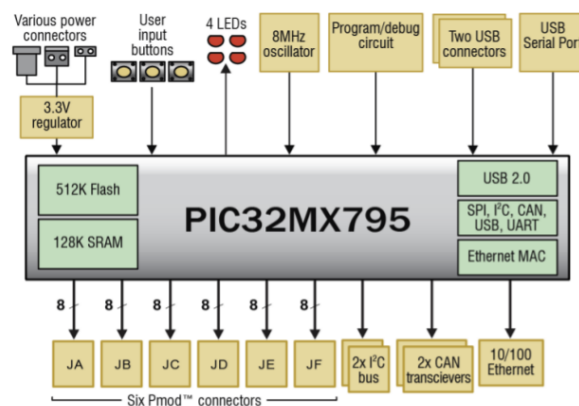


Figura 4: Diagrama do circuito da placa de desenvolvimento Cerebot MX7cK

Fonte: (DILIGENT INCORPORATED, 2013)

2.3 CIRCUITO INTEGRADO ADE7758

O ADE7758, fabricado pela empresa *Analog Devices*, é um circuito integrado 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: tensão e corrente. O canal de tensão conta com três entradas: VAP, VBP e VCP. (ANALOG DEVICES, 2011)

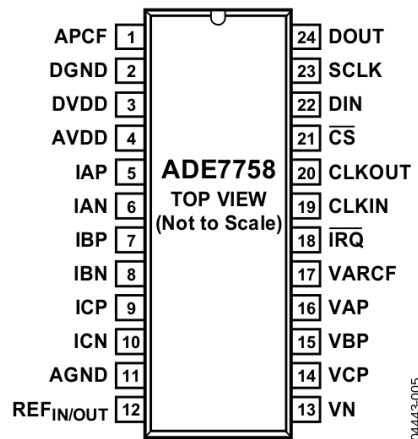


Figura 5: Configuração de pinos do circuito integrado ADE7758

Fonte: (ANALOG DEVICES, 2011)

Para o propósito deste trabalho, o ADE7758 apresenta algumas funções muito úteis, descritas abaixo.

2.3.1 DETECÇÃO DE AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE LINHA

O ADE7758 pode ser programado para detectar uma diminuição no valor absoluto da tensão de linha, abaixo de um limiar configurado no registrador de nível de afundamento (*Sag level register*), por um número de meio ciclos.

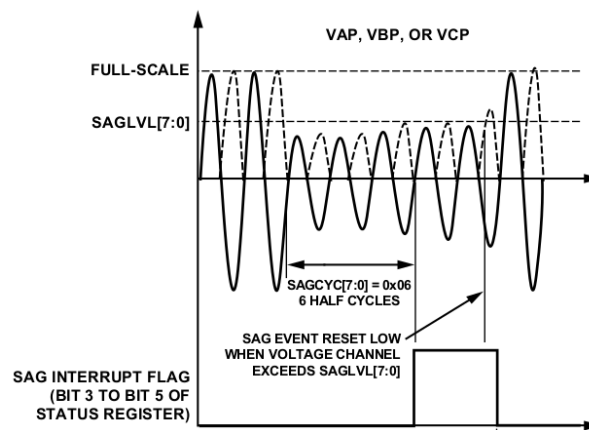


Figura 6: Detecção de afundamento de tensão

Fonte: (ANALOG DEVICES, 2011)

A figura 6 ilustra um exemplo dessa função. A tensão fica abaixo de um limiar definido no registrador de nível de afundamento (SAGLVL[7:0]), durante nove meio ciclos. Como o registrador de ciclos de afundamento indica um limiar de seis meio ciclos (SAGCYC[7:0]=0x06), o evento de afundamento começa a ser registrado após o fim do sexto meio ciclo, quando a flag que indica o afundamento é colocada em nível lógico alto para a fase de tensão correspondente (Bits 1 até 3 no registrador da interrupção) (ANALOG DEVICES, 2011).

2.3.2 DETECÇÃO DE TENSÃO DE PICO

O circuito Integrado ADE7758 pode também ser configurado para fazer a detecção de eventos de elevação de tensão. O valor absoluto de pico da forma de onda da tensão, dentro de um número fixo de meio ciclos. Além disso, múltiplas fases podem ser ativadas para essa detecção simultânea através da configuração dos bits de PEAKSEL[2:4], no registrador MMODE. Esses bits podem selecionar fase para medição da tensão e da corrente. (ANALOG DEVICES, 2011)

A figura 7 ilustra o comportamento temporal da detecção da tensão de pico.

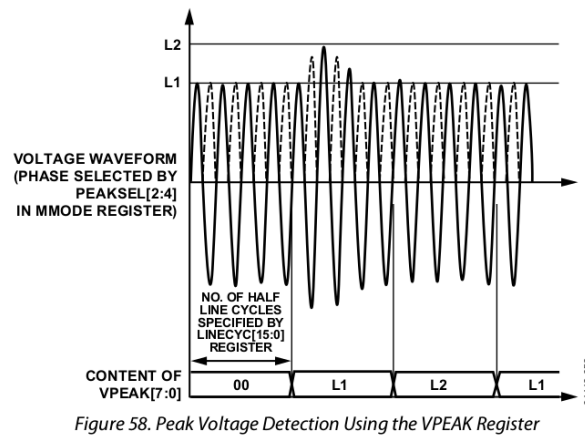


Figura 7: Detecção da tensão de pico usando o registrador VPEAK

Fonte: (ANALOG DEVICES, 2011)

2.3.3 DETECÇÃO DE SOBRETENSÃO

Na figura 8 é possível ver o comportamento da detecção de sobretensão, quando o valor absoluto da tensão excede um limiar configurado no registrador VPINTLVL[7:0]. O Bit 14 (*PKV flag*) do registrador de interrupção é responsável por gravar a ocorrência da sobretensão. Assim como na detecção de tensão de pico, multiplas fases de tensão e corrente podem ser monitoradas individualmente a partir da configuração dos bits PKIRQSEL[5:7] do registrador MMODE (ANALOG DEVICES, 2011).

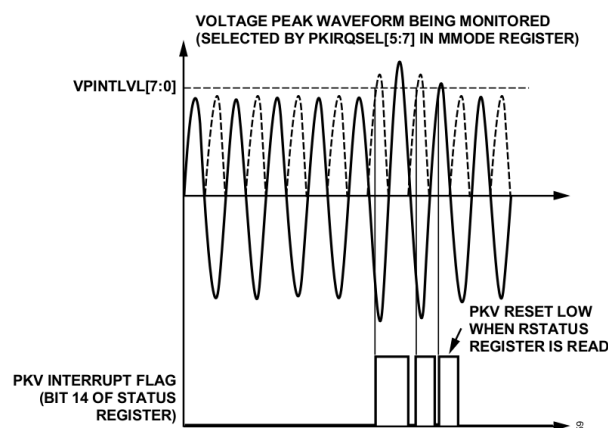


Figura 8: Detecção de elevação de tensão

Fonte: (ANALOG DEVICES, 2011)

2.3.4 MEDIÇÃO DE FREQUÊNCIA

Com o circuito integrado ADE7758 é possível fazer a medição da frequência e do período da tensão. A fase que será analisada é selecionada no Bit 0 e Bit 1 do registrador MMODE, sendo que o registrador do período é o registrador FREQ, de 12 Bits (ANALOG DEVICES, 2011).

O Bit 7 do LCYCMODE seleciona se o registrador do período irá mostrar a frequência ou o período. Por padrão esse Bit é configurado em nível lógico baixo, com o registrador mostrando a medição da frequência. Caso o Bit seja configurado em nível lógico alto, o registrador irá mostrar o período.

2.3.5 MEDIÇÃO DE TENSÃO RMS

Foi apresentado na seção 2.1.1 o conceito de valor eficaz da tensão. O circuito integrado ADE7758 é capaz de calcular esse valor para cada uma das seis entradas analógicas, mantendo os resultados em diferentes registradores.

Os valores de tensão eficaz são salvos em registradores de 24 bits: AVRMS, BVRMS e CVRMS.

3 METODOLOGIA

3.1 TRABALHO PROPOSTO

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, classificá-las de acordo com as normas vigentes, salvar essa informação (incluindo data e hora da ocorrência) e disponibilizá-la online para consulta.

Para isso, duas abordagens diferentes serão propostas neste capítulo.

3.1.1 ABORDAGEM 1

A primeira abordagem proposta envolve a utilização das funções de detecção de afundamento e de sobretensão do circuito integrado ADE7758, descritas nas seções 2.3.1 e 2.3.3, além dos timers e demais periféricos do microcontrolador PIC32MX795F512L.

Para a detecção da ocorrência de afundamento de tensão, o registrador SAGLVL[7:0] deverá ser configurado de acordo com os valores da tabela 2, ativando a interrupção quando o valor da tensão ficar abaixo de 0.9 pu por um período maior que um ciclo.

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 2.

No caso da elevação de tensão, a detecção será feita através da configuração do limite superior no registrador VPINTLVL[7:0]. 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.

3.1.2 ABORDAGEM 2

Outro método para o desenvolvimento do sistema seria a utilização da medição da tensão eficaz, função do ADE7758 descrita na seção 2.3.5. 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 2, enquadrando a ocorrência de variação da tensão como interrupção, afundamento ou elevação.

O timer presente no microcontrolador PIC32MX795F512L será acionado no início do evento, contando a duração de total e, de acordo com o valor medido, enquadrando o evento de VTCD como momentâneo ou temporário.

3.2 ETAPAS DO TRABALHO

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

- Revisão Bibliográfica

3.2.1 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 e demais áreas abordadas no trabalho. O objetivo aqui é estudar o que já foi feito na área, quais são as principais técnicas existentes para a detecção desse tipo de evento e como esse trabalho poderá contribuir com o assunto.

3.2.2 DEFINIÇÃO E ESTUDO DAS TECNOLOGIAS

4 CRONOGRAMA

Tabela 3: Cronograma de Execução

| Etapas | Setembro | Outubro | Novembro | Dezembro | Fevereiro | Março | Abril | Maiο | Junho |
|---------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| 1 | x | x | x | | | | | | |
| 2 | x | x | | | | | | | |
| 3 | x | x | x | | | | | | |
| 4 | | | x | | | | | | |
| 5 | | | x | x | | | | | |
| 6 | | | x | x | x | x | x | | |
| 7 | | | | | | x | x | x | |
| 8 | | | | | | x | x | x | |
| 9 | | | | | | | | | x |

1. Revisão bibliográfica
2. Definição e estudo das tecnologias
3. Aplicação dos conceitos teóricos
4. Desenvolvimento do protótipo
5. Validação e análise dos resultados
6. Elaboração da monografia e artigo científico
7. Defesa

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 Distribuicao de Energia Eletrica no Sistema Eletrico Nacional (PRODIST) - Modulo 8 - Qualidade de Energia**. [S.l.], 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.

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. **PIC32MX5XX/6XX/7XX Family Data Sheet - High-Performance, USB, CAN and Ethernet 32-bit Flash Microcontrollers**. United States of America, 2011. Rev. E.

ONS, P. d. R. **Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia eletrica da Rede Basica**. [S.l.], 2011.