

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO N°669

RELIGADOR AUTOMÁTICO PARA REDES DE BAIXA TENSÃO

Elisa de Mendonça Passini Leitão

DATA DA DEFESA: 02/03/2011

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Religador automático para redes de baixa tensão

Elisa de Mendonça Passini Leitão

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Porfírio Cabaleiro Cortizo

Co-Orientador: Prof. Dr. Benjamim Rodrigues de Menezes

Belo Horizonte - MG

Março de 2011

"Religador Automático Para Redes de Baixa Tensão"

Elisa de Mendonça Passini Leitão

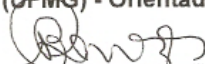
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 02 de março de 2011.

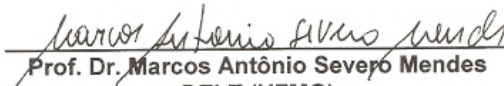
Por:



Prof. Dr. Porfírio Cabaleiro Cortizo
DELT (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Benjamim Rodrigues de Menezes
DELT (UFMG) - Co-Orientador



Prof. Dr. Marcos Antônio Severo Mendes
DELT (UFMG)



Prof. Dr. Lenin Martins Ferreira Moraes
DELT (UFMG)

Dedicatória

Ao Vitor, pelo amor, companheirismo e dedicação.

Aos meus pais, Norma e Passini, pelo amor e exemplo de vida que são para mim.

Agradecimentos

A Deus, o Autor da vida, Pai de amor infinito, os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao Vitor, meu amor, meu cúmplice, meu companheiro, meu amigo. Agradeço o seu amor, a sua compreensão, o seu companherismo e o seu devotamento. Sua ajuda incansável com questões que você sequer conhecia, mas se esforçava ao máximo para entender. Agradeço as noites de sono que você perdeu, só para me fazer companhia, enquanto eu estudava. Obrigada por me amar incondicionalmente. A você, meu agradecimento e meu coração.

À Norma, mãezinha amada e amiga. Obrigada por me fazer olhar sempre em frente, com otimismo, procurando vencer. Não permitindo que o desânimo se apoderasse de mim. Seu carinho e sua dedicação fizeram com que eu me tornasse uma pessoa melhor. Sua garra e o seu exemplo são fundamentais na minha vida. A você, meus agradecimentos e minha completa admiração!

Ao meu amigo e amado Pai, José Passini, meu exemplo de vida, minha fortaleza, minha completa admiração! Sua honestidade e retidão são modelos para minha vida. Obrigada por ser essa figura tão forte e tão importante para mim. Sua vida é exemplo de vitória.

Aos meus irmãos agradeço o carinho e o amor. Mesmo de longe pude sentir a torcida de vocês!

Em especial ao meu irmão Marcos, que sempre me incentivou e esteve ao meu lado, me aconselhando e ensinando. Valeu, Mano!

Ao meu amigo Danny Tonidandel. Entre "cafézis", sonhos, filosofias e divagações, muito aprendi com você. Obrigada, meu amigo!

À minha amiga Regiane, pelos momentos engraçados e de descontração, entre aulas, trabalhos e provas.

Ao Professor Porfírio que, mesmo sem recomendações, me deu a oportunidade de realizar esse trabalho.

Aos Professores Benjamin, Severo, Lenin e Seleme pelas orientações ao longo do trabalho.

Aos amigos Thiago e Welbert pelo companheirismo, pela oportunidade de estudarmos juntos e pela ajuda que sempre me deram.

Ao Matheus Palha, companheiro de projeto, agradeço a ajuda em vários momentos e a presteza no trabalho em conjunto.

Aos demais colegas de laboratório, pela amizade.

À CEMIG pelo financiamento do projeto.

Ao CNPq pelo apoio financeiro

Ao PPGEE pela oportunidade de estudo.

Resumo

Fusíveis são dispositivos de proteção utilizados nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Os fusíveis são compostos de um filamento projetado para derreter em caso de curto-circuito ou sobrecorrente, abrindo o circuito que devem proteger, evitando assim que essa corrente de valor elevado danifique o circuito. Por esta razão devem ser substituídos a cada ocorrência de curto ou de sobrecorrente na linha. Outra característica dos fusíveis é a não distinção entre defeitos permanentes e transitórios. Novos dispositivos foram propostos a fim de sanar esses problemas, aumentando a confiabilidade do sistema de energia elétrica. Religadores são exemplos de dispositivos com capacidade de detectar faltas e desligar o circuito, sem a necessidade de serem substituídos. Os religadores que hoje protegem o sistema elétrico são de média tensão. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um religador automático para redes de baixa tensão que seja capaz de distinguir faltas permanentes de faltas transitórias, que possibilite a seletividade do sistema elétrico e que viabilize a operação remota e a automação da linha à qual está conectado. O religador é composto de três partes essenciais: dispositivos de medição das tensões e correntes da linha, dispositivo de processamento dos dados de medição e dispositivo seccionador, que fará a abertura física do circuito. Cada uma dessas partes é analisada, especificada e descrita.

Palavras-chave: Religadores, Proteção de sistemas de distribuição, sistemas distribuição.

Abstract

Fuses are protective devices used in electric power distribution. Fuses are made of wire designed for melting in case of short-circuit or over-current, thus avoiding that the current of high value damage the circuit. Therefore, fuses have to be replaced everytime that this type of event occur. Another feature of those devices is the disability to distinguish between permanent and transient fault. New devices have been proposed to solve these problems by increasing the reliability of electric power system. Reclosers are examples of devices with the capacity to detect faults and disconnect the circuit without any replacement. Nowadays the reclosers that protect the electrical system are medium voltage. The present research intends to develop an automatic recloser to low voltage networks with the ability of distinguishing permanent faults from transient faults, allowing selectivity of the electrical system and enabling remote operation and automation of the line to which it is connected. The recloser is made of three main parts: voltage and current measurements devices, measurement data processing devices and disconnecting devices, that will open the circuit. Each one of these parts is analysed, specified and described.

Keywords: *Keywords: Reclosers, Power system protection, distribution systems.*

Sumário

Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Abreviaturas	x
Lista de Símbolos	xii
Lista de Figuras	xiv
Lista de Tabelas	xv
1 Introdução	1
1.1 Identificação do problema	1
1.2 Motivação do estudo	5
1.3 Objetivos	9
1.4 Estrutura do texto	10
2 Estado da arte	11
2.1 Introdução	11
2.2 Religadores de baixa tensão	11
2.2.1 Pesquisa acadêmica	11
2.2.2 Solução de mercado	12
2.3 Religadores de média tensão	13
2.3.1 Soluções de mercado	13
2.3.2 Pesquisas acadêmicas	20
2.4 Conclusões parciais	23
3 O Religador Automático para redes de baixa tensão	24
3.1 Introdução	24
3.2 Especificações	24
3.2.1 Condições gerais de funcionamento do Religador	24
3.2.2 Características físicas e de controle	24
3.2.3 Operação	26

3.2.4	<i>Firmware</i> de Controle e Automação	27
3.3	Diagrama de blocos do religador	29
3.3.1	Medição, condicionamento e processamento de sinais	29
3.3.2	Comunicação e interface homem-máquina	33
3.3.3	Comando do disjuntor	33
3.4	Características do dispositivo seccionador	34
3.4.1	Contator	34
3.4.2	Disjuntor	34
3.4.3	Disjuntor de estado sólido	35
3.5	Conclusões parciais	36
4	Medição de frequência e cálculos de valor eficaz e potências	38
4.1	Introdução	38
4.2	Cálculo do valor eficaz	38
4.2.1	Taxa de amostragem	39
4.2.2	Variação da frequência do sinal	39
4.2.3	Efeito da quantização	43
4.2.4	Rotinas de cálculo da tensão c.c. e da tensão eficaz	45
4.3	Redução de erros nos cálculos V_{eficaz}	48
4.4	Cálculo de potências	49
4.4.1	Definições de potência segundo Budeanu	50
4.4.2	Definições de potência segundo Frize	51
4.5	Conclusões parciais	52
5	Conclusões gerais e propostas de continuidade	53
5.1	Conclusões gerais	53
5.2	Propostas de continuidade	54
	Referências Bibliográficas	56

Lista de Abreviaturas

COD	Centro de Operações de Distribuição.
TAE	Tempo de Atendimento de Emergência.
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, expressa em horas.
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, expressa em número de interrupções.
DIC	Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão, expressa em horas.
FIC	Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão, expressa em número de interrupções.
DMIC	Duração Máxima de Interrupções Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão, expressa em horas.
ANEEL	Agência Nacional de Energia elétrica.
LACTEC	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento.
GE	General Electric.
c.a.	Corrente Alternada.
c.c.	Corrente Contínua.
LED	Diodo Emissor de Luz. <i>Light-Emitting Diode.</i>
IP	Índice de proteção.
OSM	<i>Outdoor Switching Module.</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor.</i>
TDMA	<i>Time-Division Multiple Access.</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display.</i>
GPRS	<i>General packet radio service.</i>
TC	Transformador de Corrente.
TP	Transformador de Potencial.
USB	<i>Universal Serial Bus.</i>
RTC	<i>Real Time Clock.</i>

DNP3	<i>Distributed Network Protocol.</i>
A/D	Refere-se ao Conversor Analógico/Digital.
PRODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.

Lista de Símbolos

td	Tempo de disparo da curva de um religador.
tm	Tempo morto da curva de um religador.
k	Fator de elevação da temperatura do elo-fusível durante os intervalos de abertura rápida do religador.
t_a	Intervalo de tempo entre a ocorrência da falta de energia e o conhecimento desta falta pela concessionária .
t_b	Intervalo de tempo necessário para acionar a equipe de manutenção.
t_c	Intervalo de tempo gasto para a equipe de manutenção detectar o local e a causa do problema.
t_d	Intervalo de tempo para o restabelecimento da energia elétrica para os consumidores que estão fora da área de defeito.
t_1	Tempo de pesquisa do defeito.
t_2	Tempo médio para o reparo completo da linha.
$C_a(i)$	Número de unidades consumidoras interrompidas em uma falta.
$t(i)$	Duração de cada falta.
i	Índice de eventos ocorridos no sistema que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras.
n	É o número máximo de faltas no período considerado.
C_c	Número total de unidades consumidoras, do conjunto considerado, no final do período de apuração.
SF_6	Gás Hexafluoreto de Enxofre.
I_{ter}	Corrente de curto-circuito para efeito térmico.
I_{cs}	Corrente eficaz, inicial, simétrica, de curto-circuito.
T_{op}	Tempo de operação da proteção.
F_{tc}	Fator térmico de curto-circuito.
I_{np}	Corrente nominal primária do TC.
\bar{X}	Valor médio.
N	Número de amostras, por período.
x_n	Sinais periódicos amostrados.
$\overline{X^2}$	Valor médio quadrático.

$X_{c.c.}$	Valor c.c. do sinal amostrado.
X_{eficaz}	Valor eficaz total do sinal amostrado.
f_s	Frequência de amostragem.
f_N	Frequência de Nyquist.
V_{eficaz}	Valor da tensão eficaz.
V_n	Valor do <i>n-ésimo</i> harmônico de tensão.

Lista de Figuras

1.1	Esquema de funcionamento de um sistema de distribuição sem religador . . .	2
1.2	Esquema de funcionamento de um sistema de distribuição com religador . . .	3
1.3	Curva de atuação de um religador	4
1.4	Curva de coordenação do religador e do elo-fusível	5
2.1	Exemplar de religador da série U, da Schneider Electric	14
2.2	Exemplar de religador da série N da Schneider Electric	15
2.3	Exemplar de religador do grupo W da Cooper Power System	16
2.4	Exemplar de religador NOVA da Cooper Power Systems	17
2.5	Exemplar de religador VSO da Cooper Power Systems	18
2.6	Exemplar de religador da linha VSA, com a tampa aberta	18
2.7	Exemplar de religador da linha OSM, da Noja Power	19
3.1	Fluxograma do funcionamento do religador	28
3.2	Diagrama de blocos do Religador Automático para Redes de Baixa Tensão	29
3.3	Transformador de Corrente utilizado no projeto para serviço de medição .	31
3.4	Coordenação do fusível 5H com o Disjuntor T5 400/630 - TMA, da ABB .	35
3.5	Circuito proposto para SSBC	36
4.1	Erro do valor eficaz, frequência de 56,6Hz, sem harmônicos	40
4.2	Erro máximo no valor eficaz x frequência, sem presença de harmônicos . .	41
4.3	Erro do valor eficaz, frequência de 56,6Hz, com harmônicos	42
4.4	Erro máximo no valor eficaz x frequência, com presença de harmônicos . .	42
4.5	Erro máximo da tensão eficaz, com número de bits fixo, sem harmônicos .	43
4.6	Erro médio da tensão eficaz, com número de bits fixo, sem harmônicos . .	44
4.7	Erro máximo da tensão eficaz, com número de bits fixo, com harmônicos .	45
4.8	Erro médio da tensão eficaz, com número de bits fixo, com harmônicos . .	46
4.9	Onda dente de serra, conversão e processamento	47
4.10	Detalhe da onda dente de serra, conversão e processamento	47
4.11	Modelo linear do PLL	48

Lista de Tabelas

1.1	Relação entre metas de indicadores coletivos e individuais	8
1.2	Metas para DIC e FIC não vinculados a DEC e FEC	8
1.3	Metas para DMIC	8
2.1	Valores de catálogo dos religadores série U da Schneider Electric	14
2.2	Valores de catálogo dos religadores série N da Schneider Electric	15
2.3	Características nominais de religadores da linha W	17
2.4	Características nominais de religadores da linha VSA	18
2.5	Características nominais dos religadores da linha OSM, da Noja Power	19
4.1	Conteúdo harmônico utilizado na simulação da tensão	41

Capítulo 1

Introdução

1.1 Identificação do problema

Os fusíveis são usados em sistemas de distribuição de energia elétrica para a proteção contra curto-circuito dos equipamentos conectados a uma rede. Os fusíveis são dispositivos simples e de baixo custo mas, cada vez que operam protegendo o sistema devem ser trocados requerendo mão de obra especializada e tempo para restabelecer a energia na linha. As curvas tempo x corrente dos fusíveis podem sofrer alterações por causa do envelhecimento dos fusíveis, levando-os a operar com valores de corrente diferentes de suas características originais. Além disso eles, não fazem distinção entre defeitos permanentes e transitórios [1].

Novos dispositivos foram desenvolvidos de modo a garantir a proteção do sistema elétrico. Religadores são exemplos de dispositivos de proteção que possuem capacidade de distinguir faltas permanentes de faltas transitórias e opção de serem operados remotamente.

Segundo dados estatísticos, a maioria das faltas que ocorrem em um sistema de distribuição aéreo de condutores não isolados é de natureza transitória [2]. Como exemplo podem-se citar: contato de galhos de árvores nos cabos da rede elétrica, indução de sobre-tensão nos cabos em função de descargas atmosféricas, pequenos animais que sobem nas estruturas, ventanias fortes que levam os condutores a se tocarem, dentre outros. Com os religadores operando na linha de distribuição, o tempo de restabelecimento da energia elétrica, em casos de defeitos transitórios, é reduzido.

Os religadores que protegem, hoje em dia, os sistemas elétricos de potência são de média tensão. Se o sistema de distribuição tiver de ser desenergizado por algum motivo, seja por algum defeito na linha ou para a realização de manutenção preventiva ou corretiva, o religador de média tensão deverá ser desenergizado. Isto feito, todos os circuitos a jusante do religador também serão desligados, fazendo com que um grande número de consumidores não recebam energia elétrica. Deste fato surgiu a necessidade de se desenvolver um religador de baixa tensão que permita o desligamento de um número menor de consumidores, caso haja necessidade de se desenergizar alguma parte do sistema de distribuição.

Além disso, o religador de baixa tensão diferenciara defeitos permanentes de transitórios, como qualquer religador; poderá automatizar o sistema de distribuição, medindo e enviando informações de tensão e corrente para o Centro de Operações de Distribuição (COD) da concessionária de energia e permitirá o acesso remoto para desenergizar parte do sistema para eventuais manutenções de maneira seletiva.

Os religadores são equipamentos utilizados para proteção contra curto-circuitos e sobrecorrentes. A Figura 1.1 mostra o esquema de funcionamento de um sistema de distribuição, composto por um transformador e por cargas conectadas diretamente ao secundário do transformador. A Figura 1.1(a) mostra o sistema operando normalmente. A Figura 1.1(b) mostra a ocorrência de um curto-circuito. Figura 1.1(c) mostra que, devido ao curto-circuito, a energia elétrica foi desligada e os consumidores estão sem energia. Por último, a Figura 1.1(d) mostra que a causa do curto-circuito foi transitória, ou seja, a causa desse curto foi removida, porém os consumidores permaneceram sem energia elétrica. A energia será restabelecida quando a equipe de manutenção da concessionária for até o local e trocar o fusível do transformador.

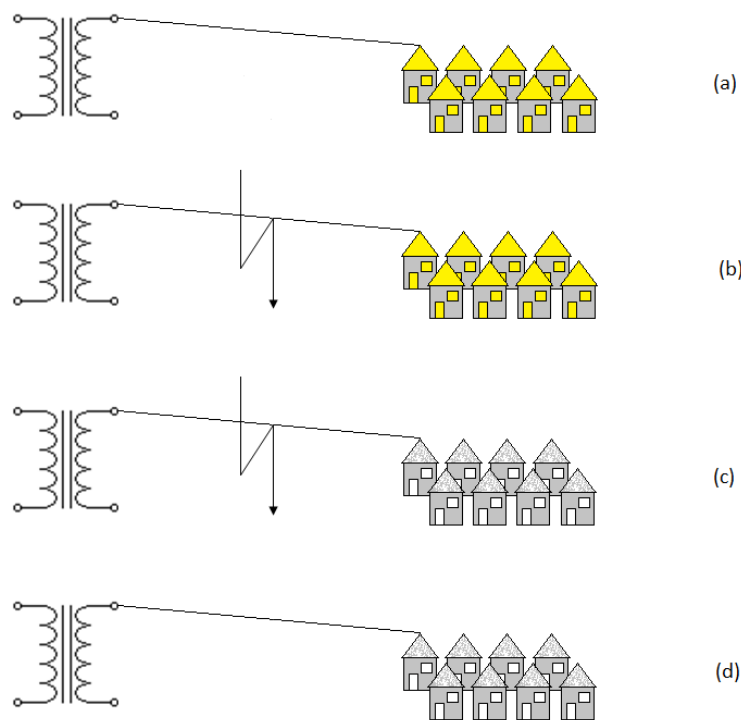


Figura 1.1: Esquema de funcionamento de um sistema de distribuição na ocorrência de um curto-circuito (a) sistema operando normalmente, (b) ocorrência de curto-circuito, (c) desligamento dos consumidores, (d) remoção do problema.

A Figura 1.2 mostra o esquema de funcionamento de um sistema de distribuição, composto por um transformador, pelo religador de baixa tensão proposto e pelas cargas. O religador conecta-se ao secundário do transformador e às cargas. A Figura 1.2(a) mostra o

sistema operando normalmente. A Figura 1.2(b) mostra a ocorrência de um curto-circuito. Figura 1.2(c) mostra que, devido ao curto-circuito, a energia elétrica foi desligada e os consumidores estão sem energia. A Figura 1.2(d) mostra que a causa do curto-circuito foi transitória, ou seja, a causa desse curto foi removida. Por último, a Figura 1.2(e) mostra que, após a causa do curto-circuito ter sido removida, o religador operou e religou os consumidores sem a necessidade de intervenção da equipe de manutenção da concessionária. Com a utilização do religador, a energia é restabelecida quase instantaneamente.

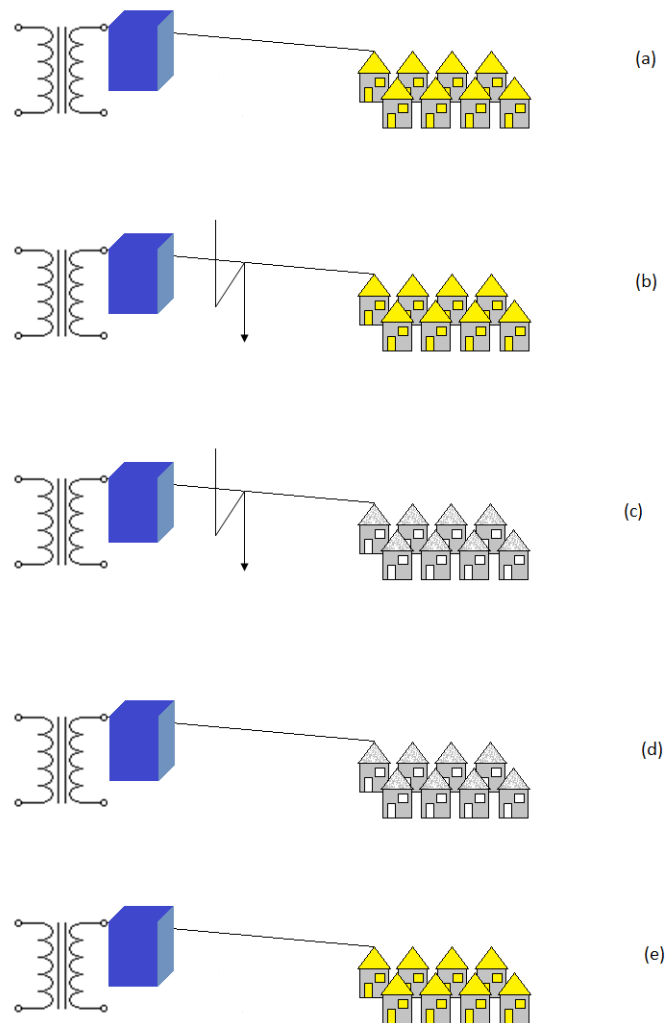


Figura 1.2: Esquema de funcionamento de um sistema de distribuição na ocorrência de um curto-circuito, com a utilização de um religador de baixa tensão (a) sistema operando normalmente, (b) ocorrência de curto-circuito, (c) desligamento dos consumidores, (d) remoção do problema, (e) restabelecimento da energia elétrica.

A Figura 1.3 mostra a curva de atuação de um religador. Quando o religador detecta a ocorrência de um curto-circuito ou de sobre-corrente, ele aguarda um tempo denominado “tempo de disparo”, td_1 , mostrado na Figura 1.3, e interrompe o circuito ao qual está ligado. Este tempo de disparo depende de sua curva tempo x corrente. Em alguns religadores

existe a possibilidade de se escolher uma, entre diversas outras curvas pré-programadas no dispositivo.

Depois de aberto, o equipamento aguarda um tempo pré-definido, conhecido por tempo morto, tm_1 , mostrado na Figura 1.3 e torna a re-energizar o circuito. Se o curto-circuito permanecer, o religador abrirá, aguardará novamente um tempo pré-definido e religará o circuito.

Persistindo o curto, após um número pré-definido de tentativas de religar o circuito o religador abrirá definitivamente e bloqueará a ação religadora. No caso representado na Figura 1.3 ajustou-se o número em três tentativas. Após a abertura definitiva, o motivo do desligamento deverá ser pesquisado, analisado e resolvido para que o religador possa voltar a operar normalmente. Se o curto-circuito desaparecer durante os intervalos de tempo morto, ao re-energizar o circuito este permanecerá ligado e os contadores de interrupções do religador serão zerados.

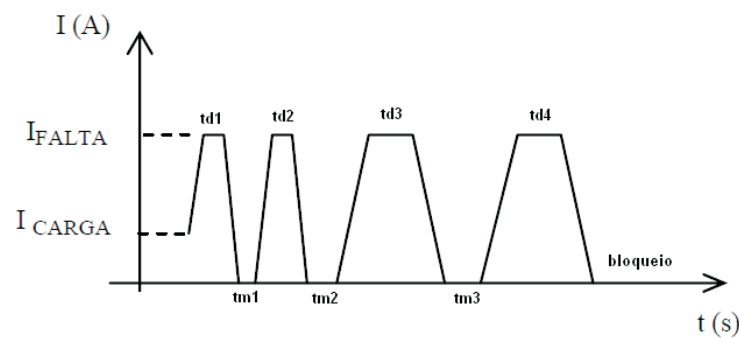


Figura 1.3: Curva de atuação de um religador

Além destas vantagens, o religador de baixa tensão proposto neste trabalho deve visar a coordenação e a seletividade do sistema ao qual está conectado. Esses dois conceitos muitas vezes são confundidos. Um sistema coordenado é seletivo, mas a recíproca não é verdadeira. A proteção seletiva é projetada e ajustada de tal forma que, para qualquer tipo de falta, permanente ou transitória, o dispositivo mais próximo desta deverá atuar e isolar o defeito antes que o dispositivo da retaguarda o faça. A proteção coordenada é projetada e ajustada de maneira a permitir o restabelecimento automático da energia elétrica para faltas transitórias, e seletividade para faltas permanentes [1].

A seletividade, portanto, garantirá que menos consumidores sejam afetados pela falta de energia. Com o religador de baixa tensão proposto, pode-se garantir a manutenção dessa seletividade, visto que ele será conectado ao lado de baixa tensão dos transformadores de distribuição. Assim, apenas os consumidores que recebam energia elétrica vinda desse transformador sofrerão com a falta de energia.

Já a coordenação garantirá que o elo-fusível ligado ao lado de alta tensão do transformador de distribuição não atue, evitando assim o tempo gasto pela equipe de manutenção,

que deveria ir até o local e trocar o elo-fusível.

Alguns religadores permitem a escolha da sua sequência de operação, ou seja, a escolha das curvas tempo x corrente a que eles obedecerão. Há, nesses religadores, curvas rápidas, graficamente curvas baixas, e curvas lentas, graficamente curvas altas. Essas curvas definirão o tempo de disparo do dispositivo que deve ser menor que o tempo de fusão do elo-fusível, para que haja a coordenação. A sequência de operação pode ser uma combinação de tempos de disparos rápidos e tempos de disparo lentos. Pode-se dizer que a coordenação está garantida quando o tempo mínimo de fusão do elo-fusível for maior que o tempo de abertura do religador, utilizando-se a curva lenta, multiplicada pelo fator k , para o curto-circuito trifásico no ponto de instalação do religador. O fator k leva em conta a elevação da temperatura do elo-fusível durante os intervalos de tempo de abertura rápida do religador. Segundo Almeida [1] é comum considerar $1,8 \leq k \leq 2,0$.

A Figura 1.4 mostra as curvas para coordenação do religador e elo-fusível. A curva A é a curva tempo x corrente rápida do religador e a curva B é a curva tempo x corrente lenta do religador. Imediatamente acima, a curva B multiplicada pelo fator k . Todas essas curvas do religador deverão estar abaixo da curva tempo x corrente do elo-fusível para que se garanta a coordenação.

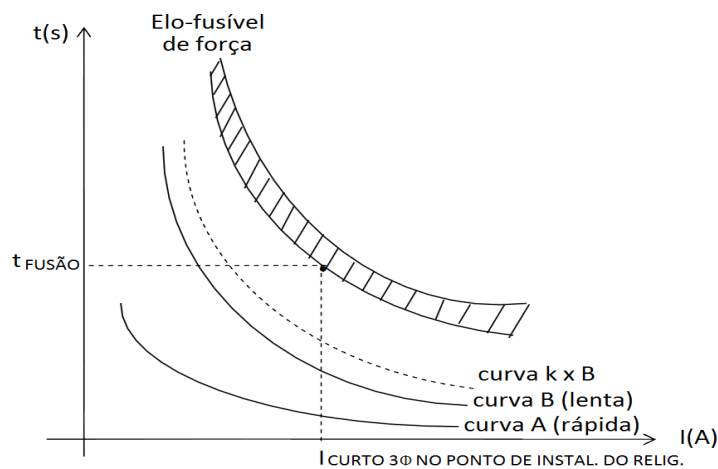


Figura 1.4: Curva de coordenação do religador e do elo-fusível

1.2 Motivação do estudo

O fornecimento de energia elétrica aos consumidores deve obedecer a dois conceitos fundamentais, normalmente denominados de qualidade de serviço e qualidade do produto. A qualidade do produto é caracterizada, principalmente, pela forma de onda da tensão dos componentes de um sistema trifásico e não será tratada neste trabalho. A qualidade do serviço, por outro lado, é entendida como a continuidade do fornecimento de energia elétrica aos consumidores. Existem muitos indicadores que mensuram essa qualidade. A

melhora nesses índices de qualidade aumentam a confiabilidade no sistema elétrico e esta é a principal motivação deste estudo.

Quando ocorre um curto-circuito nas linhas de distribuição, inicia-se a contagem do Tempo de Atendimento de Emergência, que é um indicador da continuidade do fornecimento de energia, conhecido por TAE. Este indicador pode ser subdividido em tempos parciais, quais sejam:

t_a : tempo transcorrido desde o instante em que ocorreu a contingência, até o seu conhecimento pelo Centro de Operações de Distribuição. Geralmente, é o tempo que os consumidores levam para detectar a falta da energia e avisar a concessionária;

t_b : tempo necessário para que a equipe de manutenção, ou de reparo do defeito, seja acionada;

t_c : tempo gasto pela equipe de manutenção para se deslocar ao ponto de interrupção, correr a linha e identificar o ponto de defeito e a causa;

t_d : tempo para a manobra de chaves, com a finalidade de restabelecer a energia aos consumidores fora da área de defeito.

t_1 : tempo de pesquisa do defeito, que é dado por: $t_a + t_b + t_c + t_d$;

t_2 : tempo médio para o reparo do defeito e o completo restabelecimento do sistema, segundo Kagan em [3].

Se o curto-circuito tiver causa transitória, o religador de baixa tensão proposto neste trabalho poderá religar o sistema rapidamente, reduzindo o tempo mencionado no parágrafo anterior, dado por $t_1 + t_2$.

Além do TAE existem outros indicadores de qualidade do serviço prestado pelas concessionárias de energia, que serão citados e explicados a seguir:

- DEC - Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, expressa em horas.

O DEC é um indicador coletivo que determina o tempo, em média, que cada consumidor, na área de estudo considerada, ficou sem o fornecimento de energia elétrica, no período considerado. Este indicador pode ser obtido pela equação 1.1.

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^n C_a(i) \cdot t(i)}{C_c} \quad (1.1)$$

onde: $C_a(i)$ é o número de unidades consumidoras interrompidas em um evento (i), no período de apuração; $t(i)$ é a duração de cada evento (i), no período de apuração; i é o índice de eventos ocorridos no sistema, que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras; n é o número máximo de eventos no período considerado e C_c é o número total de unidades consumidoras, do conjunto considerado, no final do período de apuração.

- FEC - Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, expressa em número de interrupções.

O FEC é outro indicador coletivo que determina o número de interrupções ocorridas, em média, no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado. Esse indicador pode ser obtido pela equação 1.2

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^n C_a(i)}{C_c} \quad (1.2)$$

- DIC - Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão, expressa em horas.

O DIC é um indicador individual que determina o intervalo de tempo em que, no período de observação, em uma unidade consumidora ou ponto de conexão, ocorreu descontinuidade na distribuição de energia elétrica.

- FIC - Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão, expressa em número de interrupções.

O FIC é também um indicador individual e determina o número de interrupções ocorridas, no período de observação, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão.

- DMIC - Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de conexão, expressa em horas.

O DMIC é outro indicador individual e determina o tempo máximo de interrupção contínua da energia elétrica em uma unidade consumidora ou ponto de conexão [4].

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através da Resolução 04/2000 [4], busca melhorar a qualidade dos serviços prestados pelas concessionárias de energia elétrica, determinando metas para os indicadores citados acima. A Tabela 1.1 apresenta a relação direta entre as metas de indicadores coletivos e indicadores individuais para consumidores situados em área urbana, com tensão nominal menor ou igual a 1kV. Nessa tabela são mostradas metas anuais, trimestrais e mensais.

Para um consumidor localizado em um conjunto, com meta DEC igual a 15horas/ano, sua meta DIC será 50horas/ano, 25horas/trimestre e ainda 17horas/mês. As concessionárias que não possuem padrões de DIC e FIC vinculados às metas de DEC e FEC, deverão observar os padrões anuais dos indicadores DIC e FIC, mostrados na Tabela 1.2 e deverão observar ainda os padrões mensais para o indicador DMIC, mostrados na Tabela 1.3.

Caso a concessionária de energia não cumpra as metas de indicadores individuais, DIC e FIC, deverá ressarcir o consumidor no mês subsequente à apuração, com valor a

Tabela 1.1: Relação entre metas de indicadores coletivos e individuais obtida em [4]

Faixa de variação das metas anuais de indicadores de continuidade dos conjuntos (DEC e FEC)	Padrão de continuidade por unidade consumidora					
	Unidades consumidoras com tensão nominal $\leq 1kV$ situadas em áreas urbanas					
	DIC(horas)			FIC(interrupções)		
	Anual	Trim	Mensal	Anual	Trim	Mensal
0 - 10	40	20	13	25	13	8
> 10 - 20	50	25	17	30	15	10
> 20 - 30	55	28	19	35	18	12
> 30 - 45	65	32	22	40	20	13
> 45	72	36	24	58	29	20

Tabela 1.2: Metas para DIC e FIC não vinculados a DEC e FEC [4]

Descrição do sistema de atendimento	DIC(horas)	FIC(interrupções)
Unidades consumidoras situadas em área não urbana com tensão nominal $\leq 1kV$	108	87
Unidades consumidoras situadas em área urbana com tensão nominal $\leq 1kV$	72	58
Unidades consumidoras situadas em área urbana com $1kV < \text{tensão nominal} < 69kV$	58	51
Unidades consumidoras situadas em área não urbana com $1kV < \text{tensão nominal} < 69kV$ ou situadas em sistema isolado	90	72
Unidades consumidoras com $69kV \leq \text{tensão nominal} < 230kV$	22	22

Tabela 1.3: Metas para DMIC [4]

Descrição do sistema de atendimento	DMIC(horas)
Unidades consumidoras situadas em área não urbana com tensão nominal $\leq 1kV$	16
Unidades consumidoras situadas em área urbana com tensão nominal $\leq 1kV$	11
Unidades consumidoras situadas em área urbana com $1kV < \text{tensão nominal} < 69kV$	9
Unidades consumidoras situadas em área não urbana com $1kV < \text{tensão nominal} < 69kV$ ou situadas em sistema isolado	14
Unidades consumidoras com $69kV \leq \text{tensão nominal} < 230kV$	4

ser creditado na fatura de energia elétrica. O cálculo do valor da compensação pode ser visto na Resolução 04/2000 [4].

O religador proposto neste trabalho visa à melhora destes índices e conseqüentemente à redução dos gastos com multas a consumidores, caso a concessionária não atinja as metas determinadas pela ANEEL.

Vale ressaltar, que em caso de curto-circuito em área rural, o gasto da concessionária de energia elétrica responsável pela linha, com o envio de equipe de manutenção, é relevante e deve ser levado em conta nas justificativas deste projeto.

Além disso, o religador proposto visa à melhora da continuidade no fornecimento de energia elétrica. Este fato trará benefícios não só para a concessionária, como dito anteriormente, mas também trará benefícios ao consumidor, já que, em caso de curto-circuito transitório, a energia elétrica será restabelecida em sua residência, ou em seu estabelecimento, quase instantaneamente. Vale ressaltar também que não há no mercado, atualmente, produto semelhante a esse.

1.3 Objetivos

No desenvolvimento deste trabalho os seguintes objetivos foram selecionados para serem estudados:

- i. O funcionamento do religador e suas principais características;
- ii. A coordenação do religador com o elo-fusível do transformador;
- iii. Pesquisar e estudar outras propostas de religadores de baixa tensão e o motivo pelo qual não foram comercializados;
- iv. Verificar as soluções de mercado para religadores de média tensão;
- v. Estudar as pesquisas na área de religadores de média tensão;
- vi. Especificar as características do religador proposto;
- vii. Estudar e especificar a melhor opção de dispositivo seccionador;
- viii. Desenvolver e aplicar métodos para cálculo de valor eficaz de tensões e correntes;
- ix. Definir a taxa de amostragem;
- x. Verificar o efeito da variação da frequência no cálculo do valor eficaz;
- xi. Verificar o efeito da quantização no cálculo do valor eficaz;
- xii. Medir tempo de cálculo e verificar a viabilidade do método de cálculo aplicado;
- xiii. Estudar meios de reduzir os erros dos cálculos do valor eficaz das tensões e correntes;

- xiv. Estudar as definições de potência existentes e definir qual será utilizada nos cálculos do trabalho;
- xv. Implementação do *firmware* do equipamento;
- xvi. Projeto das placas de circuito impresso;
- xvii. Desenvolvimento dos esquemáticos das placas de circuito impresso;
- xviii. Especificação de componentes.

1.4 Estrutura do texto

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica de estudos anteriores sobre religadores automáticos de baixa tensão. Primeiramente apresenta-se uma solução de religadores de baixa tensão encontrada no mercado, em seguida uma proposta acadêmica que apresentou alguns problemas na sua implantação. Posteriormente são apresentadas algumas soluções de mercado para religadores de média tensão e por último analisam-se alguns estudos envolvendo a modernização de antigos religadores de média tensão, a melhoria de índices da ANEEL, através de equipamento de sinalização, e um estudo de coordenação de fusíveis e religadores.

O capítulo 3 apresenta o Religador Automático para redes de baixa tensão proposto neste trabalho. Primeiramente, apresenta-se suas características e especificações. Em seguida, o diagrama de blocos do religador é mostrado e as partes que o compõe são explicadas. Por último, apresenta-se uma análise sobre algumas soluções pesquisadas para o dispositivo seccionador.

O capítulo 4 apresenta as rotinas de cálculo implementadas. Apresenta-se, inicialmente, os cálculo do valor eficaz das tensões e das correntes. Em seguida analisa-se a utilização de um PLL a fim de reduzir o erro nos cálculos de valores eficazes. Por último apresenta-se as rotinas utilizadas para os cálculos das potências.

O capítulo 5 apresenta a conclusão final sobre o trabalho e propõe alguns possíveis trabalhos futuros, visando à continuação da pesquisa aqui apresentada.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as soluções existentes na bibliografia para religadores de baixa tensão e para religadores de média tensão. Enquanto existem diversos fabricantes para religadores de média tensão, há apenas um fabricante de religadores de baixa tensão, todavia este produto é destinado a sistemas de telefonia móvel. No âmbito acadêmico foi proposto um religador de baixa tensão pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, mas apresentou alguns problemas na sua implantação.

2.2 Religadores de baixa tensão

Nesta seção serão apresentados os religadores de baixa tensão documentados.

2.2.1 Pesquisa acadêmica

O Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), patrocinado pelas concessionárias de energia Caiuá, Bragantina e Força e Luz do Oeste, pertencentes ao Grupo Rede, desenvolveu um protótipo de religador de baixa tensão entre agosto de 2000 e julho de 2001.

Este protótipo tem as funções de monitorar tensões e correntes registrando seus valores; interromper o circuito de baixa tensão por subtensão, sobretensão, falta de fase e sobrecorrente, registrando os valores das cinco últimas correntes transitórias que provocaram a operação do religador de baixa tensão; religar automaticamente o circuito de baixa tensão em condições de falta transitória, com retardo programado; medir energia e demanda; fazer a comunicação automática da interrupção e do restabelecimento do circuito e realizar comando remoto.

O religador foi desenvolvido para operar em conjunto com um transformador de distribuição, trifásico, com tensão nominal de 13,8kV-220/127V e potência de 30kVA.

O protótipo do religador de baixa tensão desenvolvido, foi ensaiado em laboratório, sendo conectado aos terminais de baixa tensão de um transformador trifásico, classe 15kV, 30kVA. Ensaios foram feitos a fim de verificar a funcionalidade do equipamento, sua exatidão, elevação de temperatura e imunidade a surtos elétricos.

Posteriormente, o protótipo foi avaliado em campo. Os resultados não foram tão bons quanto nos ensaios em laboratório. Uma simulação de falta de fase foi feita, abrindo-se a chave fusível de uma das fases na alta tensão do transformador. O protótipo realizou suas operações de abertura e fechamento de acordo com as especificações e temporizações definidas e, após as tentativas, sem sucesso, de religar o circuito abriu-o definitivamente, como previsto. Porém, quando ensaiado em situação de curto-circuito trifásico, na baixa tensão, o disjuntor do religador superaqueceu e soldou os contatos, após o terceiro curto-circuito [2].

Não foi encontrado nenhum documento que ateste que este protótipo entrou em processo de fabricação em larga escala, nem que se tenha tornado produto comercializável, ou mesmo que esteja sendo utilizado nas redes de distribuição das concessionárias do grupo REDE.

2.2.2 Solução de mercado

A General Electric Company (GE) lançou um religador de baixa tensão para uso em indústrias de telecomunicações, casas de veraneio, semáforos, iluminação pública, anúncios luminosos, dentre outros.

O religador é composto por um disjuntor que possui comando elétrico motorizado, permitindo assim a manobra do equipamento a distância; relé de religamento; bobina de abertura; transformador toroidal e contador de manobras. A capacidade desse religador é de 10A a 63A com mini-disjuntores IEC e de até 630A com disjuntores do tipo Record.

O disjuntor do tipo Record é disponibilizado em 3 ou 4 pólos, com curvas termo-magnéticas ajustáveis. Por conexão ou substituição de elementos é possível que o disjuntor realize proteção de falta a terra, proteção somente magnética e proteção termo-magnética. Suas características nominais são: tensão 690V em c.a. e 500V em c.c. e corrente de interrupção de até 200A, dependendo da versão escolhida.

Esse disjuntor poderá ser associado a uma bobina de abertura e a um relé de desligamento. A bobina de abertura é utilizada para abrir disjuntores rapidamente em caso de curto-circuito ou falta a terra. Após um disparo, a bobina deve ser rearmada antes de se fechar o disjuntor. Quando ocorre o disparo do disjuntor, o relé de desligamento inicia um ciclo de seis ou dez tentativas de reconexão, conforme o relé selecionado [5]. Há sinalização por meio de Diodo Emissor de Luz, LED, vermelho, que pisca rapidamente. Caso o problema que causou o desarme do disjuntor seja sanado, após 30 minutos, sem reincidência do problema, o contador retorna a zero. Por outro lado, se as tentativas forem frustradas, o disjuntor permanecerá desconectado e não realizará mais manobras. O LED vermelho fica aceso e o sistema permanece bloqueado até que o botão RESET seja acionado.

O comando motorizado permite realizar manobras de abertura e fechamento do disjuntor à distância e quando possui relés de reconexão, essa manobra poderá ser feita

automaticamente. A durabilidade do kit comando motorizado é de 20000 manobras, seu grau de proteção é IP40 ¹ e temperatura ambiente admissível de -5°C a +55°C.

Os transformadores toroidais associados aos relés de religamento realizam a função de captar a corrente residual monopolar e enviar a informação ao relé. Este se encarregará de dar a ordem de disparo ao disjuntor. O transformador toroidal é sempre o mesmo para qualquer sensibilidade ou temporização desejada. A conexão com o relé deve efetuar-se por condutores isolados, com resistência total, menor que 30Ω. Para distâncias maiores que cinco metros é aconselhável utilizar cabos blindados. Os transformadores toroidais de grandes dimensões devem ser utilizados para baixas sensibilidades temporizadas [5].

O contador de manobras permite verificar o número total de manobras de fechamento realizadas. Ao iniciar-se a manobra de fechamento, o contador avança meio dígito e outro meio dígito ao deixar de ser alimentado. Este contador incorpora um interruptor manual para que, quando houver necessidade, interrompa a alimentação, assim as manobras de teste não serão contabilizadas.

Vale ressaltar que este religador é modular, ou seja a General Electric possui esses módulos separados para outras aplicações e, quando há encomenda de religador, esses módulos são montados de maneira a ser um religador. Segundo pesquisa feita, tais religadores são encontrados apenas no Brasil, e sua aquisição não é fácil. Várias tentativas de orçamento e de compra foram feitas e as respostas a essas tentativas foram escassas.

2.3 Religadores de média tensão

Esta seção está subdividida em duas partes. A primeira mostra as soluções de média tensão disponíveis no mercado atualmente. A segunda parte apresenta alguns artigos que estudam melhoramentos para as redes que utilizam religadores e também inovações para que antigos religadores se adaptem às novas funcionalidades existentes, ou seja, fez-se um apanhado do que está sendo publicado e estudado atualmente dentro do estudo de religadores de média tensão.

2.3.1 Soluções de mercado

Várias empresas fabricam religadores de média tensão. Alguns desses religadores serão apresentados a seguir.

2.3.1.1 Schneider Electric

A Schneider Electric possui duas linhas de religadores trifásicos de média tensão. Da série-U fazem parte os religadores automáticos, isolados por meio de dielétrico sólido. Os

¹Da Tabela IP - Índice de proteção (do inglês, IP - *Ingress Protection Level*) no qual o primeiro algarismo determina o grau de proteção dos equipamentos instalados nos gabinetes, quanto a objetos sólidos e pessoas. O segundo algarismo determina o grau de proteção dos equipamentos instalados nos gabinetes, quanto a entrada de água. Neste caso, com o grau de proteção IP-40, o equipamento está protegido contra objetos sólidos com diâmetro maior que 1mm - índice 4 e não está protegido contra a entrada de água - índice 0.

religadores da série N também são automáticos, porém são isolados por gás.

Os religadores da série U possuem interruptores a vácuo dentro das buchas de epóxi, eliminando assim a necessidade de isoladores como óleo e gás. Um atuador magnético, quando sente um pulso de controle, opera o religador abrindo-o e fechando-o. Quando fechado, a chave é lacrada magneticamente. O religador pode ser fornecido com suportes para montagem de pára-raios, como item opcional.

A Figura 2.1 mostra um exemplar de um religador da série-U.



Figura 2.1: Exemplar de religador da série U, da Schneider Electric [6]

Os religadores da série U são fornecidos em dois níveis de tensão, quais sejam: 15,5kV e 27kV. A Tabela 2.1 mostra alguns valores de catálogo destes religadores.

Tabela 2.1: Valores de catálogo dos religadores série U da Schneider Electric [6]

Valores	15,5kV	27kV
Tensão máxima	15,5kV	27kV
Corrente nominal	630A	630A
Corrente máxima de interrupção	12,5kA	12,5kA
Tempo de operação (abertura/fechamento)	0,1/0,05s	0,1/0,05s
Operações mecânicas	10000	10000

Estes religadores possuem opções de escolha de algumas variáveis, a fim de se adequar às necessidades do consumidor. Tempo de religamento e curvas de proteção são exemplos de variáveis que podem ser alteradas.

Os tempos de religamento podem ser escolhidos individualmente e independentemente um do outro. O primeiro valor de tempo morto poderá ser escolhido entre o intervalo de 0,5s a 180s. O segundo e o terceiro poderão ser escolhidos entre 2s e 180s.

Já o módulo de controle e proteção do religador oferece um total de quarenta e oito curvas de proteção de tempo inverso que podem ser selecionadas pelo usuário.

A série N de religadores da Schneider Electric apresenta seu invólucro repleto do gás hexafluoreto de enxofre (SF_6), que é um excelente isolante elétrico. Assim, o equipamento torna-se mais compacto e requer menos manutenção.

A Figura 2.2 mostra um exemplar de um religador da série-N.



Figura 2.2: Exemplar de religador da série N da Schneider Electric [6]

A série N possui as mesmas características da série U, no que diz respeito ao controle de operação de abertura e fechamento (assim como nos religadores da Série-U, o atuador magnético recebe um pulso de corrente e opera o religador), na escolha dos tempos de religamento (possui as mesmas opções dos religadores da série-U) e no que diz respeito às curvas de proteção (possui as mesmas quarenta e oito curvas de tempo inversa dos religadores da série-U).

A grande diferença entre essas séries de religadores está no isolamento, já que um possui dielétrico sólido e o outro possui isolamento a gás. Outra diferença observada é nos níveis de tensão disponíveis para o equipamento. A Série-U apresenta apenas duas opções: 15,5kV e 27kV, como dito anteriormente. Já a Série-N possuem mais níveis de tensão disponíveis: 12kV, 15kV, 24kV, 27kV e 38kV.

A Tabela 2.2 mostra alguns dos valores de catálogo deste religador.

Tabela 2.2: Valores de catálogo dos religadores série N da Schneider Electric [6]

Valores	12/15,5kV	24kV	27kV	38kV	38kV
Tensão máxima	12/15,5kV	24kV	27kV	38kV	38kV
Corrente nominal	630A	630A	630A	630A	800A
Corrente máxima de interrupção	12,5kA	12,5kA	12,5kA	12,5kA	16kA
Tempo de operação (abertura/fechamento)	0,1/0,05s	0,1/0,05s	0,1/0,05s	0,1/0,05s	0,1/0,05s
Operações mecânicas	10000	10000	10000	10000	10000

2.3.1.2 Cooper Power Systems

A Cooper Power Systems divide seus religadores em grupos: monofásicos com controle hidráulico, monofásicos com controle elétrico, trifásicos com controle hidráulico, trifásicos

com controle elétrico e isolamento a vácuo, trifásicos com controle elétrico e isolamento a óleo e trifásicos com controle elétrico e isolamento sólido.

Os religadores monofásicos não serão analisados neste trabalho, bem como os religadores hidráulicos. Assim, tem-se uma descrição a seguir dos equipamentos trifásicos com controle eletrônico.

A Cooper produz religadores trifásicos controlados eletricamente que oferecem proteção para uma ampla faixa de tensões, variando de 2,4kV a 38kV. Estes equipamentos encontram-se disponíveis para correntes nominais de até 1200A e correntes de interrupção de até 20kA. Algumas opções de controle do religador, como tempo de religamento e características de disparo, podem ser programadas, com precisão no painel de controle, permitindo assim a coordenação deste equipamento com outros dispositivos de proteção do sistema.

Existem quatro linhas de religadores trifásicos com controle eletrônico: linha W, linha NOVA, linha VSO e linha VSA.

A linha W é constituída de seis religadores: WE, VWE, WVE27, WVE38X, VWVE27 e VWVE38X. A Figura 2.3 mostra um exemplar dos religadores da linha W. Estes são religadores automáticos, trifásicos, com controle eletrônico utilizados para a proteção contra sobrecorrentes em circuitos de até 38kV. Apresentam opção de programação de algumas características de religamento do dispositivo diretamente no painel de controle, facilitando dessa maneira sua coordenação com outros equipamentos de proteção do sistema.



Figura 2.3: Exemplar de religador do grupo W - VWVE27- da Cooper Power Systems [7]

Os seis religadores presentes na linha W diferenciam-se pelo nível de tensão que são projetados para operar, pela corrente de interrupção em curto-circuito e também pelo meio de interrupção de arco-voltaico na câmara de extinção. A Tabela 2.3 mostra as diferenças desses religadores.

Interruptores a vácuo apresentam interrupções rápidas de arco e com baixa energia. Quando comparados com interruptores a óleo, possuem algumas vantagens como menor estresse mecânico, maior vida útil dos interruptores e dos contatos e é menos poluente

Tabela 2.3: Características nominais de religadores da linha W

Tipo	Tensão nominal	Corrente nominal	Corrente de interrupção	Meio de interrupção
WE	2,4kV a 14,4kV	560A - extensível para 800A com acessório	10kA	óleo
VWE	2,4kV a 14,4kV		12kA	vácuo
WVE27	24,9kV		8kA	óleo
WVE38X	34,5kV		8kA	óleo
VWVE27	24,9kV		12kA	vácuo
VWVE38X	34,5kV		12kA	vácuo

que os a óleo.

Religadores do tipo NOVA são trifásicos e controlados eletronicamente. São desenvolvidos para operar em sistemas de distribuição de 15kV, 27kV e 38kV. A corrente máxima é de 800A. O sistema de isolamento sólido não depende de um dielétrico líquido ou gasoso. Este religador é resistente ao ozônio, oxigênio, umidade, contaminação e luz ultravioleta. A corrente de interrupção dos religadores NOVA são de 12kA.

A Figura 2.4 mostra um religador NOVA.



Figura 2.4: Exemplar de religador NOVA da Cooper Power Systems [7]

Os religadores VSO são trifásicos e controlados eletronicamente. Apresentam estrutura integral com interruptores a vácuo e isolamento a óleo (as buchas de porcelana são preenchidas com óleo). A tensão nominal dos religadores VSO é 34,5kV, corrente nominal de 560A, extensível a 800A com uso de acessório próprio, e a corrente de interrupção varia de acordo com as duas versões existentes desse religador. O VSO12 possui corrente de interrupção com valor de 12kA, enquanto o VSO16 tem capacidade de operar com correntes de curto-circuito de até 16kA. A Figura 2.5 mostra um religador do tipo VSO.

Por último, apresenta-se os religadores do tipo VSA. São religadores trifásicos, controlados eletronicamente, com isolamento a ar. Essa linha de religadores possui cinco versões, que são mostradas juntamente com seus valores de tensão nominal, corrente nominal, corrente de interrupção e tipo de interruptores na Tabela 2.4.



Figura 2.5: Exemplar de religador VSO da Cooper Power Systems [7]

Tabela 2.4: Características nominais de religadores da linha VSA

Tipo	Tensão nominal	Corrente nominal	Corrente de interrupção	Meio de interrupção
VSA12	2,4kV a 14,4kV	800A	12kA	vácuo
VSA12B		600A	12kA	
VSA16		800A	16kA	
VSA20		800A	20kA	
VSA20A		1200A	20kA	

A Figura 2.6 mostra um religador da linha VSA com a tampa da caixa aberta. Há indicadores de cada mecanismo e de cada componente necessário para o correto funcionamento do religador. Vale ressaltar que, apesar de a Figura 2.6 ilustrar um religador da linha VSA, seus principais mecanismos podem ser aproveitados para a correta compreensão do funcionamento dos religadores de outras linhas.

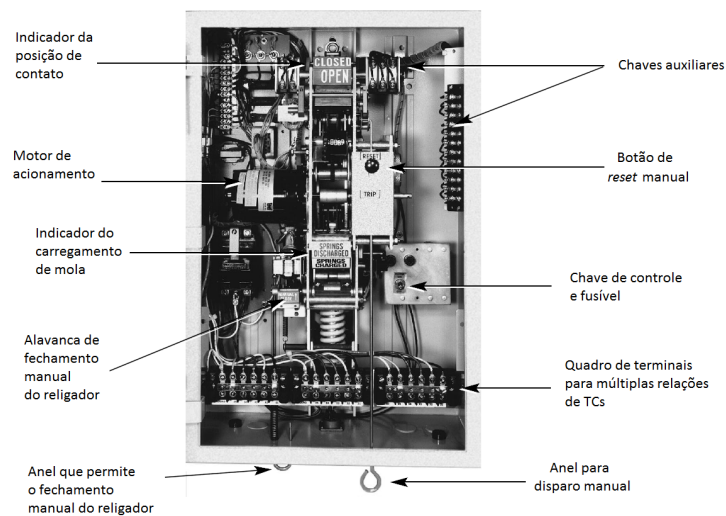


Figura 2.6: Exemplar de religador da linha VSA, com a tampa aberta [7]

2.3.1.3 Noja Power

A Noja Power é outra fabricante de religadores de média tensão [8]. Entre os seus produtos destacam-se os religadores automáticos *Outdoor Switching Module* (OSM). A Figura 2.7 mostra um exemplar de religadores OSM.

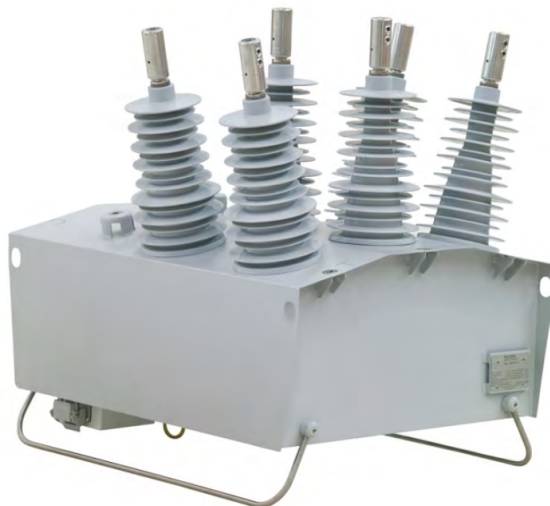


Figura 2.7: Exemplar de religador da linha OSM, da Noja Power [8]

Os religadores OSM estão disponíveis em três classes de tensão: 15kV, 27kV e 38kV. Esses religadores são projetados para uso em linhas de distribuição e em subestações de distribuição. Os religadores utilizam interruptores a vácuo abrigados em policarbonato dentro de um tanque de aço inox para fornecer um sistema completamente isolado em dielétrico sólido. O equipamento mede as correntes e as tensões nas três fases. A Cabine de Controle de Comunicação RC possui controle microprocessado que incorpora as funções de comunicação, registro de eventos e proteção. A Tabela 2.5 mostra os valores de tensão, corrente nominal e corrente de interrupção dos religadores OSM da Noja Power.

Tabela 2.5: Características nominais dos religadores da linha OSM, da Noja Power

Classe de Tensão	Corrente nominal	Corrente de interrupção
15kV	630A	16kA
27kV	630A	12,5kA
38kV	630A	12,5kA

2.3.1.4 Siemens

A Siemens possui o religador trifásico Tribune. A detecção de faltas é feita pelos transformadores de corrente que informam o valor da corrente ao controlador eletrônico [9]. São religadores com câmaras de extinção a vácuo que ficam alojadas em resina

cicloalifática, não sendo necessária a utilização de gás ou óleo para realizar o isolamento elétrico do sistema. Além disso, sua haste de acionamento está disposta de maneira a garantir a proteção contra contaminação e degradação, sem a presença de linhas de fuga, e impedir a formação de gelo, pois seu acionamento utiliza abas isolantes flexíveis. É possível aplicá-lo em postes ou subestações e pode ser utilizado com uma vasta gama de relés e controladores. Não foram encontradas informações adicionais a respeito desse religador.

2.3.2 Pesquisas acadêmicas

Religadores têm sido usados há mais de meio século e atualmente são largamente utilizados nos sistemas de distribuição de energia elétrica [10]. Há diversos artigos sobre os vários tipos de religadores, desde religadores antigos, com controle hidráulico, a estudos de coordenação de religadores microprocessados com outros dispositivos de proteção. Dentre os artigos estudados escolheu-se quatro para serem apresentados nesse trabalho. Medeiros Junior [10] propõe a implementação de um controle digital para religadores hidráulicos; Duque [11] apresenta uma solução para a automação de sistemas nos quais estão conectados religadores eletromecânicos, que não possuem controle digital; Cook [12] propõe um novo método de análise para o dimensionamento de fusíveis, com a finalidade de não superdimensionar o fusível, sem comprometer a coordenação com deste com o religador e Santos [13] apresenta um sinalizador luminoso monofásico que mostra, através de sinalização luminosa, o local da ocorrência de curto-circuito em uma linha de distribuição aérea.

Religadores controlados hidraulicamente, em geral, apresentam ótimo desempenho mecânico, mas têm limitações que tornam difícil sua coordenação com religadores modernos ou com outros dispositivos de proteção. Motivado por isso, Medeiros Junior [10] propôs uma solução para implementar o controle de religadores hidráulicos usando um *Digital Signal Processor* (DSP). O artigo propõe um controle digital para religadores hidráulicos a fim de permitir que eles se tornem mais versáteis, mantendo suas boas características mecânicas. A plataforma DSP utilizada no projeto tornou possível a aquisição e o processamento de dados com resposta rápida. O trabalho experimental foi realizado para sistema de baixa potência. O protótipo implementado foi testado em religadores de 34,5kV.

Com o mesmo objetivo de se modernizar religadores antigos, cuja parte mecânica funciona perfeitamente, Duque [11] mostra que os religadores largamente utilizados há cinquenta anos nas redes de distribuição tiveram suas atuações alargadas devido ao aumento da utilização de microprocessadores. Antigamente, religadores apenas abriam o circuito de distribuição, quando uma corrente com valor alto era detectada e fechavam o circuito algum tempo depois, repetindo esse procedimento algumas vezes. Hoje, as curvas de proteção são personalizadas, os tempos de religamento e os ciclos do religador são ajustáveis. Os antigos religadores, porém, não são microprocessados, mas ainda estão em

funcionamento, são robustos e sua troca traria gastos enormes para as concessionárias de energia elétrica. Por isso, Duque [11] propõe um dispositivo que realiza a automação do sistema para esses religadores antigos, eletromecânicos.

O dispositivo é composto basicamente de um módulo de processamento, um módulo de energia, um módulo de entrada e saída e da interface de comunicação. Cada uma dessas partes será explicada abaixo. Em seguida há um comentário sobre o protocolo de comunicação utilizado.

- O módulo de processamento. É equipado com um microcontrolador que proporciona uma grande flexibilidade na automação do sistema. Esse microprocessador é responsável pela execução de comandos e procedimentos. É também responsável por gerenciar a energia do dispositivo.
- O módulo de energia. Consiste em um conjunto de baterias, responsável por manter o dispositivo funcionando, em caso de falta de energia, já que o equipamento está conectado à linha de distribuição.
- Interfaces analógica e digital. As entradas digitais são responsáveis por monitorar o religador, o módulo de energia e a interface de comunicação. As saídas digitais comandam as ações do religador. Já as entradas analógicas são responsáveis pelo condicionamento das correntes dos TCs e das tensões dos TPs.
- Interface de comunicação. O sistema proposto foi implementado usando um sistema de comunicação móvel digital, o TDMA (do inglês, *Time-Division Multiple Access*), mas o sistema pode se adaptar a outras tecnologias de comunicação com ou sem fio, garante Duque, [11].
- O protocolo de comunicação utilizado na primeira versão do equipamento foi o Modbus. O autor [11] justifica a utilização desse protocolo devido ao menor custo, quando comparado ao DNP3 e também à facilidade de sua implementação.

Segundo o artigo, com a aplicação do sistema proposto por Duque [11], houve uma redução nos custos de aproximadamente 60% em relação a sistemas semelhantes importados, e redução de 80% no caso de troca dos religadores antigos por religadores novos que já possuam o sistema de automação.

Outro problema crítico na proteção é a coordenação, como foi dito no Capítulo 1. O dimensionamento dos fusíveis normalmente é feito analisando-se a coordenação desse dispositivo com o religador pelo Método Conservativo. O Método Conservativo ignora essa redução de temperatura que ocorre no fusível durante o tempo em que o circuito permanece aberto e simplesmente soma os efeitos do aquecimento do fusível, para cada operação do religador.

Cook [12] propõe outro método de análise, o Método do Coeficiente de Resfriamento. Quando ocorre uma falta no sistema, o religador deverá abrir o circuito, aguardar um tempo pré-determinado para então tentar religar o sistema. Se o curto-circuito permanecer, o religador deve abrir o circuito novamente e então tentar religá-lo e proceder assim por três ou quatro vezes. Se o religador não estivesse presente no sistema de proteção quando ocorresse o curto-circuito, o fusível esquentaria até o ponto de fusão do elo fusível e ele então abriria o circuito. Quando ambos estão presentes no circuito, religador do lado da carga e fusível do lado da fonte, o religador deverá abrir o circuito antes que o fusível se queime. A temperatura inicial do fusível (antes do curto) é dada pela corrente que circula por ele antes do curto, e pela temperatura ambiente. Quando ocorre a falta, a temperatura do elo fusível começa a aumentar, mas o religador abre o circuito interrompendo a corrente de curto-circuito. Durante a abertura do religador, a temperatura do elo fusível decresce, até o instante em que o religador fecha novamente o circuito. Se a falta permanecer, a temperatura do elo fusível volta a aumentar até o religador atuar.

O Método Conservativo funciona, porém não é eficiente, já que na maioria das vezes o fusível é superdimensionado. Já o Método do Coeficiente de Resfriamento leva em conta o resfriamento do fusível durante o período de tempo em que o circuito está desligado, devido à atuação do religador. Através deste método é possível realizar um dimensionamento melhor do fusível, evitando dessa maneira, perdas desnecessárias.

Quando ocorre um curto-circuito na linha, seja ela de distribuição ou de transmissão, o tempo gasto para que a equipe de manutenção percorra a linha e detecte o local exato da falta é relevante. A fim de melhorar os índices propostos pela ANEEL, discutidos no Capítulo 1, Santos [13] propõe um sinalizador luminoso monofásico para detecção do local da ocorrência de faltas no sistema aéreo de distribuição que poderá ser implementado, juntamente com o religador automático de baixa tensão proposto neste trabalho, a fim de facilitar a detecção da falta, quando essa for permanente.

Para que a sinalização da falta seja confiável, o equipamento deve detectar apenas as faltas permanentes, interrompidas por equipamentos de proteção da linha e não deve atuar em situações nas quais o valor da corrente seja elevado, mas não o suficiente para provocar a abertura permanente do circuito. Além disso, deve-se adaptar automaticamente à variação de carregamento da rede de distribuição que está monitorando. Uma possibilidade prevista de sinalização de falta inexistente ocorre no fenômeno de *in-rush* (corrente de magnetização do núcleo dos transformadores). Se o sistema for desligado por algum motivo, ao ser religado novamente circulará uma corrente com valor alto para energizar o núcleo do transformador. Para que o sistema de sinalização não atue neste momento, quando a tensão for inexistente, sem ser precedida de ocorrência de sobrecorrente, a detecção de falta e a sinalização luminosa são desativadas. Quando a tensão retorna na linha é disparado um temporizador que conta um tempo um pouco maior que o necessário para o transformador se magnetizar. Findo esse tempo, a detecção de falta e

a sinalização luminosa voltam a ser habilitadas.

2.4 Conclusões parciais

As publicações na área de religadores de média tensão mostradas neste capítulo demonstram como a utilização de religadores de média tensão é muito difundida. Existem artigos que versam sobre a modernização de religadores mais antigos, ainda em uso, melhorando assim seu desempenho e também artigos que propõem métodos diversos para a coordenação dos religadores com outros dispositivos de proteção que coexistem no sistema de distribuição de energia elétrica, dentre outros.

No mercado há uma ampla variedade de religadores de média tensão, como mostrado nesse capítulo e esses religadores são largamente utilizados, tanto em subestações, quanto em linhas de distribuição aéreas.

O mesmo não se pode dizer dos religadores de baixa tensão. A literatura é escassa já que o equipamento ainda não alcançou o mercado consumidor, i.e., as concessionárias de energia elétrica. O presente trabalho, portanto, busca projetar e construir o protótipo do primeiro religador de baixa tensão oferecido no mercado.

O religador proposto neste trabalho visa a sua larga utilização nas redes de distribuição já que, além de realizar seu trabalho básico de abrir e fechar o circuito, ele fará a automação do sistema de distribuição da concessionária, enviando dados de tensão, corrente, frequência, dentre outros, à Central de Operações de Distribuição da concessionária de energia elétrica. Estas inovações serão descritas no Capítulo 3.

Capítulo 3

O Religador Automático para redes de baixa tensão

3.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado o Religador Automático para redes de baixa tensão, que é a proposta deste trabalho. Inicialmente, serão mostradas suas características, em seguida serão apresentadas e explicadas cada uma das partes que compõem o religador: a aquisição, o condicionamento e o processamento de sinais; os dispositivos de entrada e saída de dados; as portas de comunicação e o comando do disjuntor. Por último serão apresentadas as opções de dispositivos seccionadores.

3.2 Especificações

3.2.1 Condições gerais de funcionamento do Religador

O religador é automático e capaz de interromper faltas entre fases e faltas a terra e religar o circuito com uma sequência pré-determinada de operações de abertura e fechamento, seguidas de rearme ou bloqueio. O religador é previsto para operar juntamente com transformadores de distribuição trifásicos.

O sistema é controlado por um Processador Digital de Sinais (do inglês, DSP - *Digital Signal Processor*), que opera o mecanismo de abertura e fechamento. Os ajustes, a programação e a leitura dos parâmetros de controle são obtidos de modo local ou remoto.

3.2.2 Características físicas e de controle

Para que o religador permaneça em perfeito funcionamento, mesmo em condições extremas, alguns cuidados construtivos foram tomados. Toda a parte eletrônica do religador foi posta dentro de uma caixa de aço. Do lado de fora dessa caixa há um *display*, botoeiras, chaves, *led's* de sinalização e um teclado para ajustes de parâmetros. Essa caixa foi posta dentro de outra caixa com pintura especial e borrachas para vedação, já que esta caixa estará exposta à poeira e chuva.

As botoeiras possuem funções de ligar e desligar o religador e também de bloquear a função de religamento, depois da primeira operação de disparo, independentemente do

número de operações estabelecidas para o equipamento. Este último é um dispositivo de segurança indispensável ao religador, já que em caso de manutenção o religador não deverá tentar religar o circuito, pois haverá risco de acidente.

O religador pode ser controlado no modo local ou remoto. Quando no modo local, nenhum comando remoto é possível.

O *display* é de cristal líquido e permite visualização das informações de medição. Em conjunto com o teclado, possibilita ajustes de alguns parâmetros de operação do religador. Há ainda a possibilidade de ajuste via porta serial, RS232. Ambas as comunicações acima são realizadas em modo local. Na opção remoto, essa comunicação será via fibra óptica ou via GPRS (do Inglês, *General packet radio service*).

Os seguintes parâmetros podem ser ajustados:

- número de operações até o bloqueio final;

Este ajuste permite ao operador do dispositivo escolher quantas vezes o religador tentará religar o circuito interrompido por curto-circuito ou por sobrecorrente.

- número de operações rápidas ou temporizadas, de fase e de terra, ajustáveis independentemente;

Este ajuste permite ao operador escolher quantas operações instantâneas e quantas operações temporizadas o religador fará, tanto para faltas de fase quanto para faltas de terra e estes valores, para fase e para terra, serão independentes um do outro.

- tempos de religamento independentes;

O intervalo de tempo denominado “tempo de religamento” ou “tempo morto” é definido como o tempo em que o religador permanece desligado após uma abertura por curto-circuito ou sobrecorrente, ou seja, o intervalo de tempo entre um desligamento e a próxima tentativa de religamento.

- tempo de rearme;

O intervalo de tempo denominado “tempo de rearme” é definido como o tempo necessário para que todos os contadores, exceto o contador de operações, retorne a zero após a operação do religador por causa transitória.

- corrente de disparo da proteção de fase;

Este parâmetro é o valor mínimo de corrente que ocasionará a operação do religador.

- curvas características tempo x corrente de fase, ajustáveis, independentemente;

Este parâmetro permite ao operador definir o tempo que o religador demorará para abrir, em caso de curto na fase, de acordo com a corrente que está passando na linha. Essas curvas podem ser independentes para cada tentativa de religamento.

- corrente de disparo da proteção de terra;

Este parâmetro é o valor mínimo de corrente de terra que ocasionará a operação do religador.

- curvas características tempo x corrente de terra, ajustáveis, independentemente;

Este parâmetro permite ao operador definir o tempo que o religador demorará para abrir em caso de curto na terra, de acordo com a corrente passante. Essas curvas podem ser independentes para cada tentativa de religamento.

3.2.3 Operação

Toda a operação do religador se baseia na leitura das correntes e das tensões da linha ao qual está conectado. Através destes valores, o circuito de controle calcula as potências ativa, reativa e aparente, fator de potência e energias ativa e reativa. De acordo com os valores de corrente medidos e também com valores de tempo pré-determinados, ocorrerá ou não a operação do religador. A decisão de operar ou não, atuando na bobina de religamento e no motor, é feita por um microprocessador.

Para a medição das correntes e tensões são utilizados Transformadores de Corrente (TC) e Transformadores de Potencial (TP), respectivamente. Os TCs utilizados para medição de corrente de curto-circuito são diferentes dos TCs usados para medição de corrente em modo normal, visto que a faixa de medição é muito ampla.

Como explicado no Capítulo 1, ao detectar a ocorrência de um curto-circuito ou sobrecorrente, o religador inicia a contagem do tempo de disparo. Quando o tempo de disparo for igual ao tempo determinado pela curva de proteção escolhida, o religador interrompe o circuito. Nesse momento, o contador de operações é incrementado. A curva de proteção é um dos parâmetros que podem ser escolhidos pelo operador do dispositivo, como dito na subseção 3.2.2. As aberturas podem ser instantâneas, retardadas ou uma combinação delas, tanto para defeitos fase-fase quanto para defeitos fase-terra.

Quando o equipamento desenergiza o circuito, o contador de tempo de religamento inicia sua contagem. Esse tempo de religamento, também conhecido por tempo morto é um parâmetro ajustável, como dito na subseção 3.2.2.

Após o tempo determinado pelo operador do dispositivo ter sido alcançado, o religador energizará novamente o circuito, e através dos TCs poderá detectar se a causa do problema foi removida e não existe mais curto-circuito ou sobrecorrente ou se o problema ainda persiste na linha.

Caso o problema tenha sido transitório e o circuito estiver operando em condições normais, o religador rearmar-se-á automaticamente e o contador de tempo de rearme dará início a sua contagem. O tempo de rearme, também conhecido por tempo de retorno a zero, é programável. Findo este tempo, todos os dispositivos de contagem, exceto o contador de operações, retornam a zero automaticamente.

Se a causa do problema ainda não tiver sido removida, o religador repetirá esse procedimento, incrementando o contador de operações a cada tentativa de rearme. A quantidade de vezes que o religador deve fazer essa tentativa até o bloqueio definitivo é outro parâmetro ajustável. Caso haja o bloqueio definitivo, o religador deverá enviar mensagem ao Centro de Operações de Distribuição.

O contador de operações possui contagem acumulativa das operações, inclusive transitórias, para fins de controle da manutenção e do desgaste dos contatos. A função entre o número máximo de operações e a corrente de curto-circuito interrompida é informada, de acordo com o material utilizado.

O religador é protegido contra desequilíbrio de carga. Sempre que a corrente de neutro for maior que um valor pré-ajustado, o religador atua protegendo o sistema e faz a sinalização local e remota.

A Figura 3.1 mostra um fluxograma do funcionamento do religador contendo todos os detalhes apresentados acima. No fluxograma, a variável N é um contador de tentativas de religamento. Essa variável é necessária para que o controle do religador saiba quantas vezes, em um mesmo ciclo, o disjuntor abriu o circuito. O número de tentativas de religamento é ajustável. O religador entende como um mesmo ciclo de tentativas de religamento, todas as tentativas que forem feitas dentro do mesmo intervalo de tempo de rearme. Ou seja, sempre que houver um curto-circuito transitório e as correntes voltarem aos seus valores nominais, um contador de tempo será disparado. Quando esse tempo atingir o valor de tempo de rearme, que é outra variável ajustável, o religador zera o contador N e qualquer curto-circuito que ocorra após este tempo ser atingido será entendido como um curto de outro ciclo. Ao contrário, se ocorrer outro curto-circuito, antes do tempo de rearme ser atingido, o religador entenderá que esse curto pertence ao mesmo ciclo do anterior, ou seja, neste caso $N = 2$. O contador N será zerado no início do programa e toda vez que o tempo de rearme for atingido.

3.2.4 *Firmware* de Controle e Automação

O religador terá interfaces de comunicação RS232 e USB. Também está disponível um Relógio de Tempo Real (do inglês, RTC - *real time clock*). A memória para armazenamento de dados, conhecida por memória de massa, será dimensionada de maneira a poder armazenar as grandezas medidas e calculadas, por determinado período de tempo.

O *firmware* será fornecido juntamente com o religador e será utilizado para operação, ajuste, programação e acesso aos dados de medição, de registro de eventos e perfil de carga. Esse perfil de carga contempla: corrente e tensão nas três fases, potências ativa, reativa e aparente, fator de potência e energias ativa e reativa. O *firmware* possui código de segurança programável que limita o acesso às funções de programação do controle somente a pessoas autorizadas.

A proteção abrange sobrecorrente de fase e terra, bem como falta trifásica, falta fase-

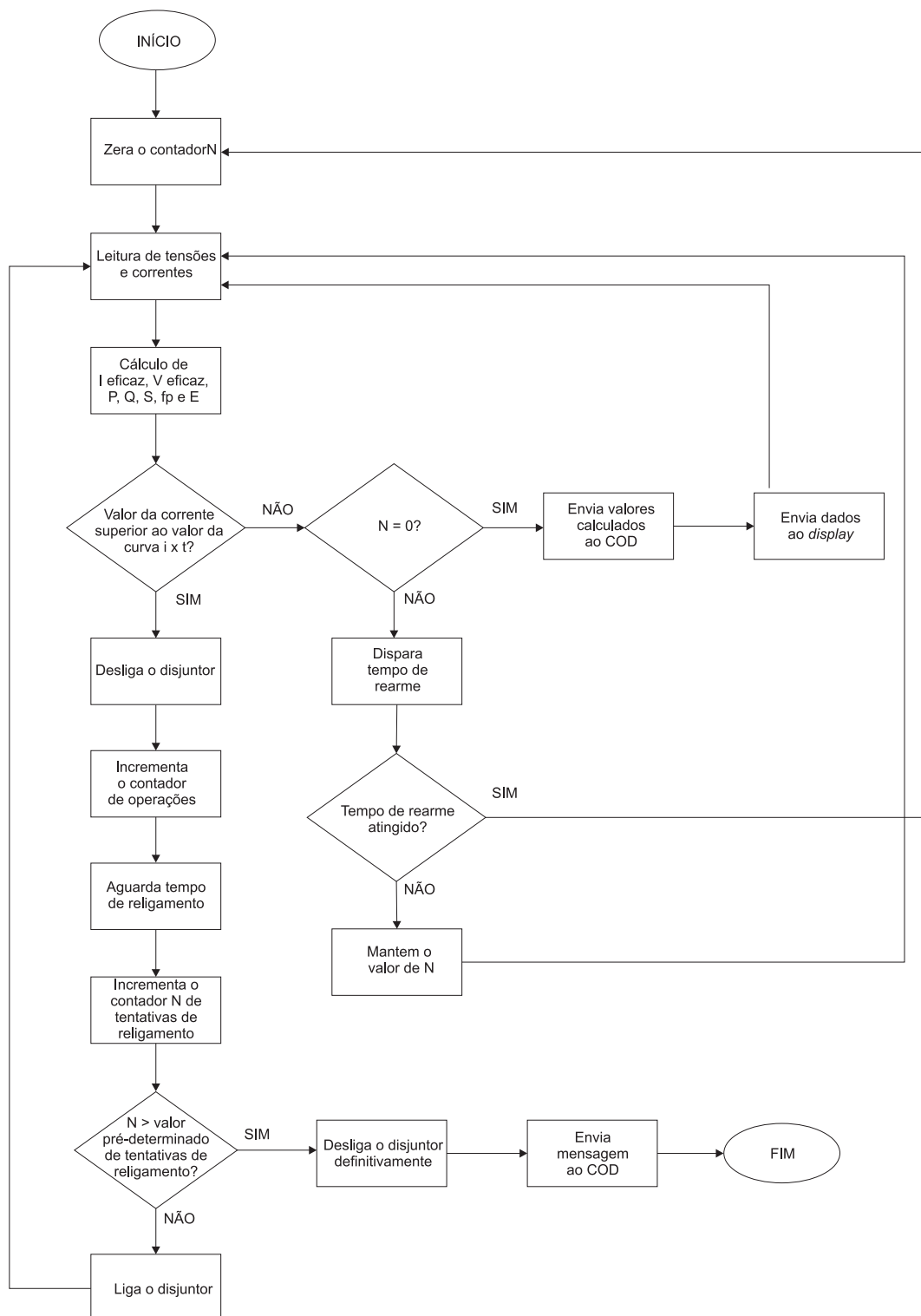


Figura 3.1: Fluxograma do funcionamento do religador

fase e falta fase-terra.

O controle possui funções de *pick-up* de carga fria, também conhecida por corrente de *inrush*, que é a corrente máxima instantânea drenada por transformadores ou capacitores, quando energizados. Esse controle, presente no dispositivo, previne a operação de abertura do religador devido a essas correntes elevadas, porém de curta duração.

A comunicação com o COD é feita via GPRS e o protocolo de comunicação utilizado é o DNP3.

3.3 Diagrama de blocos do religador

O Religador automático para redes de baixa tensão pode ser dividido, para fins didáticos, em três grandes partes: o circuito analógico de sinais, o circuito digital de sinais e o circuito de potência. A Figura 3.2 mostra o diagrama de blocos do religador. Todos esses três circuitos estão demarcados e devidamente assinalados. A Figura 3.2 mostra os níveis de tensão em cada estágio e as ações que alguns blocos realizam.

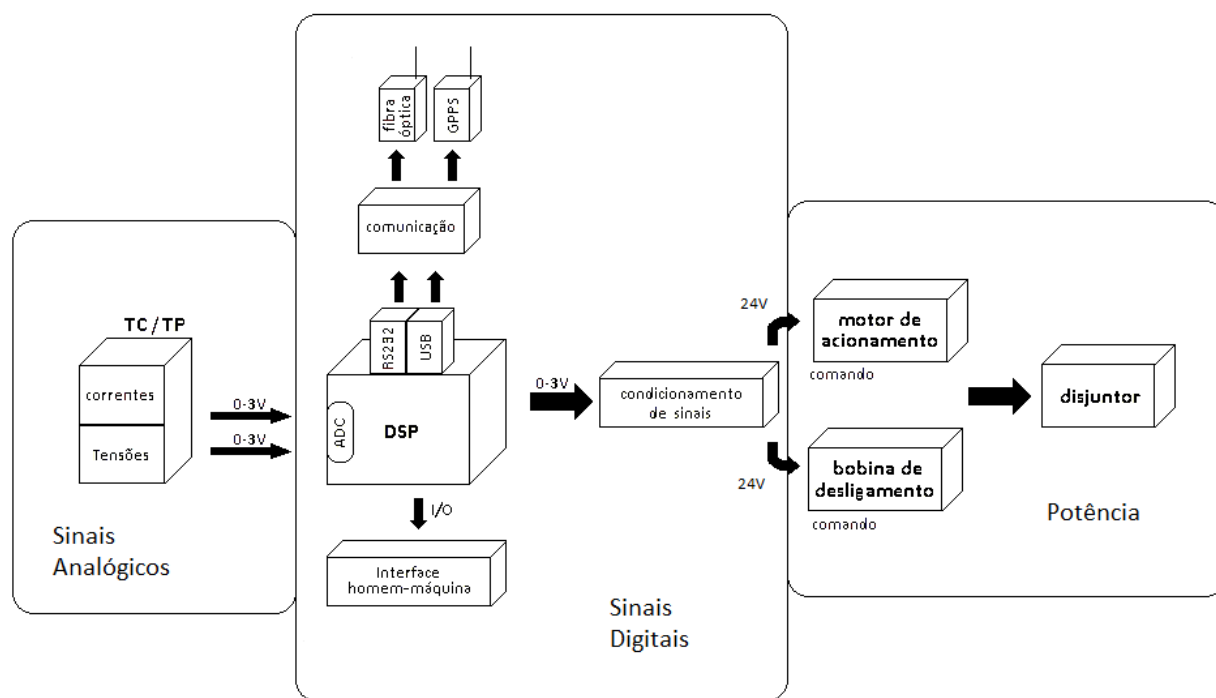


Figura 3.2: Diagrama de blocos do Religador Automático para Redes de Baixa Tensão

3.3.1 Medição, condicionamento e processamento de sinais

O primeiro bloco do circuito eletrônico corresponde, fisicamente, aos TCs, aos TPs e à Placa de Medição. Como o próprio nome diz, realiza as medições de tensão e corrente e adequa esses valores a níveis suportados pelo estágio seguinte, no caso o Conversor Analógico Digital (Conversor A/D) do DSP.

O Transformador de Corrente é um equipamento capaz de reduzir a corrente que circula no seu primário, para um valor inferior, no secundário, que seja compatível com o dispositivo que está eletricamente após o TC [14].

Os Transformadores de Corrente podem ser divididos em dois tipos: os TCs utilizados para medição e os TCs utilizados para proteção. Ambos foram utilizados neste projeto.

Os TCs de medição possuem seis características que devem ser especificadas.

- **Corrente primária nominal:** a corrente primária nominal é a corrente para a qual o TC foi projetado. Deve-se escolher a corrente primária nominal próxima ao valor da corrente de carga máxima do circuito.
- **Corrente secundária nominal:** a corrente secundária nominal é o valor máximo da corrente do secundário, quando a corrente do primário é igual a corrente nominal.
- **Carga nominal:** a carga nominal é aquela que deve suportar, nominalmente, o enrolamento secundário do TC e na qual estão baseadas as prescrições de sua exatidão.
- **Classe de exatidão:** classe de exatidão é o valor percentual máximo de erro que o TC pode apresentar na indicação de um aparelho de medição em condições especificadas em norma.
- **Fator térmico:** é o fator pelo qual se deve multiplicar a corrente nominal primária do TC, a fim de se obter uma corrente secundária capaz de ser conduzida permanentemente, sem que os limites de elevação de temperatura especificados por norma sejam excedidos e para que sejam mantidos os limites de sua classe de exatidão.
- **Corrente térmica nominal:** conhecida também como corrente de curta duração é a corrente máxima que pode circular no primário do TC, estando o secundário em curto-circuito durante o período de um segundo, sem que seja excedida a elevação de temperatura especificada por norma. [14]

Os TCs de medição devem ser projetados para assegurar a proteção dos aparelhos a ele conectados. Durante a ocorrência de um curto-circuito a corrente do secundário é limitada pelo efeito de saturação do núcleo magnético do TC.

A Figura 3.3 mostra um dos TCs de medição utilizados neste projeto.

Os TCs para serviços de proteção possuem cinco características importantes:

- **Classe:** Os TCs utilizados em serviços de proteção dividem-se em duas classes: TCs de classe B e TCs de classe A. Nos primeiros a reatância do enrolamento secundário pode ser desprezada. Nos últimos a reatância do enrolamento secundário não pode ser desprezada.

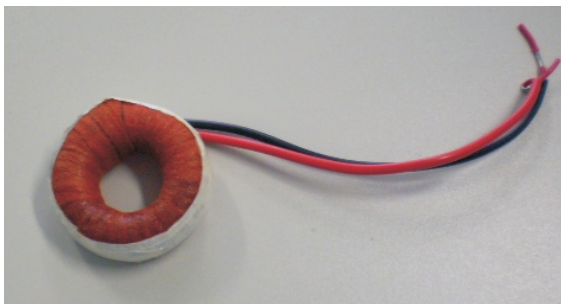


Figura 3.3: Transformador de Corrente utilizado no projeto para serviço de medição

- **Fator de sobrecorrente:** É um fator que expressa a relação entre a máxima corrente com a qual o TC mantém a sua classe de exatidão nominal e a sua corrente nominal.
- **Classe de exatidão:** É um fator que deve satisfazer a certas exigências metrológicas destinadas a conservar os erros dentro dos limites especificados.
- **Carga admissível:** É a carga máxima admitida no secundário do TC, sem que o erro percentual ultrapasse o valor especificado para a sua classe de exatidão.

A tensão nominal secundária do TC é aquela medida nos terminais da carga ligada a este, quando a corrente secundária é igual a vinte vezes a corrente nominal secundária, e na qual o erro de relação de transformação não é superior ao valor especificado. [14]

- **Limite da corrente de curta duração:** É a corrente primária simétrica, de valor eficaz, que o transformador de corrente é capaz de suportar com o enrolamento secundário em curto-circuito durante um tempo especificado [14]. Há duas maneiras de se medir os limites da corrente de curta duração:
 - a) Corrente térmica: é o valor da corrente de curto-circuito para o qual a temperatura do enrolamento não excede a temperatura máxima especificada. Pode ser calculada pela Equação 3.1

$$I_{ter} = I_{cs} \cdot \sqrt{T_{op} + 0,0042} \quad A \quad (3.1)$$

onde: I_{ter} é o valor da corrente de curto-circuito para efeito térmico, em A, I_{cs} é o valor eficaz da corrente inicial simétrica de curto-circuito, em A e T_{op} é o tempo de operação da proteção, em s. [14]

Chama-se fator térmico de curto-circuito a relação entre a corrente térmica do

TC e a sua corrente nominal primária, ou seja:

$$F_{tc} = \frac{I_{ter}}{I_{np}} \quad (3.2)$$

onde: F_{tc} é o fator térmico de curto-circuito e I_{np} é o valor da corrente nominal primária do TC, em A.

- b) Corrente dinâmica: é o maior valor de crista da corrente de curto-circuito, segundo o qual os esforços eletrodinâmicos resultantes não danificam mecanicamente o transformador de corrente.

O Transformador de Potencial condiciona a tensão do circuito, para níveis compatíveis com a tensão máxima suportada pelos equipamentos diretamente conectados ao seu secundário.

As principais características de um TP, que devem ser especificadas são:

- **Tensão nominal primária**: é a tensão para a qual o primário do transformador foi projetado.
- **Tensão nominal secundária**: é uma tensão fixa e padronizada para a qual o transformador foi projetado.
- **Classe de exatidão**: é o maior valor de erro percentual que o TP pode apresentar quando ligado a um aparelho de medida em condições especificadas.
- **Carga nominal**: é a carga admitida no secundário do TP, sem que o erro percentual ultrapasse os valores estipulados para a sua classe de exatidão.
- **Potência térmica**: é o valor da maior potência aparente que o TP pode fornecer em regime contínuo, sem que sejam excedidos os limites especificados de temperatura.
- **Tensão suportável de impulso**: é a maior tensão em valor de pico que o TP pode suportar quando submetido a uma frente de onda de impulso atmosférico de $1,2 \cdot 50\mu s$.

Ao contrário dos TCs, quando se desconecta a carga do secundário de um TP, os seus terminais devem ficar abertos, pois, se um condutor de baixa resistência for conectado, ocorrerá um curto-circuito, capaz de danificar o isolamento, comprometendo assim o funcionamento do transformador de potencial.

A Placa de Medição é parte integrante do bloco de medição e sua função é adequar os valores de saída dos TCs e dos TPs aos níveis aceitáveis pelo Conversor Analógico Digital do DSP. Esses valores são tensões e correntes positivas com forma de onda senoidais, com valores que variam de 0 a 3V.

A resolução de um número digital convertido é de 12bits para o DSP utilizado neste trabalho, ou seja, o valor digital pode variar de 0 a 4095 (base decimal). Como o sinal analógico de entrada deve variar de 0 a 3V, a resolução da tensão é

$$\frac{3V}{4095} = \frac{0,732mV}{bit} \quad (3.3)$$

Logo, a diferença entre dois valores digitais seguidos, corresponde a 0,732mV do sinal analógico.

O Processador Digital de Sinais é responsável por processar os sinais e calcular os valores de potência ativa, reativa, aparente, fator de potência e energia. É responsável por enviar ordem de abrir, fechar e reabrir o circuito e, em caso de falta permanente, envia ordem de abrir em definitivo. É também o responsável pelos contadores de operações e por enviar os sinais ao COD.

O DSP é um dispositivo especificamente projetado para manipular, através de operações matemáticas, dados digitais que são medidos por sensores de sinal. [15]

3.3.2 Comunicação e interface homem-máquina

O bloco de comunicação do religador automático compreende as interfaces de comunicação RS232 e USB que poderão ser utilizadas para acesso aos parâmetros ajustáveis via *notebook*. Também faz parte deste bloco a comunicação com o COD da concessionária de energia elétrica, que poderá ser feito via fibra óptica ou via GPRS.

Outro importante bloco é apresentado como interface homem-máquina, que possui como elementos o *display*, o teclado, *LEDs* e botoeiras. Os *LEDs* estão associados às posições das botoeiras, enquanto o teclado está associado ao *display*. Através do teclado e do *display* é possível alterar alguns parâmetros ajustáveis do religador. Este último serve ainda como visor para as medidas de tensão, corrente, potências, energia e fator de potência da rede elétrica. Deve-se salientar a possibilidade de alterar os parâmetros ajustáveis, também, via computador.

3.3.3 Comando do disjuntor

O disjuntor é comandado pelo DSP, que toma a decisão de desarmá-lo e rearmá-lo de acordo com curvas pré-definidas. O DSP, porém, comanda o disjuntor por meio de uma bobina de desligamento e de um motor de acionamento.

O motor está conectado a um sistema de molas que realizará o fechamento do disjuntor. Durante a operação do disjuntor, o sistema de mola é recarregado, automaticamente, e a energia armazenada é utilizada para o fechamento do disjuntor. O motor demora menos de 0,1s para fechá-lo. [16]

A bobina permite a abertura do dispositivo através de um comando elétrico e seu objetivo é reduzir o tempo de abertura do disjuntor, evitando assim o arco-voltaico. Com a bobina de abertura operando conjuntamente com o disjuntor, o tempo de abertura passa

a ser de 15ms. [16]

3.4 Características do dispositivo seccionador

A escolha do dispositivo de interrupção do religador é de extrema importância, já que é um componente que atua na abertura e no fechamento de correntes de valores muito elevados.

A impedância de curto-circuito de um transformador de distribuição, segundo norma, deve apresentar valor de 3,5%. Dessa maneira, pode-se calcular a corrente de curto-circuito que o religador deverá detectar e suportar por um período, de acordo com sua curva tempo x corrente, até realizar o desligamento. Diante disso, deve-se pesquisar um dispositivo seccionador que suporte tal corrente e também que suporte realizar aberturas e fechamentos em curto-circuito, sem soldar os contatos.

Avaliou-se a possibilidade da utilização de disjuntores, contatores e disjuntor de estado sólido. A seguir, uma análise de cada uma dessas possibilidades.

3.4.1 Contator

Inicialmente, pensou-se na opção de um contator para realizar as manobras de abertura e fechamentos do disjuntor. Contator é um dispositivo eletromecânico que possui uma bobina, parte fixa e uma parte móvel. A bobina produz um campo magnético que, conjuntamente com a parte fixa, proporciona movimento a parte móvel. Essa parte móvel, por sua vez, altera o estado dos seus contatos. Os que estão abertos são fechados e os que estão fechados são abertos.

Há diversos fabricantes, no Brasil, de contatores. Apesar de esses dispositivos apresentarem capacidade de suportar as correntes nominais, normalmente presentes em linhas de distribuição em regime permanente, em nenhum dos catálogos das empresas consultadas encontrou-se dados sobre a capacidade de interrupção desses dispositivos em curto-circuito. Por isso, essa chave foi descartada como possível dispositivo de interrupção do religador.

3.4.2 Disjuntor

O disjuntor foi outro equipamento pesquisado para atuar como dispositivo de abertura do religador. Os catálogos dos disjuntores apresentam valores sobre a capacidade de interrupção desses dispositivos, porém nenhum dos fabricantes pesquisados garantiu o funcionamento perfeito do disjuntor ao operar quatro vezes seguidas, como deveria ser feito, já que o religador deve abrir e fechar até quatro vezes.

O grande problema dessa sequência de aberturas e fechamentos é o aquecimento dos contatos. Como foi visto no Capítulo 2, outras tentativas de desenvolvimento de religador para baixa tensão falharam neste ponto. Portanto decidiu-se escolher um disjuntor com capacidade de abertura em torno de 10 vezes a corrente de curto-circuito do sistema a ser protegido. Dessa maneira, o aquecimento dos contatos não será tão elevado, podendo

então, operar quatro vezes seguidas sem o risco de defeito no equipamento.

Inicialmente pensou-se em utilizar um disjuntor eletromagnético. Após grande pesquisa entre marcas e modelos, decidiu-se por um determinado disjuntor que apresentava características compatíveis com o projeto. A última etapa para a escolha do disjuntor foi a tentativa de coordená-lo com o fusível utilizado nos transformadores de distribuição. A Figura 3.4 mostra a tentativa de coordenação.

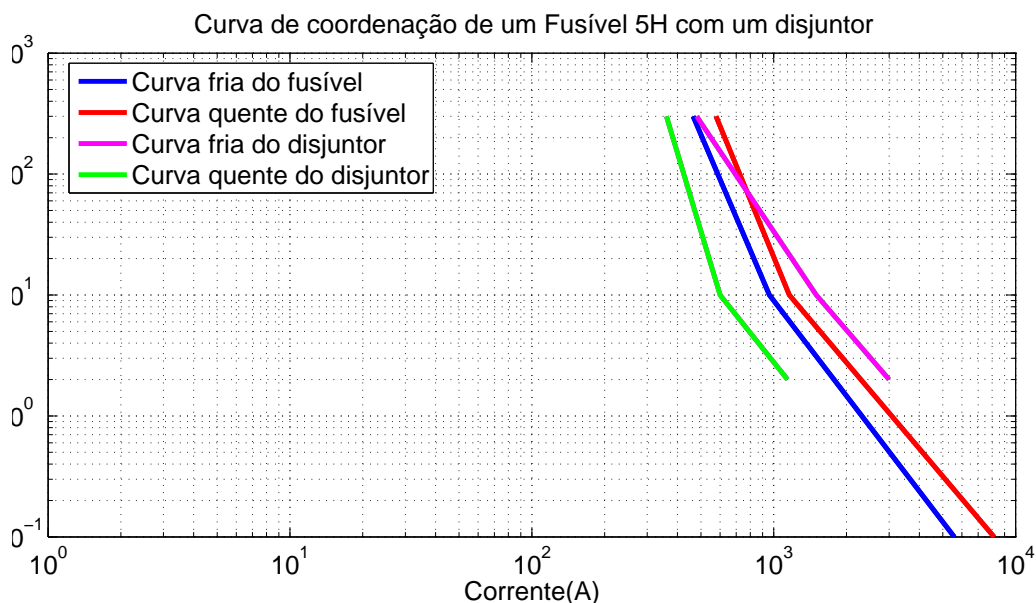


Figura 3.4: Coordenação do fusível 5H com o Disjuntor T5 400/630 - TMA, da ABB

Como pode ser observado na Figura 3.4 a coordenação não ocorreu, já que as duas curvas do disjuntor deveriam estar, graficamente, mais baixas que as curvas do fusível para que o disjuntor opere antes do fusível.

Após diversas tentativas, sem sucesso, de coordenação de outros disjuntores eletromagnéticos com o fusível 5H, muito utilizado em sistemas de distribuição, optou-se por um disjuntor com relé eletrônico, nos quais as curvas de proteção podem ser escolhidas.

A bobina de abertura e o motor de acionamento são auxiliares importantes que agilizam o processo de abertura e fechamento do religador. O motor carrega o sistema de molas que religará o circuito. A bobina de desligamento agiliza a abertura em caso de curto-circuito diminuindo assim, a possibilidade e o tamanho do arco-voltaico.

Outro auxiliar adquirido foi o Módulo de medição das grandezas elétricas que será utilizado para verificação e calibração das grandezas calculadas pelo *firmware* desenvolvido no projeto.

3.4.3 Disjuntor de estado sólido

Os Disjuntores de Estado Sólido, (do inglês, SSBC - *Solid-State Circuit Breaker*) baseados nos modernos semicondutores de potência, possuem muitas vantagens quando

comparados aos disjuntores mecânicos no que se refere a vida útil e velocidade de abertura e fechamento. Porém, ainda possuem alto custo e as perdas, quando em condução, são relevantes [17]. A utilização de tiristores como elementos dos SSBCs faz com que as perdas em condução sejam reduzidas.

Existem ainda outras opções de semicondutores de potência que podem ser utilizadas nos SSBCs. Pusorn [18] faz uma rápida comparação de algumas dessas chaves.

Observa-se através dos diversos artigos existentes a real possibilidade de se estruturar um Disjuntor de estado sólido e utilizá-lo como dispositivo seccionador em um religador de baixa tensão. A Figura 3.5 mostra uma proposta de projeto para um disjuntor com elementos semicondutores de potência. No caso, utilizou-se um tiristor.

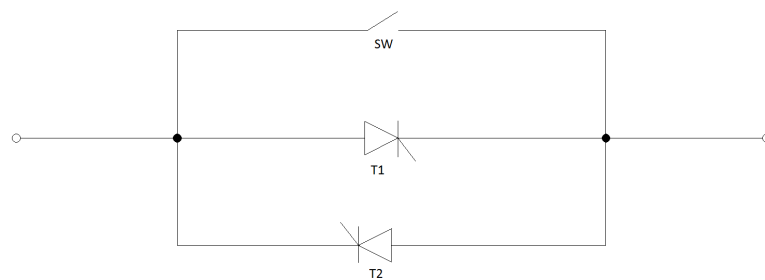


Figura 3.5: Circuito proposto para SSBC

O funcionamento do circuito pode ser entendido da seguinte maneira: imagina-se, inicialmente, que o circuito está desligado. No momento em que é energizado, o tiristor inicia a condução e alguns milissegundos depois, a chave é fechada. Ao detectar um curto-circuito, primeiramente a chave abre e o tiristor assume a condução, evitando assim a ocorrência de arco voltaico na chave. Após alguns milissegundos, o tiristor pára de conduzir e o circuito fica totalmente aberto.

Esta opção de disjuntor produzido com semicondutores de potência é uma sugestão para trabalhos futuros e poderá ser utilizada também no religador desenvolvido neste trabalho.

3.5 Conclusões parciais

O projeto do Religador Automático apresentado neste capítulo foi desenvolvido visando a ser uma solução para o problema de falta de energia causada por motivos transitórios, que correspondem à maioria das faltas de energia em residências e na indústria.

O *firmware* desenvolvido faz os cálculos de medidas importantes da rede de energia elétrica a partir das medições de correntes e tensões da linha. Estes cálculos serão comparados com os valores do módulo de medição de grandezas elétricas.

O dispositivo seccionador escolhido atende as capacidades de interrupção e de corrente nominal. A escolha de um disjuntor com capacidade de abertura de corrente em torno de

dez vezes a corrente de curto-circuito da rede ao qual pretende-se conectar o religador foi a estratégia escolhida para se evitar que os contatos se fundissem.

O disjuntor de estado sólido mostrou-se, à primeira vista, uma alternativa interessante ao disjuntor, que deve ser estudada e testada em trabalhos futuros.

Capítulo 4

Medição de frequência e cálculos de valor eficaz e potências

4.1 Introdução

Nesse capítulo serão apresentados os cálculos do valor eficaz e das potências. Serão mostrados os efeitos da variação da frequência de amostragem e da quantização, no cálculo do valor eficaz. Serão apresentadas as rotinas de cálculo para as grandezas descritas acima.

4.2 Cálculo do valor eficaz

As medições de tensão e corrente nas fases são obtidas de TPs e TCs, como dito no Capítulo 3. Essas medidas passam em um circuito conformador, que as adequam aos níveis de tensão do conversor Analógico/Digital. Com esse sinal pode-se fazer os cálculos necessários para o correto funcionamento do religador. Um desses cálculos é o do valor eficaz para tensões e correntes. Para sinais periódicos, amostrados x_n , com N amostras por período, o valor médio \bar{X} e o valor médio quadrático $\overline{X^2}$, segundo Mog em [19], são dados por :

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \quad (4.1)$$

e

$$\overline{X^2} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n^2 \quad (4.2)$$

O valor c.c. do sinal amostrado, x_n é exatamente o seu valor médio e é dado por:

$$X_{c.c.} = \bar{X} \quad (4.3)$$

O valor eficaz total de x_n é a raiz quadrada do seu valor médio quadrático, dado por:

$$X_{eficaz} = \sqrt{\overline{X^2}} \quad (4.4)$$

4.2.1 Taxa de amostragem

De acordo com o Teorema de Nyquist, a quantidade de amostras por unidade de tempo de um sinal, chamada frequência de amostragem, deve ser maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado, para que se possa reproduzir o sinal integralmente. Matematicamente, tem-se:

$$f_s > 2f_N \quad (4.5)$$

onde: f_s é a frequência de amostragem e f_N é a maior frequência contida no sinal a ser amostrado que é conhecida também por frequência de Nyquist [20].

Sabe-se que o valor da frequência fundamental, à qual estará conectado o religador é de 60Hz e deseja-se medir o efeito dos 31 primeiros harmônicos. Portanto, a frequência de Nyquist será igual a 1860Hz e a frequência de amostragem deverá ser maior que 3720Hz. A frequência de amostragem é dada por:

$$f_s = Nf_N \quad (4.6)$$

onde: N é o número de amostras por período do sinal amostrado.

De acordo com as equações 4.5 e 4.6 o número de amostras deverá ser: $N \geq 62$. Assim, escolheu-se utilizar N=64 amostras por ciclo.

4.2.2 Variação da frequência do sinal

A frequência nas linhas de distribuição pode variar, segundo o Módulo 8 do PRO-DIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), desenvolvido pela ANEEL, entre 59,9Hz e 60,1Hz, em condições normais de operação e em regime permanente e, em caso de corte de carga, durante os distúrbios no sistema de distribuição, a frequência não pode exceder 66Hz ou ser inferior a 56,5Hz, em condições extremas [21]. Por essa razão, decidiu-se analisar o resultado do valor eficaz variando-se a frequência dentro dessa faixa.

Quando a frequência da rede é diferente de 60Hz, o número de amostras escolhido não corresponde mais a um ciclo e isso gera um erro no cálculo do valor eficaz.

A fim de se analisar a forma e a magnitude desse erro desenvolveu-se um programa no *software* MatLab, que simula uma tensão senoidal, inicialmente sem harmônicos, com valor eficaz de 100V. A frequência dessa senoide varia como prevê o PRODIST, de 56,5Hz a 66Hz.

O programa calcula a tensão eficaz por meio de uma janela móvel, contendo 64 amostras, que se movimenta ao longo da senoide. Quando a frequência é de 60Hz, não há erro no valor calculado, já que 64 amostras correspondem a um ciclo. A cada movimento da janela móvel, um novo valor é incorporado ao cálculo do valor eficaz e o valor mais antigo é descartado. Na frequência de 60Hz, esses dois valores são iguais e se cancelam.

Quando as frequências são diferentes, o valor incorporado não é igual ao valor descartado e, por isso, surge um erro que varia senoidalmente, com uma frequência igual ao dobro da frequência do sinal observado e sua média é aproximadamente zero. A Figura 4.1 mostra a variação do erro no cálculo do valor eficaz para uma frequência de 56,5Hz.

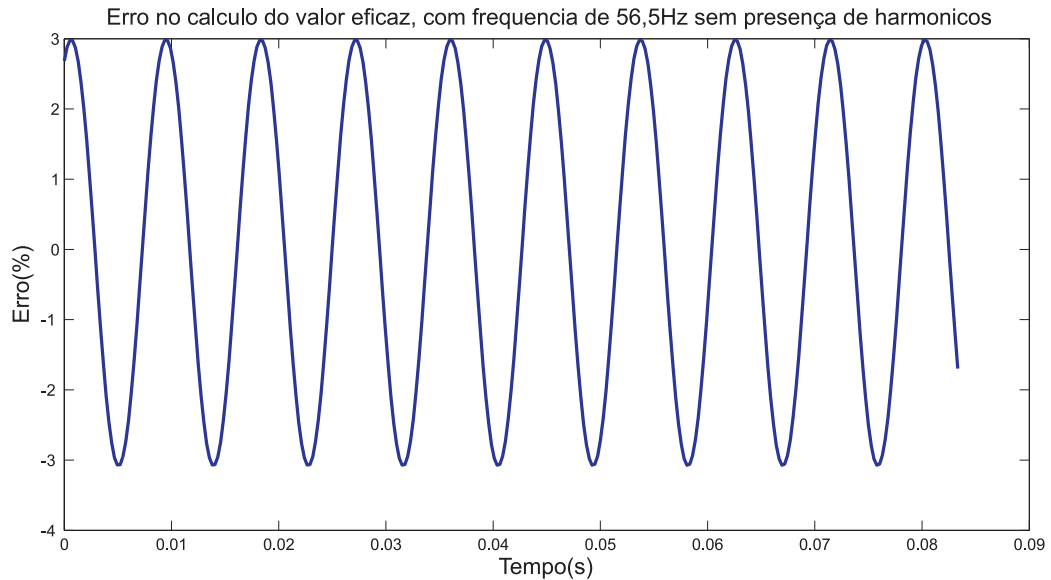


Figura 4.1: Erro do valor eficaz da tensão com frequência de 56,5Hz, sem presença de harmônicos

Como a amplitude dessa senoide varia para cada frequência do sinal medido traçou-se uma curva do erro máximo no cálculo do valor eficaz para as frequências estudadas. A Figura 4.2 mostra essa curva com um detalhe para o intervalo de frequências de 59,9Hz a 60,1Hz, que é a variação prevista pelo PRODIST [21], em condições normais de funcionamento.

O cálculo do erro médio do valor eficaz feito para um ciclo da tensão senoidal original, resulta em valores muito próximos a zero. Isso significa que, ao se calcular o valor eficaz da tensão para um ciclo, não há erro em relação ao valor eficaz da tensão original.

Observa-se que, para o caso extremo em que a tensão da rede atingir a frequência de 66Hz, o erro da tensão eficaz será menor que 4,5%. No detalhe da Figura 4.2, observa-se que dentro da faixa aceitável de variação da tensão, em condições normais, o erro é menor que 0,09%.

Em seguida simulou-se uma tensão senoidal, com harmônicos. A Tabela 4.1 mostra o conteúdo harmônico utilizado na simulação. A tensão eficaz, com esse conteúdo harmônico, pode ser calculada pela equação 4.7.

$$V_{eficaz} = \sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + \dots + V_{31}^2} \quad (4.7)$$

onde os índices de V indicam a ordem harmônica.

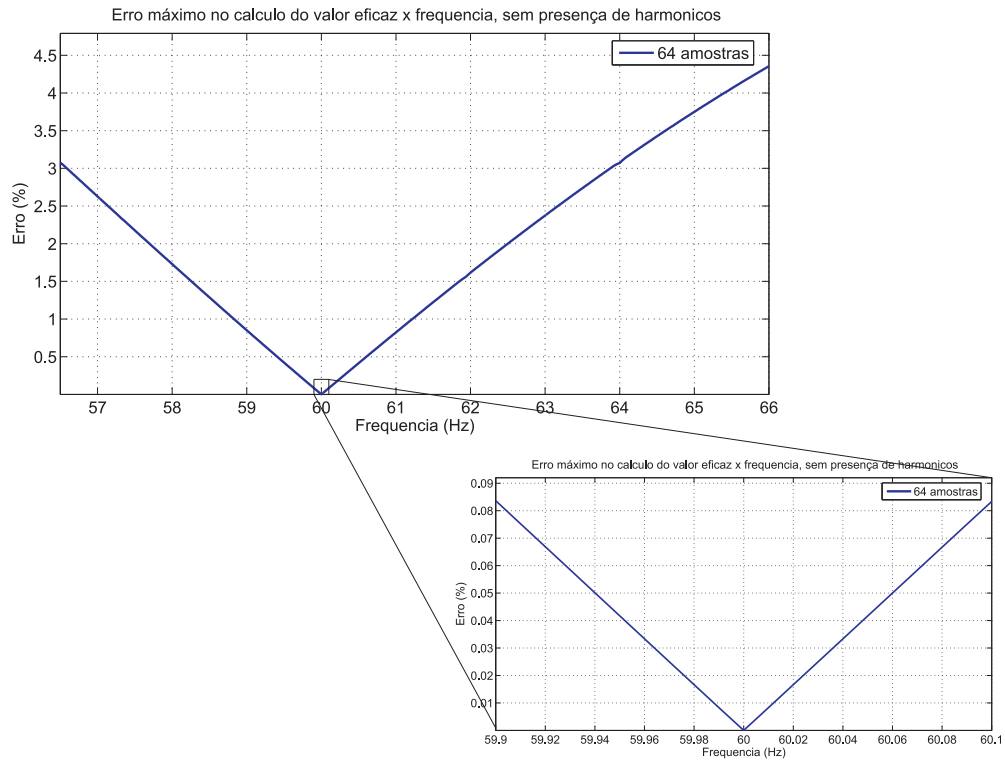


Figura 4.2: Erro máximo no valor eficaz x frequência, sem presença de harmônicos

Tabela 4.1: Conteúdo harmônico utilizado na simulação da tensão

Ordem harmônica	Valor da tensão
3	3,5V
5	5,6V
7	0,8V
9	1,1V
11	0,6V
31	5V

Com os valores escolhidos para cada harmônico, $V_{eficaz} = 100,3535V$.

A Figura 4.3 mostra a variação do erro no cálculo do valor eficaz para uma frequência de 56,5Hz, com a presença do conteúdo harmônico mostrado na Tabela 4.1.

Observa-se que o erro varia ao longo do tempo e a amplitude dessa desse erro varia para cada frequência do sinal medido. Portanto, traçou-se uma curva do erro máximo no cálculo do valor eficaz para as frequências estudadas. A Figura 4.4 mostra essa curva com um detalhe para o intervalo de frequências de 59,9Hz a 60,1Hz, que é a variação prevista pelo PRODIST [21], em condições normais de funcionamento.

Observa-se que, para o caso extremo em que a tensão da rede atingir a frequência de 66Hz, o erro da tensão eficaz também será menor que 4,5%, como no caso da simulação sem harmônicos. No detalhe da Figura 4.4, observa-se que dentro da faixa aceitável de

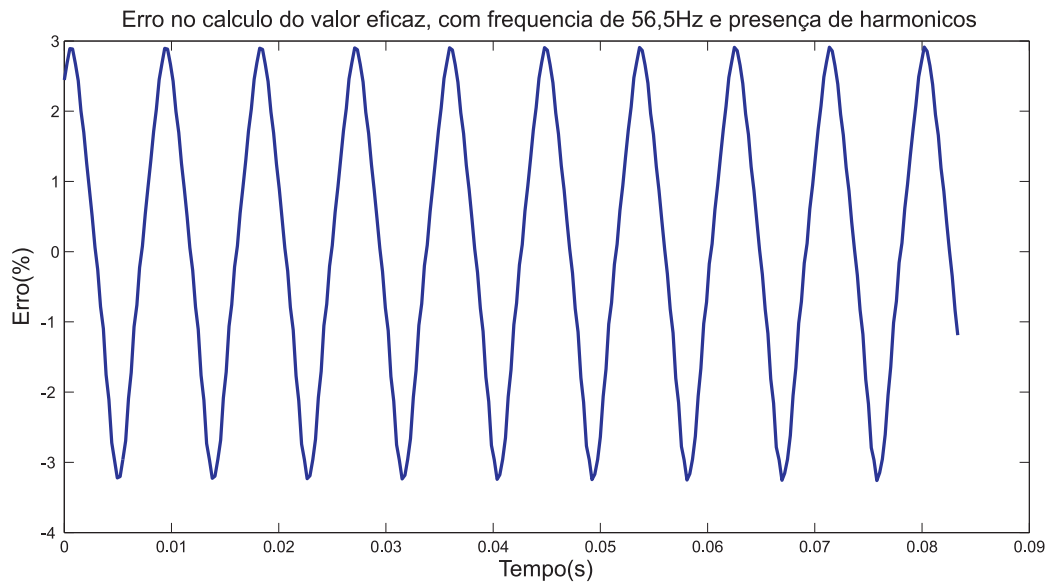


Figura 4.3: Erro do valor eficaz da tensão com frequência de 56,5Hz, com presença de harmônicos

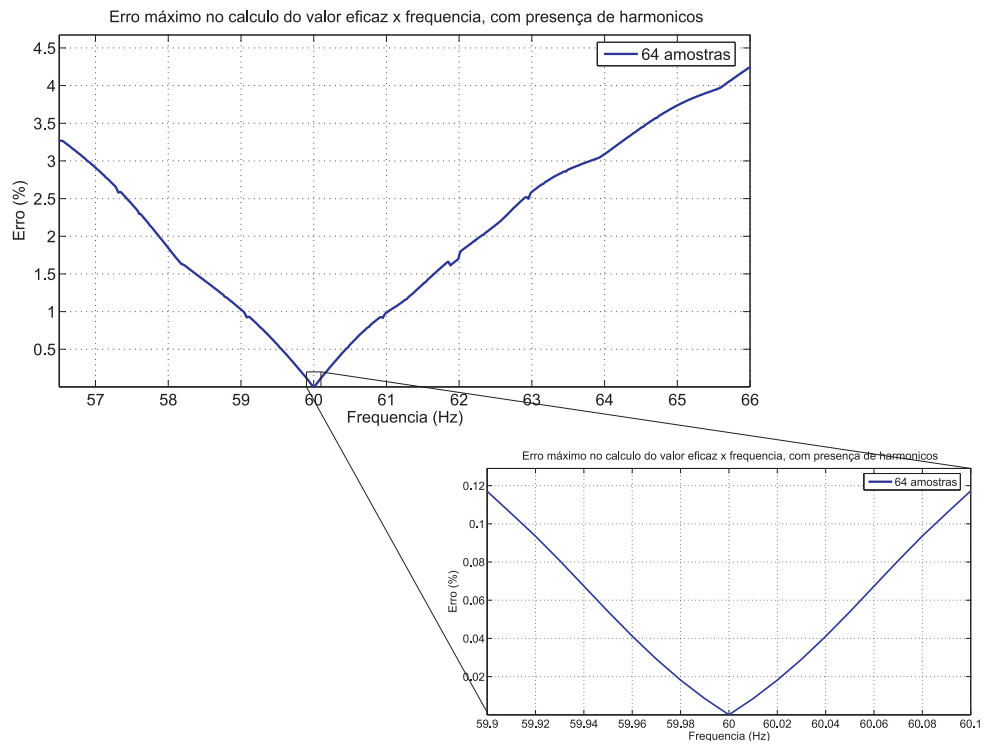


Figura 4.4: Erro máximo no valor eficaz x frequência, com presença de harmônicos

variação da tensão em condições normais, o erro aumentou, quando comparado ao erro obtido na simulação sem harmônicos. Neste caso, o erro é próximo de 0,12%.

4.2.3 Efeito da quantização

A seguir, procurou-se avaliar o erro causado pela quantização na medida do sinal [20]. Para que esse erro seja minimizado, deve-se escolher o DSP cujo conversor A/D melhor se adapte às necessidades do projeto. Para isso, deve-se determinar o efeito da quantização no cálculo da tensão eficaz.

A fim de determinar esse efeito foi feita uma simulação na qual a tensão eficaz é calculada, com número de amostras fixo em 64 amostras por ciclo, frequência variável, entre 56,5Hz e 66Hz. Os cálculos foram feitos simulando a amostragem do sinal através de um conversor A/D de 8, 10, 12, 14 e 16 bits. É importante salientar que, quanto maior o número de bits, mais caro será o processador. Dessa maneira, deve-se otimizar a relação custo x benefício.

Da mesma maneira que na subseção 4.2.2, o erro varia de maneira senoidal, já que também utiliza-se a janela móvel para verificar o efeito da quantização.

A Figura 4.5 mostra o erro máximo percentual do valor eficaz da tensão calculada, em relação ao valor eficaz da tensão real, para cada frequência, quando não há presença de harmônicos. No eixo X está a variação de frequência de 56,5Hz a 66Hz. No eixo Y, o erro percentual. Variou-se o número de bits entre 8 e 16. O detalhe da Figura 4.5 mostra a variação da frequência de 59,9Hz a 60,1Hz, que é a variação máxima permitida em condições normais de operação.

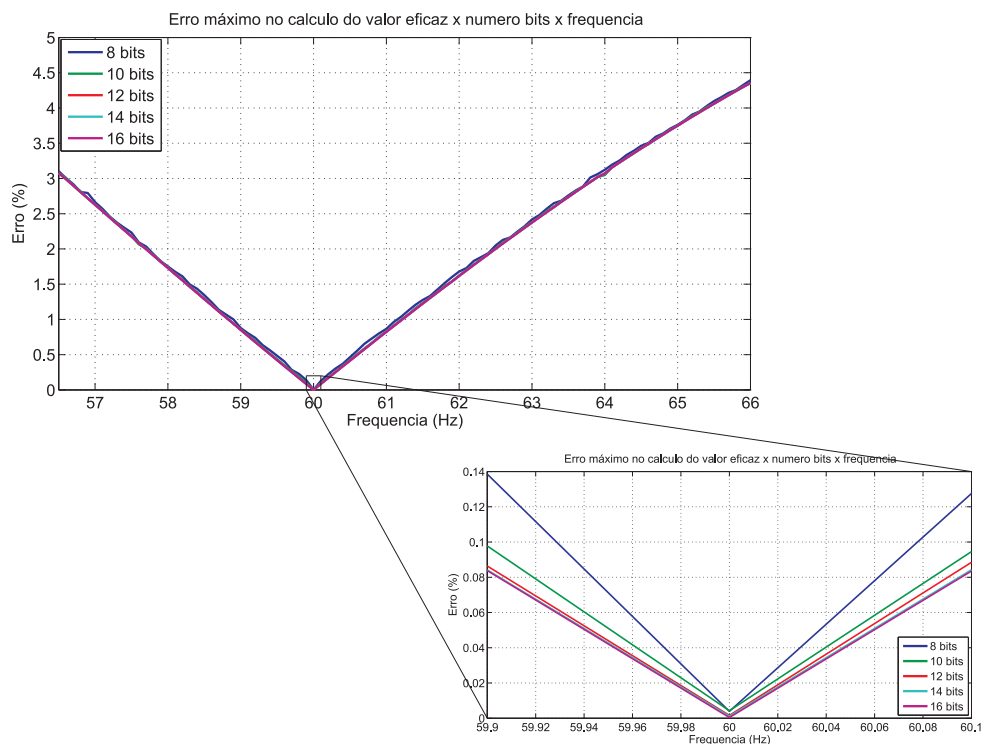


Figura 4.5: Erro máximo do valor eficaz da tensão em relação à variação da frequência com número de bits fixo, sem presença de harmônicos

Ao observar a Figura 4.5 nota-se que o erro de quantização para o caso de 8 bits é o maior, sendo seguido do de 10 bits, como era de se esperar. A partir de 12 bits a variação do erro entre os casos estudados praticamente inexistente. Para o caso da frequência nominal, de 60Hz, o erro é zero para os casos de 12, 14 e 16 bits. Quando a frequência é variada nota-se um aumento do erro que 3% em torno da frequência de 56,5Hz e um erro quase de 4,5% em condições extremas, quando a frequência é de 66Hz. No detalhe da Figura 4.5 é mostrado o erro nas proximidades da frequência fundamental. Observa-se que, nessa área do gráfico, o erro é próximo de 0,14% para 8 bits, menor que 0,1% para 10 bits e próximo a 0,08% para 12, 14 e 16 bits.

Em seguida traçou-se as curvas do erro médio. A Figura 4.6 mostra as curvas para o erro médio da tensão eficaz medida em relação ao valor teórico, de 100V, variando-se a frequência, a fim de se determinar o efeito da quantização nesse cálculo.

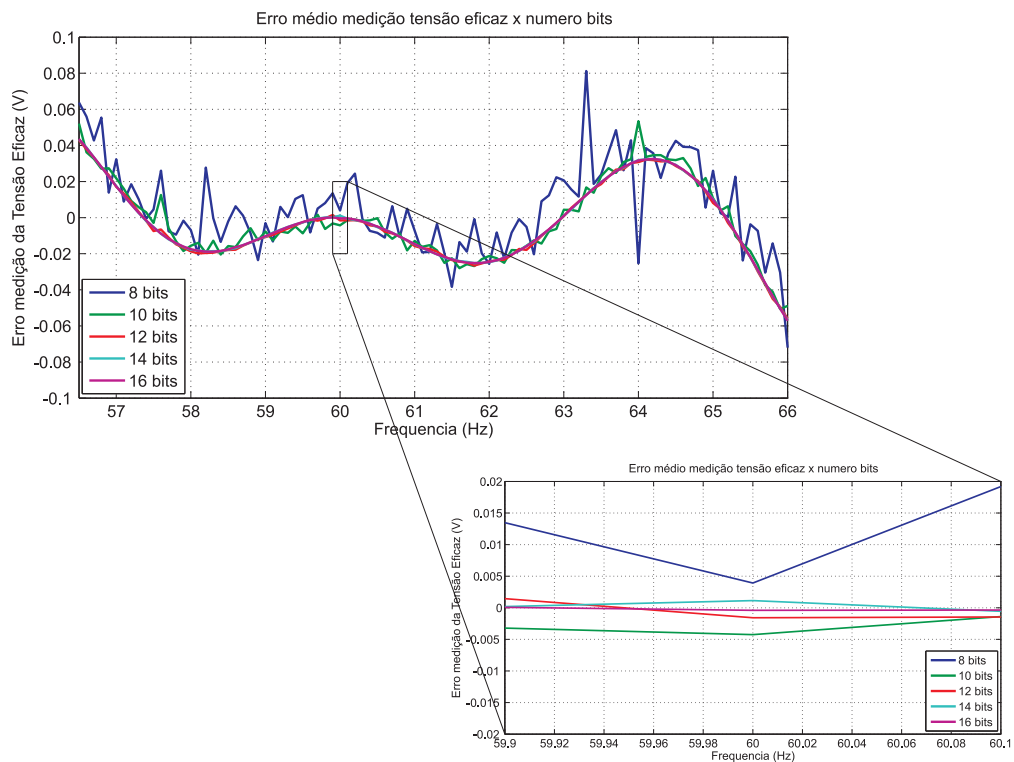


Figura 4.6: Erro médio do valor eficaz da tensão em relação à variação da frequência com número de bits fixo, sem presença de harmônicos

Nota-se na Figura 4.6 que o erro médio é muito próximo de zero. A maior variação, como dito anteriormente, é para o caso de 8 bits, seguida pelo caso de 10 bits. Para os outros valores, praticamente não há diferenças. No detalhe da Figura 4.6 nota-se um erro muito menor, já que o detalhe mostra o erro nas proximidades de 60Hz.

Em seguida adicionou-se o conteúdo harmônico da Tabela 4.1 ao valor da tensão e, novamente, fez-se as mesmas simulações. A Figura 4.7 mostra o erro máximo percentual da tensão eficaz com relação ao valor teórico $V=100,3535V$, com presença de harmônicos,

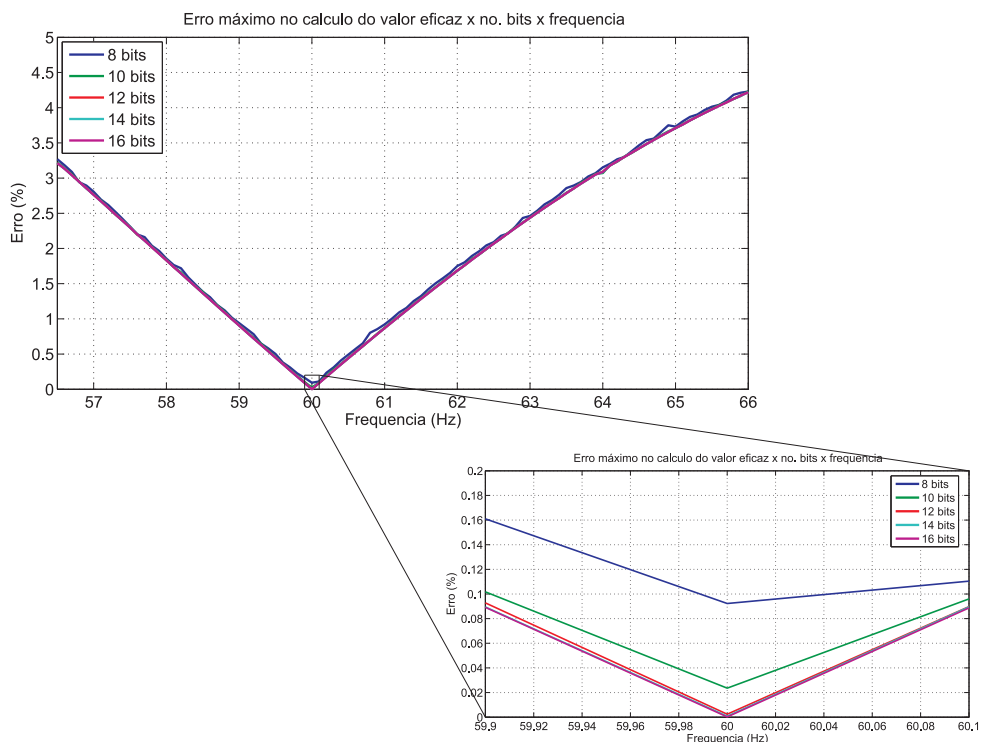


Figura 4.7: Erro máximo do valor eficaz da tensão em relação à variação da frequência com número de bits fixo, com presença de harmônicos

ao longo das frequências de 56,5Hz a 66Hz.

Ao observar a Figura 4.7 nota-se que o erro é menor que 3,5% para a frequência de 56,5Hz e menor que 4,5% para a frequência de 66Hz. No detalhe da Figura 4.7 pode-se notar que, em torno da frequência de 60Hz o erro, embora muito pequeno, é maior para 8 e 10 bits. Para os casos de 12, 14 e 16 bits, praticamente não há diferenças.

A Figura 4.8 mostra o erro médio percentual da tensão eficaz ao longo das frequências de 56,5Hz e 66Hz, quando há presença de harmônicos na tensão.

Nota-se, pela Figura 4.8, que o erro médio é praticamente zero para todos os casos, porém para 8 e 10 bits o erro é um pouco maior que para o caso de 12, 14 e 16 bits. Para esses últimos, o erro médio permanece dentro da faixa de -0,05% e 0,05%. No detalhe da Figura 4.8 pode-se notar que, em torno da frequência de 60Hz, o erro é mínimo para todos os casos e praticamente zero para 12, 14 e 16 bits. Embora muito pequeno, é maior para 8 e 10 bits. Para os casos de 12, 14 e 16 bits, praticamente não há diferenças.

Decidiu-se então utilizar um DSP com conversor A/D de 12 bits, visto não haver necessidade de um conversor melhor, já que, pelas simulações feitas, não haveria melhoras significativas no cálculo do valor da tensão eficaz.

4.2.4 Rotinas de cálculo da tensão c.c. e da tensão eficaz

Para o cálculo do valor da tensão c.c. soma-se as amostras do sinal e divide-se pelo número N de amostras, neste caso, 64, de acordo com a equação 4.1. O valor da tensão

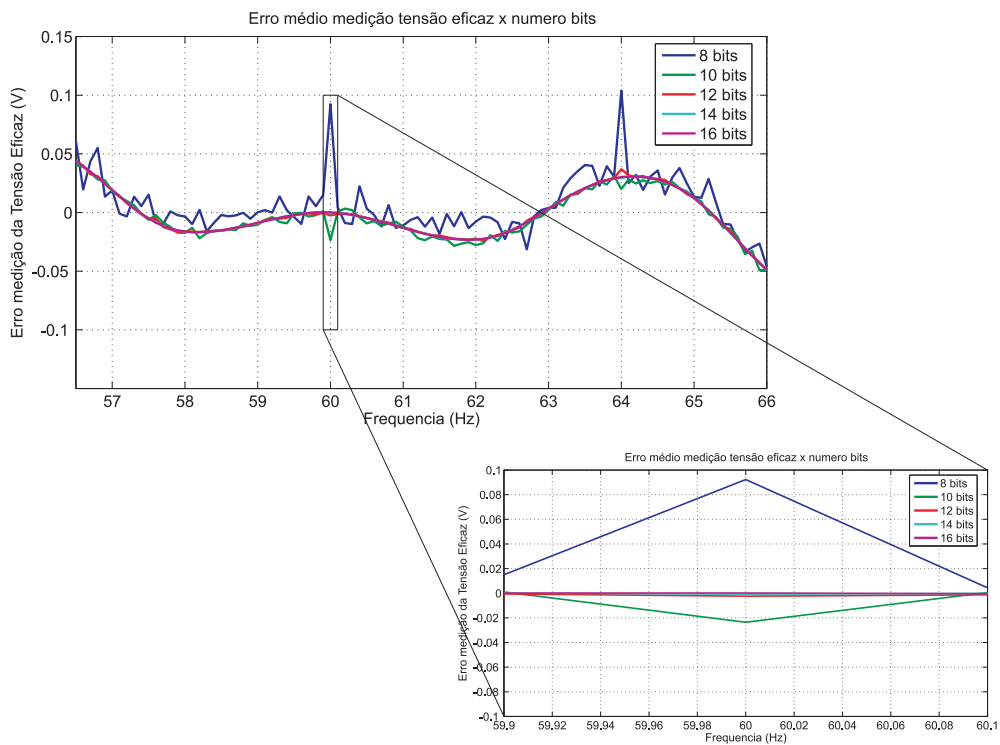


Figura 4.8: Erro médio do valor eficaz da tensão em relação à variação da frequência com número de bits fixo, com presença de harmônicos

c.c. será o próprio valor médio, conforme a equação 4.3.

A fim de se calcular o valor eficaz, somam-se todas as n amostras elevadas ao quadrado e divide-se pelo número N de amostras, neste caso, 64, de acordo com a equação 4.2. O valor da tensão eficaz será a raiz quadrada deste valor, de acordo com a equação 4.4.

É importante salientar que os cálculos para a corrente são feitos da mesma maneira.

Um contador de 16bits no DSP é programado para contar de zero a um valor que será determinado pelo período de amostragem. O contador retorna a zero quando o período é alcançado e inicia a contagem novamente.

A cada início de período da onda dente de serra, o A/D faz as conversões das tensões e correntes. Como o A/D realiza cada conversão em 80ns e são nove conversões a serem feitas, o tempo total de conversão é de 720ns, que corresponde a 0,277% do período de amostragem, ou do período da onda dente de serra, o que é a mesma coisa.

Ao terminar as conversões é gerada uma interrupção para que se faça os cálculos. O programa então armazena, em um vetor, as primeiras 64 amostras dos valores instantâneos convertidos. Em seguida calcula o valor eficaz e o valor médio da forma de onda. Depois do primeiro ciclo da fundamental, uma janela com as 64 amostras mais recentes é criada. O vetor de 64 posições é atualizado de forma que a amostra mais antiga do vetor seja substituída pela última amostra lida pelo conversor A/D. Uma variável armazena a soma destes valores que estão no vetor. A cada novo valor lido pelo conversor, o valor mais

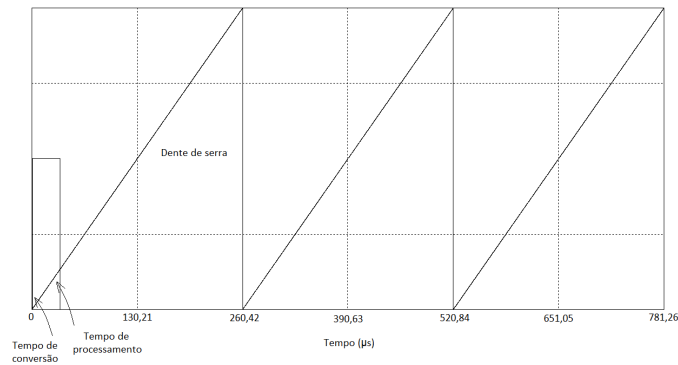


Figura 4.9: Forma de onda criada pelo contador, tempo de conversão e tempo de processamento

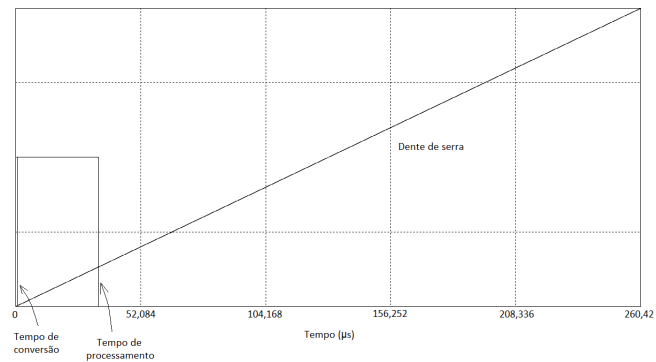


Figura 4.10: Detalhe da forma de onda criada pelo contador, tempo de conversão e tempo de processamento

antigo é subtraído e o novo valor é somado a esta variável. Em seguida a variável é dividida por 64 para calcular o valor médio instantâneo. Para o valor eficaz o mesmo procedimento é adotado, com a diferença que os valores subtraídos e somados estão elevados ao quadrado e depois da divisão é tirada a raiz quadrada desse valor, como dito anteriormente.

Como esta parte do protótipo já foi montada, mediu-se o tempo gasto para o DSP fazer os cálculos de tensão e corrente eficaz, potências e energia. O tempo total do processamento é de $33,9\mu s$, para o clock de 150MHz. Esse tempo corresponde a 13,02% do período de amostragem.

A Figura 4.9 mostra a onda dente de serra formada pelo contador, bem como o tempo de conversão e o tempo de processamento, em escala. Mostra-se na Figura 4.10 um *zoom* de um período, já que o tempo gasto para a conversão é mínimo e difícil se visualizar. Durante o restante do tempo, o DSP poderá realizar suas outras funções, como enviar dados ao COD, por exemplo.

4.3 Redução de erros nos cálculos da tensão eficaz por variação da frequência de amostragem

A medição da frequência de uma onda c.a. pode ser obtida por meio da detecção de sua passagem por zero, desde que a influência do conteúdo harmônico, dos *notches*, ou de qualquer ruído seja pequena. O problema introduzido pelos harmônicos, dos *notches* e ruídos deve-se a possibilidade de ocorrência de várias passagens pelo zero, mascarando, dessa maneira, a frequência real. Outro problema deve-se à amostragem dos sinais, já que pode-se fazer duas amostragens seguidas e entre essas duas estar o zero, ou seja, o zero não será detectado. Há maneiras de se detectar o zero nestes casos, porém é mais um detalhe que o projetista deverá considerar.

Deve-se lembrar que o valor da frequência é determinante no cálculo correto e preciso da tensão eficaz, como pode ser visto nas equações 4.2, 4.4, 4.5 e 4.6. Por isso, qualquer variação da frequência na linha causará erro no cálculo do valor eficaz.

A fim de minimizar este erro, propõe-se a alternativa de se usar um PLL (do inglês - *Phase-Locked Loop*). Santos Filho em [22], analisa três algoritmos de PLL e afirma, que apesar das suas diferenças, todos estes algoritmos são derivados de uma mesma estrutura padrão, que pode ser dividida em três partes: Detector de fase (do inglês, PD - *phase detector*), filtro e oscilador controlado por tensão. As diferenças entre os PLL são concentradas na parte de detecção de fase.

A Figura 4.11 mostra o modelo linear do PLL. O detector de fase é representado $F(s)$, o compensador $C(s)$ é um controlador proporcional-integral - PI e o oscilador de tensão é representado pelo integrador. A entrada dessa estrutura é a fase da tensão, θ , e a saída é o ângulo aproximado, $\hat{\theta}$. A frequência em torno da qual o PLL será travado pode ser visto definido por ω_{ff} [22]. A frequência de saída, que será utilizada no cálculo, é dada por \hat{f} .

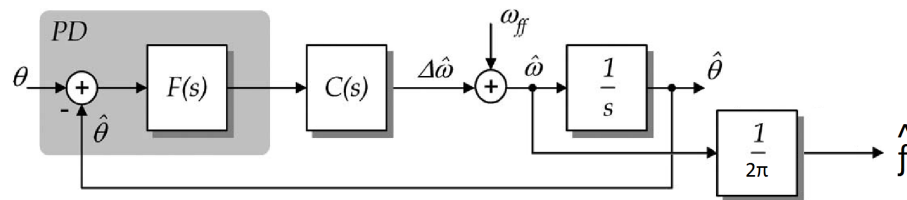


Figura 4.11: Modelo linear do PLL obtido em [22]

Assim, pode-se desenvolver um algoritmo que trave a frequência de amostragem com valor proporcional à frequência da rede, mesmo com suas variações, de acordo com a equação 4.6.

4.4 Cálculo de potências

As definições e os conceitos de potências em sistemas puramente senoidais são conhecidos e largamente aceitos por toda a comunidade científica. Em sistemas, nos quais as formas de onda de tensão e corrente são distorcidas, há controvérsias quanto a definição de potência reativa.

O ponto central da controvérsia, segundo Santos Filho em [23] recai sobre a existência ou não de significado físico das componentes de potência, resultantes do produto de tensões e correntes de frequências diferentes, e sobre como agrupá-las de modo útil e consistente.

As potências fundamentais são definidas abaixo:

Potência ativa:

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad (4.8)$$

onde: V_1 é o valor eficaz da tensão fundamental; I_1 é o valor eficaz da corrente fundamental e ϕ_1 é o ângulo de defasagem entre os dois primeiros.

Potência reativa:

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \phi_1 \quad (4.9)$$

Potência aparente:

$$S_1 = V_1 I_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (4.10)$$

A existência de reatâncias na carga cria uma defasagem entre as formas de onda de tensão e corrente. Este fato leva os condutores a serem ocupados por uma parcela de corrente que não realiza trabalho. Esta parcela de corrente será a responsável pela presença de potência oscilante entre fonte e carga. A essa potência dá-se o nome de potência reativa, cuja unidade é o Volt-Ampère reativo [var]. A potência ativa, cuja unidade é o Watt, [W], é toda potência capaz de realizar trabalho, i.e. em um sistema contendo uma fonte de tensão e uma carga puramente resistiva, toda a potência requerida pela carga se transformará em trabalho. A grandeza conhecida por potência aparente, cuja a unidade é o Volt-Ampère [VA], é definida como a máxima potência útil possível para os dados valores eficazes de tensão e corrente, segundo Suhett em [24]. Estes são os significados físicos das potências em sistemas senoidais, amplamente conhecidos e aceitos.

O problema surge quando fala-se em sistemas com harmônicos. O sistema elétrico é projetado para operar com apenas uma frequência, a chamada frequência fundamental, que no caso do Brasil é 60Hz. Qualquer frequência que esteja presente neste sistema e tenha valor diferente de 60Hz é indesejável. Essas frequências são originadas de cargas não lineares que produzem formas de onda distorcidas, com forte conteúdo harmônico na forma de onda da corrente.

Há algumas definições de potências, conhecidas na literatura, que serão analisadas.

4.4.1 Definições de potência segundo Budeanu

Budeanu propôs em 1927 um conjunto de definições de potência válidos para formas de onda genéricas de tensão e corrente. As definições de Budeanu se caracterizam por serem realizadas no domínio da frequência.

A potência aparente, segundo definição de Budeanu, corresponde a potência aparente convencional, dada em condições puramente senoidais:

$$S^2 = \sum_{n=1}^{\infty} V_n^2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \quad (4.11)$$

onde: S é a potência aparente, V_n é a tensão eficaz do n -ésimo harmônico, I_n é a corrente eficaz do n -ésimo harmônico.

A potência ativa é definida como:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \phi_n \quad (4.12)$$

onde: P é a potência ativa, V_n é a tensão eficaz do n -ésimo harmônico, I_n é a corrente eficaz do n -ésimo harmônico e ϕ_n é ângulo entre a componente de tensão e a componente de corrente de ordem n .

A potência reativa é definida como:

$$Q_B = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin \phi_n \quad (4.13)$$

onde: Q_B é a potência reativa proposta por Budeanu.

Budeanu definiu também a Potência de Distorção, D , que é o produto cruzado entre tensões e correntes harmônicas de ordens diferentes.

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (4.14)$$

onde: D é o valor da potência de distorção, S é o valor da potência aparente, P é o valor da potência ativa e Q é o valor da potência reativa.

Logo, segundo as equações 4.12, 4.13 e 4.14, a potência aparente pode ser calculada como a raiz quadrada da soma das potências ativa, reativa e de distorção, todas elevadas ao quadrado.

$$S = VI = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (4.15)$$

onde: V é o valor eficaz da tensão e I é o valor eficaz da corrente.

A principal crítica às definições de Budeanu é com relação ao conceito de potência reativas e potência de distorção. Czarnecki em [25] questiona se a definição dessas grandezas

deveriam ser feitas no domínio da frequência e se se elas podem ser medidas da maneira como foram definidas, e afirma que esses valores de potência reativa e de distorção não fornecem qualquer tipo de informação que permita projetar um circuito compensador a fim de melhorar a qualidade da energia. Afirma ainda que o valor de potência de distorção nada informa a respeito da distorção nas formas de onda.

4.4.2 Definições de potência segundo Frize

Frize propôs em 1930 suas definições de potência no domínio do tempo. Segundo Frize a potência ativa é calculada como:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (4.16)$$

onde: $p(t)$ é a potência instantânea.

A potência aparente como:

$$S = VI \quad (4.17)$$

onde: V é o valor eficaz da tensão e I é o valor eficaz da corrente.

E a potência reativa por:

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (4.18)$$

onde: Q_F é a potência aparente, segundo Frize.

Nota-se que as definições de potência ativa e potência aparente segundo Budeanu e Frize são iguais. A diferença está na definição de potência reativa. Para Frize, toda potência que não produz trabalho é chamada de potência reativa. Já para Budeanu, apenas parte da potência que não produz trabalho é reativa, a outra parte, os produtos cruzados de tensão e corrente de ordem harmônica diferentes, corresponde ao que ele denominou de potência de distorção.

Pelas críticas feitas às definições de Budeanu na subseção 4.4.1, optou-se por utilizar as definições de Frize nos cálculos das potências ativa, reativa e aparente da linha a qual o religador será conectado.

Assim, para o cálculo da potência aparente, toma-se os valores eficazes das correntes e tensões, multiplica-se uma pela outra a cada ciclo, como em 4.17.

A cada interrupção faz-se a leitura das tensões e corrente instantâneas. Em seguida multiplica-se uma pela outra e armazena-se o resultado. Ao final de um ciclo esses valores são somados e divididos pelo número de amostras, como em 4.16. Portanto, o valor de potência ativa, assim como o de potência aparente é dado a cada ciclo.

O cálculo da potência reativa é feito extraindo-se a raiz quadrada da subtração do quadrado da potência aparente pelo quadrado da potência ativa, segundo 4.18.

4.5 Conclusões parciais

Neste capítulo foram apresentadas algumas definições, quanto ao valor eficaz e às variáveis que devem ser escolhidas para a realização deste cálculo. Todas as outras grandezas serão calculadas em função do valor eficaz, por esta razão justifica-se o cuidado em definir a taxa de amostragem e o efeito da quantização e de se estudar como se comportará a tensão eficaz calculada, caso ocorra variação de frequência na linha.

Aventou-se a possibilidade de se usar um PLL a fim de se reduzir o erro nos cálculos da tensão eficaz e por último analisou-se algumas definições de potência existentes na literatura e apresentou-se os cálculos das potências realizados, de acordo com a definição escolhida.

Capítulo 5

Conclusões gerais e propostas de continuidade

5.1 Conclusões gerais

Neste trabalho apresentou-se, inicialmente, a proposta de se utilizar um religador automático para redes de baixa tensão nas linhas de distribuição. As justificativas expostas foram a capacidade de o religador distinguir faltas permanentes de faltas transitórias, a possibilidade de seletividade, a operação remota e a automação da linha de distribuição. Em seguida apresentou-se as características do religador, a explicação do seu funcionamento e as curvas de coordenação.

Posteriormente fez-se uma pesquisa bibliográfica sobre religadores de baixa e de média tensão. Há, na área acadêmica, um artigo relatando a montagem, em laboratório, de um religador de baixa tensão que, ao ser colocado em campo, não teve o funcionamento esperado. Não foi encontrada nenhuma referência sobre a comercialização desse religador. Há no mercado um religador de baixa tensão comercializável para utilização em telecomunicações, iluminação pública e semáforos. A falta de informações mais detalhadas a cerca do equipamento e a difícil comunicação com a empresa fabricante inviabilizaram a aquisição do equipamento, além de um fator técnico: não há possibilidade de automação das linhas de distribuição, já que esse religador não possui módulo de comunicação.

Em seguida, foram apresentadas algumas soluções de mercado para religadores de média tensão, juntamente com as suas características. Verificou-se que há muitas pesquisas da comunidade acadêmica acerca dos religadores de média tensão e principalmente no sentido de modernizar religadores antigos, a fim de que eles continuem em funcionamento nas linhas de energia elétrica.

Após essa pesquisa, foi desenvolvida a especificação do religador de baixa tensão proposto, como seria sua operação, as características físicas e de controle e as condições gerais de funcionamento. Posteriormente mostrou-se, através de diagrama de blocos, as partes analógicas e digitais que compõe o religador e um estudo sobre elas.

Uma análise sobre a melhor opção de dispositivo seccionador foi realizada. Inicialmente, pensou-se em utilizar um contator e fez-se pesquisas em catálogos de diversos

fabricantes. Acredita-se, porém, que o contator não é um equipamento para abertura de correntes de curto-circuito, visto não haver nos catálogos dos fabricantes tal informação.

Em seguida, analisou-se a possibilidade da utilização de um disjuntor e após muito estudo de catálogos de disjuntores, este equipamento foi o escolhido. Em seguida, teve início a escolha de qual marca e modelo seria o disjuntor. Escolheu-se um disjuntor eletromagnético, com todas as características necessárias, porém no momento de fazer a coordenação deste com o elo-fusível, tal coordenação não foi possível. A procura se voltou novamente aos catálogos até que um disjuntor com relé eletrônico sanou todos os problemas, tanto de características básicas como de coordenação.

Por último, analisou-se o método de cálculo do valor eficaz das tensões e das correntes e verificou-se que a amostragem de 64 amostras por ciclo é suficiente para obter erro zero nos cálculos de valor eficaz. Fez-se, então, um estudo do efeito causado no cálculo do valor eficaz produzido por uma variação da frequência da linha. O estudo foi feito variando-se a frequência de 57Hz a 63Hz. Em seguida pesquisou-se como o efeito da quantização poderia alterar o cálculo do valor eficaz e definiu-se a utilização de um DSP com conversor A/D de 12bits. Em seguida, apresentou-se as rotinas de cálculo do valor eficaz e das potências. Fez-se uma análise do tempo de processamento desses cálculos, bem como do tempo de conversão do A/D. Apresentou-se uma proposta para melhoria da medição da frequência fundamental e, por último, estudou-se as definições de potência existentes na literatura e decidiu-se utilizar as definições de Frize para o cálculo das potências.

Hoje, o projeto conta com uma especificação do protótipo, uma chave escolhida e pronta para ser testada, TCs e TPs especificados e já em utilização nos testes, projeto das placas de circuito impresso prontas, algoritmos de cálculos de valor eficaz de tensões e correntes, potências, fator de potência e energia, feitos, implementados e testados.

Ao final desse projeto pretende-se ter um protótipo de um religador de baixa tensão. O objetivo é transformar esse protótipo em um produto comercializável. Sendo o primeiro equipamento desse tipo, pretende-se pedir sua patente.

Por último, é importante salientar o impacto social desse equipamento, visto ser um dispositivo que melhorará a qualidade da energia bem como a continuidade do serviço. Esse impacto será melhor notado em áreas rurais nas quais o deslocamento de uma equipe de manutenção é o grande obstáculo para a prestação do restabelecimento da energia. Portanto, nota-se que não apenas as concessionárias de energia elétrica ganharão equipando seus sistemas de distribuição com esse futuro produto, mas também toda a sociedade, visto que esse equipamento fará com que a energia seja restabelecida, em 70% dos casos, de maneira quase instantânea.

5.2 Propostas de continuidade

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se enumerar as propostas:

1. Continuar o desenvolvimento do projeto, em busca do protótipo especificado. O

próximo passo deve ser o comando do disjuntor;

2. Desenvolvimento do *firmware* previsto na especificação do religador;
3. Desenvolvimento da comunicação do religador com o COD, tanto via fibra óptica, quanto via GPRS, como previsto na especificação do religador;
4. Investigar a possibilidade de utilizar Disjuntores de Estado Sólido como dispositivo seccionador do religador.

Referências Bibliográficas

- [1] Marcos A. Dias de Almeida. *Apostila de proteção de sistemas*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2000.
- [2] M.A.Ravaglio; J.C.Nascimento; A.Bannack; J.F.Tholl; R.Y.Okuyama. Desenvolvimento de Equipamento automático para a Proteção e Monitoração da Baixa Tensão de Transformadores de Distribuição Convencionais. *AELE* 2524/2001, 2001.
- [3] Nelson Kagan; Carlos C.B. de Oliveira e Ernesto J. Robba. *Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica*. Edgard Blücher, 2008.
- [4] Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL. Resolução 024/2000 - Continuidade da distribuição de energia elétrica às unidades consumidoras.
- [5] <http://www.geindustrial.com.br>.
- [6] <http://www.schneider-electric.com.br/>.
- [7] <http://www.cooperpower.com/>.
- [8] <http://www.nojapower.com.br/>.
- [9] <http://www.siemens.com.br>.
- [10] Wanir José de Medeiros Junior; José Wilson Lima Nerys; Enes Gonçalves Marra. Recloser modernization using digital signal processor. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 2:1513 – 1517, 2004.
- [11] Carlos A. Duque; Carlos E. F. de Oliveira; Frederico R. Ramos; Marcelo B. do Amaral; Pedro G. Barbosa. Automation system for conventional electromechanical reclosers. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, pages 201 – 205, 2004.
- [12] Carey J. Cook; David A. Myers. The use of cooling-factor curves for coordinating fuses and reclosers. *Power Engineering Society General Meeting. IEEE*, vol.1:32 – 39, 2004.
- [13] Josemir Coelho Santos; André Luis Trevisan Nogueira; Josué de Camargo; Marlos Mazzeu Silveira; Fábio José de Andrade. Sinalizador luminoso monofásico de faltas para redes aéreas de distribuição de energia elétricos até 69kV. *VII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, 2007.
- [14] João Mamede Filho. *Instalações Elétricas Industriais*. LTC.
- [15] Texas Instruments. Texas Instruments TMS320F2812 Tutorial.

-
- [16] ABB. Catálogo Técnico - Tmax disjuntores em caixa moldada para ate 1600A.
- [17] Christoph Meyer; Rik W. De Doncker. Solid-State Circuit Breaker Based on Active Thyristor Topologies. *IEEE Transactions on power electronics*, Vol. 21 No.2:450 a 458, 2006.
- [18] W. Pusorn; W. Srisongkram; W. Subsingha; S. Deng em; P. N. Boonchiam. Low Cost AC Solid State Circuit Breaker. *7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, pages 1724 – 1729, 2007.
- [19] Géerson Eduardo Mog. *Métodos de cálculo de parâmetro de forma de onda da energia elétrica ciclo a ciclo*. 2005.
- [20] Alan V. Oppenheim; Ronald W. Schafer; John R. Buck. *Discrete-Time signal processing*. Prentice Hall, 1998.
- [21] Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST - Módulo 8. 2008.
- [22] Rubens M. Santos Filho; Paulo F. Seixas; Porfírio C. Cortizo; Leonardo A. B. Torres; André F. Souza. Comparison of Three Single-Phase PLL Algorithms for UPS Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55:2923–2932, 2008.
- [23] Rubens Marcos dos Santos Filho. *Contribuição ao Controle digital do Paralelismo sem Comunicação de Sistemas de Energia Ininterrupta*. 2009.
- [24] Marcos Riva Suhett. *Análise de técnicas de medição de potência reativa em medidores eletrônicos*. 2008.
- [25] Leszek S. Czarnecki. What is wrong with the Budeanu Concept of Reactive and Distortion Power and Why It Should be Abandoned. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IM-36 NO. 3:834 a 837, 1987.