



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

MARLON PREISIGHE VIANA

**ESTUDO COMPARATIVO DA PROTEÇÃO DA REDE SECUNDÁRIA DE UMA
DISTRIBUIDORA DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO CHAVE FUSÍVEL E
SECCIONALIZADOR MONOFÁSICO**

Guaratinguetá

2015

MARLON PREISIGHE VIANA

**ESTUDO COMPARATIVO DA PROTEÇÃO DA REDE SECUNDÁRIA DE UMA
DISTRIBUIDORA DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO CHAVE FUSÍVEL E
SECCIONALIZADOR MONOFÁSICO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula

Guaratinguetá

2015

V614e	<p>Viana, Marlon Preisighe</p> <p>Estudo comparativo da proteção da rede secundária de uma distribuidora de energia elétrica utilizando chave fusível e seccionizador monofásico/ Marlon Preisighe Viana – Guaratinguetá, 2015. 49 f : il. Bibliografia: f. 48-49</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015. Orientador: Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula</p> <p>1. Energia elétrica - Distribuição 2. Fusíveis 3. Sistemas de energia elétrica - Proteção I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.316</p>
-------	---

ESTUDO COMPARATIVO DA PROTEÇÃO DA REDE SECUNDÁRIA DE UMA
DISTRIBUIDORA DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO CHAVE FUSÍVEL E
SECCIONALIZADOR MONOFÁSICO

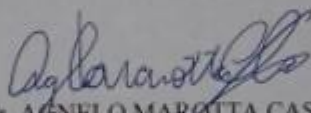
MARLON PREISIGHE VIANA

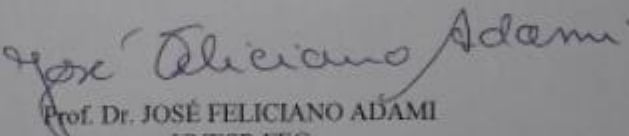
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO
DIPLOMA DE GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

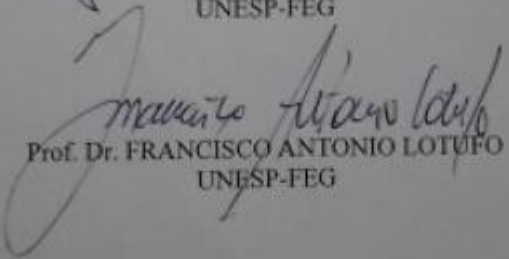
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. Leonardo Mesquita
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. AGNELO MAROTTA CASSULA
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ FELICIANO ADAMI
UNESP-FEG


Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO LOTUFO
UNESP-FEG

JANEIRO de 2016

DADOS CURRICULARES

MARLON PREISIGHE VIANA

NASCIMENTO 27.12.1990– Ji-Paraná / RO

FILIAÇÃO Eloy de Castro Lima Viana

Mariza Preisighe Viana

2009/2015 Curso de Graduação

Engenharia Elétrica - Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual
Paulista

Em primeiro lugar quero agradecer a Deus, pois sem Ele certamente eu não teria chegado até aqui. Aos meu pais, Eloy e Mariza, que sempre me apoiaram em minhas escolhas, ao meu irmão Marcus que sempre me aconselhou, a minha irmã Mayra que me ajudou a enxergar a Jesus. A minha noiva, Karen, que sempre foi muito paciente e amorosa.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por ter me protegido por tantos momentos que passei sozinho nessa caminhada e ser meu fiel e eterno parceiro.

Aos meus pais, Eloy de Castro Lima Viana e Mariza Preisighe Viana e irmão, Marcus Vinicius Preisighe Viana, pelo apoio a todo instante, me motivando, incentivando e dando forças para que nenhum obstáculo fosse maior que minha coragem e força de vontade.

À minha futura esposa Karen Alleoni, pelo amor e carinho que sempre me inspirou, pela compreensão em momentos difíceis e por nunca me abandonar quando pedi por ajuda.

Aos meus familiares que de alguma forma me ajudaram a conquistar tudo até o presente momento.

À minhas Repúblicas Cevada & Kana e Onu e a Tia Hercilha e Tia Neia por tantos anos de convivência e aprendizado ao lado de irmãos e amigos que jamais sairão da minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula, e a todos os meus professores pelos ensinamentos que me tornaram um engenheiro e me prepararam para a vida fora da universidade.

Às funcionárias da Biblioteca e de toda Graduação do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

À Elektro Eletricidade e Serviços, aos engenheiros e colegas com quem trabalhei que me possibilitaram desenvolver meus conhecimentos e a realização deste trabalho de graduação.

À UNESP Campus de Guaratinguetá – FEG Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, pela oportunidade e dedicação. Obrigado por tudo.

“Todo mundo é um gênio, mas se você julgar um peixe por sua capacidade de subir em uma árvore, ele passará toda sua vida acreditando ser estúpido”.

(Albert Einstein)

VIANA, M. P. **Estudo comparativo da proteção da rede secundária de uma distribuidora de energia elétrica utilizando chave fusível e seccionalizador monofásico.** 2015. 49 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

O objetivo deste trabalho de graduação é realizar um estudo comparativo entre a chave fusível e o seccionalizador monofásico, que são equipamentos de proteção utilizados nas redes de distribuição de energia elétrica de uma empresa deste ramo. Com este estudo, tem-se a finalidade também de se reduzir o número de desligamentos desta empresa. As redes de distribuição não são isentas de defeitos, perturbações e falhas, deste modo, a ocorrência de adversidades na rede, que podem ser faltas transitórias ou permanentes, tem como consequência a interrupção de energia elétrica. Desta forma, existem os sistemas de proteção das redes de distribuição, que tem por objetivo garantir que a maior parte do sistema elétrico continue funcionando. A incidência de faltas transitórias na rede de distribuição da empresa de energia elétrica em estudo gerava o desligamento imediato dos clientes, devido à má utilização de chaves fusíveis como equipamento de proteção junto à religadores. Com a utilização da chave fusível na rede de distribuição tinha-se o desligamento imediato dos clientes, já com a utilização do seccionalizador monofásico como equipamento de proteção junto à religadores, têm-se três tentativas de religamento da energia elétrica dos clientes. Como as tentativas de religamento podem eliminar uma falta transitória, não ocasionando desligamento de nenhum consumidor, com a implementação dos seccionalizadores monofásicos em substituição às chaves fusíveis, o número de desligamentos da empresa em estudo por faltas transitórias foi reduzido em 47,6%.

PALAVRAS-CHAVE: Rede de distribuição de energia elétrica. Desligamento de clientes. Faltas transitórias. Faltas permanentes. Chave Fusível. Seccionalizador Monofásico.

VIANA, M. P. **Comparative study of the protection of the secondary network of an electricity distribution company using fuse key and single-phase seccionalizador**. 2015. 49 f. Graduate Work (Graduate in Electrical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

The objective of this work is to conduct a comparative study between the fuse key and the single-phase seccionalizador, which are protective equipment used in an electricity distribution networks. This study has also the purpose to reduce the number of electrical power breakdown. Distribution networks are not free from faults, disturbances and failures, then the occurrence of adversities on the network, which may be transient or permanent faults, results in the interruption of electric power. Thus, there are protective systems of distribution networks, which aims to ensure that the electric system continues to function. The incidence of transient faults in the distribution network of this electricity company was used to generate immediate shutdown of customers due to the bad use of fuses as protective equipment by the reclosers. With the use of the fuse switch in the distribution network, there was the immediate shutdown of customers, however, using the single-phase seccionalizador as protective equipment by the reclosers, there are three attempts to restart the electricity power. As the attempts to restart the electricity power are able to eliminate a transient fault, not causing shutdown of any costumer, with the implementation of single-phase sectionalizers to replace the fuses, the number of company shutdowns due to transient faults was reduced by 47.6%.

KEYWORDS: Electricity distribution network. Client's shutdown. Transient faults. Permanent faults. Fuse switch. Single-phase sectionalizers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de proteção contra sobrecorrente	14
Figura 2 - Chave fusível tipo expulsão	18
Figura 3 - Elo fusível	19
Figura 4 - Curva tempo versus corrente do fusível tipo K	20
Figura 5 - Uma sequência de operação de um religador	22
Figura 6 - Religador	22
Figura 7 - Zona de proteção do seccionizador e do religador	23
Figura 8 - Seccionizador Monofásico	24
Figura 9 - Disjuntor	25
Figura 10 - Falta temporária (Falta transitória)	28
Figura 11 - Falta permanente	29
Figura 12 - Diagrama unifilar de um sistema seletivo de rede de distribuição	32
Figura 13 - Análise de seletividade entre um relé e um fusível	32
Figura 14 - Proteção por elo fusível	33
Figura 15 – Operações lentas (Δt_1) e operações rápidas (Δt_3)	34
Figura 16 - Faixa de coordenação religador/elo fusível	35
Figura 17 - Coordenação religador/seccionizador	37
Figura 18 - Principais motivos de desligamentos dos clientes	39
Figura 19 - Falta Transitória com Chave Fusível	40
Figura 20 - Abertura da chave fusível devido à falta transitória	41
Figura 21 - Falta transitória com Seccionizador Monofásico	43
Figura 22 - Funcionamento do sistema de proteção com SM	44
Figura 23 - Abrangência dos equipamentos de proteção	45

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Ocorrências de curtos-circuitos	27
Tabela 2 - Ocorrências de curtos-circuitos permanentes e temporários	30
Tabela 3 - Valores do fator multiplicador K2 do elo fusível.....	34
Tabela 4 - Motivos de desligamentos na empresa em estudo versus Impacto gerado	38
Tabela 5 - Comparação de equipamentos de proteção	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DEC	Duração Equivalente de interrupção por unidade Consumidora
FEC	Frequência Equivalente de interrupção por unidade Consumidora
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
SM	Seccionalizador Monofásico
RL	Religador
CHI	Cliente Hora Interrompido
CI	Cliente Interrompido
UC	Unidade Consumidora
DIC	Duração de interrupção Individual por unidade Consumidora
FIC	Frequência de interrupção Individual por unidade Consumidora
DMIC	Duração Máxima de Interrupção Contínua por unidade consumidora
DICRI	Duração da interrupção ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	ESTRUTURA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO	15
2	EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO CONTRA SOBRECORRENTE	17
2.1	CHAVE FUSÍVEL	18
2.2	RELIGADOR (RL)	21
2.3	SECCIONALIZADOR MONOFÁSICO (SM).....	23
2.4	DISJUNTORES	24
2.5	RELÉS	25
3	PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO	27
4	SELETIVIDADE E COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	31
4.1	SELETIVIDADE.....	31
4.1.1	Estudo de Seletividade Entre Dois Elos Fusíveis	33
4.2	COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS	33
4.2.1	Coordenação religador/fusível.....	33
4.2.2	Coordenação Religador/Seccionalizador.....	36
5	ESTUDO DE CASO DOS DESLIGAMENTOS DA EMPRESA	38
5.1	UMA SOLUÇÃO PROPOSTA PARA AS FALTAS TRANSITÓRIAS.....	42
5.2	PROBLEMAS DA IMPLEMENTAÇÃO DO SM E RESULTADO	44
6.	CONCLUSÃO.....	47
	<u>REFERÊNCIAS.....</u>	48

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica percorre um longo caminho até chegar aos pontos consumidores, começando pela geração, passando pela transmissão e chegando à distribuição.

A geração da energia elétrica pode ocorrer de várias formas, sendo no Brasil majoritariamente a hidrelétrica. Devido às grandes distâncias entre as hidrelétricas e as cidades, a tensão da energia elétrica deve ser elevada: os valores típicos em circuitos de corrente alternada são 138, 230, 345, 440, 500, 750 kV, além de 600 kV em circuitos de corrente contínua, para reduzir as perdas de energia nas linhas de transmissão. Dessas linhas, a energia elétrica vai até as subestações rebaixadoras que reduzem os níveis de tensões até 13,8; 25; 69; 138 kV, sendo então distribuída pela rede.

As redes de distribuição podem ser aéreas ou subterrâneas, urbanas e rurais, atendendo aos consumidores residenciais e comerciais através de transformadores que reduzem a tensão para 127 e 220 V.

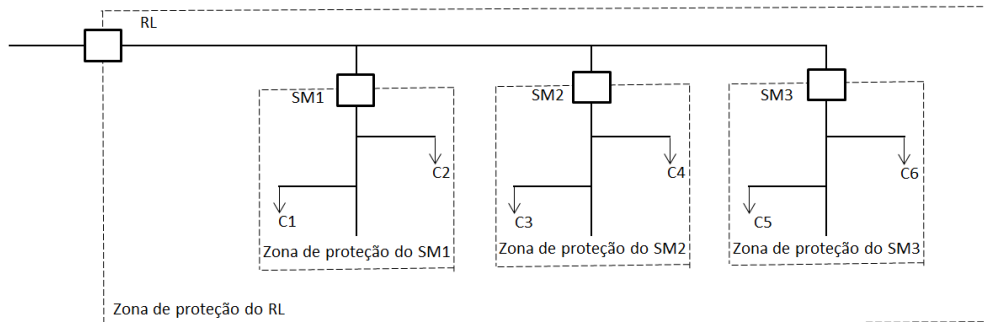
A rede de distribuição é complexa. Não é possível que seja completamente isenta de defeitos, perturbações e outras falhas. A ocorrência destas adversidades tem como consequência a interrupção de energia elétrica, podendo causar danos pessoais e materiais.

Tendo como base essas adversidades que acontecem na rede, a proteção da rede deve ser robusta, recebendo informações de grandezas elétricas em tempo real, para efetuar as devidas proteções.

Desta forma, existem os sistemas de proteção das redes de distribuição, que tem por objetivo garantir que maior parte do sistema elétrico continue funcionando. Primeiro deve-se identificar o defeito e, através de chaveamentos, isolar o defeito. Com este procedimento é possível restabelecer a energia dos clientes que se encontram fora da área isolada, reduzindo a duração da interrupção destes clientes e melhorando os índices de confiabilidade.

A Figura 1 ilustra melhor o funcionamento de um sistema de proteção.

Figura 1 - Sistema de proteção contra sobrecorrente



Fonte: Autor

Caso o defeito ocorra na zona de proteção do seccionizador monofásico SM2, ele deve isolar o defeito, desligando apenas os clientes C3 e C4. Caso contrário o defeito pode atuar o relógio RL, desligando os clientes C1, C2, C3, C4, C5 e C6.

Um sistema de proteção é constituído por equipamentos que identificam, encontram e comandam a supressão de um curto-circuito ou uma condição adversa do sistema elétrico, reduzindo os danos causados e evitando que a maior parte dos clientes sejam desligados (LEME; CUNHA; PITOCCO; RIZZARDI, 2013).

A empresa objeto de estudo deste trabalho de graduação é responsável por distribuir energia elétrica em 223 cidades do estado de São Paulo e 5 cidades do estado do Mato Grosso do Sul, sendo que muitas destas cidades possuem áreas de preservação do meio ambiente.

O sistema de proteção da rede de distribuição de energia elétrica desta empresa é responsável por reduzir a quantidade de clientes desligados (clientes que ficam sem energia), impactando menos nos indicadores DEC (Duração Equivalente de interrupção por unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de interrupção por unidade Consumidora), quando ocorre alguma falha na rede. Os indicadores são apurados pelas distribuidoras e enviados periodicamente para a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) para verificação da continuidade do serviço prestado, representando, respectivamente, o tempo e o número de vezes que uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica para o período considerado (mês, trimestre ou ano), o que permite que a agência avalie a continuidade da energia oferecida à população (ANEEL, 2015).

Quanto menos os clientes da área de concessão da empresa ficarem sem energia elétrica, melhor a empresa é remunerada, pois a empresa é remunerada pela ANEEL devido ao bom

funcionamento do sistema elétrico. A distribuição da energia elétrica é feita por redes aéreas, sendo assim, ficam mais vulneráveis a fenômenos da natureza, podendo gerar desligamentos.

A área de gerenciamento de sistemas elétricos desta empresa tem registrado um número elevado de defeitos em seu sistema de proteção da rede. Atualmente a proteção é realizada através de chave fusível, sendo que foram registrados problemas com este tipo de tecnologia, referente à atuação imediata quando ocorre um defeito na rede de distribuição de energia elétrica. Isto gera o desligamento de um número elevado de clientes, com consequente perda de eficiência da empresa. Portanto, é relevante identificar as causas deste problema e propor uma solução eficaz.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo geral fazer um estudo comparativo entre a chave fusível e o seccionizador monofásico na rede secundária de uma distribuidora de energia elétrica a fim de reduzir o número de desligamentos, e consequentemente melhorar a confiabilidade e a qualidade de distribuição de energia elétrica. Dentro deste objetivo geral, os seguintes objetivos específicos também são atingidos:

- Apresentar os diferentes tipos de equipamentos de proteção por sobrecorrente de redes de distribuição.
- Apresentar e justificar os sistemas de proteção utilizados na empresa em estudo.
- Elaborar um estudo de caso, apresentando a tecnologia mais eficiente para esta aplicação e com o melhor custo benefício.

1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Essa monografia está dividida em 5 capítulos. No capítulo 1 é apresentada a importância da continuidade de fornecimento de energia elétrica, o que gera remuneração para a empresa.

O capítulo 2 apresenta os equipamentos de proteção contra sobrecorrente, que são estudados neste trabalho, mostrando como funcionam, em quais casos atuam ou não atuam e onde devem ser utilizados na rede de distribuição de energia elétrica.

No capítulo 3 é apresentado o funcionamento do sistema elétrico com os equipamentos de proteção contra sobrecorrente apresentados funcionando de forma conjunta.

No capítulo 4 é mostrado como deve funcionar a seletividade e a coordenação dos equipamentos de proteção da rede de distribuição de energia elétrica.

No capítulo 5, são apresentados os problemas decorrentes da má utilização dos equipamentos e como estes problemas foram solucionados, bem como os resultados e ganhos finais.

No capítulo final é apresentada a conclusão deste trabalho de graduação, citando a consequência da solução implantada.

2 EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO CONTRA SOBRECORRENTE

Os principais equipamentos de proteção que podem ser utilizados nas redes de distribuição são 1) chaves fusíveis, 2) seccionadores monofásicos, 3) religadores, 4) disjuntores e 5) relés. Cada um destes equipamentos apresenta características técnicas e operacionais próprias (FERREIRA, 2009), que serão mostradas neste capítulo.

Os equipamentos de proteção contra sobrecorrentes podem ser instalados para proteção de linhas e de outros equipamentos. A proteção contra sobrecorrentes de equipamentos visa exclusivamente proteger, por exemplo, transformadores, capacitores, entre outros, devido a correntes de curto-circuito, descargas atmosféricas, sobrecargas ou defeitos internos. Já na proteção contra sobrecorrente de linha, que é o ponto central deste trabalho, os equipamentos de proteção são parametrizados com o objetivo de proteger os circuitos primários ou secundários contra sobrecargas ou correntes de falta (corrente de curto-circuito). Sendo que estes equipamentos, devido às suas capacidades de detectarem faltas e isolarem o trecho sob defeito, seccionam o trecho defeituoso permanentemente ou temporariamente (FERREIRA, 2009).

A utilização dos equipamentos de proteção nas redes de distribuição tem como finalidade satisfazer os seguintes aspectos:

- Proteger a integridade física dos colaboradores e animais.
- Preservar materiais e dispositivos contra os danos causados por sobrecargas e sobrecorrentes.
- Melhorar a confiabilidade da rede de distribuição, em consequência da possibilidade de delimitar os efeitos de uma falha a menor parte possível do circuito, reduzindo o número de clientes afetados, melhorando os indicadores de avaliação de qualidade do fornecimento de energia elétrica (índices de confiabilidade).

As características específicas dos equipamentos de proteção para satisfazer tais objetivos são:

- Detecção: devem identificar valores de correntes irregulares.
- Interrupção: devem suspender correntes de curto-circuito dentro de sua capacidade nominal. Geralmente, os equipamentos de proteção interrompem a

corrente de falta durante sua passagem pelo zero, isso é feito através da formação de um arco elétrico.

- Capacidades de manobras: alguns equipamentos podem ser manobrados sob correntes de carga, enquanto outros somente podem ser manobrados caso não haja corrente circulante (FERREIRA, 2009).

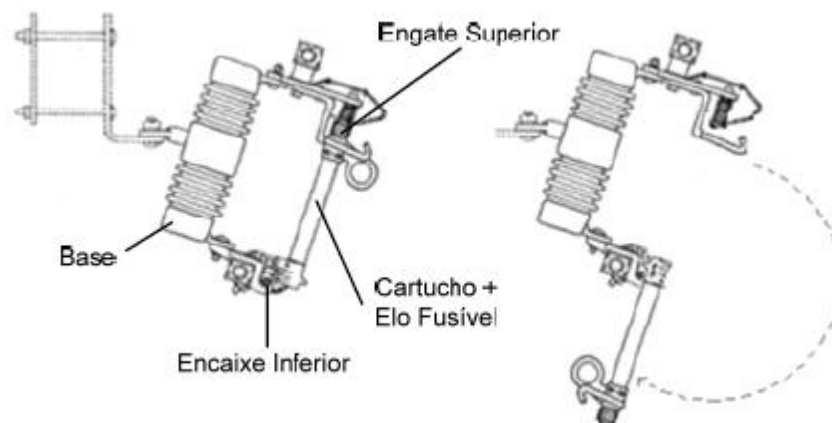
A seguir são mostrados os dispositivos empregados na aplicação dessas funções nas redes de distribuição de energia elétrica.

2.1 CHAVE FUSÍVEL

É um dispositivo eletromecânico que provê uma proteção monofásica do circuito, possui baixo custo e desempenho satisfatório para o nível de média tensão. Sua atuação ocorre quando a corrente excede o valor máximo suportado pelo elo fusível, chegando ao ponto de fusão do mesmo, devido ao efeito Joule, e acarretando na abertura do circuito, necessitando sua substituição manual. Em redes de distribuição são bastante utilizados os seguintes tipos de chaves fusíveis: 1) abertas, 2) expulsão, 3) indicadoras e 4) não repetidoras (FERREIRA, 2009).

O tipo de chave fusível utilizado na empresa em estudo é o de expulsão, sendo que os elementos que compõe este tipo são: elo fusível, base (isolador de porcelana ou resina epóxi), porta fusível (tubo de fibra isolante) ou cartucho e elementos de fixação (aço zincado), conforme mostrado na Figura 2 (FERREIRA, 2009).

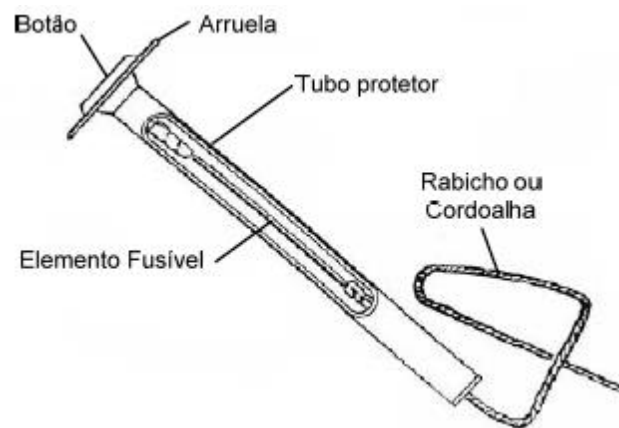
Figura 2 - Chave fusível tipo expulsão



Fonte: (Ferreira, 2009)

À chave fusível é acoplado o cartucho. No interior do cartucho se encontra o elo fusível, sendo este o elemento de proteção, responsável pela detecção de sobrecorrentes (Figura 3), o qual é rompido em função de certos valores de correntes e tempos de fusão associados (características de operação). Ao passar uma sobrecorrente pelo elo fusível, ocorre a fusão do mesmo, e neste instante surge um arco elétrico que queima o interior do cartucho. A queima do cartucho libera gases desionizantes que extinguem o arco, cessando a passagem de corrente elétrica.

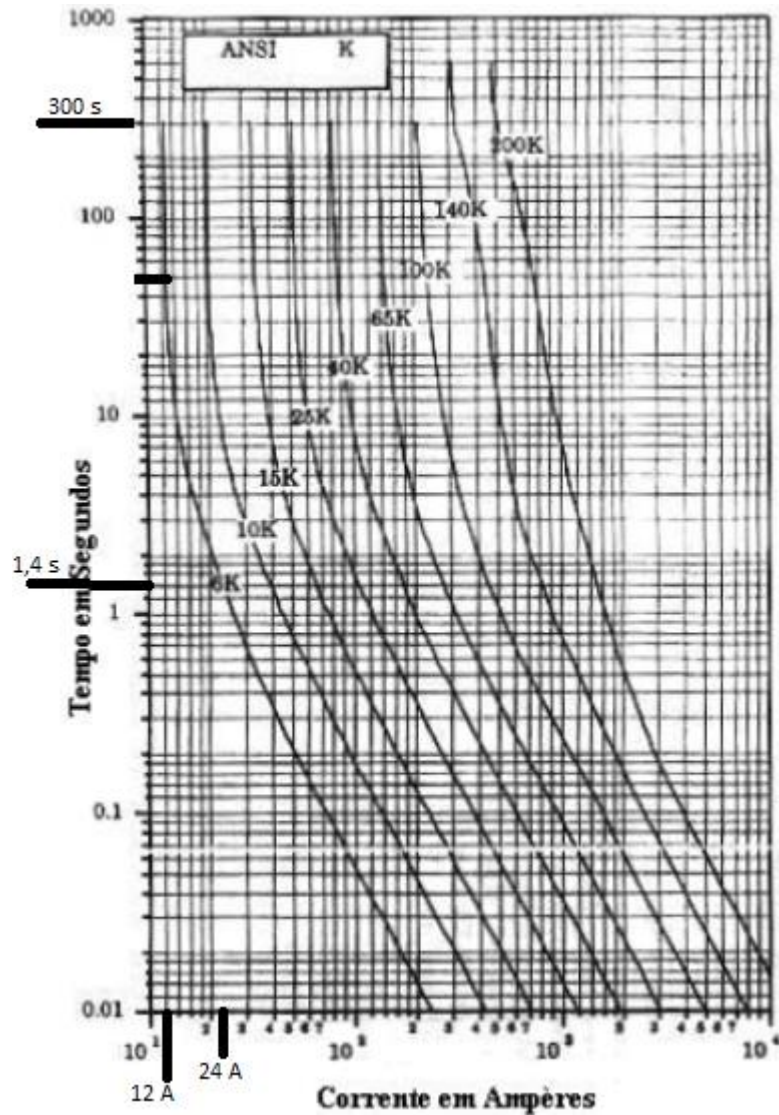
Figura 3 - Elo fusível



Fonte: (Ferreira, 2009)

A seleção do elo fusível mais adequado para uma determinada rede elétrica considera as suas propriedades construtivas, térmicas e elétricas, devendo preservar suas características nominais no decorrer da operação do sistema e atuar (fundir o elo) a partir da corrente mínima de fusão. A abertura do circuito através da fusão do elo depende dos seguintes fatores: propriedades físicas do material que constitui o elemento fusível, densidade de corrente que passa através do fusível, material envolvente, grau de envelhecimento e temperatura ambiente. Os fusíveis são categorizados pelas curvas características e pelo tipo de material que o compõe. As curvas características dos fusíveis são representadas com tempo *versus* corrente. Na Figura 4 é mostrada a curva característica de um fusível tipo K (GIGUER, 1988).

Figura 4 - Curva tempo versus corrente do fusível tipo K



Fonte: (GIGUER, 1988).

Na Figura 4, considerando uma sobrecorrente de 100 A, o elo fusível do tipo 6K atua (interrompe a passagem de corrente) em um tempo de 50 ms, já num elo fusível de 10K atua em um tempo de 200 ms. Por exemplo, um elo fusível de 6K deve ser instalado onde a corrente nominal é em torno de 6 A e ele começa a fundir a partir de uma corrente 200% da nominal, ou seja, 12 A. O elo fusível de 6K com a corrente de 12 A demora 300 s para fundir. Para cumprir o objetivo de atuação rápida, na empresa é considerada a atuação de um elo de 6K com uma sobrecorrente igual a 4 vezes a nominal, ou seja, 24 A. O tempo de fusão para uma sobrecorrente de 4 vezes a corrente nominal é de 1,4 s. Existem três tipos de fusíveis: H, K e T. Os fusíveis tipo H são de atuação lenta, sendo parametrizados para proteção primária de transformadores de pequeno porte. Os fusíveis tipo K são de atuação rápida e são abundantemente utilizados na proteção de ramais de alimentadores. Os fusíveis tipo T

também são utilizados na proteção de ramais de alimentadores, mas apresentam tempo maior de atuação que o tipo K (GIGUER, 1988).

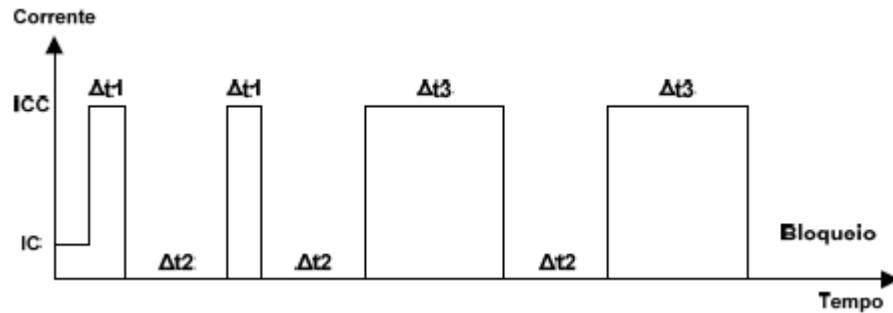
2.2 RELIGADOR (RL)

O religador é um equipamento de proteção de custo mais elevado, e com mais funções de proteção, instalado ao longo dos alimentadores das redes de distribuição, pois ele pode ter até três tipos de atuação: 1) atuação por fase, 2) atuação pelo neutro e 3) atuação pelo RAI (Relé de Alta Impedância). Para ilustrar os diferentes tipos de atuação considere a corrente nominal do religador igual a 30 A, a atuação por fase é devido a altas correntes, por exemplo, 200 A. A atuação pelo neutro é devido a médias correntes, por exemplo, 40 A. E a atuação pelo RAI é devido a baixas correntes, pelo rompimento de um cabo que toca o solo, que resultaria em uma corrente, por exemplo, de 10 A. Esta atuação pelo RAI não está presente em todos os religadores, sendo um item opcional.

Como o religador é um equipamento muito sofisticado, ele pode ser usado em subestações de pequeno porte como proteção de todo o alimentador. Possui a função de proteção e também é usado como dispositivo de chaveamento, com objetivo de equilíbrio de cargas. É fundamental ter um equipamento sofisticado como um religador para se fornecer energia elétrica de modo seguro e confiável.

É um equipamento automático, que interrompe correntes de curto-circuito sendo capaz de realizar uma quantidade de operações de abertura e religamento definida pelo usuário, para posteriormente bloquear seus contatos na posição aberta. A quantidade máxima são quatro aberturas, sendo possíveis algumas combinações entre as operações de abertura, podendo haver uma sequência de somente operações temporizadas (reage em maior tempo $=\Delta t_3$) ou somente operações rápidas (reage em menor tempo $=\Delta t_1$), ou podendo mesclar entre operações temporizadas e rápidas. Normalmente são duas operações rápidas seguidas de duas operações temporizadas, com o objetivo de diminuir a quantidade de atuações de elos fusíveis, durante faltas temporárias. A Figura 5 apresenta uma sequência de operação de um religador com duas operações rápidas (Δt_1) e duas operações temporizadas (Δt_3), sendo I_c e I_{cc} , as correntes de carga e de curto-circuito, respectivamente.

Figura 5 - Uma sequência de operação de um religador



Fonte: (FERREIRA, 2009)

O religador detecta uma corrente de curto-circuito (I_{cc}) durante um tempo (Δt_1), definido pela característica tempo *versus* corrente da curva rápida de atuação do RL. Se após este tempo o valor de corrente permanecer, os contatos abrem pela primeira vez durante um tempo (Δt_2), denominado tempo de religamento, e então fecham os contatos pela primeira vez. O religador ainda detecta pela segunda vez uma corrente de curto-circuito (I_{cc}) durante outro tempo (Δt_1), abrindo os contatos pela segunda vez durante outro tempo (Δt_2), e então fecham os contatos pela segunda vez. O religador ainda detecta pela terceira vez uma corrente de curto-circuito (I_{cc}) durante um tempo (Δt_3), definido pela característica tempo *versus* corrente da curva temporizada de atuação do RL, os contatos abrem pela terceira vez durante um tempo (Δt_2), e então fecham os contatos pela terceira vez. O religador ainda detecta pela quarta vez uma corrente de curto-circuito (I_{cc}) durante outro tempo (Δt_3), os contatos abrem pela quarta vez e então ocorre o bloqueio dos contatos. Neste caso é necessária a intervenção humana para restabelecer a energia. Na Figura 6 é mostrado um religador (FERREIRA, 2009).

Figura 6 - Religador

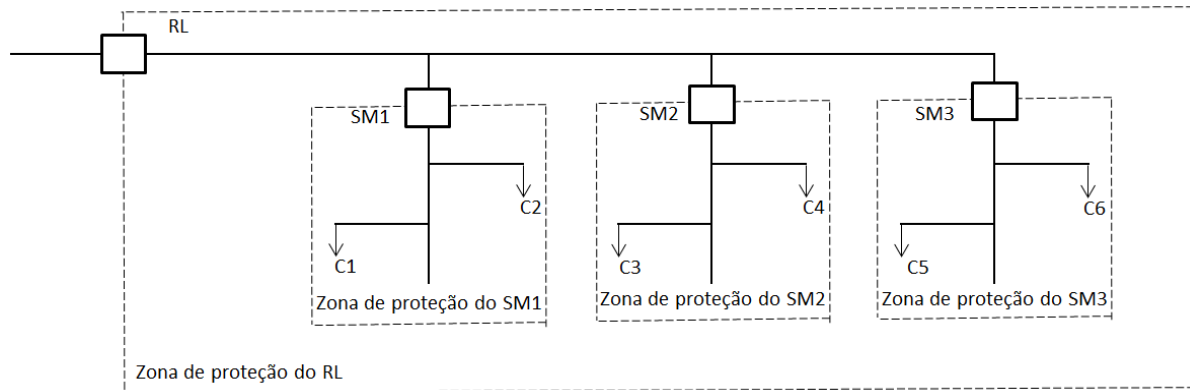


Fonte: (SCHNEIDER, 2015)

2.3 SECCIONALIZADOR MONOFÁSICO (SM)

Em relação ao modo de utilização do seccionizador monofásico, este deve ser instalado à jusante de um religador, ou seja, à frente de um religador, para que atue na zona de proteção do religador, ou qualquer equipamento de proteção, de acordo com a Figura 7.

Figura 7 - Zona de proteção do seccionizador e do religador



Fonte: Autor

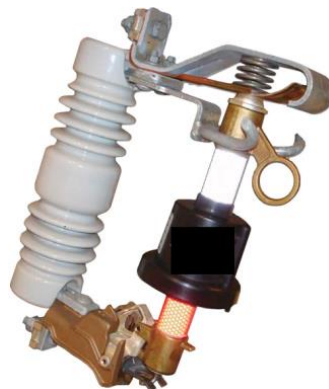
A Figura 7 representa a zona de proteção dos seccionizadores monofásicos (SM1, SM2 e SM3) e do religador (RL). Supondo um curto-circuito permanente à frente do seccionizador monofásico 1 (SM1), com a atuação do SM1, somente os clientes (C1 e C2), que estão na zona de proteção do SM1, serão desconectados. Caso o SM1 não atue, o curto-circuito permanente fará atuar o religador (RL), desligando todos os clientes (C1, C2, C3, C4, C5, C6), que estão na zona de proteção do RL. Supondo um curto-circuito permanente à frente do seccionizador monofásico 2 (SM2), a correta atuação do SM2 desligará apenas os clientes (C3 e C4), que estão na zona de proteção do SM2. Caso o SM2 não atue, o curto-circuito permanente fará atuar o religador (RL), desligando todos os clientes (C1, C2, C3, C4, C5, C6), que estão na zona de proteção do RL. Supondo um curto-circuito permanente à frente do seccionizador monofásico 3 (SM3), a atuação do SM3 desligará somente os clientes (C5 e C6), que estão na zona de proteção do SM3. Caso o SM3 não atue, o curto-circuito permanente fará atuar o religador (RL), desligando todos os clientes (C1, C2, C3, C4, C5, C6), que estão na zona de proteção do RL.

Supondo que uma corrente de curto-circuito tenha origem na zona de proteção do seccionizador monofásico 1, esta sobre-corrente ao passar pelo SM1, inicia-se um mecanismo de contagem, incrementando uma contagem a cada abertura do religador. Na

terceira abertura do religador, o seccionizador SM1 isola o trecho à sua frente do restante do circuito (os clientes C1 e C2 são desligados). Caso o SM1 não atue na terceira abertura do religador RL, na quarta abertura o RL bloqueia seus contatos na posição aberta. Neste caso todos os clientes (C1, C2, C3, C4, C5, C6) são desconectados. Para esse sincronismo de proteção funcionar corretamente, o seccionizador deve ter uma corrente de atuação (ou *pick-up*) igual a corrente de atuação do RL.

O seccionizador não foi fabricado para interromper correntes de curto-circuito (deve sempre trabalhar em conjunto com um religador), mas pode ser fechado sob condições de falta, ou seja, ele pode ser usado também como dispositivo de manobras sob carga. A Figura 8 mostra um seccionizador.

Figura 8 - Seccionizador Monofásico



Fonte: (MYEEL, 2015)

2.4 DISJUNTORES

Os disjuntores são equipamentos usados na proteção de sistemas de distribuição e em todo alimentador principal (tronco) deve estar presente. São amplamente usados em subestações.

A principal característica dele é conseguir ligar e desligar o circuito sob grande quantidade de carga, ou seja, com corrente passando pelo alimentador.

Para que o disjuntor opere corretamente devem ser seguidos alguns requisitos básicos:

- A capacidade de desacoplamento do disjuntor tem que ser igual ou maior à máxima corrente de curto circuito no ponto de instalação do disjuntor.
- A tensão nominal do disjuntor tem que ser igual ou maior à tensão nominal do sistema.
- Os níveis de isolamento do disjuntor e do sistema tem que ser compatíveis.

- A corrente suportada pelo disjuntor tem que ser maior do que a máxima corrente que possa passar pelo disjuntor (MAMEDE FILHO, 2011).

A Figura 9 mostra um tipo de disjuntor.

Figura 9 - Disjuntor



Figura: (ABB, 2010)

2.5 RELÉS

As formas de proteção dos sistemas elétricos são comandadas na maior parte dos casos por relés. Os relés tem a função de reconhecer rapidamente os defeitos, localizá-los e impulsionar através de sinalizações, alarmes e comandos de aberturas de disjuntores, ocasionando o isolamento do defeito. O relé é um dispositivo que através de cálculos de tensão e corrente gerência os parâmetros do sistema elétrico e é sensível para verificar anomalias no sistema, como por exemplo, sobretensão, sobrecarga, curto-circuito, subtensão, etc. As características funcionais essenciais dos relés são iguais para qualquer tipo, podendo ser eletromecânicos, digitais ou eletrônicos. Os relés eletromecânicos predominaram no campo da proteção dos sistemas elétricos de potência por muitas décadas. Hoje em dia os

relés digitais se destacam no setor elétrico devido aos ganhos em relação aos eletromecânicos (BITTENCOURT, 2011).

Foram apresentados cinco equipamentos de proteção por sobrecorrente de redes de distribuição de energia elétrica.

- A chave fusível apresenta baixo custo e atuação imediata. Sua atuação ocorre na primeira vez que a corrente elétrica excede o valor máximo suportado pelo elo fusível, chegando ao ponto de fusão do mesmo, e acarretando na abertura do circuito.
- O seccionizador monofásico apresenta médio custo e atuação não imediata. Funciona através de um elemento sensível à sobrecorrente e um mecanismo de contagem de aberturas (normalmente 3 contagens de abertura) do equipamento que está em sua retaguarda, ou seja, o SM somente abre o circuito, isolando o problema, depois de três tentativas de religamento do RL.
- O religador possui alto custo e atuação não imediata. Possui uma tecnologia melhor para identificar diferentes tipos de sensibilização e tentativas de religamento do circuito.
- O disjuntor apresenta alto custo e atuação imediata. Possui a função de desacoplar o circuito caso venha uma corrente excessiva.
- Os relés apresentam médio custo e atuação imediata. Tem a função de reconhecer rapidamente os defeitos, localizá-los e impulsionar através de sinalizações, alarmes e comandos de aberturas de disjuntores, ocasionando o isolamento do defeito.

3 PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO

Os tipos de sistemas de distribuição mudam de acordo com vários parâmetros, inclusive desenvolvimento social e econômico de cada região. Esses parâmetros determinam a natureza e a quantidade de carga suprida. Os clientes são classificados de acordo com o carregamento e conectados em circuitos trifásicos, bifásicos e monofásicos dos alimentadores (ramais).

Piques na rede de distribuição de energia elétrica geram menos impacto, do que um desligamento, no funcionamento do sistema elétrico como um todo. Porém, para parâmetros dos equipamentos utilizados na proteção da rede de distribuição, é necessária uma análise sobre todos os defeitos possíveis, para então escolher o dispositivo mais adequado a necessidade da região, por exemplo, regiões onde tem muita vegetação, descarga atmosférica, vento e etc. KINDERMANN (2007) mostra estatísticas extraídas através de levantamentos históricos de ocorrências nas concessionárias de energia. As estatísticas em relação aos tipos de curto-circuito (trifásicos, bifásicos, bifásico-terra e monofásico-terra) são mostradas na Tabela 1.

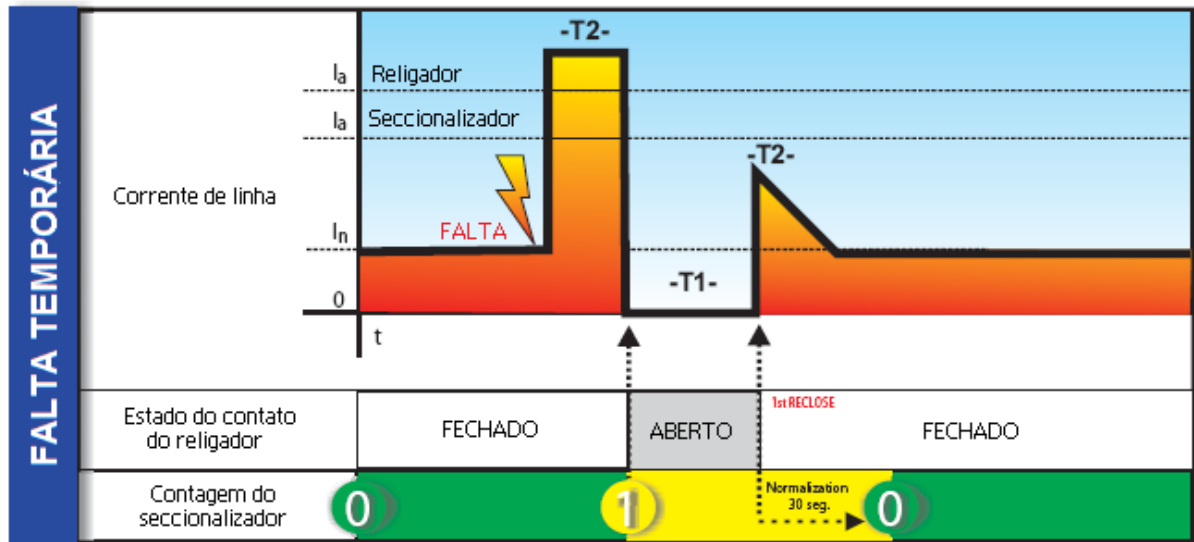
Tabela 1 - Ocorrências de curtos-circuitos

OCORRÊNCIAS DE CURTO-CIRCUITOS	
TIPOS DE CURTO-CIRCUITOS	OCORRÊNCIAS (%)
Trifásico	06
Bifásico	15
Bifásico-terra	16
Monofásico-terra	63

Fonte: (KINDERMANN, 2007)

A Tabela 1 mostra que a maior parte (63%) das ocorrências são do tipo curto-circuito monofásico-terra (fase-terra), como por exemplo, um galho encostando em uma fase gerando um caminho até o terra ou um cabo rompendo ao solo. Também se tem a classificação envolvendo os tipos de curto-circuito: os curtos-circuitos são divididos em temporários e permanentes. Os curtos-circuitos temporários são aqueles com casos reversíveis, ou seja, a falha é eliminada após a atuação de equipamentos de proteção. Como mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Falta temporária (Falta transitória)

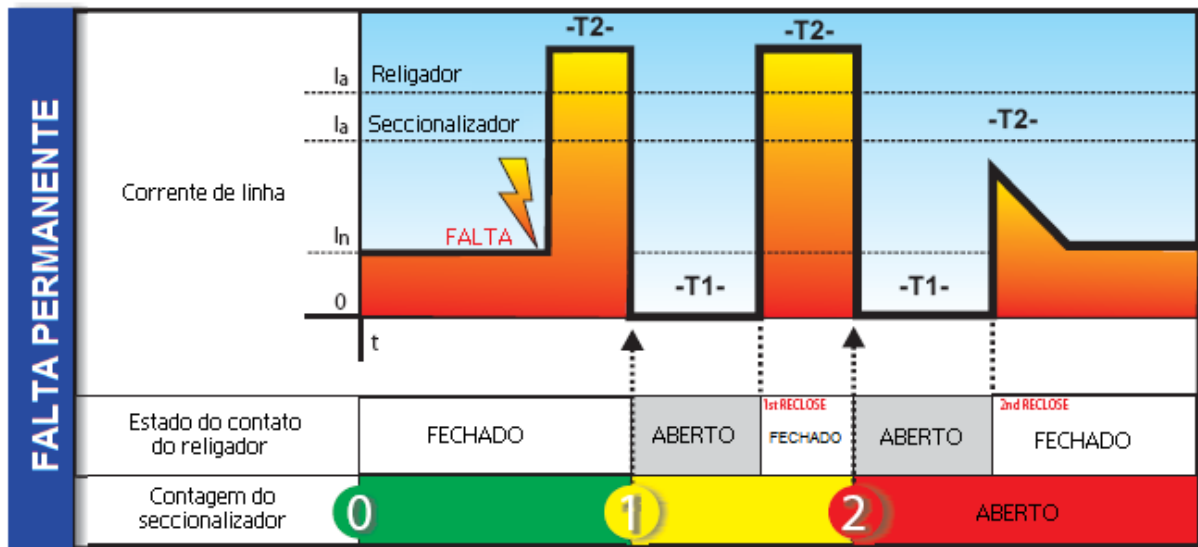


Fonte: (Alves, 2009)

A Figura 10 mostra uma falta temporária num circuito com religador e seccionizador. O circuito vem funcionando normalmente com a corrente nominal I_n , quando então aparece uma falta no sistema, um curto-circuito em que a corrente é maior que a corrente de atuação (I_a) tanto do seccionizador quanto do religador. O religador demora o tempo T_2 para perceber a corrente de curto-circuito e abrir (contabilizando a primeira contagem do seccionizador), permanecendo aberto durante o tempo T_1 . Nesse intervalo de tempo o defeito se extingue e o religador fecha a sua chave, verificando que agora a corrente do circuito é menor que a corrente de atuação (I_a), normalizando o funcionamento do circuito durante o tempo T_2 (corrente I_n). O pique observado no segundo T_2 é devido ao transitório, já que uma linha de transmissão pode ser considerada como um circuito RL (Resistivo-Indutivo). Depois de um tempo de trinta segundos sem que haja novas ocorrências, a memória de contagem do seccionizador monofásico é zerada. Um exemplo típico comum deste tipo de falha é quando um galho de árvore cai entre duas fases do circuito, provocando um curto-circuito fase-fase. No entanto, com a ação do vento este galho se desprende das linhas de transmissão, interrompendo o curto-circuito fase-fase e, assim, o circuito volta a operar normalmente.

Os curtos-circuitos permanentes são aqueles que precisam da ação de uma equipe de manutenção de rede para deixar de existir. O caso de defeito não é reversível após a atuação de um equipamento de proteção, permanecendo os consumidores sem energia.

Figura 11 - Falta permanente



Fonte: (Alves, 2009)

A Figura 11 mostra uma falta permanente num circuito com religador e seccionizador, na disposição como mostrado na Figura 7. O circuito vem funcionando normalmente com a corrente nominal I_n , quando então aparece uma falta no sistema, um curto-circuito em que a corrente é maior que a corrente de atuação I_a tanto do seccionizador (neste momento ele fica sensibilizado) quanto do religador. O religador demora o tempo T_2 para perceber a corrente de curto-circuito e abrir pela primeira vez, e permanecendo aberto durante o tempo T_1 . Neste instante é contabilizada a primeira contagem do seccionizador. Após o primeiro tempo T_1 o religador fecha os contatos pela primeira vez. O religador ainda detecta uma corrente maior que a corrente de atuação I_a tanto do seccionizador quanto do religador durante o segundo tempo T_2 . Então o religador abre pela segunda vez, fazendo com que seja contabilizada a segunda contagem do seccionizador. Como neste caso o seccionizador foi programado para abrir com duas contagens de ausência de corrente (duas aberturas do religador), neste momento ele se abre e isola o defeito, desligando os clientes à sua jusante. Com este procedimento a interrupção de energia se restringe aos consumidores pertencentes ao ramal protegido pelo seccionador, não deixando que o problema se propague para os demais consumidores protegidos pelo religador. Ou seja, circuito protegido pelo religador volta a funcionar normalmente (zerando o contador do religador, que foi programado para bloquear seus contatos na posição aberta na terceira abertura).

A estatística de ocorrências de curtos-circuitos temporários e permanentes está representada, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Ocorrências de curtos-circuitos permanentes e temporários

OCORRÊNCIAS DE CURTO-CIRCUITOS PERMANENTES E TEMPORÁRIOS	
CURTO-CIRCUITOS MONOFÁSICOS-TERRA	OCORRÊNCIAS (%)
Permanente	04
Temporário	96

Fonte: (KINDERMANN, 2007)

De acordo com a estatística da Tabela 2, pode-se perceber que grande parte das ocorrências é devido a curto-circuito temporário (falta transitória). O sistema proposto visa apresentar estudo para eliminar as faltas transitórias e reduzir os desligamentos de clientes, aumentando a confiabilidade e a qualidade de distribuição de energia elétrica.

4 SELETIVIDADE E COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A finalidade de um sistema de proteção na rede de distribuição de energia elétrica é isolar o defeito de um trecho o mais rápido possível (BARROS; GEDRA, 2009).

Para cumprir esse propósito são necessários os seguintes requisitos: coordenação, seletividade, sensibilidade, velocidade, automação e confiabilidade.

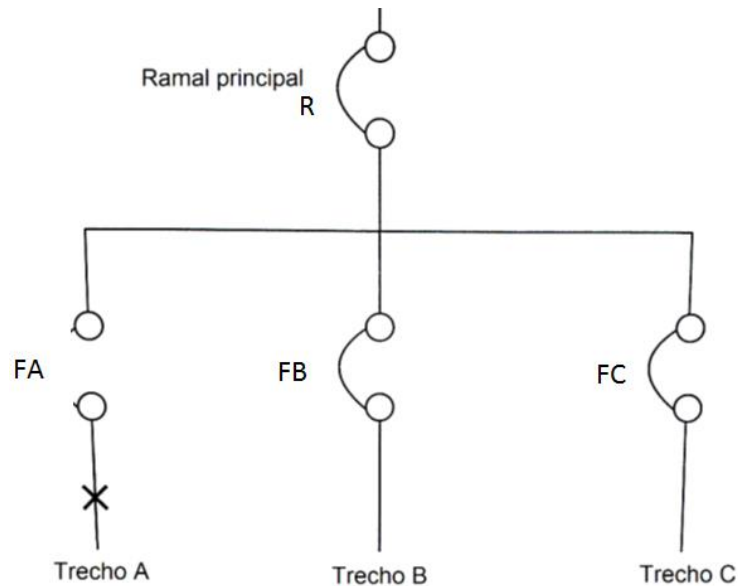
4.1 SELETIVIDADE

Um sistema de proteção com a seletividade ajustada corretamente é eficaz, ou seja, o equipamento de proteção mais próximo ao defeito atua, desconectando o trecho defeituoso do restante do sistema elétrico (MAMEDE, 2011).

A seletividade entre os dispositivos de proteção é importante, pois o equipamento de proteção mais próximo ao defeito deve atuar prontamente, dessa forma o defeito não é propagado para o resto do circuito, evitando mais desligamento de clientes.

Na Figura 12 tem-se um exemplo de um sistema seletivo. A falha ocorre no trecho A, atuando a chave fusível (FA) do trecho A (desligando apenas os clientes do ramal A), isolando o defeito, e permanecendo em funcionamento normal os trechos B, C e o ramal principal. Se isso não acontecer, pode-se dizer que o sistema não está seletivo, ou seja, a seletividade foi mal ajustada (BARROS; GEDRA, 2009). Caso não atuasse a chave fusível (FA) o curto-circuito poderia chegar até o ramal principal, atuando o religador (R). Desligando além do trecho A, os trechos B e C também, ou seja, desligaria todos os clientes do Religador para frente.

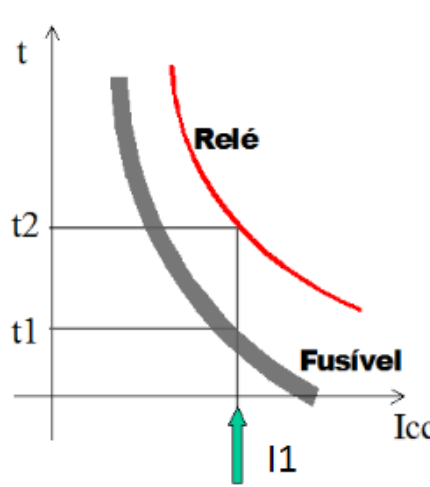
Figura 12 - Diagrama unifilar de um sistema seletivo de rede de distribuição



Fonte: (BARROS; GEDRA, 2009)

A seletividade entre os equipamentos que fazem parte do sistema de proteção da rede de distribuição de energia elétrica é realizada analisando-se as suas curvas características de tempo *versus* corrente. Na Figura 13 tem-se um exemplo de seletividade entre um fusível e um relé.

Figura 13 - Análise de seletividade entre um relé e um fusível



Fonte: (CPFL, 2003)

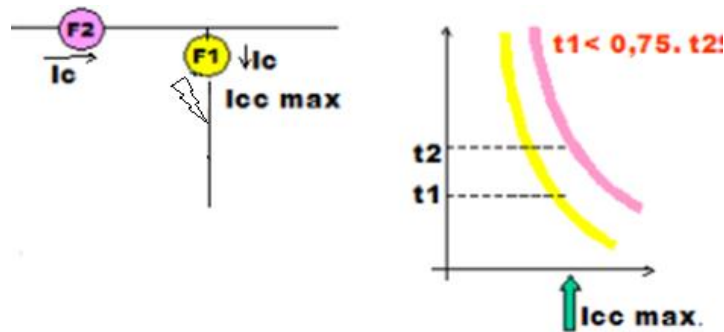
Ao passar uma corrente I_1 em um circuito protegido por uma chave fusível e um relé com as características da Figura 13, observa-se que o fusível atua em um tempo t_1 , enquanto o relé atua em um tempo t_2 , sendo que $t_1 < t_2$. Ou seja, o fusível atua primeiro que o relé.

4.1.1 Estudo de Seletividade Entre Dois Elos Fusíveis

A parametrização da seletividade entre elos fusíveis é aceitável se o tempo de interrupção do elo fusível protetor (F1) for menor que 75% do tempo mínimo de fusão do elo fusível protegido (F2), ou seja, $t_1 < 0,75 \times t_2$, de acordo com a Figura 14.

A Figura 14 mostra um sistema de proteção seletivo entre dois elos fusíveis, onde o elo fusível protetor F1, fica mais próximo ao defeito e mais distante da subestação, ou seja, ele deve atuar primeiro, isolando o problema. Já o elo fusível protegido, (F2), fica mais longe do problema e mais perto da subestação. De acordo com o gráfico da Figura 14, o sistema de proteção funciona corretamente, pois para a corrente I_{cc} , F1 atua primeiro, isolando o problema.

Figura 14 - Proteção por elo fusível



Fonte: (BITTENCOURT, 2011)

4.2 COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

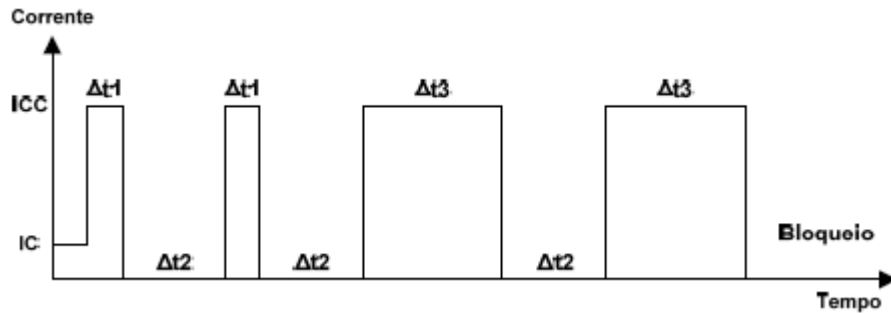
A coordenação da proteção é o ato ou efeito de dispor dois ou mais dispositivos de proteção em série, de forma a atuarem em uma sequência de operação preestabelecida garantindo a seletividade da proteção (UNESP, 2013).

4.2.1 coordenação religador/fusível

As curvas de atuação e a sequência de operação recomendável para a coordenação entre o religador e os elos fusíveis são duas operações rápidas (Δt_1) e duas operações lentas (Δt_3), isto faz com que ocorra a diminuição da fusão dos elos fusíveis, pois como a maior parte das faltas são transitórias, depois da primeira (Δt_1) e segunda (Δt_1) tentativa espera-se que o

defeito seja sanado e o elo não se funda. Caso contrário, na terceira operação lenta (Δt_3), o elo fusível se funda devido às altas correntes de curto-circuito e, desta forma, os clientes ficam sem energia, devido a falta ser permanente. Na figura 15 as duas primeiras operações são rápidas (Δt_1) e as duas últimas são lentas (Δt_3).

Figura 15 – Operações lentas (Δt_1) e operações rápidas (Δt_3)



Fonte: (FERREIRA, 2009)

A coordenação da proteção de fase e terra do religador com os elos fusíveis é assegurada quando:

- Para o valor de corrente máxima de falta ($I_{CC(máx)}$) passando pelo religador e pela chave fusível, o tempo mínimo de fusão do elo ($t_{mín.fusão\ elo\ fusível} = \Delta t_1 + x$) tem que ser superior ao tempo de atuação rápida ($t_{atuação\ curva\ rápida\ RL} = \Delta t_1$) do religador, multiplicado por um fator K_2 , ou seja, de acordo com a inequação (1). A corrente máxima de falta ($I_{CC(máx)}$) é encontrada com a intercessão da curva do “Elo (mínimo)” com a curva “Rápida $\times K$ ”, ilustrada pelo ponto B na Figura 16.

$$t_{mín.fusão\ elo\ fusível} > t_{atuação\ curva\ rápida\ RL} \times K_2 \quad (1)$$

A Tabela 3 mostra o valor do multiplicador K_2 em função do número de operações rápidas e do tempo de religamento.

Tabela 3 - Valores do fator multiplicador K_2 do elo fusível

VALORES DE K_2		
TEMPO DE RELIGAMENTO	MULTIPLICADOR K_2 (Elo do lado da carga)	
s	1 rápida	2 rápidas
0,5	1,3	1,5
1,0	1,3	1,5
1,5	1,3	1,5
2,0	1,3	1,5

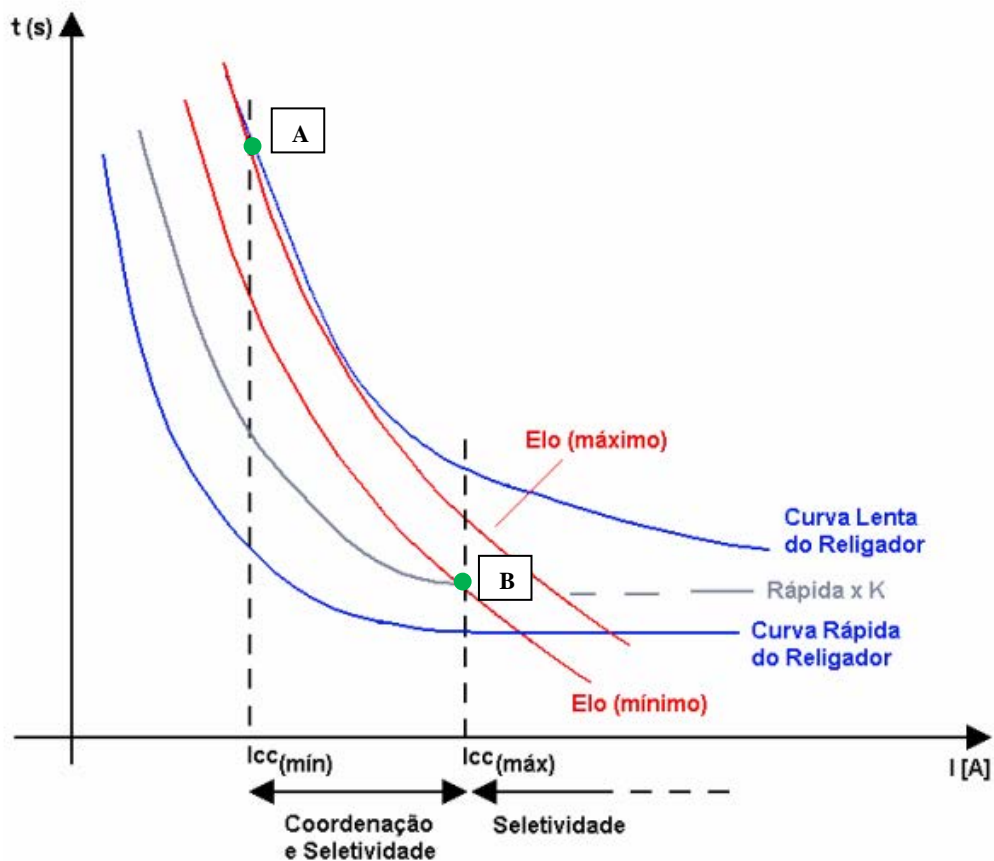
(Elektro, 2014)

- Para o valor da corrente mínima de falta ($I_{cc(mín)}$) passando pelo religador e pela chave fusível, o tempo máximo de interrupção do fusível ($t_{máx.interrupção\ fusível} = \Delta t_3 - y$) tem que ser menor que o tempo de atuação na curva lenta do religador ($t_{atuação\ curva\ lenta\ RL} = \Delta t_3$), ou seja, de acordo com a inequação (2). A corrente mínima de falta ($I_{cc(mín)}$) é encontrada com a intercessão da curva do “Elo (máximo)” com a “Curva Lenta do Religador”, ilustrada pelo ponto A na Figura 16.

$$t_{máx.interrupção\ fusível} < t_{atuação\ curva\ lenta\ RL} \quad (2)$$

A faixa de coordenação entre a chave fusível e o religador é determinada pelas duas inequações anteriormente apresentadas, que estabelecem o ponto máximo ($I_{cc(máx)}$) e mínimo ($I_{cc(mín)}$) de correntes. A figura 16 mostra a faixa de coordenação religador/elo fusível (Elektro, Norma ND. 78).

Figura 16 - Faixa de coordenação religador/elo fusível



Fonte: (LEME; CUNHA; PITOCCHO; RIZZARDI, 2013)

4.2.2 Coordenação Religador/Seccionalizador

Para se obter uma coordenação entre religador e seccionalizador monofásico em série, devem ser atendidos os seguintes requisitos:

- A corrente mínima de atuação do seccionalizador monofásico deve ser ajustada o mais próximo de 80% do ajuste da corrente mínima de atuação do religador tanto para a proteção de fase quanto para a proteção de terra, conforme a inequação (3). Por exemplo, se a corrente de atuação do religador é 40 A, a corrente de atuação do seccionalizador monofásico é menor ou igual à 24 A.

$$I_{\text{mín.atuação fase-terra SM}} \leq 0,8 \times I_{\text{mín.atuação fase-terra RL}} \quad (3)$$

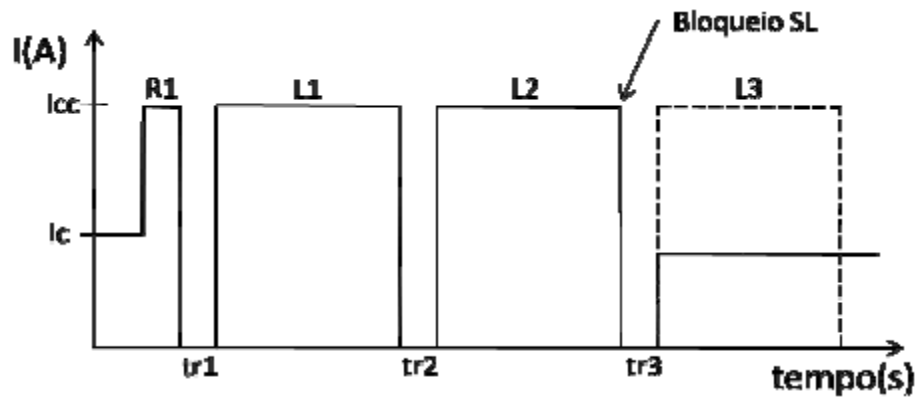
- O número de contagem para a atuação do seccionalizador monofásico deve ser ajustado para no máximo o número de operações para o bloqueio do religador menos um, de acordo com a inequação (4). Por exemplo, normalmente o religador bloqueia seus contatos na posição aberta na quarta abertura, portanto, o seccionalizador monofásico atua na terceira abertura do religador.

$$N_{\text{contagem bloqueio SM}} \leq N_{\text{operações bloqueio RL}} - 1 \quad (4)$$

A coordenação entre o religador e o seccionalizador também depende do tempo de retenção de memória do seccionalizador, que é o tempo necessário para o seccionalizador “esquecer” uma contagem. Logo, a coordenação entre o religador e o seccionalizador é assegurada quando, em uma condição de falta permanente, o somatório dos tempos de operação e religamento do religador (tempo total acumulado) a partir da primeira contagem, não excedam ao tempo de memória do seccionalizador.

A Figura 17 ilustra a coordenação religador/seccionalizador monofásico com a sequência de operação do religador ajustada para uma operação rápida (R1) e três operações lentas (L1, L2 e L3) e o seccionalizador monofásico ajustado em três contagens para bloqueio (atuação).

Figura 17 - Coordenação religador/seccionalizador



Fonte: (ELEKTRO, 2014)

Para a situação de coordenação religador/seccionalizador apresentado na Figura 17, o tempo de retenção de contagem (memória) do seccionalizador deve ser o seguinte.

Para um seccionalizador monofásico o tempo de memória é de normalmente 50 segundos, podendo ser escolhido pelo usuário de 1 até 99 segundos. (Elektro, 2014).

5 ESTUDO DE CASO DOS DESLIGAMENTOS DA EMPRESA

A empresa é a terceira maior distribuidora de energia elétrica do Brasil em MWh fornecido, com capital aberto.

Esta empresa oferece a seus clientes energia elétrica com segurança e qualidade para o desenvolvimento e bem-estar das comunidades atendidas, gerando crescente valor para clientes, colaboradores e acionistas.

Foi realizado um estudo na empresa mostrando quais são os principais motivos de desligamento e quais os impactos gerados, conforme a Tabela 4. Sendo que CHI significa Cliente Hora Interrompida, que é calculado através da quantidade de clientes multiplicado pelo número de horas desligadas, e CI significa cliente interrompido, que corresponde ao número de UCs (unidades consumidoras), que sofrem interrupção no fornecimento de energia elétrica devido ao desligamento.

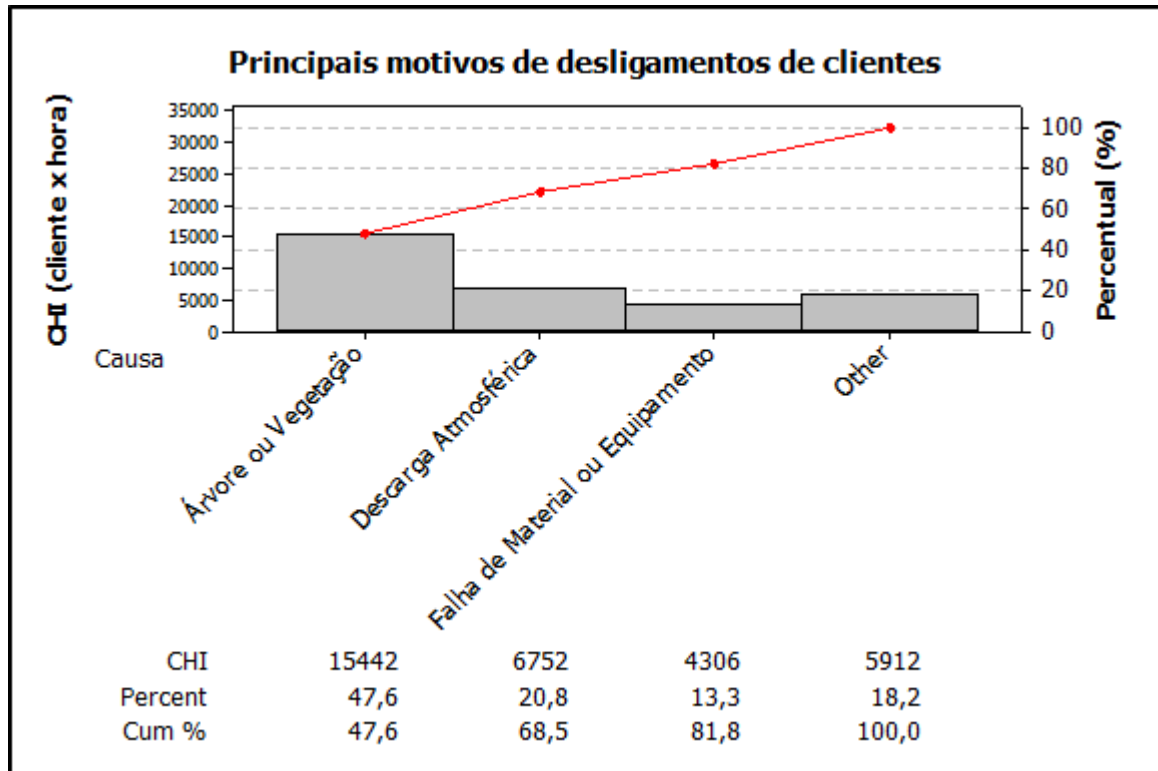
Tabela 4 - Motivos de desligamentos na empresa em estudo versus Impacto gerado

DESLIGAMENTOS NA EMPRESA EM ESTUDO vs IMPACTO GERADO		
MOTIVO DOS DESLIGAMENTOS	SOMA DE CHI (cliente x horas)	SOMA DE CI (cliente)
Árvore ou Vegetação	15.441,8	7844,0
Descarga Atmosférica	6.752,5	1717,0
Falha de Material ou Equipamento	4.306,0	733,0
Não Classificada pelo eletricista	2.624,1	1028,0
Não Indentificada pelo eletricista	2.621,1	744,0
Abalroamento	504,5	55,0
Vento	162,0	242,0
TOTAL GERAL	32.411,9	12363,0

Fonte: Autor

E a Figura 18 mostra um gráfico representando o percentual das três principais causas de desligamentos dos clientes.

Figura 18 - Principais motivos de desligamentos dos clientes



Fonte: Autor

No gráfico da Figura 18 é possível verificar que a maior parte dos desligamentos ocorridos na empresa foi devido à Árvore ou Vegetação, representando 47,6% dos problemas. Sendo que os exemplos mais recorrentes envolvendo árvores são: Um galho da árvore é quebrado, por causa do vento ou podridão do mesmo, caindo sobre dois fios (duas fases) e fechando um curto-circuito fase-fase, logo depois o galho cai ao chão. Outro exemplo, uma vegetação cresce no meio da rede de distribuição, e um vento mais forte faz com que os fios da rede se encostem, gerando um curto-circuito fase-fase, mas logo depois o fluxo de ar termina de passar pela rede, cessando o curto-circuito.

A descarga atmosférica causa uma falta transitória, mas para ser classificada como transitória deve-se ter um bom sistema de aterramento na rede de distribuição de energia elétrica. Caso contrário poderá queimar um transformador, sendo uma falta permanente, pois será necessária a intervenção de uma equipe para troca do equipamento e o reestabelecimento da energia para os clientes. No caso da uma falha de material ou equipamento, a falta é permanente, pois também será necessária a intervenção de uma equipe para troca do

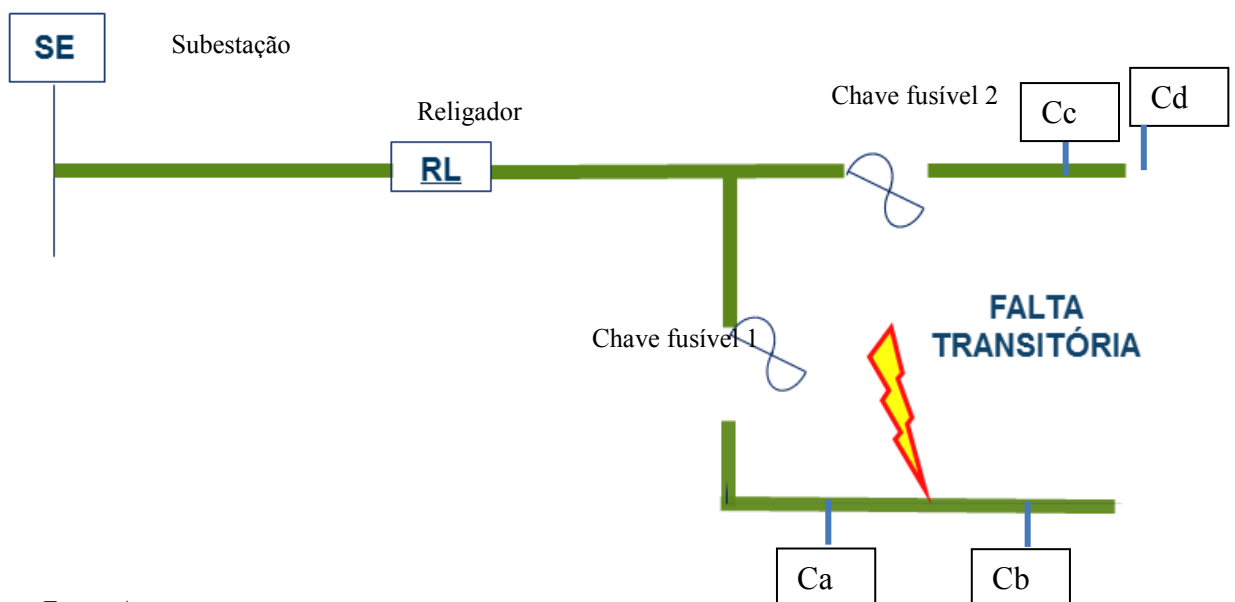
equipamento e o reestabelecimento da energia para os clientes, e pelo mesmo motivo o abalroamento (acidente de trânsito envolvendo postes de energia elétrica) é considerado uma falta permanente. Já o vento pode causar uma falta transitória (contato momentâneo entre cabos condutores) ou uma falta permanente (quebrar ou derrubar um poste).

É possível implementar melhorias somente em casos de faltas transitórias, pois os equipamentos de proteção atuam e resolvem o problema, já nas faltas permanentes, o defeito não é reversível após a atuação de um equipamento de proteção, permanecendo após a atuação.

Assim, interpretando os resultados das ocorrências, foi definido que o foco do trabalho é reduzir os desligamentos ocorridos devido à “*Árvore ou Vegetação*”, que é falta transitória, e representa quase metade dos problemas (47,6%). Não é considerado como um dos focos deste trabalho reduzir o número de desligamentos devido à “*Descarga Atmosférica*”, representando 20,8% das ocorrências, porque a descarga é imprevisível (pode ser falta transitória ou permanente).

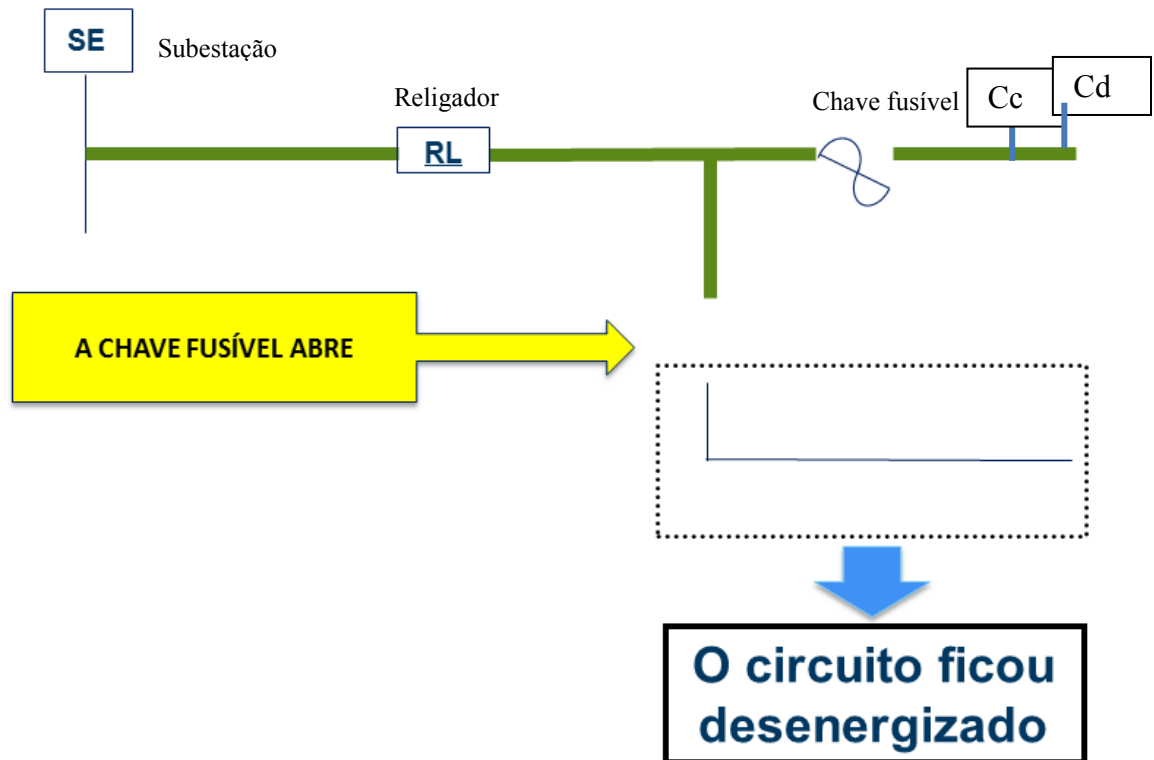
Para o desligamento devido à faltas transitórias a falta ocorre como ilustrado na Figura 19. No momento da falta transitória a chave fusível 1 abre, desenergizando o circuito e desligando os clientes Ca e Cb, como mostra na Figura 20. Neste caso, houve o desligamento imediato dos clientes Ca e Cb e, portanto, é necessário o deslocamento de uma equipe da empresa ao local para reestabelecer a energia elétrica.

Figura 19 - Falta Transitória com Chave Fusível



Fonte: Autor

Figura 20 - Abertura da chave fusível devido à falta transitória



Fonte: Autor

Porém, se o problema é transitório, como por exemplo, um galho que cai entre duas fases fechando um curto-circuito fase-fase e depois de poucos segundos um vento derruba o galho, e este cai no chão, houve uma desenergização que poderia ser evitada. Evitada caso existisse um sistema de proteção que seu mecanismo não desligasse os clientes na primeira condição de falta transitória, fato que ocorre com a chave fusível. Um desligamento como esse pode ter grande impacto para uma empresa de distribuição de energia elétrica. Em São Paulo, por exemplo, onde se tem grande quantidade de trânsito, apenas para a equipe chegar ao local da ocorrência pode demorar até duas horas, ou seja, os clientes ficam sem energia elétrica durante duas horas, sendo que esta interrupção poderia ser evitada. Sem contar que o aumento da indisponibilidade de energia aumenta o índice de confiabilidade DEC e, conseqüentemente, diminui a remuneração da empresa feita pela ANEEL. O desligamento gerado pela falta transitória pode ser solucionado através de um equipamento de proteção com tentativas de religamento.

5.1 UMA SOLUÇÃO PROPOSTA PARA AS FALTAS TRANSITÓRIAS

Para solucionar o problema de desligamento imediato devido à falta transitória foi pesquisado dentre os principais equipamentos de proteção apresentados neste trabalho, qual poderia evitar desligamento imediato, oferecendo tentativas de religamento, e com um bom custo-benefício para a empresa. A Tabela 5 apresenta um resumo das principais características dos equipamentos de proteção utilizados na análise em substituição à chave fusível.

Tabela 5 - Comparação de equipamentos de proteção

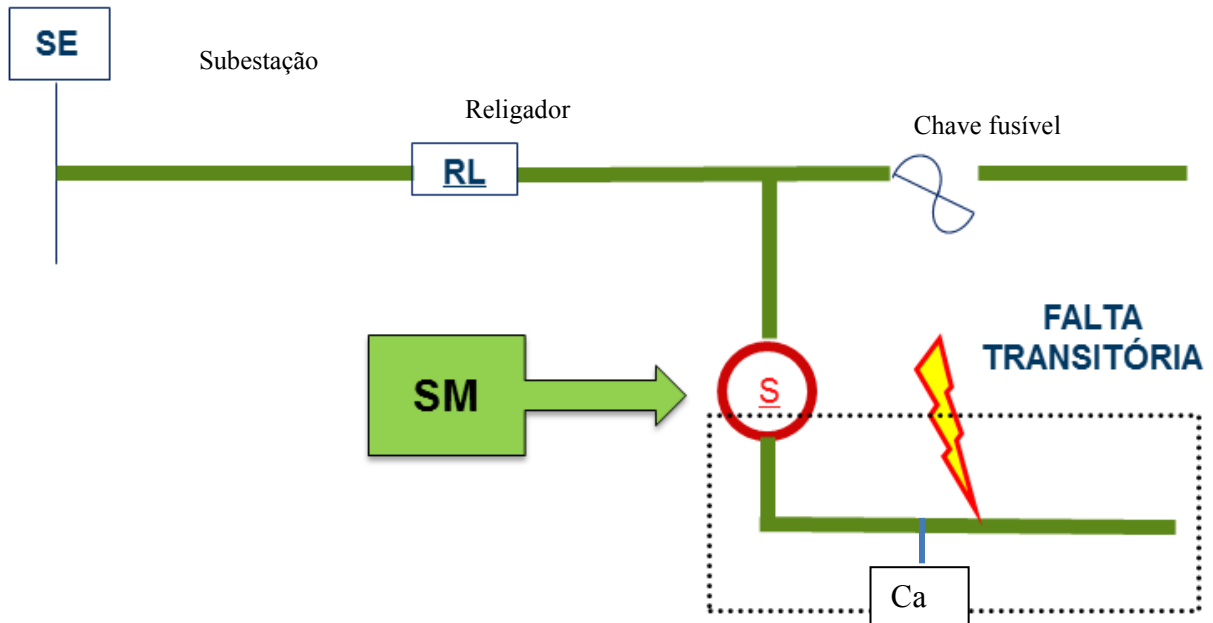
CARACTERÍSTICAS DE DESLIGAMENTO E CUSTO – EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO		
EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO	DESLIGAMENTO IMEDIATO?	CUSTO
Relé	Sim	Médio
Disjuntor	Sim	Alto
Chave fusível	Sim	Baixo
Religador	Não	Alto
Seccionalizador monofásico	Não	Médio

Fonte: Autor

Para atender às premissas de tentativas de religamento e bom custo-benefício, optou-se pelo teste com a utilização do seccionalizador monofásico ao invés da chave fusível. O Seccionalizador apresentou-se mais vantajoso em relação ao religador devido ao custo. Já em relação à chave fusível, também é mais vantajoso, pois mesmo possuindo maior custo, o lucro líquido da empresa é maior, uma vez que esta é remunerada pela eficiência na distribuição de energia, assim, o menor número de desligamentos oferece mais receita.

Na Figura 21 é representada a instalação de um seccionalizador monofásico (SM) no lugar da chave fusível e será discutido e explicado seu funcionamento diante de uma falta transitória.

Figura 21 - Falta transitória com Seccionalizador Monofásico

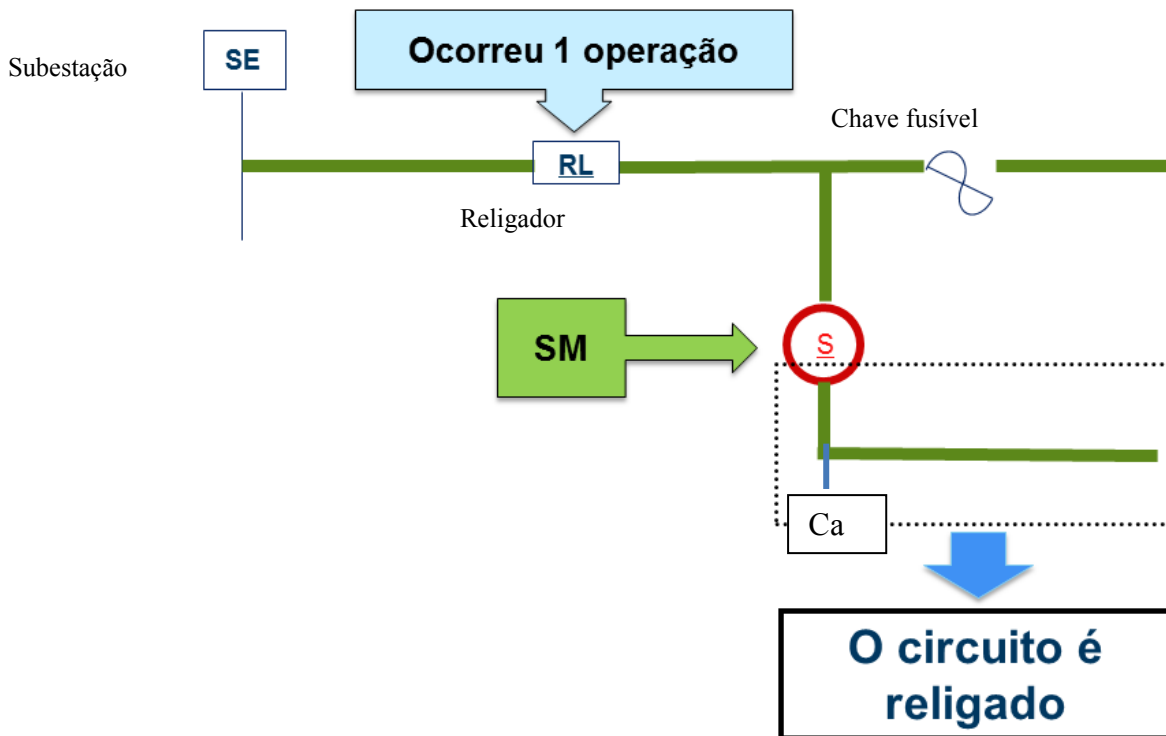


Fonte: Autor

Na Figura 21 ocorre uma falta transitória no trecho à frente do seccionalizador monofásico (SM), fazendo com que o religador abra seus contatos pela primeira vez, contabilizando a primeira contagem na SM. Passado um tempo o religador rearma, e como o problema se auto-extinguiu (p.e. o galho caiu no chão) o religador não abre seus contatos e, portanto, não é contabilizada a segunda contagem na SM, o que evita que a SM se abra e desconecte os consumidores Ca. Nesse caso, foi evitado um desligamento de um trecho do circuito, sendo que os consumidores Ca experimentam somente uma interrupção momentânea devido a primeira abertura dos contatos do religador. Com este procedimento obtém-se uma diminuição do DEC, o que acarreta um aumento da remuneração da empresa pela ANEEL.

A Figura 22 explica o mecanismo acima. A primeira falta transitória faz com que o religador (RL) opere uma vez, ou seja, abra a sua chave e então a feche depois de um tempo, religando o circuito. Quando o religador fecha o circuito, o problema já não existe mais, e o circuito apenas sentiu um pique devido a sofrer uma abertura e fechamento, entretanto, nenhum cliente foi desligado e o circuito voltou a funcionar normalmente (Ca permanece com energia elétrica), caracterizando o bom funcionamento do sistema de proteção. Vale ressaltar que o SM e o RL são programáveis quanto a corrente de atuação, e contagens para abertura, entretanto, o número padrão mais utilizado de contagens para o SM até sua abertura é de 3 vezes. No caso de haver alguma falha da coordenação entre RL e SM, e o SM não abrir na terceira contagem, na quarta abertura do RL seus contatos são bloqueados na posição aberta, desconectando todos os consumidores a sua jusante. O número padrão para abertura do RL é de 4 vezes.

Figura 22 - Funcionamento do sistema de proteção com SM



Fonte: Autor

Se o número de aberturas do SM chegar a 3 vezes e abrir, ou no caso da falta de coordenação, o RL bloquear seus contatos na posição aberta (4 vezes), significa que pode ter ocorrido uma falta permanente, uma vez que o problema persistiu.

5.2 PROBLEMAS DA IMPLEMENTAÇÃO DO SM E RESULTADO

Devido ao mecanismo mais eficiente para a empresa do seccionizador monofásico em relação às chaves fusíveis, foram comprados SMs para substituição das chaves. Houve a compra de SMs de 2 marcas (A e B).

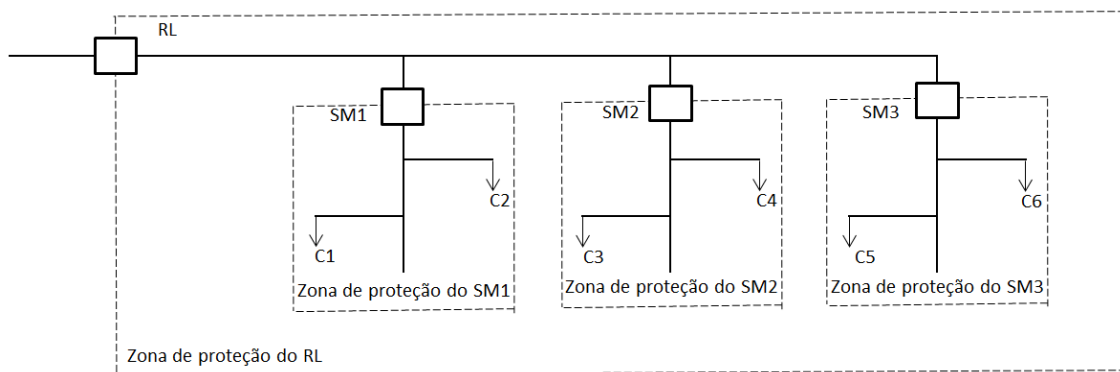
Verificou-se que alguns SMs não estavam funcionando seletivamente e coordenadamente com os outros equipamentos, ocorrendo o desligamento da retaguarda (RL), ou seja, desligando mais clientes em comparação se atuasse o SM, pois o SM abrange um número menor de clientes. Nestas ocorrências foi observado que somente os SMs da marca A não isolavam o defeito a sua frente.

Devido a este fato, o fabricante da marca A foi contactado para análise do problema. O fabricante coletou uma amostra de 33 SMs para realização de testes funcionais e inspeções visuais.

Foi elaborado um relatório de testes, e neste constava que o SM da marca A possuía duas observações de utilização (A Figura 23 é para auxiliar a explicação):

1. O SM1 não foi projetado para ser aberto sob condições de carga, ou seja, deve-se abrir primeiro o RL, desenergizando o trecho do SM1, SM2 e SM3, para depois abrir o SM1. Sendo que este procedimento é inviável para a empresa, pois abrindo o RL desliga todos os clientes C1, C2, C3, C4, C5 e C6 e aumenta o DEC diminuindo a confiabilidade da rede e a receita da empresa. Caso abra-se o SM1, desligaria apenas os clientes C1 e C2.

Figura 23 - Abrangência dos equipamentos de proteção



Fonte: Autor

2. O SM não pode ser reestabelecido em cima de um curto-circuito. Pode ocorrer o caso dos técnicos da empresa inspecionarem o local e verificarem que um SM desarmou, com isso conclui-se que o defeito está no trecho do SM para frente (no sentido da origem da corrente de curto-circuito). Verificando o trecho não se visualiza nenhuma anormalidade na rede, então os técnicos decidem rearmar a SM para reestabelecer a energia aos consumidores. Porém, pouco tempo depois o SM desarma novamente, pois foi rearmado em cima de algum defeito, (p.e. um curto-circuito).

Ou seja, caso estas duas condições ocorram, o SM do fabricante A deixa de funcionar corretamente.

Diante do exposto pelo fabricante A, concluiu-se que não é viável para a companhia de distribuição de energia elétrica ter um SM desta marca, pois para toda manutenção ou manobra que for realizada na rede, mais clientes serão desligados devido à abertura do RL, sendo que o defeito não será restringido apenas aos consumidores posteriores a SM.

Devido a estas restrições da marca A, o fabricante da marca B também foi contactado e questionado se seu produto também possuía estas restrições. O fabricante alegou que sua SM pode ser fechada em cima de uma falha e foi projetada para ser aberta sob condições de carga. Como a empresa em estudo utiliza SMs da marca B foi possível comprovar que esta marca realmente gera uma quantidade menor de desligamento em comparação com a marca A.

Após implementação dos SMs (A e B) e sua operacionalização, verificou-se uma redução de 28% nos desligamentos, sendo que o esperado era de 47,6% (percentual original de desligamentos por faltas transitórias). Devido as falhas de operação das SMs do tipo A foi reduzido apenas 28% dos desligamentos e não 47,6% como esperado. Com isso o indicador DEC reduziu de 9,0 h para 7,9 h. Isso significa que antes da implementação do seccionizador monofásico um cliente ficava sem energia elétrica em média por 9,0 h no período de 1 ano, e agora o cliente fica 7,9 h sem energia elétrica no mesmo período. Ou seja, o cliente agora tem 1,1 h a mais de energia no período de 1 ano. O indicador FEC também reduziu de 4,9 para 4,6, o que significa, que um cliente antes da implementação do seccionizador monofásico era desligado 4,9 vezes no período de um ano e agora é desligado 4,6 vezes. O total das multas geradas pelos indicadores DIC, FIC, DMIC e DICRI (ANEEL, RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 664/2015) antes da implementação foi de R\$ 13 milhões e após a implementação foi de R\$ 6,83 milhões, o que resultou em uma economia de 47,5%, que representa em valores absolutos a quantia de R\$ 6,17 milhões. A seguir está o significado de cada indicador. O DIC (duração de interrupção individual por unidade consumidora) é a quantidade de horas que o cliente ficou sem energia. O FIC (frequência de interrupção individual por unidade consumidora) é a quantidade de interrupções que o cliente experimentou no período de apuração (mensal, trimestral ou anual). O DMIC (duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora) indica o número de horas da maior interrupção experimentada pelo consumidor no período de apuração. O DICRI (duração da interrupção ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão) representa o tempo de cada interrupção ocorrido em dia crítico que afetou uma unidade consumidora específica.

6. CONCLUSÃO

A ocorrência de faltas transitórias na rede de distribuição de energia elétrica da empresa em estudo gerava o desligamento imediato dos clientes, devido à utilização de chaves fusíveis como equipamento de proteção junto à religadores. As faltas transitórias são reversíveis após a operação de um equipamento de proteção, ou seja, a falha é eliminada após a sua atuação, sendo assim, há uma desenergização que pode ser evitada. Evitada caso exista um sistema de proteção que seu mecanismo não desligue os clientes na primeira condição de falta transitória, fato que ocorre com a chave fusível.

Os desligamentos por faltas transitórias representavam 47,6% dos problemas da empresa. Assim, foi estudado a chave fusível e o seccionizador monofásico como equipamentos de proteção por sobrecorrente com o intuito de reduzir o número de desligamentos dos clientes, analisando qual teria o melhor custo benefício para a empresa, melhorando a confiabilidade e a qualidade de distribuição de energia elétrica.

Para solucionar o problema de desligamento imediato devido à falta transitória, foi analisado a chave fusível e o seccionizador monofásico, escolhendo qual poderia evitar desligamento imediato, oferecendo tentativas de religamento, e com um bom custo-benefício para a empresa. Assim, atendendo estes requisitos, foi escolhido o seccionizador monofásico para resolver os desligamentos devido à faltas transitórias.

A empresa realizou a compra de duas marcas de SM, a marca A e B. A marca A não apresentou redução representativa dos desligamentos dos clientes. A marca A apresentou as seguintes particularidades: 1) não foi projetado para ser aberto sob condições de carga (circuito energizado) e 2) o seccionizador monofásico não pode ser reestabelecido em cima de um curto-circuito. No total apresentou 28% de redução e não 47,6% como esperado. Foi concluído que para reduzir 47,6% dos desligamentos, deveria ser utilizado o SM da marca B, pois esse não apresenta as seguintes particularidades apresentadas pela marca A.

Concluindo, a empresa apresentou redução de seus desligamentos utilizando seccionizadores monofásicos da marca B, no lugar de chaves fusíveis. Reduzindo o DEC de 9,0 h para 7,9 h, o FEC de 4,9 para 4,6 e as multas geradas pelo DIC, FIC, DMIC e DICRI de R\$ 13 milhões para R\$ 6,83 milhões. O que resultou em uma economia de 47,5%, que representa em valores absolutos a quantia de R\$ 6,17 milhões.

REFERÊNCIAS

ABB. **Tecnologia de energia e automação**: Disjuntor. Disponível em: < <http://new.abb.com.br>>. Acesso em 28 nov. 2015.

ANEEL. **Indicadores de continuidade**. Disponível em: < www.aneel.gov.br>. Acesso em: 25 nov. 2015.

ANEEL. **Resolução normativa N° 664/2015**. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/052/resultado/ren_2015_664.pdf. Acesso em: 19 dez. 2015.

BARROS, B. F.; GEDRA, R. L. **Cabine primária**. 1.ed. São Paulo: Editora Érica, 2009.

BITTENCOURT, A. A. **Proteção adaptativa de alimentadores de distribuição de energia elétrica considerando geração distribuída**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. p. 44 – 49.

BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. **Protective Relaying Principles and Applications**. Third Edition London: Boca Raton, 2006, 638 p.

CPFL. **Proteção de redes aéreas de distribuição**: Sobrecorrente, 2003.

Elektro. **Norma ND.78**: Proteção de redes aéreas de distribuição. 2. ed. Campinas, 2014. p. 35 – 39.

FERREIRA, G. D. **Otimização da confiabilidade de sistemas de distribuição de energia elétrica**: Uma abordagem considerando a seleção e alocação de dispositivos de proteção e manobras. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2009. p. 38 – 45.

GIGUER, S; **Proteção de sistemas de distribuição**. Porto Alegre: Editora SAGRA.

JUNIOR, R. C. P.; **Proteção de sobrecorrente em sistemas de distribuição de energia elétrica através de abordagem probabilística**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. p. 6 – 56.

KINDERMANN, G. **Curto circuito**. Florianópolis: 4 ed. do autor. 2007.

LEDESMA, J. J. G.; **Uma metodologia para análise da coordenação e seletividade da proteção de sistemas de distribuição**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012. p. 61 – 67

LEME, D. M.; CUNHA, M. A.; PITOCCO, T. A.; RIZZARDI, W. C. **Sistema de proteção da rede de distribuição de energia elétrica**. Itatiba: Universidade São Francisco Itatiba, 2013. p. 28 – 41.

MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Editora GEN / LTC, 2011. 70p.

MYEEL. **Industries: Productors reconectores**. Disponível em: <<http://www.myeel.com.ar>>. Acesso em: 12 dez. 2015.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Gestão de energia: Religador**. Disponível em: <<http://www.schneider-electric.com>>. Acesso em: 05 dez. 2015.

SOUZA, E. D.; SILVEIRA, F. T.; GALVANI, G. T. A.; **Coordenação entre religador e seccionizador em redes de distribuição**. Belo Horizonte: Editora UniBH, 2011, 223 p.

UNESP. **Proteção e coordenação de instalações industriais**. Departamento de engenharia elétrica. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 2013. 1p.