

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
NÍVEL MESTRADO PROFISSIONAL

CLARISSA ARGENTI ROCHA

MÉTODO DE COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DE
FUSÍVEIS E RELIGADORES PARA REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

SÃO LEOPOLDO

2018

Clarissa Argenti Rocha

**Método de Coordenação e Seletividade de Fusíveis e
Religadores para Redes de Distribuição de Energia**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do
Rio dos Sinos - UNISINOS.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Marques de Fi-
gueiredo

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva
Pereira

São Leopoldo

2018

R672m Rocha, Clarissa Argenti.
Método de coordenação e seletividade de fusíveis e religadores para redes de distribuição de energia / Clarissa Argenti Rocha. – 2018.
53 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2018.
“Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Marques de Figueiredo.”
“Coorientador: Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira”

1. Distribuição de energia. 2. Redes elétricas. I. Figueiredo, Rodrigo Marques de. II. Pereira, Paulo Ricardo da Silva. III. Título.

CDU 621.3

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária: Raquel Herbcz França – CRB 10/1795)

Clarissa Argenti Rocha

**Método de Coordenação e Seletividade de Fusíveis e
Religadores para Redes de Distribuição de Energia**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do
Rio dos Sinos - UNISINOS.

Aprovado em 31 de Agosto de 2018.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Vicente Canto dos Santos –
Unisinos
Avaliador

Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon – UFSM
Avaliador Externo

Prof. Dr. Rodrigo Marques de Figueiredo (Ori-
entador)

Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira (Coori-
entador)

Visto e permitida a impressão
São Leopoldo

Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira
Coordenador PPG em Engenharia Elétrica

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos professores Rodrigo e Paulo, por nunca desistirem de mim, mesmo quando nem eu mais acreditava. À professora Ana Paula por me motivar em todos os momentos. Ao professor Leonel e aos demais colegas do itt Fuse por compreenderem as dificuldades do caminho e serem um apoio nos momentos que necessitei estar ausente. À minha família, por acreditar na minha capacidade e pelo apoio nos momentos difíceis. Meu esposo Armando, por ser meu braço direito nessa caminhada e me dar apoio e compreensão em todos os momentos, ser uma referência de excelência e um motivador para que nunca desistisse. Finalmente, a Deus, pois só com fé é possível percorrer as dificuldades do caminho.

Epígrafe

*“Deus não escolhe os capacitados,
capacita os escolhidos.”
(Autor Desconhecido)*

RESUMO

As redes atuais de distribuição são cada vez mais exigidas quanto a sua confiabilidade, as concessionárias precisam atender os critérios dos indicadores de qualidade individual. Para alcançar melhor a eficiência da rede aplica-se a ela os conceitos de coordenação e seletividade. Buscando este conceito o presente trabalho apresenta um método para determinação de fusíveis e religadores aplicados na rede de distribuição de forma a garantir sua capacidade de coordenação e seletividade. Através do estudo dos elementos de proteção e do conhecimento das características da rede, e de como devem ser estes elementos dimensionados a ponto de serem seletivos e coordenados apresenta-se uma metodologia para, por meio do uso de grafos determinar o valor de fusíveis e religadores em uma rede de distribuição. Ao final a metodologia possibilita a execução de manobras de rede e avalia se a coordenação e seletividade dos elementos ainda é válida. Para a aplicação deste método, a rede IEEE de 34 barras é adaptada adicionando fusíveis e religador para permitir validar o conceito aqui apresentado.

Palavras-chaves: Coordenação. Seletividade. Grafo. Proteção. Distribuição de energia.

ABSTRACT

Existing power distribution networks are increasingly required as to their reliability, energy distribution companies need to meet the criteria of individual quality indicators. To achieve the efficiency of the network, apply to it the concepts of coordination and selectivity. Looking for this concept the present work presents a method for determination of fuses and automatic circuit reclosers applied in the power distribution network to guarantee its coordination and selectivity. Through the study of the elements of protection, and the knowledge of the characteristics of the network, and how these elements should be dimensioned to be selective and coordinated, a methodology is presented for, using graphs, to determine the value of fuses and automatic circuit reclosers in a power distribution network. In the end, the methodology allows the execution of network maneuvers, and evaluates if the coordination and selectivity of the elements is still valid. For the application of this method, the IEEE network of 34 bars is adapted by adding fuses and automatic circuit recloser to allow validating the concept presented here.

Key-words: Coordination. Selectivity. Graph. Protection. Power distribution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fusível e seus elementos	17
Figura 2 – Exemplo curva tempo x corrente fusível	17
Figura 3 – Características técnicas das Chaves Fusíveis	18
Figura 4 – Imagem representativa de um sistema chave repetidora.	18
Figura 5 – Características de operação dos religadores e fusíveis	19
Figura 6 – Comparação de curvas de religador	20
Figura 7 – Exemplo de rede coordenada e seletiva	22
Figura 8 – Exemplo de ajuste de curva para coordenação	22
Figura 9 – Exemplo de verificação de seletividade	25
Figura 10 – Fluxograma do algoritmo proposto	29
Figura 11 – Rede IEEE 34 barras adaptada para manobra	30
Figura 12 – Rede IEEE 34 com identificação dos nós de dispositivos de proteção	30
Figura 13 – Fluxograma do algoritmo proposto - Etapa 1	31
Figura 14 – Processo de simplificação: nós intermediários	32
Figura 15 – Processo de simplificação: Corrente de curto mínima	32
Figura 16 – Processo de simplificação: Nós intermediários	33
Figura 17 – Rede simplificada final	33
Figura 18 – Fluxograma do algoritmo proposto - Etapa 2	34
Figura 19 – Fluxo de análise da rede	34
Figura 20 – Fluxograma do algoritmo proposto - Etapa 3	35
Figura 21 – Fluxograma do algoritmo proposto - Etapa 4	36
Figura 22 – Dispositivos montantes e Jusantes ao religador	36
Figura 23 – Grafo da rede teste	37
Figura 24 – Fluxograma do algoritmo proposto - Etapa 5	38
Figura 25 – Rede IEEE 34 barras original	39
Figura 26 – Rede IEEE 34 barras original	41
Figura 27 – Identificação do fluxo 6 na rede IEEE 34 barras original.	41
Figura 28 – Rede simplificada	42
Figura 29 – Curva do religador considerando os ajustes realizados	44
Figura 30 – Ajuste do religador após Manobra	45
Figura 31 – Rede IEEE 34 barras simplificado após Manobra	45
Figura 32 – Rede IEEE 34 barras após Manobra	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de corrente para elos fusíveis Tipo K	24
Tabela 2 – Trabalhos relacionados	28
Tabela 3 – Elementos adicionados a rede IEEE 34 barras	40
Tabela 4 – Itens presentes no fluxo 6.	42
Tabela 5 – Exemplo do fluxo 6, com os valores para ele definidos de fusíveis do Tipo K	43
Tabela 6 – Valores dos Fusíveis escolhidos Tipo K calculados em cada fluxo e definição final do fusível a ser aplicado	43
Tabela 7 – Comparação dos fusíveis calculados para o caso de manobra, com os fusíveis existentes na rede	46
Tabela 8 – Resultado dos cálculos iniciais de rede	53
Tabela 9 – Resultado para a rede simplificada	54
Tabela 10 – Cálculos da rede IEEE 34 barras após Manobra	55
Tabela 11 – Resultados para a rede simplificada após Manobra	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
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 ou ponto de conexão
DICRI	Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
A	Ampere
V	Volts
I	Corrente
t	Tempo
s	Segundos
NA	Normalmente aberto
NF	Normalmente fechado
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Δi Ajuste de corrente

Δt Ajuste de tempo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Sistemas Elétricos de Potência	15
2.2	Dispositivos de Proteção e Manobra	16
2.3	Coordenação e seletividade de Sistemas de Distribuição	21
2.4	Análise de Redes	23
3	METODOLOGIA	29
4	RESULTADOS	39
4.1	Testes	40
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
5.1	Trabalhos futuros	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
	ANEXOS	52
	ANEXO A – RESULTADO DOS CÁLCULOS INICIAIS DE REDE . .	53
	ANEXO B – RESULTADO PARA A REDE SIMPLIFICADA	54
	ANEXO C – CÁLCULOS DA REDE IEEE 34 BARRAS APÓS MA- NOBRA	55
	ANEXO D – RESULTADOS PARA A REDE SIMPLIFICADA APÓS MANOBRA	56

1 INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição de energia elétrica tem como objetivo principal fornecer energia à população de forma confiável, presando pela qualidade da energia fornecida e pela continuidade do fornecimento. Além de atender estes requisitos, o sistema ainda deve atender a modicidade tarifária, permitindo acesso a todos, sem discriminação. Entretanto, todo o sistema existente é passível de falha e quanto maior a quantidade de elementos para a confiabilidade da rede maior será o custo da distribuição. Por esses motivos, a rede deve ser planejada de forma eficiente, buscando mitigar as falhas transitórias e agindo de forma eficiente nas falhas permanentes.

Para permitir a realocação de dispositivos de proteção tendo como base os conceitos primordiais de coordenação e seletividade da rede o presente trabalho propõe uma nova metodologia para determinar os valores adequados para o dimensionamento e ajustes dos elementos de proteção, bem como para validar a possibilidade de manobra de rede sem que a coordenação e a seletividade sejam prejudicadas, evitando, assim, falhas na rede.

Objetivando especificamente desenvolver um método que avalie uma rede pré-existente para determinar quais são os valores dos dispositivos de proteção do tipo fusíveis e o ajustar adequadamente o dispositivo religador, bem como valide a possibilidade de realizar manobras e manter a coordenação e a seletividade da mesma. Para isso é proposta a utilização da técnica de grafos, modelando a rede de distribuição em grafos e por meio de um processo de identificação dos elementos relevantes para a coordenação e seletividade. Por consequência a rede é transformada em um sistema de menor dimensão e complexidade mantendo as informações fundamentais para a definição dos elementos de proteção.

Para alcançar o objetivo proposto, a revisão bibliográfica apresenta o estudo inicial da rede de distribuição, compreendendo os critérios pela qual ela é avaliada. Na sequência, são apresentados os elementos de proteção que permitem mitigar as falhas do sistema e agir de forma mais eficiente. Após, são apresentados os conceitos de coordenação e seletividade, permitindo a compreensão dos mesmos, e como sua aplicação pode ser realizada. A revisão é finalizada com o estudo das técnicas de análise de rede, e de alguns dos métodos atualmente aplicados. Depois, a metodologia proposta é apresentada e, sequencialmente, os testes são realizados para a validação da mesma. Finalizando com as considerações finais do estudo e apresentação de possíveis trabalhos a serem realizados a partir desse.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os assuntos que fundamentam o trabalho para seu bom entendimento por parte do leitor. Assim sendo, são contextualizados os sistemas elétricos de potência, os dispositivos de proteção e manobra que fazem parte desse tipo de sistema, a coordenação e a seletividade de rede, sua fundamental importância, e alguns métodos para a análise da rede.

2.1 Sistemas Elétricos de Potência

O sistema elétrico de potência tem por função fornecer energia elétrica estável e contínua para todos os consumidores de forma confiável e viável economicamente para as empresas. Mas devido a complexidade do sistema não é fácil atingir estes objetivos. Teve início no século XIX, com poucas cargas pontuais e usinas específicas para cada carga. Durante os mais de 100 anos de existência do sistema elétrico nacional ocorreram diversas mudanças no setor, e a complexidade do sistema e de sua gestão cresceu juntamente com as unidades consumidoras. (GEDRA; BARROS; BORELLI, 2014)

Atualmente é dividido em três grupos organizados de forma hierárquica: geração, transmissão e distribuição. A geração está no nível mais alto desta hierarquia, seguida da transmissão e finalizando com a distribuição, sendo esta a responsável por entregar a energia gerada para o consumidor final. Mesmo a geração e a transmissão tendo influência direta nas falhas da distribuição, segundo Comassetto (2008), 90% das interrupções são oriundas do sistema de distribuição, pois este é o sistema mais exposto e menos robusto das três divisões. São as existências destas falhas, causadas pelo próprio sistema de distribuição e a necessidade de confiabilidade do sistema que fazem com que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) trabalhe com os indicadores individuais de continuidade.

Para regular o sistema de distribuição, a ANEEL utiliza o Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, (ANEEL, 2018) separado em 11 módulos que permitem de forma direta regular o serviço de distribuição e estabelecer padrões para todas as companhias existentes no país. É o Módulo 8 o responsável por determinar como deve ser avaliada a qualidade do serviço prestado, considerando distorções harmônicas, níveis de tensão, flutuação e interrupções de fornecimento. (ANEEL, 2018) As interrupções são as falhas mais graves existentes no sistema. O consumidor comum normalmente não é capaz de identificar falhas como harmônicos e flutuações, mas a completa falta de fornecimento leva o consumidor comum a realizar reclamações.

Para monitorar estas falhas e determinar limites para as mesmas, levando as distribuidoras a buscar sempre o melhoramento das redes, o Módulo 8 determina como devem ser calculados os

indicadores de qualidade individual, sendo os seguintes: Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (DIC); Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (FIC); Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão (DMIC); Duração da Interrupção Individual Ocorrida em Dia Crítico por Unidade Consumidora ou Ponto de Conexão (DICRI); Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC); e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC). Sempre que as distribuidoras extrapolam os limites destes indicadores elas devem compensar o consumidor conforme determinado pelo PRODIST.

Para evitar falhas, o sistema deve ser bem conservado, seja por ações simples, como podas de árvores ou com ações mais complexa, como a adição de sistemas de proteção e manobra, que permitem que a rede seja capaz de se "religar" ou manobrar a rede.

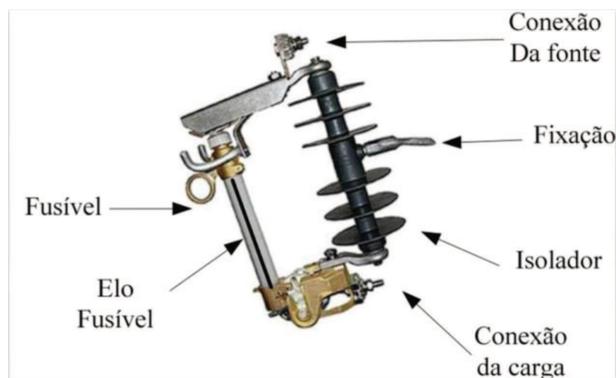
2.2 Dispositivos de Proteção e Manobra

Todo o sistema de distribuição possui falhas inerentes ao sistema, mesmo com as mais rígidas técnicas de proteção não é possível evitar estas falhas. O Curto Circuito é a falha mais comum no sistema, ela ocorre quando algo faz a corrente alcançar níveis elevados e coloca todos os dispositivos seriais na rede com essa corrente, mas essa não é a única falha existente: variação na tensão da rede, cargas em condições diferentes das projetadas, descargas atmosféricas, etc, são exemplos de outros tipos de falhas que ocorrem na rede. É interessante ressaltar que os demais tipos de falha podem causar como consequência o curto circuito.

Os dispositivos de proteção têm como função proteger a rede destas falhas, impedindo que elas se propaguem pela rede e isolando o ponto com falha, eliminando a sua alimentação. Entretanto, ao isolar pontos da rede, conforme a sua distribuição, pontos sem falha podem ser desenergizados por não possuírem ligação direta com o alimentador principal, essa é a missão dos dispositivos de manobra, reorganizar a rede e permitir que a energia seja reestabelecida por um alimentador secundário, redistribuindo a rede. (FILHO; MAMEDE, 2011)

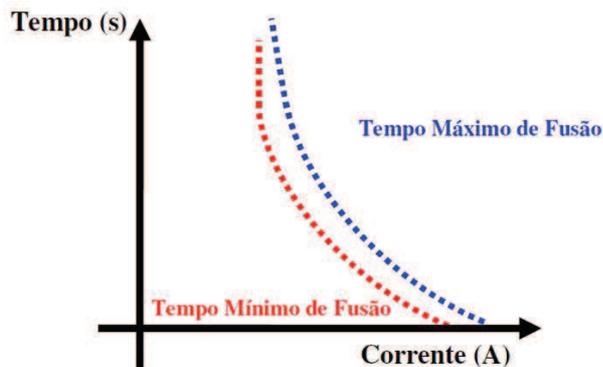
Como anteriormente citado, as falhas de curto circuito são as mais comuns em sistemas de distribuição e para sua proteção o sistema mais abundantemente utilizado na rede são os fusíveis. No curto circuito, a corrente tem um crescimento rápido em um período curto de tempo, quando essa corrente elevada passa pelo elo fusível, gera calor de forma quadrática à intensidade da corrente. Ao atingir seu máximo, o elo é rompido e libera a abertura da chave interrompendo o circuito e finalizando assim com o curto existente. (MARGEGAN, 2012) Na figura 1 é possível ver em exemplo de estrutura de fusível e seus elementos. Sabendo que a corrente cresce de forma rápida com o curto circuito e que é proporcional ao aquecimento do elemento protetor, a curva de Tempo x Corrente é inversa. Como visto na figura 2, as duas curvas presentes são o tempo máximo e mínimo de fusão, a área existente entre as duas curvas é denominada faixa de operação. É dentro deste intervalo que o fusível tem capacidade de atuar de forma a proteger o sistema.

Figura 1 – Fusível e seus elementos



Fonte: (FILHO, 2017)

Figura 2 – Exemplo curva tempo x corrente fusível



Fonte: (COMASSETTO, 2008)

São as características do elo fusível que determinam a sua capacidade de atuação, segundo Comassetto (2008) no Rio Grande do Sul, as companhias distribuidoras utilizam os elo fusíveis do "Tipo K". Esses são elementos que apresentam capacidade de sobrecarga de uma vez e meia de sua corrente nominal, e possuem fusão em duas vezes do seu valor nominal. Além desses dois fatores o "Tipo K" tem uma rápida característica de atuação.

Para especificar um fusível é preciso determinar basicamente três itens: Tensão Nominal; Capacidade de Corrente Nominal; e Capacidade de Interrupção. Na figura 3 é apresentado um exemplo de característica de fusíveis que possuem mesma corrente nominal.

Figura 3 – Características técnicas das Chaves Fusíveis

Tensão Nominal	Corrente Nominal	Capacidade de Interrupção	
		Simétrica	Assimétrica
15 kV	100 A	7.100 A	10.000 A
	100 A	10.600 A	16.000 A
24,2 kV	100 A	4.500 A	6.300 A
	100 A	8.000 A	12.000 A

Fonte: (COMASSETTO, 2008)

Há, em alguns casos, o uso das chaves repetidoras ou religadoras. Seu funcionamento é idêntico ao de um fusível, entretanto, ela possui como característica a capacidade de se rearmar. Elas são utilizadas em situações onde há curtos de curta duração, denominados efeitos transitórios, como por exemplo galhos de árvores que em uma ventania tenham contato temporário com a rede. Nesses casos o uso de uma chave fusível comum causaria a interrupção definitiva da rede e assim exigiria o deslocamento de equipe de manutenção para o rearme da rede. No entanto, a chave repetidora possui três fusíveis, onde apenas um está conectado a rede. Quando o fusível conectado se rompe, ele abre e mecanicamente conecta o próximo fusível em seu lugar. Se a falha transitória for interrompida, a rede volta a operar de forma normal. Entretanto, se a falha permanece, o sistema atua novamente abrindo o segundo fusível e colocando o terceiro em seu lugar. Novamente, se a falha permanece o sistema abre e finaliza os estágios de rearme. Um exemplo de como é a estrutura de uma chave repetidora pode ser visto na figura 4.

Figura 4 – Imagem representativa de um sistema chave repetidora.



Fonte: (DELMAR,)

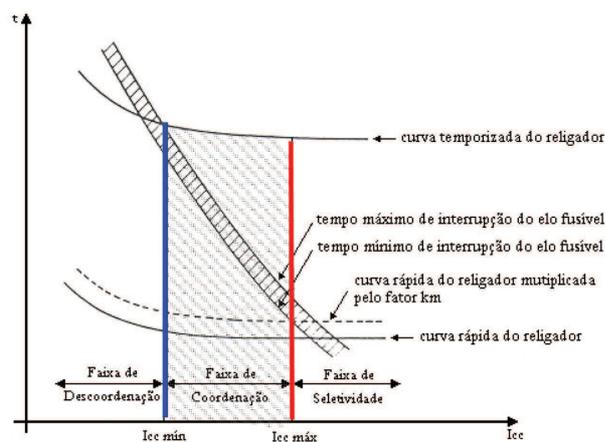
O sistema de chave repetidora tem custo mais elevado que do fusível, mas inferior aos

sistemas religadores. A escolha da utilização de um sistema desses é tomada pelo excesso de ações de curto transitórias, e depende do conhecimento do operador das falhas existentes na rede. O sistema mais sofisticado para isso é o religador, entretanto o seu alto valor comparado aos demais elementos faz com que seu uso seja aplicado em locais mais críticos, como a proximidade de Subestações.

O religador tem como função principal proteger de falhas transitória a rede, não apenas a diretamente conectada a ele, mas também as redes protegidas por fusíveis a jusante. O religador atua na falhas transitórias, as quais correspondem a 80% das falhas existentes na rede. Quando ocorre uma falha transitória o religador se desarma, abrindo a rede, após um período predeterminado o religador fecha novamente, reestabelecendo o fornecimento de energia. O religador pode atuar até três vezes dessa forma, variando conforme for parametrizado, sendo as duas primeiras com interrupção mais curta que a terceira. Só será feito o total desarme do religador quando, após as três interrupções, o sistema ainda permanecer com característica de curto. Seu funcionamento se assemelha a chave religadora, entretanto o sistema religador possuem um desenvolvimento mais sofisticado. É possível ajustar sua curva de atuação buscando a melhor coordenação com o fusíveis a jusantes, modificar o tempo que o sistema permanece em desarme buscando a melhor característica para a rede em que se encontra aplicado, ajustes de características de forma remota, entre outras funções que podem ser aplicadas (NASCIMENTO, 2017).

Segundo Comassetto (2008), os religadores apresentam dois grupos de curva: Lentas, que permitem que o fusível a jusante atue primeiro; Rápidas, que atua antes que os fusíveis a jusante, eliminando os efeitos transitórios. Na figura 5 é possível ver as características da relação de curva entre fusível e religador.

Figura 5 – Características de operação dos religadores e fusíveis

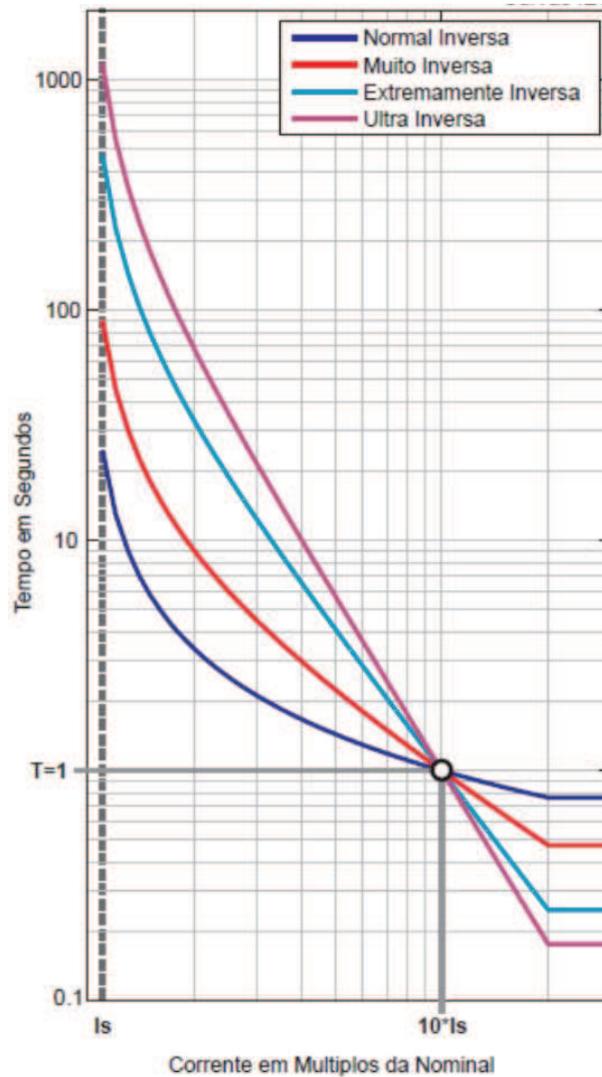


Fonte: (COMASSETTO, 2008)

São comuns os dispositivos religadores apresentarem diversas curvas características, algumas normatizadas pela IEC e IEEE e as desenvolvidas diretamente pelos fabricantes. As quatro curvas mais utilizadas são apresentadas na figura 6, são as curvas denominadas de

Normalmente Inversa, Muito Inversa, Extremamente Inversa e Ultra Inversa. Cada uma dessas curvas é representada por uma equação, é através da modificação dos parâmetros das equações que se pode ajustar o religador para realizar coordenação com a rede (FILHO, 2000).

Figura 6 – Comparação de curvas de religador



Fonte: (DUARTE, 2013)

- Equação Curva Normalmente Inversa

$$T_{ni} = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{0,02} - 1} x T_{ms} \tag{1}$$

- Equação Curva Muito Inversa

$$T_{ni} = \frac{13,5}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right) - 1} x T_{ms} \tag{2}$$

- Equação Extremamente Longa

$$T_{ni} = \frac{80}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^2 - 1} x T_{ms} \quad (3)$$

- Equação Ultra Inversa

$$T_{ni} = \frac{315,2}{\left(\frac{I_{ma}}{I_{ac}}\right)^{2,5} - 1} x T_{ms} \quad (4)$$

Onde:

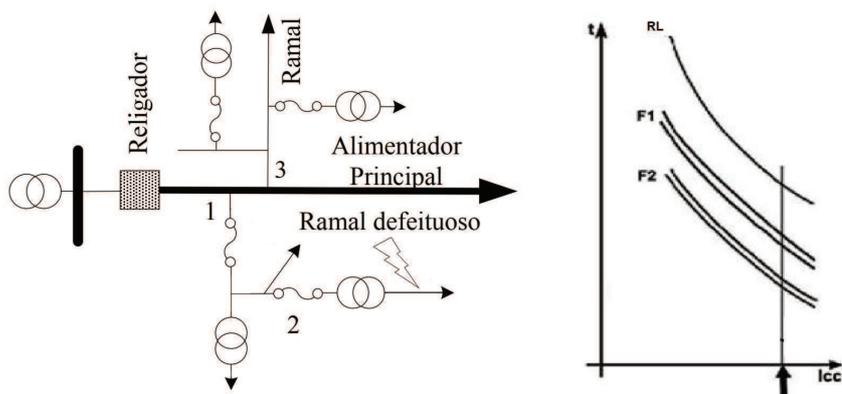
- T_{mi} - Tempo de operação do relé;
- T_{ms} - Multiplicador de tempo;
- I_{ac} - corrente de acionamento;
- I_{ma} - sobrecorrente máxima admitida.

2.3 Coordenação e seletividade de Sistemas de Distribuição

Para selecionar de forma adequada os dispositivos de proteção de forma a isolar as falhas existentes na rede, evitando que o menor número de cargas sejam atingidas, a rede precisa ter seus elementos de proteção distribuídos de forma coordenada e seletiva. Em poucas palavras, a seletividade na rede consiste em garantir que o elemento protetor mais próximo a falha será o primeiro e o único a atuar, evitando que as demais cargas da rede sejam prejudicadas e a coordenação garante que os elementos de proteção sequenciais, como o religador e a chave repetidora, atuem antes dos dispositivos de atuação permanente, como exemplo o fusível (LEDESMA, 2012).

Usando como base a figura 7 tem-se um exemplo de rede seletiva e coordenada. Nela, o ramal 2 é defeituoso. Como se trata de uma rede coordenada, o primeiro elemento a atuar é o religador, conforme apresentado no item 2.2 o religador atuará verificando a cada atuação se a falha se extinguiu ou se ainda permanece. No caso da persistência da falha a seletividade da rede garante que o fusível presente no ramal 2 atue e isole apenas este ramal. A coordenação do elemento religador garante que caso a falha seja momentânea ela não causará a interrupção do ramal, já a seletividade garante que o sistema isolará apenas o ramal 2 com falha e não o dispositivos anteriores, presente no ramal 1.

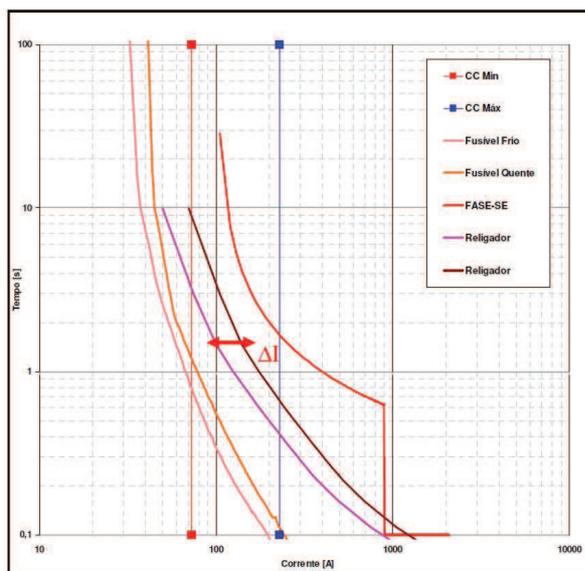
Figura 7 – Exemplo de rede coordenada e seletiva



Fonte: Adaptado de (LEDESMA, 2012)

Para definir a seletividade e coordenação dos elementos é preciso levar em consideração a curva tempo x corrente dos elementos, e no caso do religador, ainda é possível realizar o ajuste para que a mesma se enquadre dentro da seletividade e coordenação da rede. Tendo como base a figura 8 de (COMASSETTO, 2008). Nela é demonstrado um exemplo de ajuste da curva do religador para que o mesmo seja seletivo em relação aos fusíveis a jusante. Nesse exemplo um incremento na corrente de partida do religador é realizado, causando o deslocamento da curva do religador e ajustando-o em relação a curva do fusível e aos limites de máximo e mínimo da corrente de curto circuito.

Figura 8 – Exemplo de ajuste de curva para coordenação



Fonte: (COMASSETTO, 2008)

É comum a realização de manobras nas redes, o que causa impacto na coordenação e seletividade das mesmas. Para realizar essas manobras utilizam chaves seccionadoras, esses

elementos não têm característica de proteção da rede - atuam como chaves que abrem e fecham o circuito da rede. As seccionadoras são apresentadas de duas formas, as normalmente fechadas (NF), e as normalmente abertas (NA). Na prática, não há diferença construtiva entre os dois modelos, mas a denominação NF e NA é dada pela característica inicial de operação da rede. Cargas da rede que possuem necessidade de confiabilidade de fornecimento normalmente possuem duas entradas de alimentação, uma NF, que tem por característica ser sua fonte principal de alimentação, e uma segunda alimentação com uma chave NA, para casos de emergência possibilitando a manobra. É típico de sistemas com grande número de cargas que possuam mais de uma interligação com subestações, sendo uma NF e outra NA.

2.4 Análise de Redes

As redes radiais são as mais comumente empregadas pelas concessionárias de energia e sendo o método mais tradicional de distribuição de energia. São denominadas redes radiais aquelas em que o fluxo de energia percorre um só sentido, tendo como fonte a subestação. Para a análise de redes e correto dimensionamento das mesmas é fundamental ter um robusto cálculo de fluxo de potência. Ao longo dos anos diversos métodos foram desenvolvidos para calcular esse fluxo. (BERNARDON, 2007).

O cálculo do fluxo de carga em sistemas elétricos, basicamente consiste em determinar as variáveis de estado do sistema, que são as tensões complexas nas barras as distribuições dos fluxos de potência ativa e reativa nos ramos da rede e outras possíveis grandezas derivadas destas. (MILBRADT, 2015)

Para a aplicação em redes radiais, Milbradt (2015) destaca três métodos como os mais significativos. O método Escalonado aplica as leis de Kirchhoff para correntes e tensão, iniciando nas cargas mais distantes e aplicando em todos os nós até a fonte. Um valor é determinado na primeira interação do sistema e considera-se que ocorreu a convergência quando a tensão calculada é idêntica a tensão definida no início.

Para o método de soma das corrente, o cálculo é realizado em dois sentidos, primeiramente das cargas para a subestação, calculando as correntes de todos os nós. No sentido contrário é realizado o cálculo das quedas de tensões. As interações são realizadas até que o resultado das variações das tensões calculadas sejam menores que um determinado erro. Já no método das somas das potências, o método é parecido ao anteriormente apresentado, entretanto busca-se a convergência da potência. (MILBRADT, 2015)

Os critérios para definição dos ajustes de proteção apresentam diferença entre as concessionárias, entretanto a filosofia de proteção apresenta conceitos básicos que estão presentes em todas elas. Para isso, alguns pontos são importantes. A rede deve apresentar seletividade, isolando sempre o mais próximo à origem da falha do sistema. Coordenação, para que falhas transitórias não sejam causa de desligamento completo da rede. Rapidez, a falha deve ser eliminada no

menor tempo possível, evitando maiores danos. Sensibilidade, tendo capacidade de ser sensível aos problemas que possam ocorrer, buscando o menor valor possível para ativar o sistema de proteção. Segurança, o sistema não pode falhar e nem atuar sem que realmente exista uma falha. E por fim, deve ser econômico, aplicando as técnicas de forma consciente, sendo de aplicação viável e evitando o uso excessivo de equipamentos desnecessários (GIGUER, 1988).

Os critérios a serem adotados nesse trabalho fazem uso da filosofia aplicada no Rio Grande do Sul, usando assim para o dimensionamento fusíveis do Tipo K, do grupo chamado preferencial, e evitando o primeiro valor nominal de corrente de 6 A. Assim os valores a serem utilizados para aplicação são: 10 A, 15 A, 25 A, 40 A, 65 A, 100 A, 140 A e 200 A. (RAMOS, 2014).

O carregamento admitido será de 150% do valor nominal, considerando que não podem ocorrer danos na operação do elemento fusível, entrando em fusão após 200% do valor do nominal de carregamento. A partir destas considerações é possível determinar a tabela 1 onde são apresentados de elementos a serem utilizados para a proteção por fusíveis e suas correntes a serem consideradas.

Tabela 1 – Dados de corrente para elos fusíveis Tipo K

Elo fusível Tipo K	Corrente Nominal (A)	Corrente Admissível (A)	Corrente de Fusão (A)
10	10	15	20
15	15	22,5	30
25	25	37,5	50
40	40	60	80
65	65	97,5	130
100	100	150	200
140	140	210	280
200	200	300	400

Fonte: adaptado de (RAMOS, 2014)

Para o ajuste do religador Comassetto (2008) apresenta um algoritmo para aplicação da seletividade entre religadores e fusíveis, ele reduz a duas equações a definição do religador, após a aplicação dos cálculos de curto-circuito, fluxo de potência e após a definição de quais fusíveis serão utilizados a montante e a jusante do religador, sendo:

Equação 5 aplicada para o ajuste de fase:

$$1,5 \cdot I_c \leq I_{pf} \leq \frac{I_{2\phi F}}{2} \quad (5)$$

onde:

- I_c - Corrente de carga no trecho;

distribuição. A metodologia proposta indica os locais mais adequados para a colocação destes dispositivos, para isso utiliza-se de o método de otimização de busca profundidade, um modelo de força bruta, no qual os critérios de FEC e FIC são determinantes para o cálculo.

Comassetto (2008) apresenta um método Heurístico para otimizar a proteção e a manobra em redes de distribuição, alterando a topologia da rede, adicionando ou removendo equipamentos, aumentando a confiabilidade através do investimento na rede e aumentando a confiabilidade com a possibilidade de transferência de cargas entre alimentadores. Considerando sempre a diminuição de consumidores interrompidos, melhorando assim, os índices de confiabilidade da rede.

Na dissertação proposta por Filho (2017) mostra-se o impacto da aplicação das diferentes filosofias de proteção nos indicadores de qualidade. Analisando eventos de curta e longa duração e afundamento e elevação de tensão. Usando a rede IEEE de 34 barras ele monitora quatro barras aplicando a cada uma as filosofias de proteção seletiva e coordenada mais aplicadas no setor elétrico.

A dissertação de Silveira (2011) apresenta um sistema para a seleção automática de grupos de ajustes de relés de proteção, através da mudança da topologia da rede de um sistema de distribuição. Para a tomada de decisão é utilizada a rede de Petry colorida, e o sistema utiliza monitoramento em tempo real da rede, através dos estados dos disjuntores, e realiza a mudança através de sinais de comandos enviados automaticamente.

Em sua dissertação Ledesma (2012) apresenta uma ferramenta computacional para com dois métodos, direto e interativo, para o cálculo de defeitos de redes de distribuição e apresenta uma metodologia para a análise de seletividade e coordenação da proteção de sobrecorrente em sistemas de distribuição. Através da metodologia proposta o autor possibilita uma análise de forma detalhada e rápida para um grande quantidade de defeitos o comportamento dos dispositivos modelados.

Na dissertação apresentada por Ramos (2014) é proposta uma metodologia para a análise da coordenação e seletividade dos dispositivos de proteção durante a reconfiguração da rede, interagindo com os religadores buscando soluções que possibilitem a reconfiguração da rede, Objetivando desenvolver um método que possibilite as reconfigurações de rede e que ao mesmo tempo mantenha a seletividade da mesma.

Negrão (2015) apresenta uma metodologia que propõem solucionar a coordenação de relés direcionais de sobrecorrente em sistemas de transmissão em malha. São utilizadas as informações dos relés como dispositivos de proteção principal e de retaguarda remota. Através dos critérios predefinidos, determinam-se os possíveis ajustes das curvas de atuação dos relés.

No artigo proposto por Pujiantara et al. (2018) é apresenta um análise de rede em anel, e com geração distribuída. Nesses casos a corrente de curto circuito tem seu valor afetado. Nesse artigo ele propõem métodos adaptativos objetivando localizar mais rapidamente o curto circuito,

permitindo a rede fazer uma proteção coordenada e seletiva.

O artigo de Boaski et al. (2017) propõem o estudo da influência da coordenação e seletividade na confiabilidade da rede de distribuição. A metodologia, através da implementação de um programa computacional, integra as análises de curto circuito, coordenação e seletividade dos dispositivos de proteção, bem como, o cálculo dos indicadores de confiabilidade.

Em seu artigo Ledesma et al. (2015) apresenta um método para a coordenação e seletividade de dispositivos relés no qual são consideradas as redes em desequilíbrio. Para isso todos os cálculos consideram uma metodologia completa de três fases. Também são desenvolvidos os modelos matemáticos dos principais equipamentos de proteção encontrados em sistemas de distribuição.

Os trabalhos citados têm impacto na metodologia que é apresentada a seguir. Para a melhor compreensão de como cada um influencia na metodologia, a tabela 2 foi desenvolvida. Nela, são listados autor, título e como cada um deles dos trabalhos relaciona-se com a dissertação apresentada.

Tabela 2 – Trabalhos relacionados

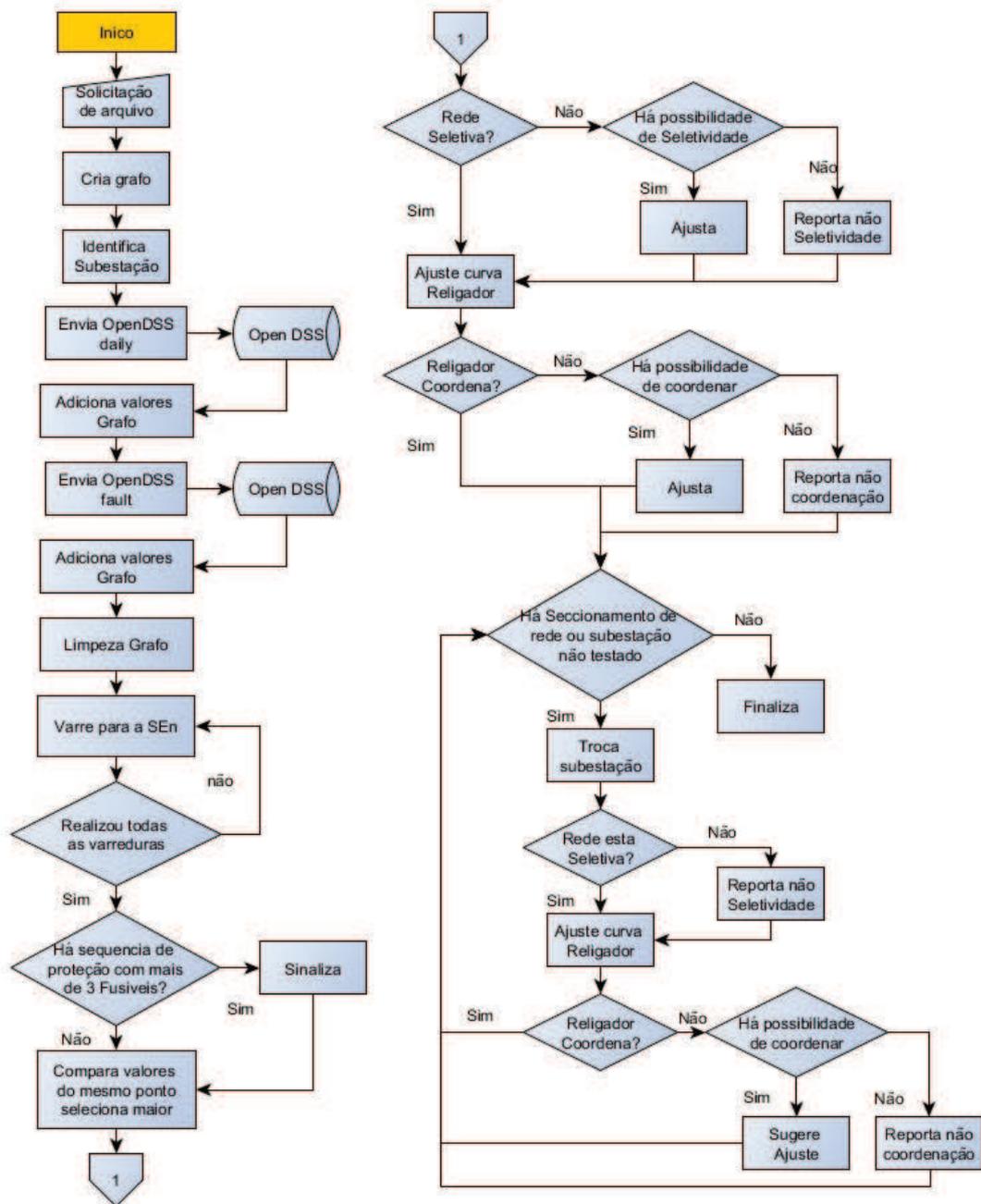
Autores	Trabalho Realizado	Relação com o Trabalho
Nascimento (2017)	Alocação de religadores normalmente abertos em redes de distribuição de energia elétrica	Impacto das manobras de rede e do uso de dispositivos abertos
Maia (2015)	Alocação de dispositivos de proteção em redes de distribuição primária de energia	Método de força bruta para definição de alocação de dispositivos
Comassetto (2008)	Algoritmos Heurísticos de Otimização da Proteção e Manobra em Redes de Distribuição de Energia	Cálculo dos dispositivos de proteção
Filho (2017)	Impacto de diferentes filosofias de proteção nos indicadores de qualidade da energia elétrica	Compreensão do efeito do religador em suas filosofias de atuações
Silveira (2011)	Sistema para seleção automática de grupos de ajustes em relés de proteção	Uso da rede de Petry colorida, método de análise similar aos grafos, porém aplicado de maneira diferente
Ledesma (2012)	Uma metodologia para análise da coordenação e seletividade da proteção de sistemas de distribuição	Compreensão de grande quantidade de defeitos nos dispositivos modelados
Ramos (2014)	Metodologia para análise da coordenação e seletividade de dispositivos de proteção durante reconfiguração de redes de distribuição	Interação de religadores nos casos de manobras de rede
Negrão (2015)	Metodologia para coordenação e seletividade da proteção direcional de sobrecorrente em sistemas de transmissão de energia elétrica	Aplicação de ajuste de curvas
Pujiantara et al. (2018)	<i>Protection coordination using zone selective interlocking method and neural network in IEEE 9 bus plan</i>	Coompreensão das diferentes estruturas de rede e o impacto na coordenação e seletividade
Boaski et al. (2017)	<i>Methodology for coordination and selectivity of protection devices with reliability assessment</i>	Impacto da coordenação e seletividade na confiabilidade de rede
Ledesma et al. (2015)	<i>Algorithm for the analysis of coordination of protection for distribution Systems</i>	Modelo matemático para dispositivos de proteção

Fonte: Elaborado pelo autor

3 METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida propõe a avaliação da rede usando critérios de proteção, coordenação e seletividade tendo como parâmetros iniciais a base de dados da rede de distribuição modelada no *OpenDSS*. O algoritmo proposto para o sistema é apresentado na figura 10.

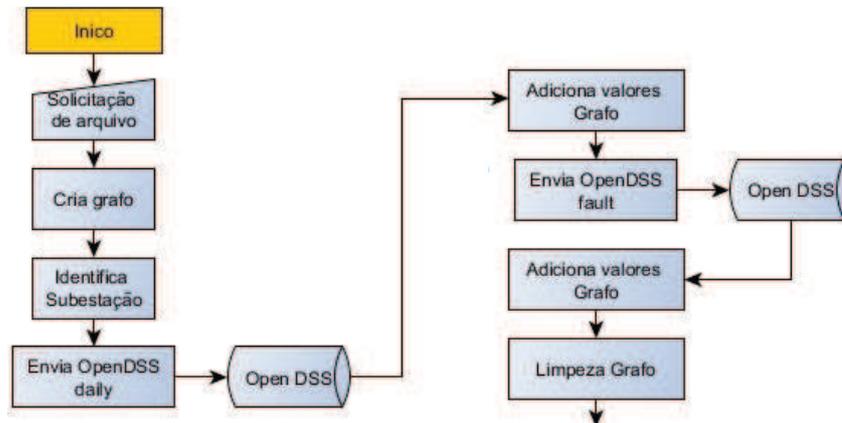
Figura 10 – Fluxograma do algoritmo proposto



Fonte: Elaborado pelo autor

A primeira parte da metodologia pode ser vista na figura 13. Iniciada com um arquivo que tem como parâmetros iniciais a base de dados da rede de distribuição modelada no *OpenDSS*, para obter essas informações relevantes ao dimensionamento do sistema, o algoritmo realiza uma interface com este mesmo *software*, onde os cálculos serão realizados.

Figura 13 – Fluxograma do algoritmo proposto - Etapa 1

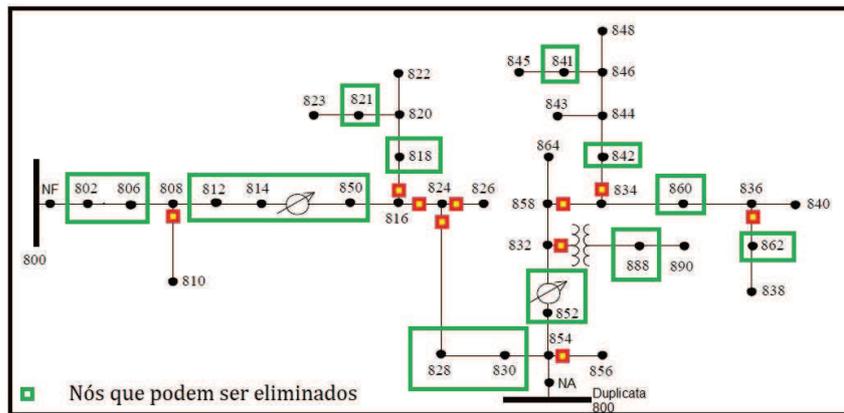


Fonte: Elaborado pelo autor

O primeiro cálculo a ser realizado pelo *OpenDSS* é o fluxo de potência, por meio do qual são adquiridas as correntes de carga máximas de cada ramal. Nesta etapa são aplicadas as curvas de carga referentes a cada transformador de distribuição ou nó de carga da rede conforme seu respectivo perfil de uso, considerando as 24 horas do dia. Assim, independente da coincidência de uso ou não, após o cálculo de fluxo, por meio dos monitores, são obtidos os valores máximos de corrente em cada chave, a fim de garantir o correto dimensionamento dos dispositivos de proteção. Na sequência é realizado o cálculo da corrente de curto-circuito. Neste modo são avaliados os curto-circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos, os quais são importantes para a definição da sensibilidade e alcance da proteção. No final de cada cálculo, todos os valores relevantes são armazenados como informações do grafo.

Com as informações completas do grafo, o algoritmo inicia pela simplificação da rede. O processo consiste em identificar quais as informações serão relevantes para definir os pontos de proteção. Usando como base a figura 14 pode-se ver o processo de simplificação de nós não relevantes por serem intermediários. Estes nós não contêm informações relevantes para a definição dos elementos de proteção, por isso eles podem ser eliminados.

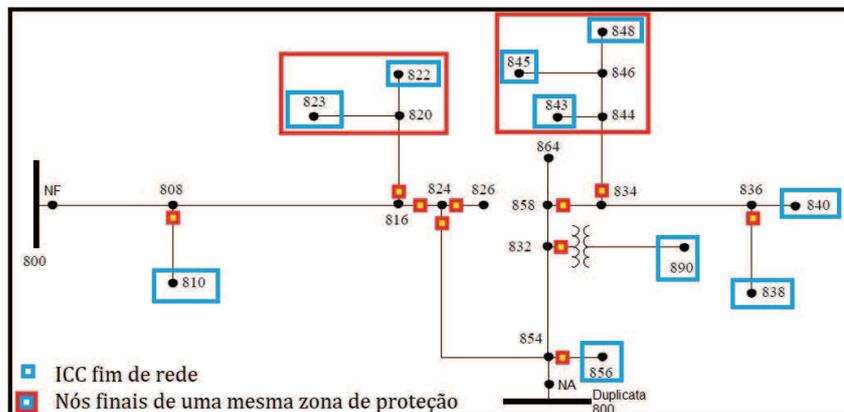
Figura 14 – Processo de simplificação: nós intermediários



Fonte: Elaborado pelo autor

Outra simplificação aplicada é apresentada na figura 15. Esta simplificação é realizada considerando a menor corrente de curto-circuito dentro da zona de proteção de um determinado elemento protetor, que pode apresentar mais de um fim de rede. Nesse aspecto, pode-se considerar para o dimensionamento apenas o nó que apresentar o menor valor de corrente de curto, uma vez que os demais nós já estão contemplados dentro dos valores intermediários entre o ponto de instalação da chave e o ponto com menor curto-circuito.

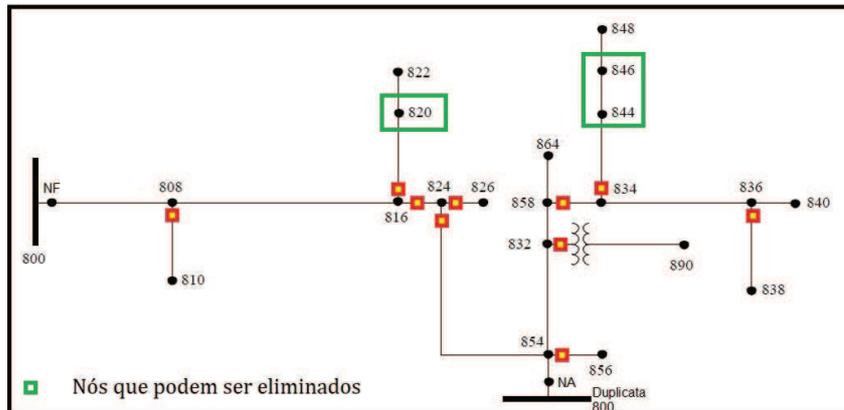
Figura 15 – Processo de simplificação: Corrente de curto mínima



Fonte: Elaborado pelo autor

Neste exemplo, após aplicada estas duas etapas de simplificação, novamente a rede apresenta pontos de nós intermediários, como pode ser visto na figura 16. Assim, pode-se aplicar a simplificação da rede por nós intermediários novamente reduzindo o circuito em análise.

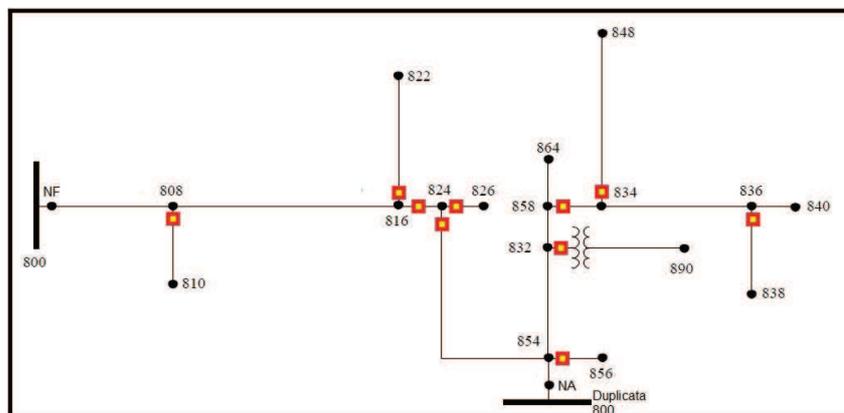
Figura 16 – Processo de simplificação: Nós intermediários



Fonte: Elaborado pelo autor

A rede simplificada final apresenta apenas os nós relevantes para o dimensionamento da proteção. São eles: elementos de proteção, elementos de manobra, finais de rede com corrente de curto-circuito mínima, nós intermediários (para a conexão dos ramais) e subestações.

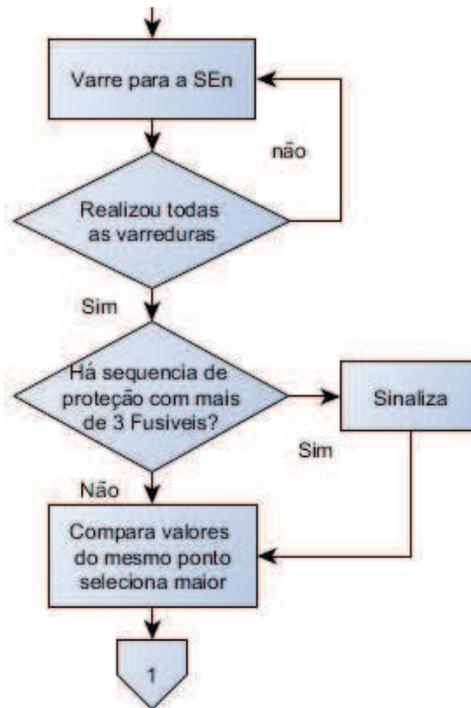
Figura 17 – Rede simplificada final



Fonte: Elaborado pelo autor

Posterior a simplificação da rede, é definido o grafo da rede atual e, a partir deste, pode-se realizar a análise de proteção definindo os dispositivos de proteção da rede. Está a etapa dois do algoritmo, figura 18.

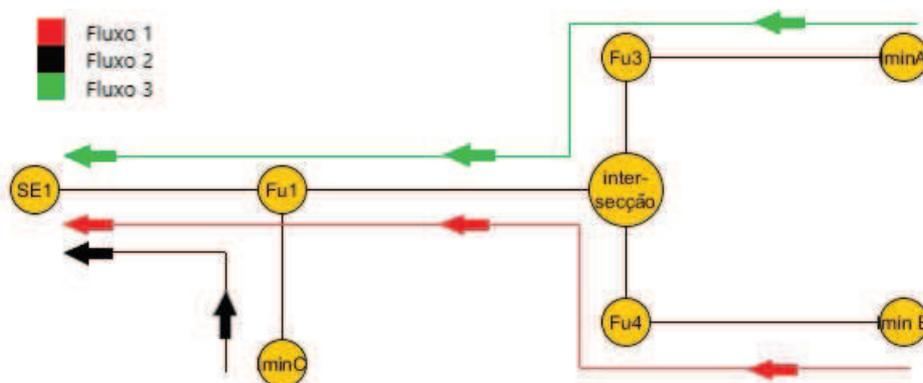
Figura 18 – Fluxograma do algoritmo proposto - Etapa 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Para fazer as análises de coordenação utilizamos o mesmo método apresentado por Comassetto (2008), onde os elementos são comparados aos pares, indo sempre da extremidade do grafo, onde todos os nós com apenas uma aresta são considerados os pontos extremos, e analisando o caminho direto até o nó que representa a subestação, como mostrado na figura 19. O nó que representa a subestação é identificado na criação do grafo, ao receber os dados do *OpenDSS* o sistema identifica qual ponto é a subestação e denomina-o de SEn, onde n é o número indicativo que qual subestação está sendo avaliada.

Figura 19 – Fluxo de análise da rede

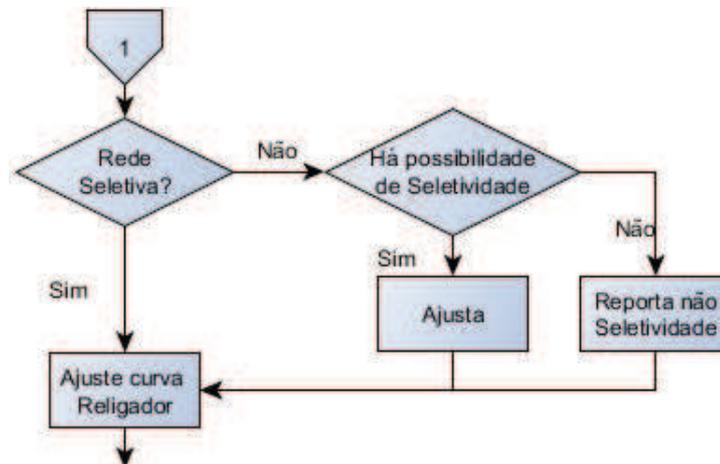


Fonte: Elaborado pelo autor

Caso durante a avaliação de sequência dos fusíveis seja identificado uma sequência com mais de três elementos fusíveis, esta sequência é sinalizada. Após analisar todos os caminhos, alguns pontos apresentarão mais de um valor, assim o maior é escolhido e os demais são excluídos. Na figura 19 o elemento Fu1 foi avaliado para cada um dos fluxos de análise realizados. O valor do dispositivo foi determinado três vezes, nesses casos o de maior valor é escolhido para a proteção.

Nas sequências, o método avalia se a rede já se encontra seletiva. Caso haja algum ponto discrepante, é verificado se há a possibilidade de realizar a seletividade. Tendo como exemplo o mesmo caso da Figura 19, se o elemento Fu1 for igual ao inferior ao elemento Fu3 é preciso alterá-lo para manter a seletividade, elevando seu valor, caso não seja possível essa troca, é sinalizado que há um ponto sem seletividade. Isso é definido pela etapa 3 do algoritmo, figura 20.

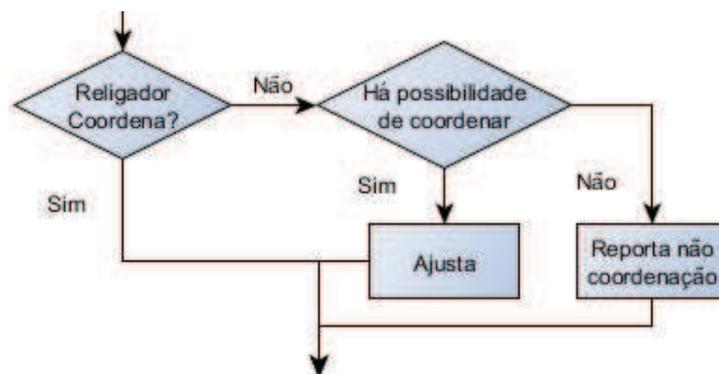
Figura 20 – Fluxograma do algoritmo proposto - Etapa 3



Fonte: Elaborado pelo autor

Na sequência a etapa 4, figura 21 é responsável por avaliar a coordenação do religador. Através do uso da ferramenta *solver* do *software EXCEL* é definido o ajuste do religador de forma a coordenar com o sistema. Se o sistema não for capaz de coordenar o religador, isto é reportado e o sistema aproxima o ajuste conforme o melhor caso que o sistema encontrar.

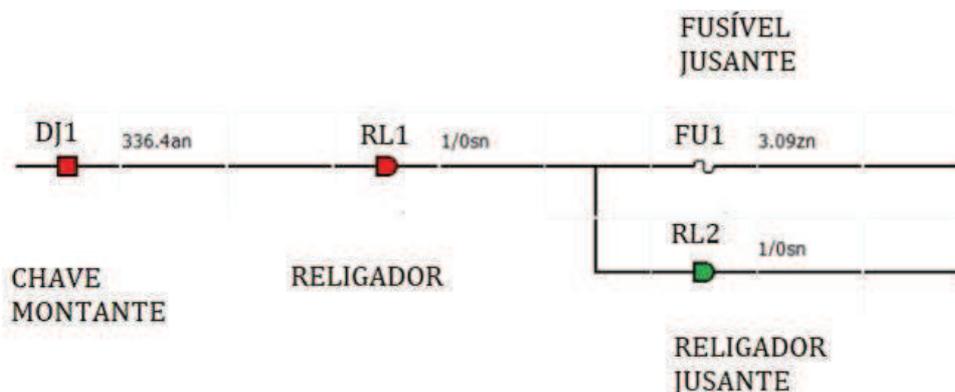
Figura 21 – Fluxograma do algoritmo proposto - Etapa 4



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a coordenação do religador ele deve considerar alguns pontos importantes. São utilizados para fim de definição da curva, apenas os dispositivos de proteção mais próximos a ele, sendo considerados o dispositivo de maior valor a jusante e o de menor valor a montante. Para compreender esse conceito utiliza-se o exemplo da figura 22, tomando como base o religador RL1 verifica-se que a chave DJ1 é montante a ele, ou seja, está antes do religador em referência a subestação. Entretanto os dispositivos FU1 e RL2 estão a jusante do religador pois encontram-se após o religador considerando como referência a subestação.

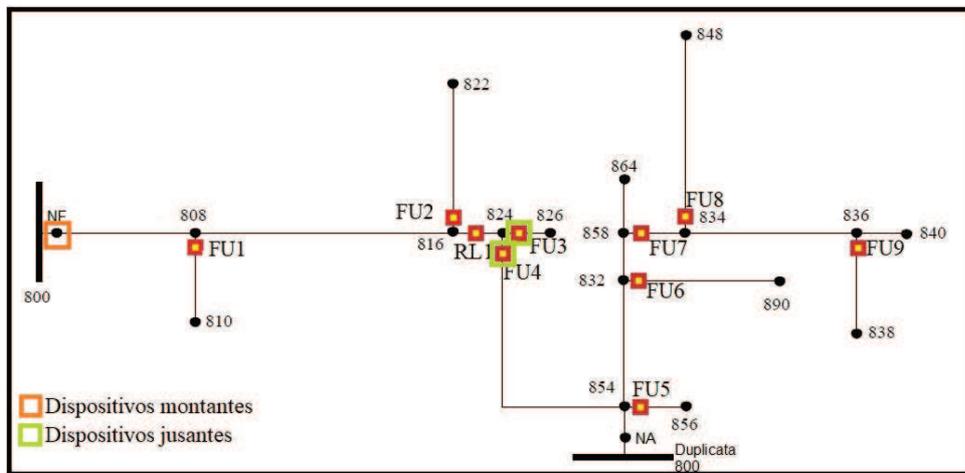
Figura 22 – Dispositivos montantes e Jusantes ao religador



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 23 é possível ver no grafo anteriormente apresentado os dispositivos que são montantes e os dispositivos jusantes ao religador. Os dispositivos não identificados, são aqueles que não se encontram diretamente conectados ao religador e não serão utilizados para a coordenação.

Figura 23 – Grafo da rede teste



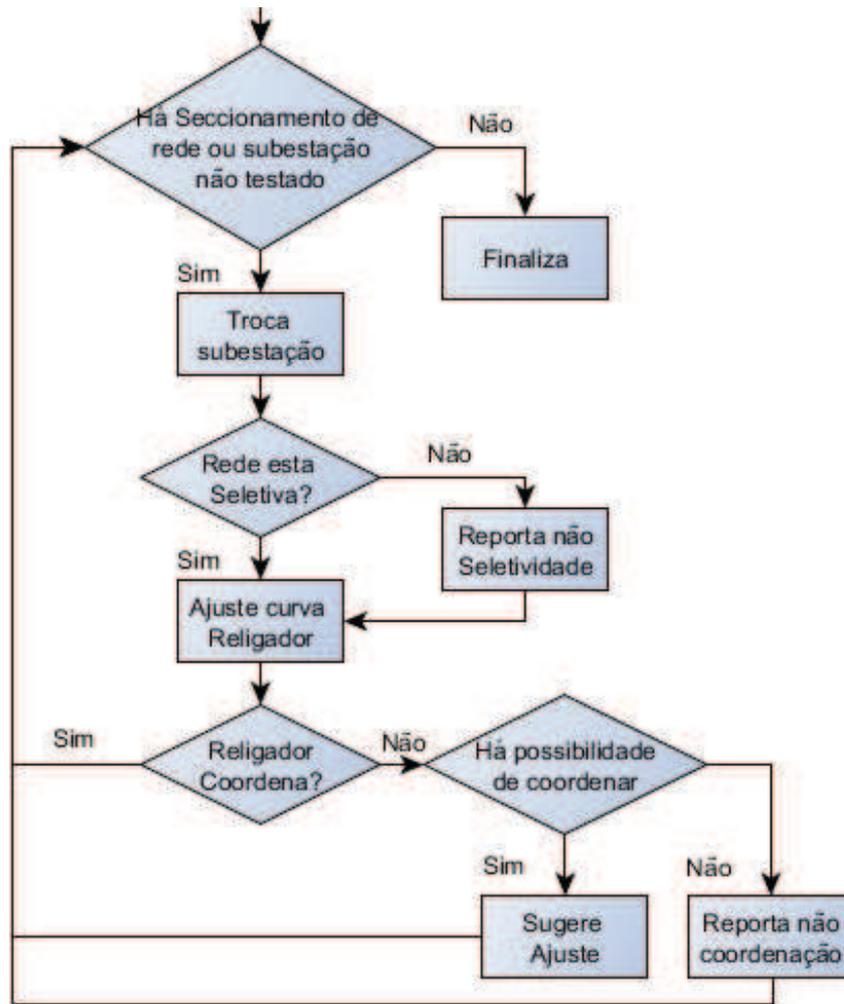
Fonte: Elaborado pelo autor

Para o limite de coordenação são utilizadas a menor e a maior corrente de curto circuito a qual o religador estará sujeito. É neste intervalo que se almeja alcançar a coordenação. Para a melhor coordenação, o sistema precisa primeiramente aplicar as equações 5 e 6 propostas por Comassetto (2008) e apresentadas na seção 2.4. É através dos limites que essas equações apresentam que é possível determinar a faixa em que o ajuste de corrente pode ser realizado no religador. Tendo todos os limites a qual o religador será submetido utiliza-se a ferramenta *SOLVER* do *software Excel* no método evolucionário para determina o ajuste ΔI (ajuste de corrente) e Δt (ajuste de tempo) no dispositivo religador.

Caso não seja encontrado uma coordenação possível, é realizada a modificação do dispositivo a montante, elevando-o para o próximo dispositivo existente na sequência de fusíveis do tipo-K. E novamente é realizada a tentativa de ajuste do religador. Se, após esgotadas as possibilidades de ajuste, persistir a descoordenação, é reportado que o dispositivo não coordena com a rede.

Com a finalização da etapa 4, tem-se o estudo de coordenação e seletividade do alimentador em análise para a condição normal de operação. Após este passo, torna-se possível realizar a avaliação do alimentador para a condição de manobra, alterando a condição de operação das chaves NA e NF, permitindo que todas as subestações ou condições de manobra sejam avaliadas. Isso o método propõe na etapa 5, figura 24. Para cada manobra são realizado os cálculos da rede pelo *OpenDSS* e é feita uma nova leitura da seletividade dos elementos presentes na rede. Caso não seja possível manter a seletividade em algum dos fluxos avaliados, o sistema os identifica, e o processo de ajuste do religador é novamente realizado para realizar a coordenação da rede e novamente sinaliza caso a coordenação não seja possível.

Figura 24 – Fluxograma do algoritmo proposto - Etapa 5



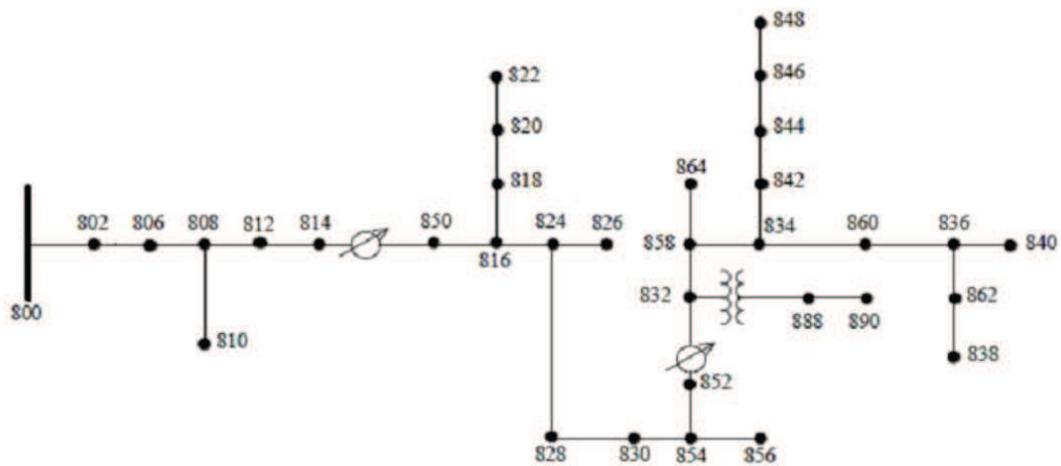
Fonte: Elaborado pelo autor

Ao final de cada manobra o algoritmo compara com o resultado anterior, e verifica se os dispositivos presentes na rede possibilitam a manobra realizada.

4 RESULTADOS

Para a realização dos testes na metodologia proposta foi utilizada a rede IEEE 34 barras (IEEE,) que pode ser vista na figura 25. O objetivo de utilizar uma rede padrão do IEEE é facilitar a reprodução do método apresentado e ter uma base para comparação com os demais métodos que possam a vir ser propostos. Entretanto, a rede IEEE 34 barras não apresenta os elementos de proteção e nem possibilidade de manobra. Para que isso fosse possível foram alocados nove fusíveis, um religador, duas seccionadoras e a subestação foi duplicada. Posicionados conforme tabela 3.

Figura 25 – Rede IEEE 34 barras original



Fonte: (FILHO, 2017)

Tabela 3 – Elementos adicionados a rede IEEE 34 barras

Elemento	Entre as barras
fusível 1	808 - 810
fusível 2	816 - 818
fusível 3	824 - 826
fusível 4	824 - 828
fusível 5	854 - 856
fusível 6	832 - 888 *
fusível 7	858 - 834
fusível 8	834 - 842
fusível 9	836 - 862
Religador	816 - 824
Seccionadora 1 NF	800 - 802
Seccionadora 2 NA	854SB - 854 **
Duplicata de subestação	854SB ***

Fonte: Elaborado pelo autor

Sendo ressaltado que os elementos estão sempre próximos a primeira barra apresentada e as seguintes observações devem ser consideradas:

* O fusível encontra-se a montante do transformador, tendo que atuar em caso de falha no equipamento;

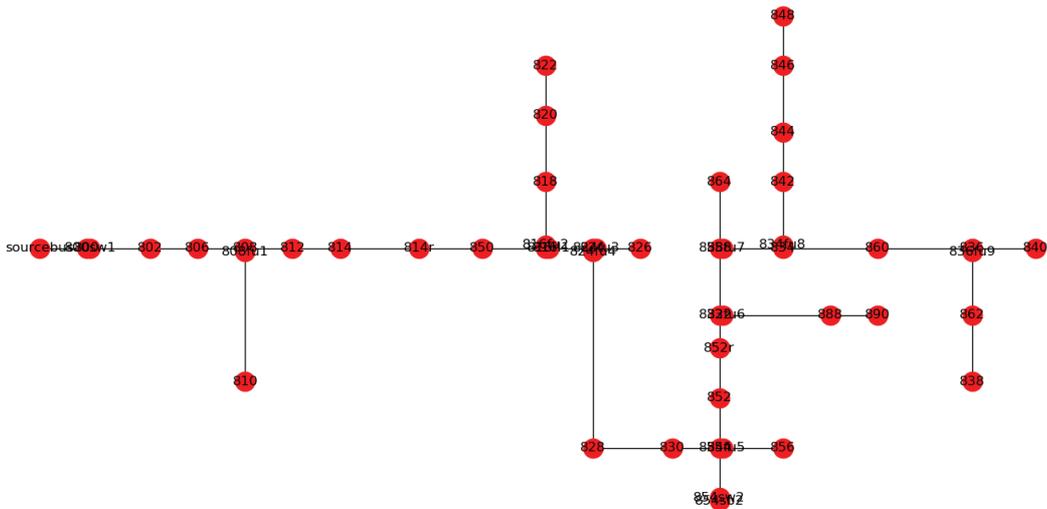
** O trecho entre 854 -854SB é idêntico ao trecho entre 800 e 802, simulando assim a barra de entrada da subestação;

*** A nova subestação entra na barra 854SB, mas permanece inativa na condição normal de operação pois tem estado NA.

4.1 Testes

Seguindo a metodologia aplica-se, os cálculos de corrente nominal da rede usando o *software OpenDSS* através do modo *daily*. Posteriormente aplica-se os cálculos de curto-circuito utilizando o modo *fault*. Com os dados é criado o primeiro grafo que pode ser visto na figura 26, contendo as seguintes informações presentes no Anexo A.

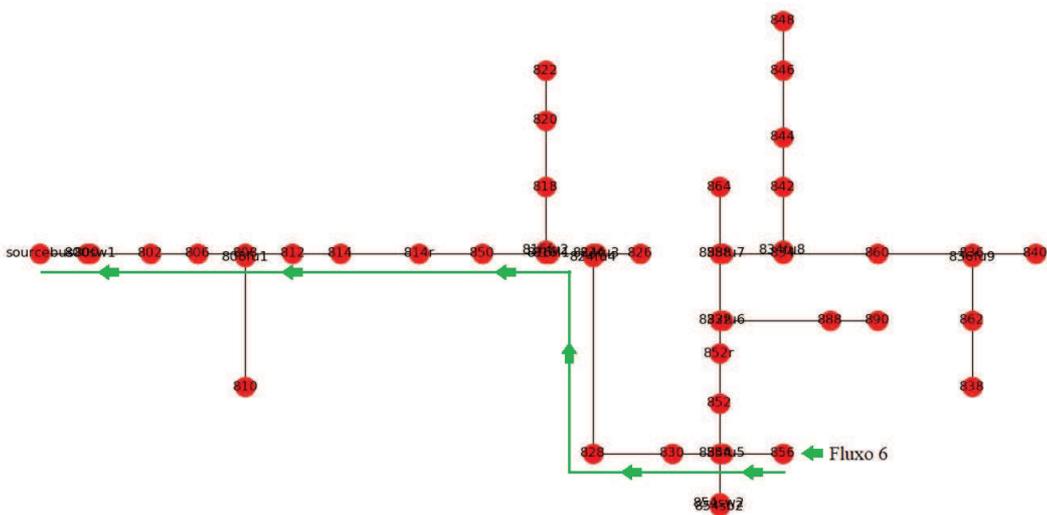
Figura 26 – Rede IEEE 34 barras original



Fonte: Elaborado pelo autor

Avaliando apenas os elementos presentes na sequência de análise denominada de fluxo 6, que pode ser vista na figura 27, tem-se todos elementos da tabela 4.

Figura 27 – Identificação do fluxo 6 na rede IEEE 34 barras original.



Fonte: Elaborado pelo autor

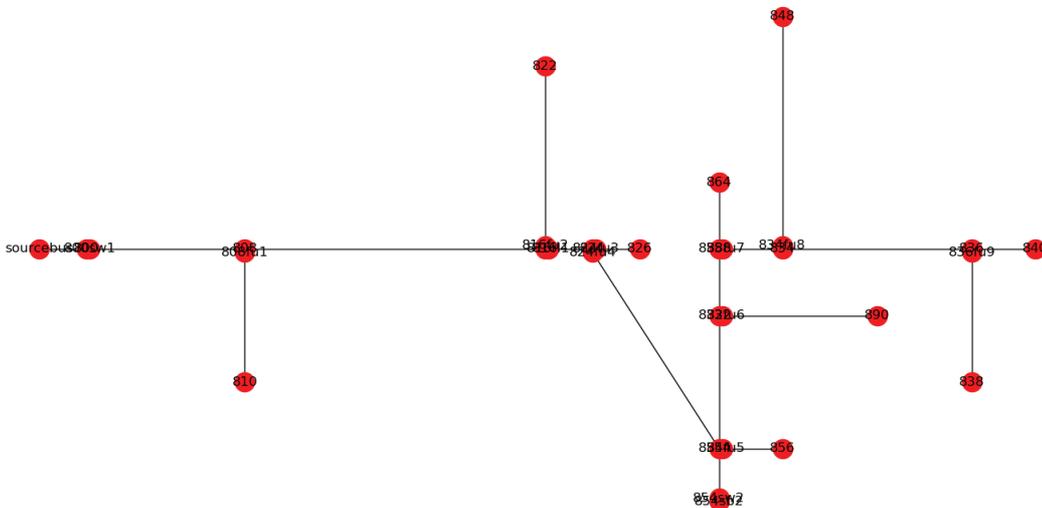
Tabela 4 – Itens presentes no fluxo 6.

Nó	Corrente Nominal	Corrente Curto		
	Módulo	Trifásica	Bifásica	Monofásica
SW1		2223495,00	1921384	2621893
802	51,185	21131,00	18529	16204
806	51,194	12688,00	11127	9721
808	51,366	1502,00	1319	1142
812	51,559	742,00	651	557
814	51,708	529,00	465	394
850	48,1	505,00	449	365
816	48,102	503,00	448	364
824	39,617	450,00	400	327
Fusível 4				
828	37,717	446,00	396	324
830	37,6	369,00	326	268
854	36,292	367,00	324	267
Fusível 5				
856	0,15576	222,00		222

Fonte: Elaborado pelo autor

Na sequência do método proposto, é realizada a simplificação da rede, onde agora são considerados apenas os nós fundamentais para a análise, e agora eles possuem uma tabela de informações diferente, pois os valores que antes eram determinados pela rede, são determinados pelos mínimos e máximos estabelecidos na simplificação. A rede simplificada pode ser vista na figura 28, e os valores de cada nó são apresentados no Anexo B.

Figura 28 – Rede simplificada



Fonte: Elaborado pelo autor

Posterior é verificado se há a existência de sequências com mais de três fusíveis. Neste caso não há nenhuma sequência, podendo seguir para a determinação dos fusíveis conforme cada fluxo possível. Para esta rede foram analisados dez fluxos, cada um referente a um extremo da rede. Na tabela 5 é possível ver um exemplo para o fluxo 6 de como foram definidos os fusíveis. O fluxo é apresentado na primeira coluna, sendo o início na primeira linha e a subestação na última. Para cada fusível é definido a máxima corrente nominal dos nós anteriores e a mínima corrente dos nós anteriores.

Tabela 5 – Exemplo do fluxo 6, com os valores para ele definidos de fusíveis do Tipo K

Fluxo 6	I Nominal (A)	ICC (A)			Fusível Escolhido Tipo K	Fator de Segurança
	Módulo	Trifásica	Bifásica	Monofásica		
856	0,15576	222		222		
fusível 5	0,15576	222	0	222	10	11,1
854	36,292	367	324	267		
fusível 4	36,292	367	324	267	25	5,34
824	39,617	450	400	327		
816	48,102	503	448	364		
808	51,366	1502	1319	1142		
SW1	51,366	450	400	327	40	4,0875

Fonte: Elaborado pelo autor

Após a execução de todos os fluxos, os resultados para cada fusível são comparados e são definidos os valores finais para cada posição, como pode ser visto na tabela 6, estes são os elementos definidos para a rede.

Tabela 6 – Valores dos Fusíveis escolhidos Tipo K calculados em cada fluxo e definição final do fusível a ser aplicado

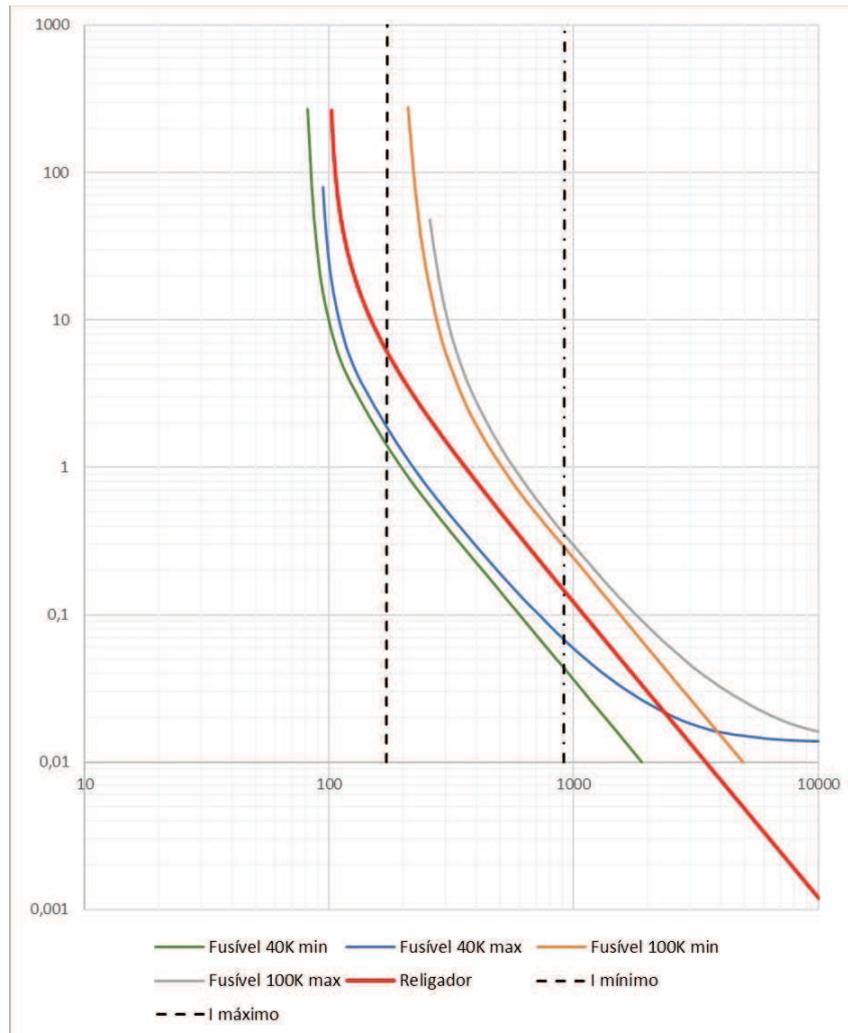
	Fluxo 1	Fluxo 2	Fluxo 3	Fluxo 4	Fluxo 5	Fluxo 6	Fluxo 7	Fluxo 8	Fluxo 9	Fluxo 10	fusível Escolhido Tipo K
fusível 1										10	10
fusível 2									10		10
fusível 3								10			10
fusível 4	40	40	40	25	25	25	25				40
fusível 5						10					10
fusível 6					10						10
fusível 7	25	25	25								25
fusível 8		10									10
fusível 9			10								10
SW1	65	65	65	40	40	40	40	40	40	40	65

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a definição da curva do religador deve-se considerar que o maior fusível a jusante dele é o fusível 4 do modelo 40 K. A sua montante, a subestação, tem proteção equivalente ao calculado para SW1, modelo 65 K.

Após a determinação dos valores de corrente de curto-circuito mínimo e máximo para o religador, são aplicados os cálculos apresentados por Comassetto (2008) e que estão no item 2.4. Com estes valores, determina-se uma posição inicial e posteriormente são realizados ajustes nas curvas em ΔI e Δt . O resultado pode ser visto na figura 29. Para que fosse possível realizar a coordenação da rede, o fusível da subestação foi ajustado para o modelo 100K.

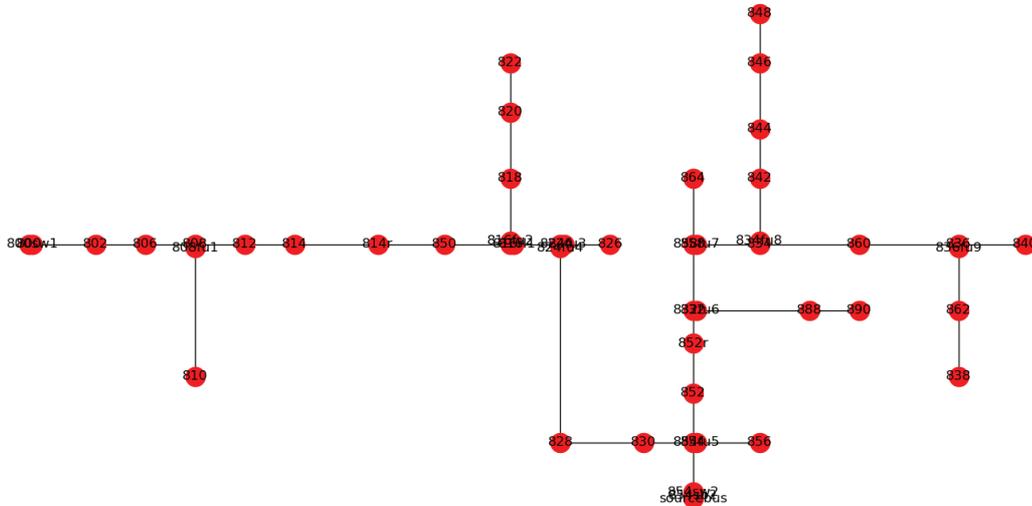
Figura 29 – Curva do religador considerando os ajustes realizados



Fonte: Elaborado pelo autor

Após as definições de ajuste da rede, a próxima análise a ser realizada é a manobra da rede abrindo a subestação original da rede IEEE de 34 barra, e fechando a seccionadora que adicionada na barra 854. Após a manobra tem-se os novos valores para o cálculo da rede, eles são apresentados no Anexo C, e o grafo representativo é visto na figura 30.

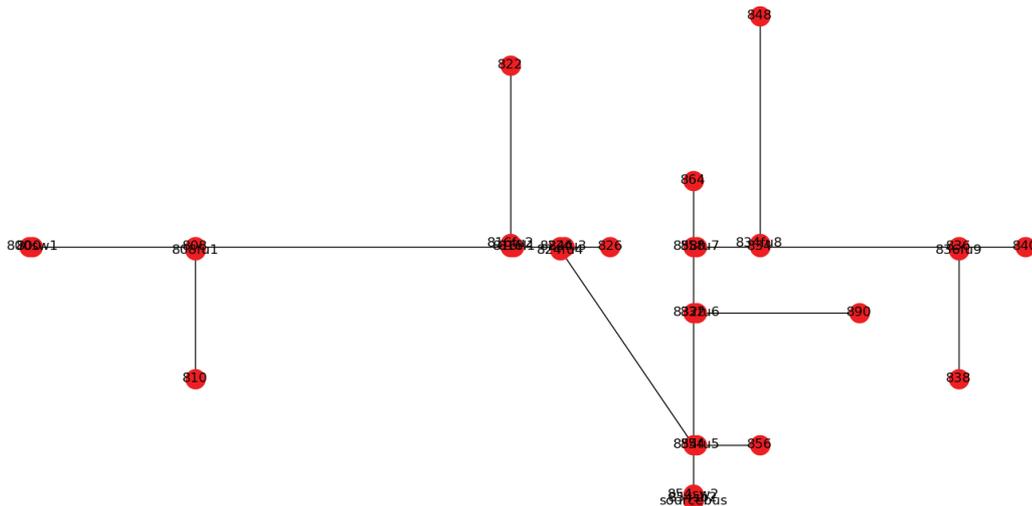
Figura 30 – Ajuste do religador após Manobra



Fonte: Elaborado pelo autor

Novamente é realizada a simplificação da rede, resultando na tabela presente no Anexo D e na figura 31. Mais uma vez o sistema não apresenta sequência maior a três fusíveis, e os cálculos são realizados para os novos fluxos existentes. Para poder comparar os resultado foram calculados quais seriam os fusíveis desejáveis para cada caso, e comparado aos valores já existentes em cada posição.

Figura 31 – Rede IEEE 34 barras simplificado após Manobra



Fonte: Elaborado pelo autor

São apresentados na tabela 7 os resultados dos fusíveis calculados para a situação de possível manobra, com o respectivo fusível dimensionado no cálculo anterior. Para esta situação, o ajuste do religador deve ser feito considerando seu fusível montante como o fusível 4 de 40 K.

Os fusíveis a jusante, fusível 1, 2 e 3 são todos do modelo 10 K. Assim, o ajuste da coordenação deve ser realizado considerando esses limites. É importante salientar que grande parte da rede não apresenta coordenação para o caso de manobra, já que o elemento religador está a montante de poucos elementos da rede e que é necessário a realização de seu ajuste, já que sua curva inicial considera como valor mínimo, os valores que agora são apresentados como máximo.

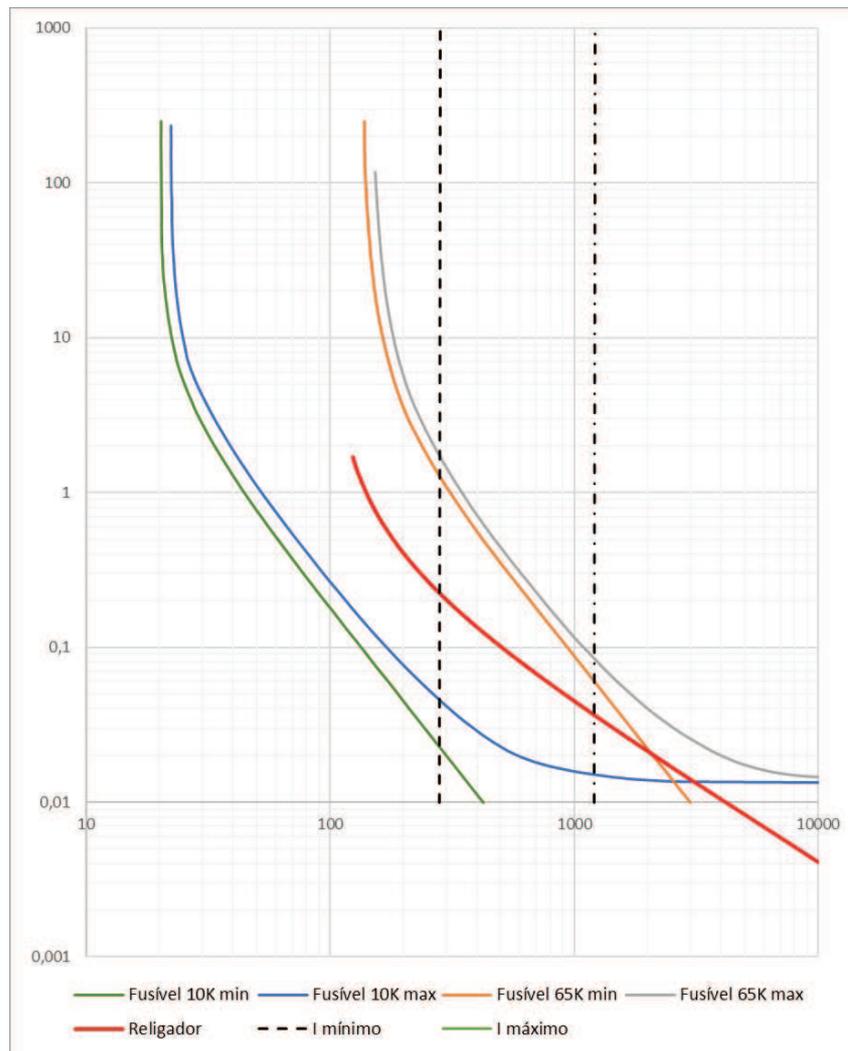
Tabela 7 – Comparação dos fusíveis calculados para o caso de manobra, com os fusíveis existentes na rede

	fusível calculado TipoK	fusível existente TipoK
fusível 1	10	10
fusível 2	10	10
fusível 3	10	10
fusível 4	15	40
fusível 5	10	10
fusível 6	10	10
fusível 7	25	25
fusível 8	10	10
fusível 9	10	10
SW2	40	

Fonte: Elaborado pelo autor

Aplica-se o cálculo no religador considerando como fusível a jusante fusível 1 de 10 K e fusível 2 de 10 K. A montante considera-se a chave com valor de 40 K. Determina-se novamente os valores de corrente de curto-circuito mínimo e máximo para o religador, são aplicados os cálculos e com estes valores, determina-se uma posição inicial e posteriormente são realizados ajustes nas curvas em ΔI e Δt , novamente fazendo uso da ferramenta SOLVER do *Excel*. Mas uma vez se fez necessário elevar na escala o valor do dispositivo de proteção a montante, para o valor de 65 K. O resultado pode ser visto na figura 32.

Figura 32 – Rede IEEE 34 barras após Manobra



Fonte: Elaborado pelo autor

Com a execução da única manobra existente da rede, após a definição que a rede mantém seletividade e o novo ajuste para coordenação, o algoritmo finaliza sua execução, consequentemente finalizando o teste, tendo a rede assim com seus elementos fusíveis determinados e os ajustes necessários do religador definidos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho objetivou desenvolver um método capaz de determinar os valores adequados de fusíveis e religadores para uma rede de distribuição, considerando os conceitos de coordenação e seletividade, e avaliando se ela permanece atendendo estes critérios após a realização de manobras na rede.

A metodologia proposta apresenta um modelo que, através da transformação de rede de distribuição em um sistema de grafos, possibilita a simplificação da rede diminuindo a quantidade de elementos a serem avaliados para a definição dos elementos de proteção, durante o desenvolvimento deste trabalho, não foram encontrados trabalhos que fizessem uso da mesma técnica.

A utilização de grafos, bem como o método de simplificação de redes apresentado na metodologia, possibilitam uma análise da rede usando menos elementos do que os normalmente utilizados nas análises convencionais. Ao aplicar em uma rede compacta, como o modelo IEEE 34 barras utilizado, o sistema já apresenta grande capacidade de simplificação, eliminando elementos que não apresentam interferência direta na definição dos elementos de proteção.

A previsão de manobra na rede e a avaliação de como o sistema se comporta nestes casos permitem que seja possível avaliar se a rede permanece coordenada e seletiva após a manobra e possibilita que os elementos religadores sejam ajustados para que o sistema continue coordenado.

O método de análise diferente dos comumente utilizados traz uma nova visão a avaliação de coordenação e seletividade, propondo o uso de uma técnica não comum e que mostra-se eficiente na determinação de elementos de proteção. Com isso conclui-se que os objetivos propostos foram alcançados com êxito, de modo que a método contribui para a área de proteção de sistemas de distribuição, propondo uma nova visão para este horizonte.

5.1 Trabalhos futuros

Para a realização de desenvolvimentos futuros, propõe-se:

- Desenvolvimento de ferramenta computacional para aplicação o método aqui apresentado;
- Aplicação do mesmo método em redes de grande portes;
- Utilização de técnicas de avaliação de grafos para desenvolvimentos de determinação de alocação de dispositivos de proteção considerando o impacto no consumidor;
- Aplicação do método considerando as correntes de curto monofásicos com impedâncias de falta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL, A. N. de E. E. . *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*. 2018. 01/1/2018. Citado na página 15.
- BERNARDON, D. *Novo método de reconfiguração das redes de distribuição a partir de algoritmos de tomadas de decisão multicriteriais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2007. Citado na página 23.
- BOASKI, M. A. F. et al. Methodology for coordination and selectivity of protection devices with reliability assessment. In: *2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- COMASSETTO, L. *Algoritmos Heurísticos de Otimização da Proteção e Manobra em Redes de Distribuição de Energia*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2008. Citado 12 vezes nas páginas 15, 17, 18, 19, 22, 24, 25, 26, 28, 34, 37 e 44.
- DELMAR. <<http://www.delmar.com.br>>. Acessado em: 29/07/18. Citado na página 18.
- DUARTE, T. *Redução do tempo de eliminação de faltas em barramentos interconectados em anéis múltiplos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, 2013. Citado na página 20.
- FILHO, H. R. *Impacto de diferentes filosofias de proteção nos indicadores de qualidade da energia elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 17, 26, 28 e 39.
- FILHO, J. *Instalações Elétricas Industriais (8a. Ed.)*. Grupo Gen - LTC, 2000. ISBN 9788521618430. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=_eN6AQAACAAJ>. Citado na página 20.
- FILHO, J.; MAMEDE, D. *Proteção de sistemas elétricos de potência*. [S.l.]: Grupo Gen - LTC, 2011. ISBN 9788521618843. Citado na página 16.
- GEDRA, R.; BARROS, B. D.; BORELLI, R. *Geração, Transmissão, Distribuição E Consumo De: ENERGIA ELETRICA*. 1. ed. São Paulo: ERICA, 2014. ISBN 9788536508207. Citado na página 15.
- GIGUER, S. *Proteção de sistemas de distribuição*. Sagra, 1988. ISBN 9788524101953. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=9rGPkgEACAAJ>>. Citado na página 24.
- IEEE, P. A. D. T. F. W. G. *Comprehensive Test Feeder*. Citado na página 39.
- LEDESMA, J. *Uma metodologia para análise da coordenação e seletividade da proteção de sistemas de distribuição*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 21, 22, 26 e 28.
- LEDESMA, J. J. G. et al. Algorithm for the analysis of coordination of protection for distribution systems. *IEEE Latin America Transactions*, v. 13, n. 7, p. 2168–2175, July 2015. ISSN 1548-0992. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

- MAIA, M. *Alocação de dispositivos de proteção em redes de distribuição primária de energia*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, USP, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 28.
- MARGEGAN, C. *Proteção e Seletividade em sistemas elétricos industriais*. 1. ed. São Paulo: Atitude Editorial, 2012. ISBN 978-85-65828-00-0. Citado na página 16.
- MILBRADT, R. *Novo método de estimação de estado multi-área com potencial aplicação em redes elétricas inteligentes*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2015. Citado na página 23.
- NASCIMENTO, J. *Alocação de religadores normalmente abertos em redes de distribuição de energia elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 19, 25 e 28.
- NEGRÃO, D. L. A. *metodologia para coordenação e seletividade da proteção direcional de sobrecorrente em sistemas de transmissão de energia elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, USP, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 28.
- PUJANTARA, R. F. et al. Protection coordination using zone selective interlocking method and neural network in ieee 9 bus plan. In: *2018 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 196–201. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 28.
- RAMOS, M. *Metodologia para análise da coordenação e seletividade de dispositivos de proteção durante reconfiguração de redes de distribuição*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 24, 26 e 28.
- SILVEIRA, J. *Sistema para seleção automática de grupos de ajustes em relés de proteção*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, UFC, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 28.

Anexos

ANEXO A – RESULTADO DOS CÁLCULOS INICIAIS DE REDE

Tabela 8 – Resultado dos calculos iniciais de rede

Nó	Arestas	Corrente Nominal (A)	Corrente Curto (A)		
			Trifásica	Bifásica	Monofásica
800	5;8	51,171	270619,00	233977	331959
SW1	4;5		222349,00	192138	262189
802	49;4	51,185	21131,00	18529	16204
806	48;49	51,194	12688,00	11127	9721
808	48;33;47;	51,366	1502,00	1319	1142
fusível 1	47;32		1317,00	1319	1143
810	32	0,6259	910,00		910
812	33;34	51,559	742,00	651	557
814	36;34	51,708	529,00	465	394
850	19;20	48,1	505,00	449	365
816	10;20;22;	48,102	503,00	448	364
fusível 2	21;22		503,00	448	364
RL1	9;10		503,00	448	364
818	28;21	13,012	355,00		355
820	28;39	11,908	213,00		213
822	39	5,341	190,00		190
824	9;29;30;	39,617	450,00	400	327
fusível 3	29;1		404,00	400	342
fusível 4	30;31		450,00	400	326
826	1	1,5554	333,00		333
828	15;31	37,717	446,00	396	324
830	15;13	37,6	369,00	326	268
854	13;14;2;11	36,292	367,00	324	267
fusível 5	35;14	0,12119	327,00	324	278
SW2	11;12		361,00	319	262
SB2	12				
856	35	0,15576	222,00		222
852	2;3	36,333	279,00	246	203
832	37;38;24;	33,798	258,00	229	187
fusível 6	6;37	11,702	258,00	229	187
888	6;7	70,042	844,00	733	677
890	7	70,051	432,00	377	318
858	24;25;26;	24,096	251,00	222	182
fusível 7	27;26		251,00	222	182
864	25	0,075151	180,00		180
834	41;42;27;	23,628	243,00	215	177
fusível 8	42;46		243,00	215	177
842	46;45	16,313	242,00	215	176
844	45;43	16,3	240,00	213	175
846	43;44	9,7782	235,00	208	171
848	44	9,7864	235,00	208	171
860	16;41	8,4957	240,00	213	175
836	16;17;18;	5,1907	236,00	209	172
fusível 9	40;17		236,00	209	172
840	18	1,5597	235,00	208	172
862	23;40	2,0886	236,00	209	172
838	23	1,0573	178,00		178

Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO B – RESULTADO PARA A REDE SIMPLIFICADA

Tabela 9 – Resultado para a rede simplificada

Nó	Arestas	Corrente Nominal Módulo	Corrente Curto		
			Trifásica	Bifásica	Monofásica
800	2;3	51,171	270619,00	233977	331959
SW1	1;2		222349,00	192138	262189
808	1;26;31;	51,366	1502,00	1319	1142
fusível 1	31;25		1317,00	1319	1143
810	25	0,6259	910,00		910
816	26;5;15;	48,102	503,00	448	364
fusível 2	15;16		503,00	448	364
RL1	4;5		503,00	448	364
822	16	5,341	190,00		190
824	4;22;24;	39,617	450,00	400	327
fusível 3	22;23		404,00	400	342
fusível 4	24;10		450,00	400	326
826	23	1,5554	333,00		333
854	8;9;10;6	36,292	367,00	324	267
fusível 5	9;11	0,12119	327,00	324	278
SW2	6;7		361,00	319	262
856	11	0,15576	222,00		222
832	28;8;18;	33,798	258,00	229	187
fusível 6	27;28	11,702	258,00	229	187
890	27	70,051	432,00	377	318
858	18;19;20;	24,096	251,00	222	182
fusível 7	21;20		251,00	222	182
864	19	0,075151	180,00		180
834	29;13;21;	23,628	243,00	215	177
fusível 8	29;30		243,00	215	177
848	30	9,7864	235,00	208	171
836	12;13;14;	5,1907	236,00	209	172
fusível 9	12;17		236,00	209	172
840	14	1,5597	235,00	208	172
838	17	1,0573	178,00		178

Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO C – CÁLCULOS DA REDE IEEE 34 BARRAS APÓS MANOBRA

Tabela 10 – Cálculos da rede IEEE 34 barras após Manobra

Nó	Arestas	Corrente Nominal	Corrente Curto		
		Módulo	Trifásica	Bifásica	Monofásica
800	5		363,00	318	275
SW1	4;5		363,00	318	275
802	49;4	0,045465	369,00	323	280
806	48;49	1,1339	374,00	327	284
808	48;33;47;	2,182	483,00	423	371
fusível 1	47;32		418,00	423	378
810	32	0,62343	347,00		347
812	33;34	3,3402	731,00	640	578
814	36;34	3,3942	1229,00	1076	994
850	19;20	3,2913	1201,00	1051	969
816	10;20;22;	3,2923	1212,00	1061	978
fusível 2	21;22		1212,00	1060	978
RL1	9;10		1212,00	1061	978
818	28;21	12,863	917,00		917
820	28;39	11,739	333,00		333
822	39	5,245	281,00		281
824	9;29;30;	12,072	1733,00	1518	1397
fusível 3	29;1		1490,00	1518	1398
fusível 4	30;31		1734,00	1518	1397
826	1	1,5554	1200,00		1200
828	15;31	12,066	1797,00	1574	1448
830	15;13	12,195	16722,00	14659	12959
854	13;14;2;11	48,487	21131,00	18529	16202
fusível 5	35;14		18394,00	18501	16190
SW2	11;12		222349,00	192138	262189
SB2	8;12	48,475	2706194,00		
856	35	0,14836	1012,00		1012
852	2;3	37,463	1063,00	931	844
832	37;38;24;	34,85	982,00	863	776
fusível 6	6;37		982,00	863	776
888	6;7	69,934	1375,00	1189	1259
890	7	69,944	557,00	486	430
858	24;25;26;	25,186	885,00	777	700
fusível 7	27;26		885,00	777	700
864	25	0,077339	671,00		671
834	41;42;27;	24,707	791,00	695	626
fusível 8	42;46		791,00	694	626
842	46;45	17,032	787,00	691	623
844	45;43	17,018	768,00	674	608
846	43;44	10,405	721,00	633	571
848	44	10,395	714,00	627	566
860	16;41	8,7202	763,00	670	605
836	16;17;18;	5,1926	728,00	639	578
fusível 9	40;17		728,00	639	578
840	18	1,5353	718,00	630	569
862	23;40	2,1112	725,00	636	575
838	23	1,0692	538,00		538

Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO D – RESULTADOS PARA A REDE SIMPLIFICADA APÓS MANOBRA

Tabela 11 – Resultados para a rede simplificada após Manobra

Nó	Arestas	Corrente Nominal (A)	Corrente Curto (A)		
			Monofásica		
Módulo	Trifásica	Bifásica			
SW1	1;2		363,00	318	275
808	1;26;31;	2,182	483,00	423	371
fusível 1	31;25	0	418,00	423	378
810	25	0,62343	347,00		347
816	26;5;15;	3,2923	1212,00	1061	978
fusível 2	15;16	0	1212,00	1060	978
RL1	4;5	0	1212,00	1061	978
822	16	5,245	281,00		281
824	4;22;24;	12,072	1733,00	1518	1397
fusível 3	22;23	0	1490,00	1518	1398
fusível 4	24;10	0	1734,00	1518	1397
826	23	1,5554	1200,00		1200
854	8;9;10;6	48,487	21131,00	18529	16202
fusível 5	9;11	0	18394,00	18501	16190
SW2	6;7	0	222349,00	192138	262189
856	11	0,14836	1012,00		1012
832	28;8;18;	34,85	982,00	863	776
fusível 6	27;28	0	982,00	863	776
890	27	69,944	557,00	486	430
858	18;19;20;	25,186	885,00	777	700
fusível 7	21;20	0	885,00	777	700
864	19	0,077339	671,00		671
834	29;13;21;	24,707	791,00	695	626
fusível 8	29;30	0	791,00	694	626
848	30	10,395	714,00	627	566
836	12;13;14;	5,1926	728,00	639	578
fusível 9	12;17	0	728,00	639	578
840	14	1,5353	718,00	630	569
838	17	1,0692	538,00		538

Fonte: Elaborado pelo autor