

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE  
LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA PARA  
MINIMIZAR A INFLUÊNCIA DE FONTES DE  
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA PROTEÇÃO DE  
SISTEMAS ELÉTRICOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Fernando Guilherme Kaehler Guarda**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**

# **ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA PARA MINIMIZAR A INFLUÊNCIA DE FONTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS**

por

**Fernando Guilherme Kaehler Guarda**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

**Orientador: Prof. Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng.**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE LIMITADORES DE  
CORRENTE DE FALTA PARA MINIMIZAR A INFLUÊNCIA DE  
FONTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA PROTEÇÃO DE  
SISTEMAS ELÉTRICOS**

elaborada por  
**Fernando Guilherme Kaehler Guarda**

como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Elétrica**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Ghendy Cardoso Junior, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**Ubiratan Holanda Bezerra, Dr. (UFPA)**

---

**Lenois Mariotto, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 27 de Julho de 2012.

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Guarda, Fernando Guilherme Kaehler

Alocação e Dimensionamento de Limitadores de Corrente de Falta para Minimizar a Influência de Fontes de Geração Distribuída na Proteção de Sistemas Elétricos / Fernando Guilherme Kaehler Guarda.-2012.

91 p.; 30cm

Orientador: Ghendy Cardoso Junior

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2012

1. Geração Distribuída 2. Proteção de sistemas elétricos  
3. Limitadores de corrente de falta 4. Algoritmos Genéticos I. Cardoso Junior, Ghendy II. Título.

---

©2012

Todos os direitos autorais reservados a Fernando Guilherme Kaehler Guarda. A reprodução de partes ou de todo este trabalho só poderá ser feita mediante autorização do autor.

Endereço: Av. Borges de Medeiros, 761, Bairro Nsa. Sra. Do Rosário, Santa Maria, RS, 97010-081

Fone: (+55) 55 91650428; E-mail: [fernandokg@gmail.com](mailto:fernandokg@gmail.com)

---

Dedico esse trabalho às duas pessoas mais importantes da minha vida: Meu pai, Rubem e minha mãe, Stela. Vocês são os pilares que me sustentam. Obrigado de coração.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus por tudo que me é proporcionado.

Ao professor Ghendy Cardoso Jr. pela excelente orientação e constante suporte e questionamento, o que me levou a sempre buscar conhecimento e crescer como profissional e pessoa.

Agradeço também ao meu pai Rubem e minha mãe Stela, por serem o que são e me darem todo o suporte nessa jornada. Sem eles eu não seria nada.

A minha avó Celina, por ser uma pessoa incrível a quem eu admiro muito e com quem eu aprendo cada dia mais.

A minha irmã Luciana tanto pelas brigas quanto pelas risadas.

À minha namorada Ananda, não só pelo amor, mas por ser um exemplo de pessoa e de profissional, a qual desejo ter para sempre na minha vida.

Ao amigo Nelson Knak Neto pela amizade, apoio e valiosas conversas, sejam elas técnicas ou não.

Aos colegas de CEEMA, em especial ao amigo Chrystian Dalla Lana da Silva que me ajudou em diversos momentos de falta de inspiração, e também ao amigo Adriano Peres de Moraes que me proporcionou momentos de incrível engrandecimento profissional.

Agradeço também aos meus amigos, Henrique Dallmeyer, Felipe de Gregori, Nicholas Fonseca e Leonardo Tonetto pelo companheirismo e por fornecer uma válvula de escape na loucura que é o mundo da Engenharia Elétrica.

Gostaria de agradecer à Universidade Federal de Santa Maria por me proporcionar um ensino de qualidade e as melhores condições para meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço também ao CNPq pelo fomento à pesquisa.

*"No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço e à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz."*

*Ayrton Senna*

## **RESUMO**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Santa Maria

### **ALOCAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA PARA MINIMIZAR A INFLUÊNCIA DE FONTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS**

Autor: Fernando Guilherme Kaehler Guarda  
Orientadora: Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng.  
Data e Local da defesa: Santa Maria, 27 de Julho de 2012.

Essa dissertação apresenta o desenvolvimento de metodologias que visam reduzir o efeito da inserção de fontes de Geração Distribuída na proteção de sistemas elétricos de potência. Primeiramente foram analisados problemas associados à inserção das fontes de Geração Distribuída em sistemas elétricos de potência, focando na influência dessas fontes na proteção desses sistemas. Considerando o problema associado ao aumento da corrente de curto-circuito e sua consequente influência nos relés de sobrecorrente, desenvolve-se uma metodologia que visa restaurar a coordenação desses dispositivos através da inserção de limitadores de corrente de falta juntamente com as fontes de GD instaladas. Em um segundo momento desenvolveu-se um método para a alocação dos limitadores de corrente de falta em sistemas de distribuição para que a inserção das fontes de GD não cause uma descoordenação entre elos-fusíveis e religadores. Essa metodologia faz uso de algoritmos genéticos e visa determinar o local de instalação e o dimensionamento dos limitadores. Verifica-se a coordenação entre os elos fusíveis e também entre elos e religador, e se necessário, sugere-se para substituição de equipamentos superados. As metodologias desenvolvidas têm como objetivo a minimização dos custos de limitadores e a substituição de equipamentos de forma que os limitadores são alocados considerando-se não só o local e dimensionamento ótimos, como também o número de dispositivos a serem substituídos.

Palavras-chave: Proteção de sistemas elétricos, Geração distribuída, limitadores de corrente de falta, algoritmos genéticos



## **ABSTRACT**

Master of Science Dissertation  
Electrical Engineering Graduation Program  
Federal University of Santa Maria

### **FAULT CURRENT LIMITER ALLOCATION AND SIZING TO MINIMIZE DISTRIBUTED GENERATION INFLUENCE IN ELECTRIC POWER SYSTEMS**

Author: Fernando Guilherme Kaehler Guarda

Advisor: Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng.

Date e Local of Presentation: Santa Maria, 27 de Julho de 2012.

This dissertation presents the development of methodologies that aim to reduce the effect of distributed generation sources in the protection of electric power systems. First were analyzed problems associated with integration of Distributed Generation sources in electric power systems, focusing on the influence of these sources in protecting these systems. Considering the problem associated with increased short circuit current and its resulting influence on overcurrent, it's developed a methodology that aims to restore the coordination of such devices by inserting fault current limiters together with sources of GD installed. In a second step is developed a method for allocation of fault current limiters in distribution systems for which insertion of source GD does not cause a miscoordination between fuses and reclosers. This methodology uses genetic algorithms and aims to determine the installation location and sizing of limiters. Coordination between the fuses and also between these and reclosers is verified, and if necessary, it is suggested to replace equipment that was overloaded. The developed methodologies aimed at minimizing the cost of replacing equipment and limiters so that the limiters are allocated considering not only the optimal location and sizing, as well as the number of devices to be replaced.

Keywords: Power Systems Protection, Distributed Generation, Fault Current Limiters, Genetic Algorithms.

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 Considerações Gerais .....	13
1.2 Objetivos .....	13
1.3 Motivação .....	14
1.4 Revisão Bibliográfica .....	15
1.5 Estrutura da Dissertação .....	17
<b>2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA</b> .....	<b>18</b>
2.1 Considerações Gerais .....	18
2.2 Geração Distribuída .....	18
2.3 Vantagens da Geração Distribuída .....	19
2.4 Desvantagens da Geração Distribuída .....	20
2.5 Considerações Finais .....	21
<b>3 PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS COM FONTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA</b> .....	<b>23</b>
3.1 Considerações Gerais .....	23
3.2 Impactos Nos Níveis De Curto-Circuito E Ajustes De Proteção .....	23
3.3 Impactos Na Qualidade De Energia .....	25
3.4 Impactos Do Ilhamento .....	26
3.5 Impactos Nos Índices De Confiabilidade .....	27
3.6 Impacto Na Estabilidade Dos Sistemas De Potência .....	28
3.6.1 Impacto Causado pela Mudança dos Níveis de Penetração .....	28
3.6.2 Impacto Causado Pelos Diferentes Tipos de Geração .....	29
3.7 Considerações Finais .....	31
<b>4 Limitadores De Corrente De Falta</b> .....	<b>32</b>
4.1 Considerações Gerais .....	32
4.2 Forma de operação dos limitadores de corrente de falta .....	32

4.3 Limitador de corrente de estado sólido .....	33
4.4 Limitador de corrente supercondutor.....	35
4.5 Limitador de corrente magnético .....	36
4.6 Considerações finais .....	38
<b>5 RESTAURAÇÃO DA COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE DIRECIONAIS UTILIZANDO LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA .....</b>	<b>39</b>
5.1 Considerações Gerais .....	39
5.2 Algoritmos genéticos .....	39
5.3 Coordenação dos relés de sobrecorrente direcionais sem GD .....	43
5.4 Restauração da coordenação original dos relés de sobrecorrente .....	46
5.5 Aplicação da metodologia proposta .....	47
5.6 Resultados obtidos.....	50
5.7 Considerações Gerais .....	52
<b>6 ALOCAÇÃO ÓTIMA DE LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA PARA SOLUCIONAR O PROBLEMA DE DESCOORDENAÇÃO RELIGADOR – FUSÍVEL EM SISTEMAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA .....</b>	<b>54</b>
6.1 Considerações Gerais .....	54
6.2 Fusíveis .....	54
6.3 Religadores .....	56
6.3.1 Ajuste do “ <i>pick-up</i> ” de fase do religador .....	58
6.4 Coordenação religador-fusível com geração distribuída .....	59
6.5 Metodologia para alocação de limitadores de corrente .....	62
6.5.1 Codificação do problema .....	63
6.5.2 Função de aptidão.....	63
6.5.3 População inicial .....	64
6.5.4 Funcionamento do algoritmo proposto .....	64
6.5.5 Restrições impostas ao algoritmo genético .....	66
6.6 Resultados obtidos.....	66

6.7 Considerações finais .....	71
<b>7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>72</b>
7.1 Conclusões.....	72
7.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	73
8 Referência Bibliográficas.....	74
ANEXO A .....	79
ANEXO B .....	85
ANEXO C .....	87
ANEXO D .....	89
ANEXO E .....	91
ANEXO F.....	92
ANEXO G.....	94

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 Considerações gerais**

Com o crescimento da demanda de energia elétrica, é cada vez mais evidente a necessidade de diversificação da matriz energética. O progresso da economia também tem destacado essa necessidade, visto que o consumo energético é um indicador de crescimento econômico. Acomodar as instalações de fontes de Geração Distribuída (GD) tornou-se um problema considerável, levando-se em conta o panorama energético atual, onde grande parte do sistema elétrico é considerado obsoleto. Essas fontes são responsáveis por fornecer diversos efeitos positivos, causando melhorias na operação e no gerenciamento de sistemas elétricos de potência. Entretanto, devem ser considerados os efeitos negativos causados pelas fontes de GD para que não haja uma interação prejudicial entre estas e a rede em que são instaladas.

Sendo assim, o estudo de técnicas para a minimização dos efeitos negativos das fontes de GD, como influência dessas na proteção e nas correntes de curto-circuito, é primordial para garantir o sucesso na diversificação da matriz energética mundial.

## **1.2 Objetivos**

Neste trabalho, são propostas duas metodologias destinadas a reduzir o efeito da GD nos esquemas de proteção de redes elétricas: A primeira – denominada Restauração da Coordenação – propõe um método para garantir a manutenção da coordenação original dos relés de sobrecorrente do sistema quando esse é sujeito a inserção de fontes de GD. A segunda propõe uma solução ao problema da coordenação elo-religador em sistemas de distribuição sujeitos a influência de fontes de GD.

O objetivo da primeira metodologia consiste na instalação de dispositivos limitadores de corrente de falta, em conjunto com a fonte de GD, de modo a diminuir

os efeitos da contribuição dessas à corrente de curto-circuito e assim, manter as configurações originais dos relés de sobrecorrente.

Já na segunda, o objetivo é desenvolver um algoritmo genético de modo a encontrar os locais e valores ótimos de limitadores de corrente a serem instalados em um sistema de distribuição com presença de fontes de GD, considerando a coordenação entre elo-religador, e buscando minimizar o custo de instalação e modificação no sistema de distribuição.

### **1.3 Motivação**

As tecnologias aplicadas na fabricação de fontes de GD vêm se tornando cada vez mais acessíveis, o número de instalações dessas fontes tem crescido exponencialmente. Com a criação de programas de incentivo às fontes alternativas de energia, os governos têm lidado com um aumento de produtores independentes e autoprodutores de energia. Contando com uma geração própria, muitas vezes esses produtores de energia suprem sua própria demanda e desejam vender o excedente gerado, conectando-se à rede. Essa conexão acaba afetando o sistema elétrico em que se encontra e cabe as empresas de energia se adaptarem a essa nova realidade.

Com isso, intensa pesquisa vem sendo desenvolvida com o intuito de adequar a proteção dos sistemas elétricos existentes quando da inserção de fontes de GD.

Muitas das técnicas propostas envolvem modificações físicas nos sistemas, onde são instaladas as fontes de GD, provocando a necessidade de um alto investimento por parte das empresas responsáveis pelo gerenciamento dos sistemas elétricos.

Outras técnicas envolvem um custo inicial muito alto, o que acaba se tornando proibitivo, visto que os métodos não oferecem uma garantia de funcionalidade, pois a tecnologia aplicada ainda não possui maturidade.

Sendo assim, é justificado o desenvolvimento de uma metodologia que procure ao mesmo tempo reduzir ao máximo qualquer tipo de alteração na configuração de redes e ajustes de equipamentos, mas também, permitir que os

sistemas sujeitos a presença de fontes de GD aproveitem os benefícios trazidos pela sua instalação.

## 1.4 Revisão bibliográfica

Diversos trabalhos são encontrados na literatura onde autores buscam solucionar ou reduzir os efeitos negativos da inserção de fontes de GD no sistema de proteção. No geral, são utilizadas técnicas de inteligência computacional que buscam realizar alterações físicas nos sistemas sob influência da GD para acomodar essas fontes. Essa mesma inteligência computacional também é utilizada para realizar alterações nos ajustes dos dispositivos de proteção e também para a mudança dos locais de instalação desses dispositivos.

HADJSAID et al. (1999) mostra, através de um exemplo simples, o efeito das fontes de GD nas correntes de falta detectadas pelos dispositivos de proteção. Nesse trabalho é sugerida uma retificação da coordenação da proteção para cada inserção de GD. Entretanto, essa metodologia só se mostra funcional para uma penetração de GD que supra até 20% da carga do sistema.

Já em LIJUN et al. (2011), um método de proteção inteligente é proposto. Ele faz uso da norma IEEE 1588, que define um protocolo de precisão de tempo (*Precision Time Protocol - PTP*) para medição e controle das redes, que supre as necessidades de sincronização de dados após a inserção de fontes de GD, utilizando para isso uma tecnologia de GPS de precisão de tempo PMU (*Phasor Measurement Unit – Unidade de Medição Fasorial*) para obtenção e cálculo dos dados. Para isso é utilizado um sistema multi-agente que faz uso de inteligência computacional para então desenvolver um sistema de proteção que abranja as fontes de GD. Porém, a metodologia implica na construção de um sistema de proteção por completo, o que foge do intuito de acomodar as fontes de GD causando o mínimo de alteração nos já existentes.

Em BARAN e EL-MARKABI (2004), é demonstrada a extensão da deterioração nos ajustes de relés de sobrecorrente e uma metodologia para restaurar o desempenho dos relés. O método depende de uma estimativa da corrente de falta, ao mesmo tempo em que leva em consideração o local de instalação da fonte de GD e sua contribuição para a corrente de curto-circuito. É

proposto então realizar ajustes em todos os relés do sistema para considerar essa mudança na corrente de falta.

GIRGIS E BRAHMA (2001) e BRAHMA E GIRGIS (2004) discutem a coordenação elo-religador na presença de GD. Religador e elo são coordenados para uma falta em um ramal lateral sem considerar a GD. Conectando a GD entre religador e elo-fusível, para uma falta em um ramal lateral, passará pelo elo uma corrente de falta maior que no religador. Isto resulta em uma perda de coordenação entre os dispositivos. Nestes dois trabalhos são sugeridos métodos que exigem a troca dos religadores originais por dispositivos microcontrolados, para que, durante a atuação de um religador na sua curva rápida, as fontes de GD à jusante do religador sejam desconectadas antes do primeiro religamento, buscando evitar uma reconexão de GD sem a devida sincronização. Apesar de ser este o procedimento definido pela norma IEEE 1547 (BASSO e FRIEDMAN, 2003), desconectar todas as GD do sistema toda vez que uma falta temporária ocorre reduzirá consideravelmente a confiabilidade do sistema.

Em BRAHMA E GIRGIS (2004) é proposto um esquema adaptativo que independe do tamanho, número e localização das fontes de GD em um sistema de distribuição. O método proposto neste trabalho é adaptativo tanto para modificações temporárias quanto permanentes nos sistemas de distribuição. A perda de carga causada por uma falta permanente será reduzida em muitos casos após a implantação do método desenvolvido. Porém, este esquema adaptativo não funcionará satisfatoriamente em sistemas com uma penetração de GD dentre 5 a 15% da carga total do sistema.

Em ZEINELDIN e XIAO (2011) é desenvolvido um método para o dimensionamento de dispositivos Limitadores de Corrente de Falta (LCF), onde é utilizado o algoritmo enxame de partículas para encontrar o dimensionamento ótimo destes dispositivos. O objetivo nesse trabalho é a minimização das alterações nas correntes de falta decorrentes da inserção de fontes de GD na rede, mas não é considerada a alocação ótima desses dispositivos.

Já em SHAHRIARI et al. essa alocação é considerada. Fazendo uso de Algoritmos Genéticos (AG) é realizada a alocação e dimensionamento de LCF de Estado Sólido de modo a minimizar as correntes de faltas e contribuições das fontes de GD.



Em SEO et al. (2010) é desenvolvido um algoritmo que visa recuperar as correntes de falta considerando o tempo em que os LCF saiam do estado de limitação e retornem ao funcionamento normal (tempo de restabelecimento). Entretanto, LCF supercondutores não possuem uma maturidade tecnológica e isso os faz ter um custo muito alto, tornando essa metodologia onerosa para as empresas de energia.

## **1.5 Estrutura da dissertação**

No Capítulo 2 desse trabalho é apresentada uma pequena introdução sobre Geração Distribuída, o cenário atual desse tipo de geração, suas vantagens e desvantagens.

Por outro lado, o Capítulo 3 é focado nos impactos causados pela inserção de fontes de GD em sistemas elétricos, especificando e explanando cada um deles de modo a fornecer um melhor entendimento de cada impacto causado por essas fontes.

O capítulo 4 é dedicado aos dispositivos e metodologias destinadas a limitar a corrente de falta (LCF). Os diferentes tipos de dispositivos serão expostos e terão seu funcionamento detalhado, focando no limitador de corrente de falta de estado sólido, dispositivo utilizado no desenvolvimento desse trabalho.

No Capítulo 5 será abordada a metodologia de Restauração da Coordenação de Relés de Sobrecorrente em um sistema elétrico, considerando a inserção de fontes de GD. Este capítulo conterà também uma explanação sobre Algoritmos Genéticos (AG) e como estes foram utilizados para determinar a coordenação original dos relés de sobrecorrente.

O Capítulo 6 é dedicado à metodologia de alocação e dimensionamento de LCF, que tem o intuito de reduzir os custos referentes à instalação desses dispositivos, como também, de quaisquer alterações necessárias em elos ou religadores para manutenção da coordenação destes em um sistema de distribuição de energia com presença de fontes de GD. Os resultados e eficácia da metodologia serão demonstrados através dos coordenogramas anteriores à inserção das fontes de GD e após a inserção destas.

## **2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

### **2.1 Considerações gerais**

Neste capítulo serão apresentados conceitos relacionados ao cenário energético brasileiro, dando ênfase à utilização de fontes de geração distribuída em sistemas elétricos de potência. A segunda seção deste capítulo apresentará uma definição de fontes de geração distribuída e como o cenário brasileiro está situado em relação a esse tipo de geração. Na terceira seção serão apresentadas as vantagens relacionadas à conexão dessas fontes em sistemas elétricos existentes e uma discussão acerca de aspectos econômicos e técnicos. A quarta seção focará nas desvantagens que acompanham essa interação entre geração distribuída e sistema elétrico existente.

### **2.2 Geração distribuída**

Com o crescimento e aceleração da economia brasileira e mundial, entra em contexto a questão energética. Com a elaboração da Lei nº 10.438, de 26/02/2002, foi criado o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), e com ele a questão da diversificação da matriz energética ficou evidente. Essa diversificação busca uma maior segurança no fornecimento de energia existente e também uma valorização dos potenciais energéticos distintos de cada região, promovendo assim a criação de empregos, a capacitação, formação de mão de obra, visando uma garantia de confiabilidade de fornecimento de energia elétrica.

Outro fator contribuinte para a diversificação da matriz energética é a questão ambiental. A resolução ANEEL nº 395/98, artigo 3º diz que os interessados em obter concessão para exploração de aproveitamentos hidrelétricos com potência superior a 30 MW, deverão apresentar os estudos de viabilidade ou o projeto básico e solicitar sua inclusão no programa de licitações de concessões. Ou seja, há cada vez mais dificuldades para a instalação de grandes usinas geradoras de energia, o

que permite que a Geração Distribuída muitas vezes desponte como uma solução viável para demanda de energia em determinada região.

A expressão “geração distribuída” serve para identificar uma fonte de geração de energia elétrica, tipicamente de 1 a 10 MW (FARRET, SIMÕES, 2006), localizada próxima aos consumidores.

De acordo com o Balanço Energético Nacional 2010, pode-se destacar a produção de 2.176 GWh de eletricidade através de fontes eólicas de energia, representando um aumento de 75,8% em relação ao ano de 2009. Esse significativo aumento reflete a intenção de diversificar a matriz energética brasileira e realizar um maior aproveitamento de características locais para uma geração descentralizada de energia. Mas para que continue essa expansão, são necessários estudos apropriados e análises minuciosas dos sistemas de transmissão e distribuição onde estão conectadas essas fontes. (MCDERMOTT e DUGAN, 2000). A conexão dessas fontes à rede é de fundamental importância, sendo que esta deve ser feita após a realização de estudos prévios intensivos sobre sua localização, as potências geradas e quando estas devem entrar em atuação (BARIN et al, 2007).

A entrada destas novas fontes de energia sem a realização de estudos preliminares tenderá a causar transtornos ao sistema, provocando problemas de caráter operacional, regulatório e gerencial, sendo estes aspectos constantemente analisados e avaliados em empresas concessionárias de energia.

### **2.3 Vantagens da geração distribuída**

Estudos recentes apresentam diversos benefícios da conexão de fontes de geração distribuída em sistemas elétricos de potência. Segundo (FARRET e SIMÕES, 2006) a penetração da geração distribuída, ou seja, a quantidade de geração em relação à carga total do sistema é o fator mais importante na determinação da influência da geração distribuída na operação do sistema. Por exemplo, um gerador de 2 MW causa um efeito considerável em um sistema de distribuição, mas é desprezível para o sistema de transmissão. Já uma geração distribuída que supra a demanda de 30% ou mais da carga total do sistema causará uma grande alteração na operação da transmissão.

As vantagens da inserção de uma geração descentralizada de energia podem ser divididas em dois aspectos: O econômico e o técnico.

Considerando o aspecto econômico, as fontes de geração distribuída, quando instaladas, podem suprir um aumento de demanda, evitando assim a necessidade de uma expansão no sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica. Também podem ser instaladas em módulos, podendo entrar em operação num curto período de tempo, fazendo assim com que a capacidade de geração possa ser aumentada ou reduzida apenas pela variação dos módulos instalados. Essa flexibilidade na alocação das fontes de geração distribuída tem um efeito positivo nos preços da energia, através do fornecimento de potência ao sistema, o que causa a redução da demanda.

No aspecto técnico, vantagens na operação e na qualidade de energia se destacam entre as demais. A inserção da geração distribuída tem um efeito positivo no perfil de tensão dos sistemas de distribuição. Também reduzem as perdas de potência nas redes de distribuição, pois irá suprir parte da demanda, diminuindo o fluxo de potência a ser transmitido do sistema.

Essas fontes podem auxiliar em programas de gestão de demanda e no chamado "*Corte dos picos de demanda*", que consiste na utilização da geração distribuída como meio de reduzir a curva de carga em horários de pico.

Há também a contribuição da GD para a continuidade e confiabilidade dos sistemas elétricos, visto que existem vários pontos de geração e não apenas uma geração centralizada. Algumas também podem ser utilizadas em *Stand-By*, com o intuito de fornecer energia em casos de emergência.

Um dos pontos principais das fontes de geração distribuída é que podem ser dimensionadas e alocadas de modo ótimo, o que dá ao sistema uma melhor condição de operação.

## **2.4 Desvantagens da geração distribuída**

São inegáveis os benefícios da conexão de fontes de geração distribuída em sistemas de energia. Entretanto, esses sistemas não foram projetados para acomodar certas características técnicas inferidas pela inserção dessas fontes.

Dentre as desvantagens da integração dessas fontes de geração distribuída nos sistemas existentes, pode-se citar:

- A desregulamentação do setor elétrico e os incentivos governamentais (PROINFA, 2002) levam cada vez mais ao surgimento de produtores independentes e autoprodutores de energia. Com isso, haverá um aumento no número de empresas envolvidas no setor elétrico, aumentando significativamente a complexidade de operação do sistema elétrico;
- A geração distribuída insere um fluxo de potência bidirecional, onde originalmente havia um fluxo unidirecional, implicando no aumento da complexidade de operação do sistema;
- Essas fontes dependem, em sua grande parte, da variabilidade de fenômenos naturais, tais como ventos, incidência do sol;
- Os custos de algumas tecnologias ainda são proibitivos, mas seguem diminuindo devido aos avanços tecnológicos, principalmente na área da eletrônica de potência e também através dos incentivos fornecidos pelo governo.

## **2.5 Considerações finais**

Fontes de Geração Distribuída oferecem diversos benefícios, incluindo a segurança no suprimento da demanda energética, melhoria da qualidade da energia fornecida, entre outros. Embora sejam claros os benefícios proporcionados pela instalação de fontes de GD, estas muitas vezes não são economicamente ou tecnicamente viáveis. Considerando que os sistemas elétricos possuem um caráter operacional único, a inserção de fontes de GD causa uma mudança nessas características, sendo muitas vezes necessário modificar os sistemas já existentes de modo a acomodar essas novas gerações. As inserções de fontes de GD são muitas vezes realizadas de uma forma errônea, sem a realização de estudos preliminares, o que é um reflexo da desregulamentação do setor elétrico no que concerne Geração Distribuída. Entretanto, se um estudo preliminar for realizado e as fontes de GD forem alocadas corretamente, os efeitos sobre o sistema elétrico serão

bastante atrativos, proporcionando uma redução nas perdas e um aumento na confiabilidade.

## **3 PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS COM FONTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

### **3.1 Considerações gerais**

Apesar dos amplos benefícios da inserção de fontes de geração distribuída em sistemas elétricos, existe uma preocupação constante com a influência destas no sistema de proteção, tais como a perda de coordenação entre os dispositivos de proteção (relés, religadores, fusíveis); no controle dos níveis de tensão, controle de reativos e na automatização da distribuição da energia elétrica.

O sistema de proteção deve ser capaz de acomodar as mudanças causadas pela inserção das fontes de geração distribuída e manter a confiabilidade de sua operação. Para isso, a proteção ideal, considerando a geração distribuída, deve alterar o mínimo possível os ajustes originais e também evitar, se possível, a substituição dos dispositivos de proteção já existentes no sistema, visando redução dos custos às empresas de energia.

### **3.2 Impactos nos níveis de curto-circuito e ajustes de proteção**

Proprietários de unidades de geração distribuída, conectados ao sistema elétrico para venda de energia, concentram sua preocupação na segurança de seus geradores. Estando suas máquinas operando o maior tempo possível, procurando gerar o máximo de potência ativa, estes devem ajustar suas proteções de forma mais rigorosa que a habitual, visando à segurança de suas máquinas.

Esta prática pode gerar um aumento do número de desligamentos automáticos destes geradores, prejudicando a qualidade e confiabilidade do sistema e alterando a estabilidade e regulação de tensão.

Para distúrbios que ocasionem sobretensões, o desligamento indevido dos geradores pode agravar o perfil de tensão, aumentando as chances de uma atuação indevida das proteções das linhas de transmissão, uma vez que foram projetadas

considerando um sistema de geração centralizado, o que ocasionará uma possível abertura dos disjuntores. Estes desligamentos podem levar o sistema a um blecaute.

Já para defeitos que causem uma grande absorção de reativos por parte dos geradores para o controle do perfil de tensão, os novos ajustes dos limitadores de mínima excitação podem aumentar o número de desligamentos destes. Com o aumento do número de unidades de geração distribuída, o número de sobretensões poderá ser maior e, como consequência, acarretará em um maior número de desligamentos dos equipamentos ou até mesmo em algum dano.

A inserção de uma ou mais unidades de geração distribuída pode alterar a coordenação da proteção, como pode ser visto na Figura 3.1.

Um curto-circuito após o fusível pode conduzir à operação não desejada deste, sem a devida atuação do disjuntor, no esquema *fuse saving*. Também se deve observar que as características das unidades de geração distribuída (tipo de gerador, nível de tensão, transformador conector à rede) influenciarão nesse impacto, pois cada tipo de fonte gerará níveis distintos de curto-circuito, como é mostrado na Figura 3.2.

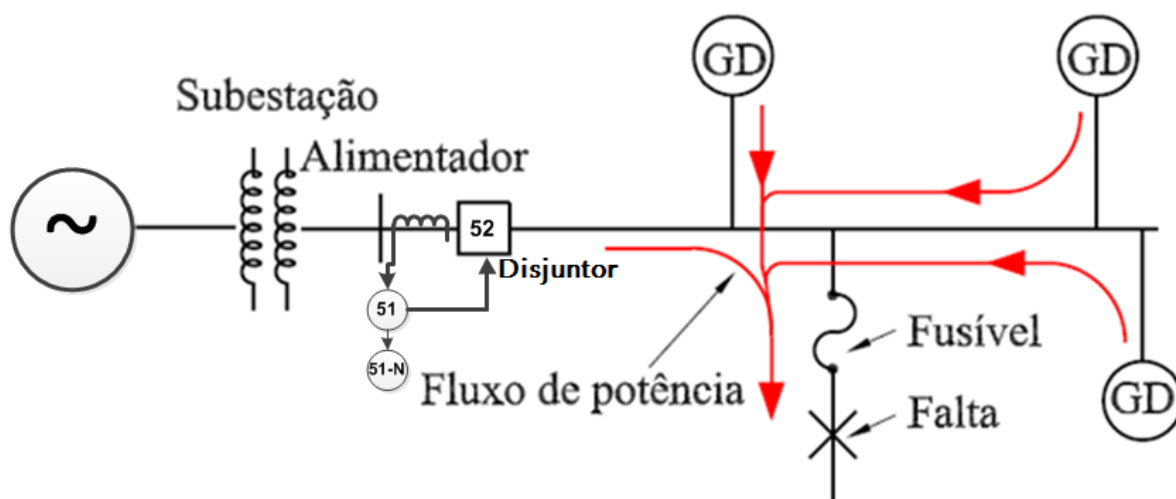


Figura 3.1: Impacto no nível de curto-circuito com a inclusão de unidades de geração distribuída



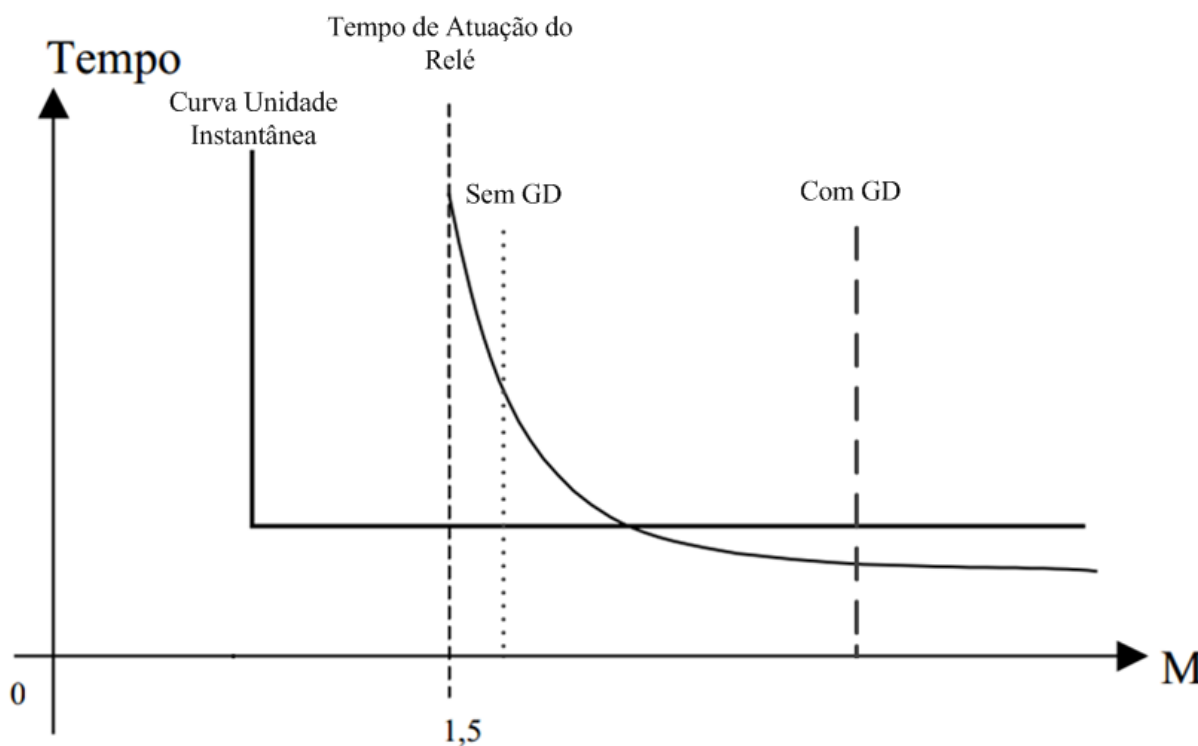


Figura 3.2 – Coordenograma de Atuação do relé de sobrecorrente

### 3.3 Impactos na qualidade de energia

A qualidade de energia é seriamente estudada pelas empresas da área, não só pela competitividade de mercado, mas também pela sensibilidade de equipamentos industriais.

Considerando fontes alternativas, como fotovoltaicas e turbinas eólicas, o grande problema é que não se tem um controle na geração dos recursos primários (neste caso, iluminação solar e vento), de maneira que não é possível garantir uma geração constante. Células fotovoltaicas utilizam baterias e inversores para serem conectados à rede e com isto, alguns problemas podem surgir, tais como a influência do nível de carregamento das baterias e as componentes harmônicas de frequência geradas pelos inversores (BARKER; MELLO, 2000).

No caso das turbinas eólicas, que normalmente são compostas por um conjunto formado por geradores assíncronos, retificadores, inversores entre outros equipamentos eletrônicos que podem ser fontes de cintilação de tensão (*Voltage Flicker*), afundamentos de tensão (*Voltage Sags*), distorções harmônicas e flutuações de tensão.

Cintilação de tensão pode ser resultado da partida ou desligamento de máquinas da rede (partida de motor de indução), ou por uma mudança repentina de

geração das mesmas (variações da energia solar e eólica), que resultarão em uma significativa mudança no valor da tensão do alimentador.

Afundamentos de tensão são reduções não permanentes da tensão, com valores entre 10 e 90% da faixa de tensão padrão (GÓMEZ; MORCOS, 2002), com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto.

### 3.4 Impactos do ilhamento

O ilhamento ocorre quando pelo menos uma unidade de geração distribuída do sistema elétrico permanece operando e alimentando alguma área, tendo o sistema sido desligado (intencionalmente ou não) por algum motivo. Na Figura 3.2 nota-se que o ilhamento pode ser útil, pois é possível manter cargas prioritárias alimentadas, mesmo que o restante do sistema esteja sem energia.

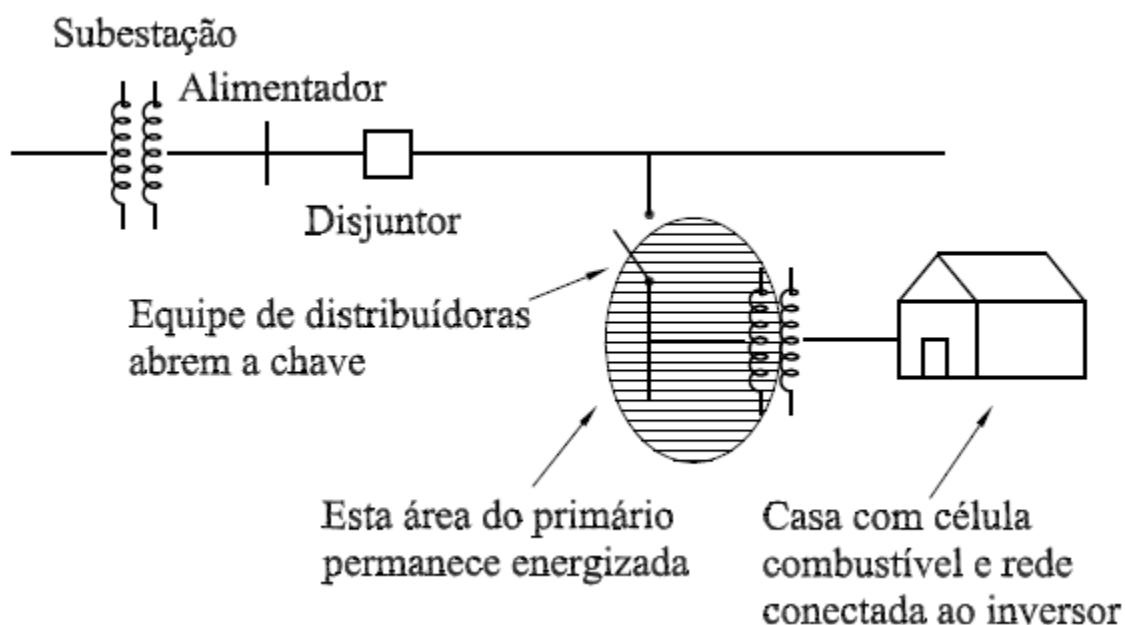


Figura 3.3: Ilhamento que pode ocorrer em uma área do sistema

Porém, ao manter o alimentador energizado, haverá a possibilidade de prejudicar a segurança de técnicos, caso os proprietários não sejam capazes de desconectar suas fontes.

O sistema de geração distribuída pode também estar aterrado inadequadamente, de forma que poderá perder a referência em uma situação de ilhamento. Esta condição de ilhamento normalmente ocorre após algum distúrbio ou

falta, onde o sistema é desligado pela abertura de algum disjuntor. Porém, após a falta, é normal que o sistema tente se recompor e isto acontece rapidamente através do refechamento do mesmo dispositivo. Contudo, se a unidade geradora saiu de sincronia com o resto do sistema durante este curto espaço de tempo, problemas podem começar a surgir, que podem ser desde o simples desligamento da máquina, à destruição de uma das unidades geradoras ou até mesmo um blecaute do sistema.

### **3.5 Impactos nos índices de confiabilidade**

Em termos de confiabilidade, as contribuições da GD devem ser consideradas, pelo menos, em três pontos de vista (COWART, 2001):

- O ponto de vista de clientes individuais;
- De um grupo de clientes e sua companhia local de distribuição;
- O mercado como um todo e operadores do sistema.

Dentre as formas pelas quais a GD pode exercer uma influência efetiva em questões relativas à confiabilidade pode-se destacar o aumento da qualidade de energia e a segurança de fornecimento sem interrupções.

A GD pode também contribuir para a melhoria na qualidade de energia em áreas congestionadas, no final de linha de trechos longos, e em locais onde uma alta qualidade de energia é exigida, podendo inclusive prover capacidade de geração local sob o controle de clientes que demandam um serviço ininterrupto.

Clientes que instalam a GD no seu lado do medidor, usualmente o fazem por uma combinação de três razões: redução de custos, aumento da qualidade de energia e maior confiabilidade.

Um dos motivos de redução de custos são os altos valores da energia para demanda em horários de ponta.

A GD pode proporcionar um alívio para sistemas de transmissão e distribuição e transmissão em condições de sobrecarga ou congestionamento, reduzindo investimentos e contribuindo para o aumento na versatilidade dos sistemas elétricos.

### 3.6 Impacto na estabilidade de tensão dos sistemas de potência

Diversos autores vêm realizando pesquisas com o intuito de avaliar o impacto das fontes de geração distribuída na estabilidade dos sistemas elétricos de potência. Simulações executadas estabeleceram o comportamento dinâmico do sistema assim que os geradores distribuídos são conectados à rede. De tais simulações foram retiradas as seguintes conclusões:

- O impacto causado pela geração distribuída depende do índice de penetração da mesma (DONNELLY, 1996) (SLOOTWEG, KLING, 2002);
- O local de instalação da geração distribuída pode determinar o tipo de impacto que ocorrerá (DONNELLY, 1996);
- As diferentes formas de geração, bem como os diferentes detalhes construtivos das máquinas, devem promover os mais variados impactos no sistema de potência (SLOOTWEG, KLING, 2002).

#### 3.6.1 Impacto Causado pela Mudança dos Níveis de Penetração

A participação da GD na quantidade de energia gerada nos sistemas de potência atuais ainda é muito pequena. Os estudos mostraram um resultado lógico no que diz respeito à sensibilidade do sistema para o índice de penetração: quando uma determinada unidade de GD tende a colaborar com a estabilidade de tensão do sistema, o aumento dessa mesma penetração tende a melhorar a estabilidade do sistema. O inverso também se mostrou verdadeiro.

Os resultados obtidos em (DONNELLY, 1996) ilustraram que a GD oferece um impacto significativo na redução da margem de estabilidade dos sistemas de distribuição. Os autores observaram, também, um comportamento linear na relação entre a sensibilidade do sistema com relação ao percentual de penetração da GD, o que poderia levar a uma proporcionalidade entre o percentual de penetração e seus efeitos na estabilidade.

### 3.6.2 Impacto Causado Pelos Diferentes Tipos de Geração

Muitos autores somente citam a possível influência do nível de penetração e dos diferentes tipos de geração nos sistemas elétricos de potência. Já em (SLOOTWEG, KLING, 2002), os resultados da investigação do impacto das distintas tecnologias e do nível de penetração na estabilidade transitória são apresentados. Os autores efetuaram um estudo com cinco tipos de tecnologia de geração distribuída para diferentes níveis de penetração em um sistema teste. São elas:

- Geradores de indução com gaiola de esquilo;
- Geradores síncronos;
- Geradores síncronos com controle de tensão e frequência;
- Inversores eletrônicos de potência;
- Inversores eletrônicos de potência com controle de tensão e frequência;

Para analisar a estabilidade transitória, os autores usaram como distúrbio uma falta em uma das barras do sistema citado. Dois indicadores da estabilidade transitória foram analisados: o máximo desvio da velocidade síncrona e o período de oscilação. Salienta-se que os autores afirmam que os resultados obtidos necessitam de um estudo mais aprimorado. Das simulações realizadas, segue uma síntese dos resultados:

- Os geradores assíncronos não tiveram uma influência significativa nas variáveis medidas;
- Os geradores síncronos diminuíram o máximo desvio da velocidade síncrona com o aumento do nível de penetração da GD. Isto se deve ao fato de que os geradores síncronos são equipados com excitação externa, podendo alimentar a corrente de falta, de modo que a magnitude da tensão não diminui tanto como no caso do sistema sem o gerador. Como consequência, o torque de sincronização permanece alto. Em relação ao período de oscilação, o sistema com a presença dos geradores síncronos reduz o coeficiente de amortecimento,

ampliando o tempo para estabilização da variável medida. Isto pode ser explicado pelo fenômeno de oscilação inter-área (KUNDUR, 1994);

- No que diz respeito aos inversores, a presença destes na rede reduziu o máximo desvio da velocidade no rotor. No instante que os disjuntores detectam o decaimento da magnitude da tensão, os inversores são rapidamente retirados da rede. Com uma diminuição de unidades de geração, as outras máquinas do sistema tendem a desacelerar, resultando no decréscimo da aceleração do rotor. O resultado da análise dos inversores com ou sem controle de velocidade e frequência é o mesmo, já que ambos não atuam neste curto espaço de tempo, pelo fato de serem desconectados da rede rapidamente. Os autores destacam também que o fato dos inversores se desligarem da rede rapidamente faz com que a tensão caia em proporções muito maiores e em alguns casos pode-se perder algumas máquinas ou cargas da rede. O período de oscilação do sistema nas simulações ampliou-se, no caso de inversores sem controle e se manteve constante, para os que possuem controle de tensão e frequência.

Os autores em (DONNELLY, 1996) procuraram analisar os impactos causados por geradores síncronos no sistema de potência e a sensibilidade destes, utilizando o modelo de um gerador alimentado por uma turbina a gás com potência de 60 MW.

O objetivo das simulações foi o de comparar as respostas dinâmicas do sistema sem e com a GD, analisando sobre o ponto de vista da estabilidade transitória e da estabilidade de pequenos sinais. Estas tiveram como contingência um curto-circuito para terra em uma das barras e a perda desta depois de alguns instantes. Observou-se que a adição de geradores no sistema elétrico de potência melhorou o desempenho do mesmo na situação de uma falta. O desvio da velocidade em relação à velocidade síncrona caiu pela metade no caso em que os geradores distribuídos estão presentes.

No que diz respeito à sensibilidade, os resultados mostram que quando diminuía-se a inércia dos geradores, a frequência do modo natural de oscilação

aumentava, o que era esperado, porque estas máquinas de menor porte devem determinar o amortecimento do sistema.

Nas simulações realizadas por (EDWARDS, 2002), os geradores perderam o sincronismo, mostrando um lado negativo desta nova configuração de geração. Os autores, valendo-se de um modelo de rede de distribuição, onde o tipo de GD é a turbina a gás, avaliaram a estabilidade do sistema sob o ponto de vista da estabilidade transitória e da estabilidade de pequenos sinais.

A existência de mais geradores ligados à rede e de diferentes inércias, resulta em oscilações de potência, frequência e tensão, ocasionando falsos comandos de aberturas em disjuntores. Do ponto de vista de transmissão, a perda destas unidades geradoras pode causar uma sobrecarga no sistema, resultando numa instabilidade do sistema (CONCEIÇÃO, 2003).

### **3.7 Considerações Finais**

Os sistemas elétricos existentes apresentam características que não permitem a inserção de fontes de GD sem que ocorram adequações. Para a correta operação de um sistema elétrico com fontes de GD, diversos estudos preliminares devem ser realizados com o intuito de minimizar os efeitos negativos.

Mesmo com estudos preliminares e uma correta instalação de fontes de GD, problemas ainda aparecerão, tais como um aumento dos níveis de curto-circuito, , a bidirecionalidade do fluxo de corrente, entre outros, que causarão a necessidade de efetuar modificações na rede e em dispositivos do sistema.

## **4 LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA**

### **4.1 Considerações gerais**

Os dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito têm a finalidade de limitar as correntes de falta em valores adequados às especificações nominais de instalações existentes.

Os limitadores de corrente de falta são dispositivos de baixa impedância durante as condições de operação normal do sistema elétrico, não produzindo efeito algum. Entretanto, durante um curto-circuito, ele rapidamente insere uma alta impedância em série com a rede, de modo a limitar a corrente em um valor pré-definido.

Para redes de transmissão e distribuição, LCF supercondutores e de estado sólido são tecnologias emergentes. O desenvolvimento de tais dispositivos está sendo financiada por governos de diversos países no mundo. Cada tipo de LCF possui uma série de vantagens e desvantagens, cabendo ao usuário encontrar o que mais se adequa aos seus propósitos.

Em conceito, todos os tipos de limitadores de corrente podem ser vistos como uma chave normalmente fechada em paralelo com um resistor. O tipo de chave, seu circuito controlador e o tipo de resistor variam de acordo com o fabricante.

### **4.2 Forma de operação dos limitadores de corrente de falta**

Considerando sua forma de operação, esses limitadores podem ser divididos em dois grupos:

- Utilização de características não-lineares do material limitador. Quando uma corrente muito alta flui pelo material limitador, sua resistência aumenta, o que causa a limitação da corrente;
- Utilização de chaveamento em alta velocidade composto por tiristores de potência.



### 4.3 Limitador de corrente de estado sólido

A utilização de Limitadores de Corrente de Estado Sólido (LCES) oferece uma solução viável às redes de transmissão e distribuição.

Proporcionando uma limitação de corrente quase instantânea, o LCES reduz as correntes de falta tanto em dispositivos à montante quanto à jusante. Para interromper a corrente, o LCES rapidamente insere um elemento consumidor de energia (ex: resistor, indutor) em série no circuito de modo a limitar a corrente de falta. Além de limitar a corrente de falta, o LCES serve também como um limitador de correntes de *inrush* (energização de transformadores).

Um LCES oferece as seguintes vantagens:

- Limitar a corrente de falta;
- Limitar a corrente de *inrush*, até mesmo para cargas capacitivas;
- Operações repetidas com alta confiabilidade e quase nenhum desgaste;
- Melhoria da qualidade de energia no que diz respeito aos efeitos dos curtos-circuitos para rede.

Consiste em uma chave de alta velocidade composta por tiristores e uma impedância limitadora em paralelo. Um detector de corrente envia um sinal para a comutação dos tiristores, fazendo com que a impedância limitadora seja inserida em série com o sistema, reduzindo drasticamente a corrente, como mostrado na Figura 4.1. Todo o processo ocorre na faixa de 1 ms (UEDA, 1993).

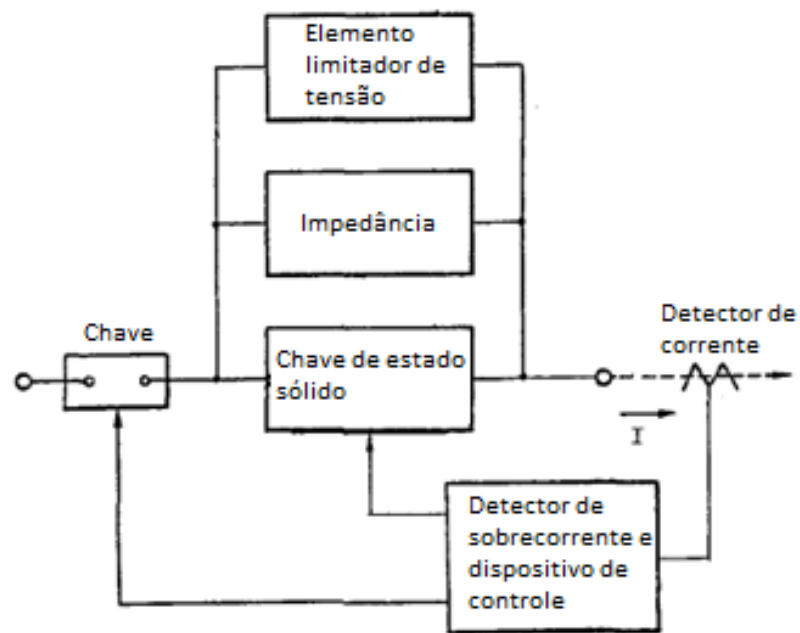


Figura 4.1 – Funcionamento do LCES

A desvantagem intrínseca ao limitador de estado sólido é o fato de que a queda de tensão nas chaves provoca perdas e sobreaquecimento. A solução para este problema tem sido a utilização de sistemas de resfriamento, como radiadores. Porém, as perdas das chaves comutadoras não representam ameaça ao uso deste dispositivo, visto que representam apenas 0,2% da potência do sistema. A Figura 4.2 mostra um gráfico de funcionamento do LCES.

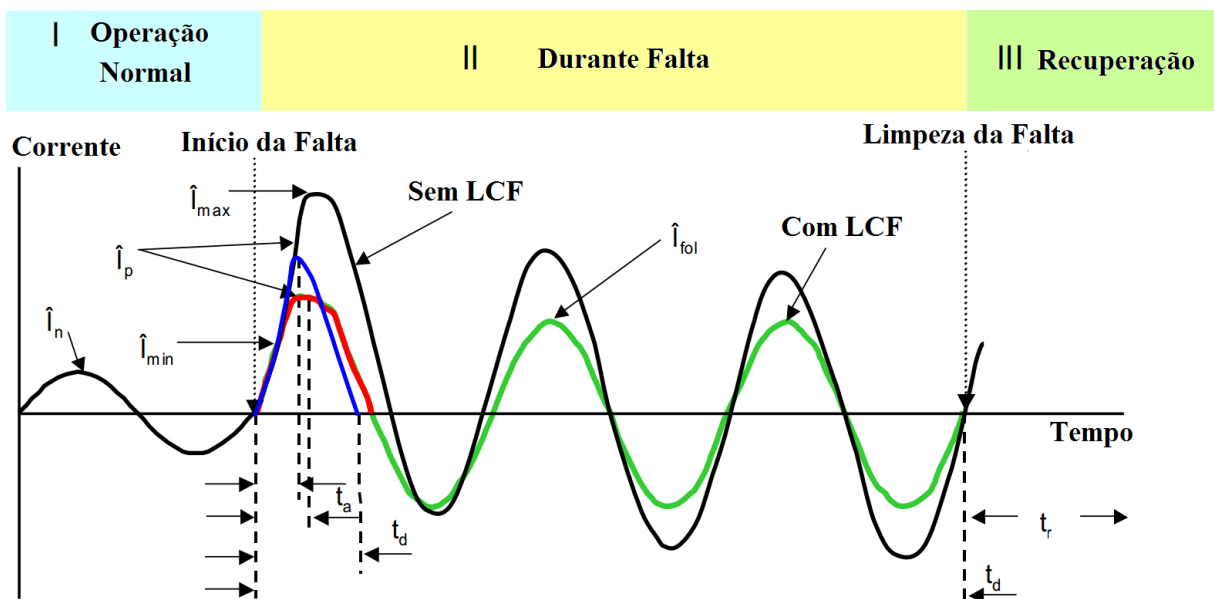


Figura 4.2 – Efeito do LCES na corrente de curto-circuito

Onde:

$\hat{I}_n$ : Corrente de pico nominal do sistema;

$\hat{I}_{min}$ : Corrente mínima de inicialização de funcionamento do LCF;

$\hat{I}_{max}$ : Corrente máxima de limitação;

$\hat{I}_p$ : Valor de pico (previsto) da corrente de curto-circuito;

$\hat{I}_{fol}$ : Valor de pico da corrente de curto-circuito com atuação do limitador;

$t_a$ : Tempo de ação do limitador: de  $t = 0$  até  $\hat{I}_{max}$ ;

$t_d$ : Tempo de duração da falta;

$t_r$ : Tempo entre a interrupção da corrente de curto-circuito e o retorno do LCF até seu estado de baixa impedância.

#### 4.4 Limitador de corrente supercondutor

Os avanços realizados na área dos supercondutores permitiram que limitadores de corrente de falta pudessem utilizar essa tecnologia e também serem competitivos em relação ao custo. Na operação deste dispositivo, a resistividade do elemento limitador de corrente, que é mantido no estado supercondutor, é nula. Durante uma situação de curto-circuito, a transição do estado supercondutor para limitante é quase instantânea. Porém, pode-se citar a fragilidade do material supercondutor, uma necessidade de um sistema de refrigeração constante e eficiente, de modo que o dispositivo limitante se mantenha no estado supercondutor (em torno de  $-126^{\circ}\text{C}$ ).

Esses limitadores podem ser divididos em dois grupos: Resistivos e indutivos. Nos dois casos, o princípio de operação mantém-se o mesmo: durante a operação normal do sistema, o material limitador é mantido no estado supercondutor, o que faz com que sua impedância chegue à zero. O LCFSC é extremamente sensível às variações de temperatura, devendo ser devidamente dimensionado para que não haja o sobreaquecimento do mesmo e a consequente perda de sua característica supercondutora.

Quando sujeito a uma corrente de falta, o LCFSC tem sua temperatura elevada, saindo então do estado supercondutor e oferecendo uma alta resistência e

consequentemente limitando a corrente de curto-circuito. Seu método construtivo é mostrado na Figura 4.3 (fonte: *Electric Power Research Institute*).

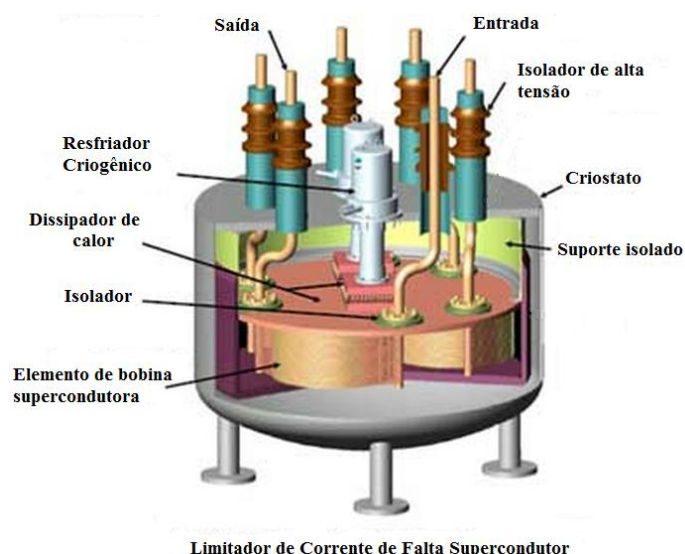


Figura 4.3 – Limitador de corrente de falta supercondutor

## 4.5 Limitador de corrente magnético

O limitador de corrente magnético é um dispositivo formado por um núcleo laminado e um imã permanente entre os pólos. O circuito a ser protegido é ligado em série com a bobina.

O princípio de operação do limitador de corrente magnético é explicado com ajuda da figura 4.4. O imã permanente é imprensado entre o núcleo saturável e é usado para saturar o núcleo em condições normais de operação. A direção da força magnetomotriz e a corrente alternada é aditiva no núcleo 1 e subtrativa no núcleo 2 ao mesmo tempo. Durante condições normais de operação, onde a corrente de operação é baixa, ambos os núcleos estão saturados, fazendo com que a impedância efetiva do sistema seja baixa. Durante uma falta, o alto valor das correntes forçam os núcleos a saírem da saturação. Então a indutância não saturada de um dos núcleos em combinação com a indutância saturada do outro núcleo restringe o fluxo da alta corrente de falta. A figura 4.5 mostra o ponto de operação de um núcleo baseado nas características B-H do imã permanente e núcleo. Para saturar o núcleo de ferrite, este deve ter um valor baixo de densidade de fluxo de saturação se comparado com o imã permanente

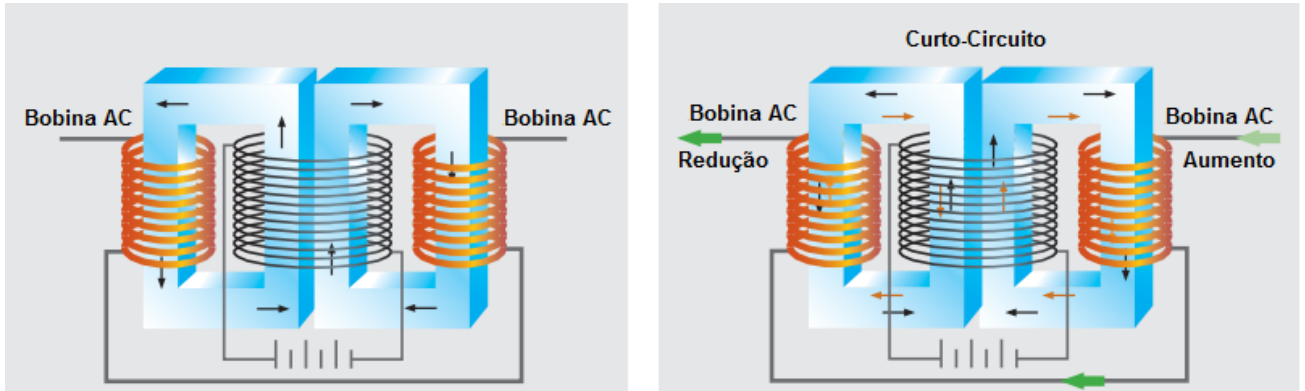


Figura 4.4 – Construção e funcionamento do LCFM

O princípio de funcionamento desse limitador baseia-se no fato de que ímãs permanentes possuem um grande laço de histerese. Quando o ímã opera em ciclos nesse laço, ocorre uma dissipação de energia.

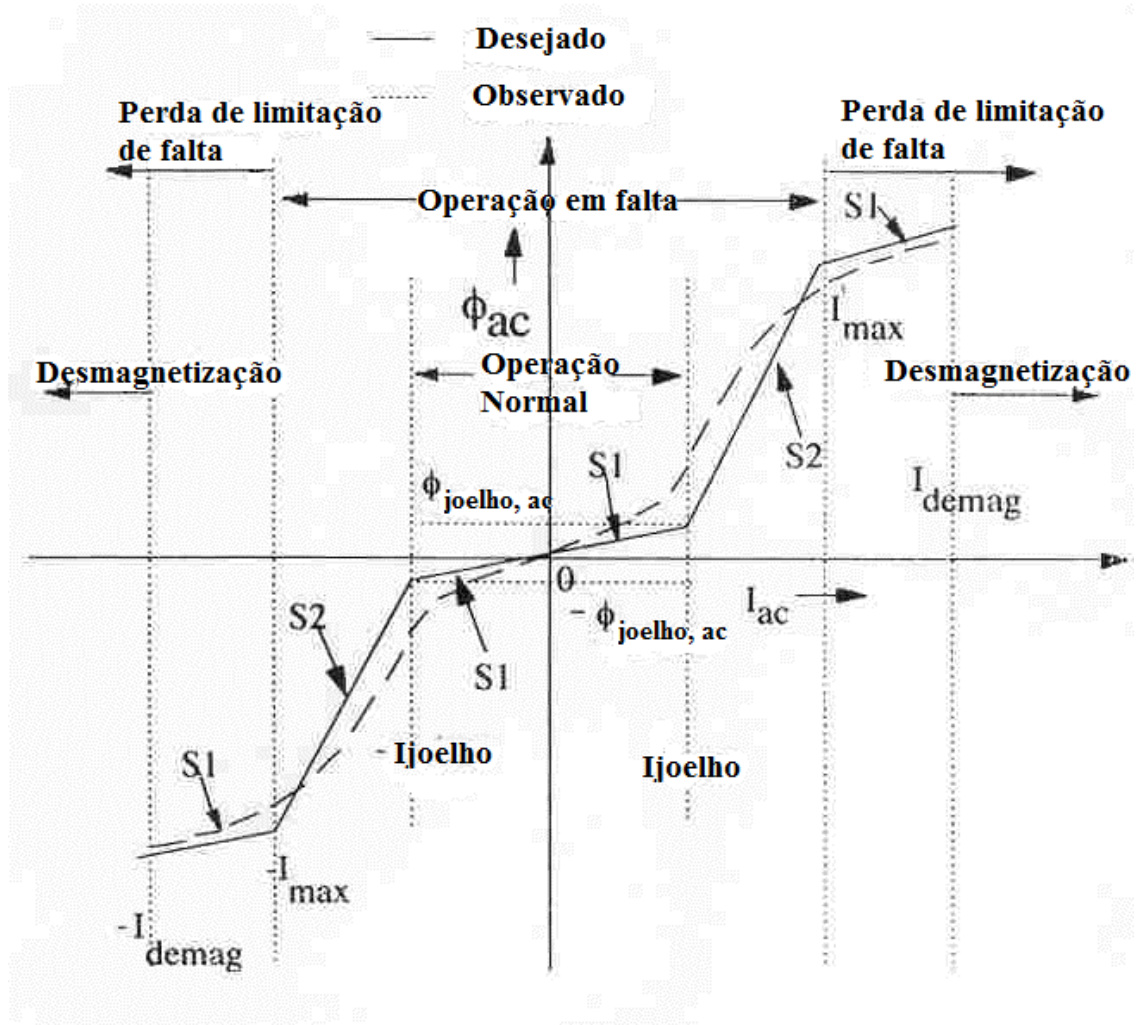


Figura 4.5 – Curva de histerese do limitador de corrente magnético

O dispositivo limitador magnético possui um indutor em série com o circuito, o qual apresenta uma impedância mesmo com o sistema em funcionamento normal. Dependendo do sistema elétrico em que será aplicado, essa impedância poderá ter influência e causar problemas na operação, sendo necessária a consideração de outro tipo de limitador para aplicação.

#### **4.6 Considerações finais**

Limitadores de corrente são uma solução viável quando se deseja limitar as correntes de curto-circuito em virtude da inserção de fontes de GD. Apesar das tecnologias utilizadas se apresentarem muitas vezes custosas, com os avanços nas pesquisas e tecnologia, o preço desses vem se tornando atrativo.

O desenvolvimento tecnológico propicia a maturidade necessária para a utilização de limitadores de corrente com um grau de confiabilidade bastante adequado, o que induz pesquisadores a desenvolverem metodologias que incorporam o uso destes dispositivos.

O limitador de corrente de estado sólido será utilizado ao longo desse trabalho, devido ao fato de ser o mais utilizado mundialmente, possuir um bom desempenho e não apresentar um elevado custo.

## **5 RESTAURAÇÃO DA COORDENAÇÃO DE RELÉS DE SOBRECORRENTE DIRECIONAIS UTILIZANDO LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA**

### **5.1 Considerações gerais**

Este capítulo descreve a metodologia proposta no sentido de restaurar a coordenação original de relés de sobrecorrente direcionais de um sistema de potência sujeito a presença de fontes de GD, tendo como ponto de partida os seus valores iniciais, definidos por estudos realizados antes da inserção da Geração Distribuída. Estes valores iniciais de foram obtidos por meio do Algoritmo Genético (AG) proposto por (RAZAVI et al, 2010). Com base nos resultados obtidos pelo AG, foi desenvolvida a técnica que faz uso de LCF instalados juntamente com as fontes de GD, para reduzir, localmente, a contribuição dessas para a corrente de curto-circuito.

Na seção 5.2 é apresentada uma introdução aos AG's, dando uma visão geral sobre a aplicação desses algoritmos e uma explicação sobre as vantagens da utilização de algoritmos evolutivos. Também são explicadas as funções de cada operador genético e também os critérios para formação de populações e codificação de cromossomos.

A seção 5.3 descreve o AG utilizado por RAZAVI et al. (2010), de modo a determinar a coordenação ótima dos relés de sobrecorrente direcionais sem GD.

A seção 5.4 mostra e detalha a metodologia proposta, explicando passo a passo a solução do problema de restauração da coordenação original, através da inserção de LCF juntamente com as fontes de GD no sistema.

### **5.2 Algoritmos genéticos**

Os algoritmos genéticos são algoritmos de busca que utilizam uma analogia com o fenômeno da seleção natural, onde são aplicados os conceitos de sobrevivência do indivíduo mais adaptado ao meio, contando com mecanismos

aleatórios e estruturados para guiar a permuta de genes entre os indivíduos pais na geração de um indivíduo filho. Segundo KAGAN (2009), o principal fator que motiva o uso de AGs está relacionado à sua capacidade de busca direcionada e aleatória, de modo a se obter o ponto ótimo de dada função, mesmo quando esta apresenta características não lineares, múltiplos picos (ótimos locais) e descontinuidades. Assim, os AGs realizam uma busca que evita a convergência para ótimos locais.

O resultado é uma interação genética entre os indivíduos ao longo das gerações dando origem a características diferenciadas. A possibilidade de perduração dos indivíduos com determinadas características na natureza é afetada pelos demais indivíduos da população e também por sua adaptabilidade ao ambiente. Os indivíduos que mais se adaptarem às condições definidas pelo meio, onde estão inseridos sobreviverão e gerarão descendentes, o que permite que passem adiante suas características genéticas, fazendo com que existam populações de indivíduos com aptidões acima da média.

Em cada geração do AG, é formada uma população com um conjunto de indivíduos (cromossomos), que representam soluções factíveis para o problema de otimização. Cada cromossomo é formado por um conjunto de *genes*, que são chamados *alelos*. A posição de cada gene no cromossomo é chamada de *locus*. Segundo GOLDBERG (1989) e MICHALEWICZ (1996), a decodificação de um cromossomo resulta na sua manifestação exterior (*fenótipo*), conjunto de parâmetros ou solução. A Figura 5.1 mostra a representação de uma população formada por P indivíduos, cada um possuindo N genes.

		Locus →												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...	N
Indivíduos (Cromossomos)	1	1	0	1	4	0	9	1	2	0	2	1	...	0
	2	0	2	1	0	0	3	1	2	3	1	0	...	1
	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	P	1	2	5	4	1	2	9	7	8	8	1	...	1
		Gene ↑												

Figura 5.1 – Terminologias de Algoritmos Genéticos



A aptidão é um valor numérico que mede o grau de adaptação dos indivíduos ao meio, em relação aos demais indivíduos da população. Este valor é resultado da avaliação de uma função de aptidão, que caracteriza o problema de otimização.

De acordo com (MICHALEWICZ, 1996), os procedimentos referentes a uma aplicação de AG são as seguintes:

- Codificação dos cromossomos (Representação genética de soluções factíveis do problema);
- Criação da população inicial;
- Determinação da função de aptidão para avaliação dos indivíduos;
- Determinação da estratégia do operador seleção;
- Determinação dos operadores genéticos;
- Seleção dos parâmetros de controle;
- Definição do critério de parada.

A Figura 5.2 mostra o fluxograma típico dos algoritmos genéticos.

Os algoritmos evolutivos se baseiam em três operadores genéticos, que são os responsáveis pela criação de novas gerações. São eles:

- Seleção: Tem como função escolher os elementos da população que participarão do processo de reprodução, isto é, selecionar os pais dos indivíduos que estarão presentes na nova população (FILITTO, 2008). Devem-se escolher os membros da população que possuem um maior valor de aptidão em relação ao meio;
- Cruzamento: Tem a função de combinar os cromossomos dos pais, para gerar os cromossomos dos filhos;
- Mutação: É responsável pela inserção de pequenas variações aleatórias nos cromossomos dos filhos. Tem como função inserir diversidade à população, evitando assim estagnar em um ótimo local.

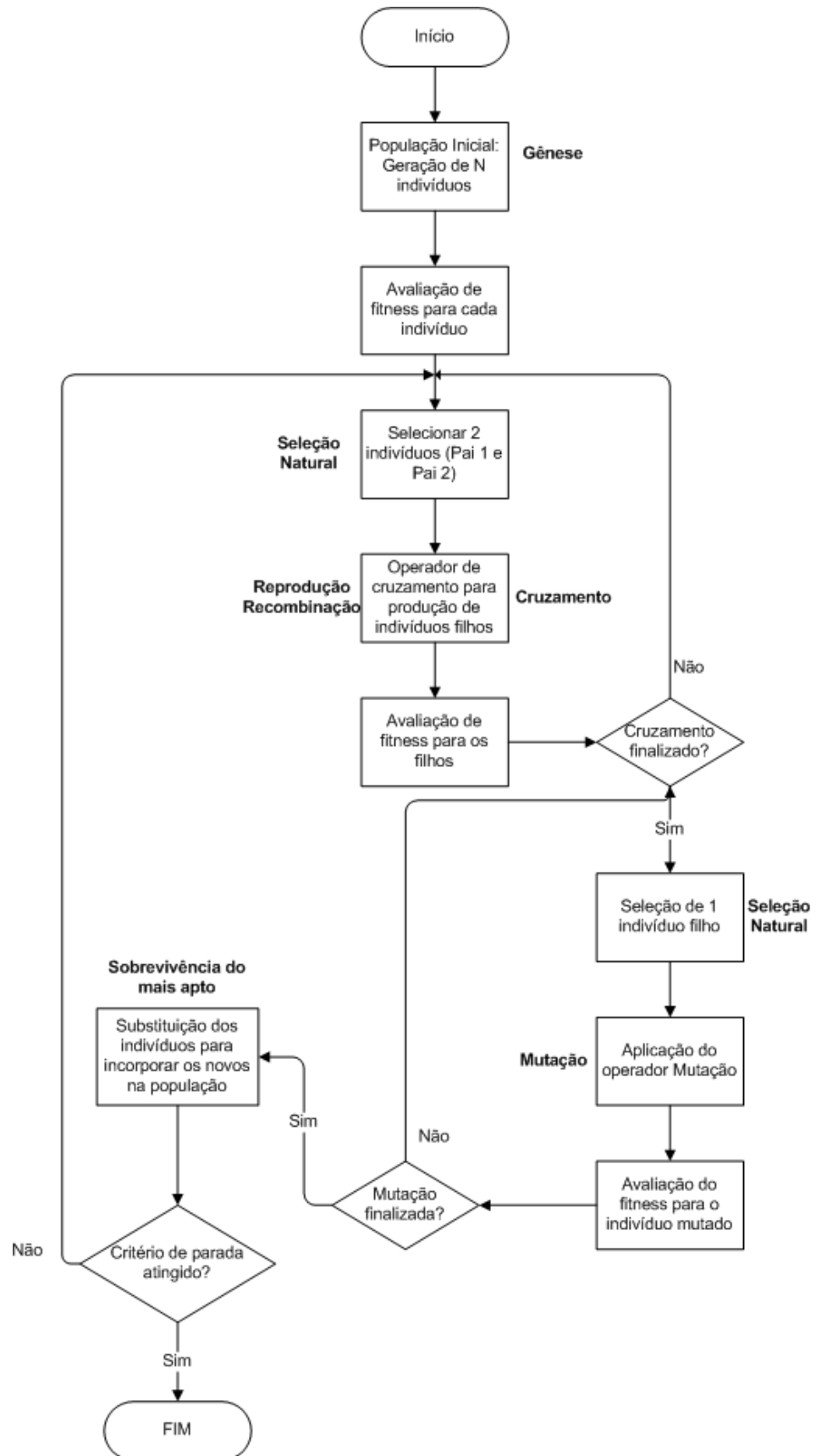


Figura 5.2 – Fluxograma de funcionamento de um AG Simples

A codificação dos cromossomos é o primeiro requisito quando se deseja formular um problema de acordo com as premissas dos AG's. A codificação é extremamente dependente do problema, por isso, a correta representação dos indivíduos é crucial.

Normalmente, a população inicial é gerada aleatoriamente, visto que a convergência da população deve ser independente da população inicial. O tamanho da população inicial deve proporcionar um equilíbrio entre o tempo de convergência do AG e a qualidade da solução apresentada. Se uma população inicial for muito grande, o tempo de execução do AG pode ultrapassar valores aceitáveis. Por outro lado, se a população for muito pequena, a solução apresentada pode não ser a ótima, já que haverá a possibilidade de o AG ter encontrado um valor ótimo local.

### 5.3 Coordenação dos relés de sobrecorrente direcionais sem GD

Em RAZAVI et al. (2010), um método flexível e preciso para a coordenação de relés de sobrecorrente foi apresentado. Esse algoritmo possui alta simplicidade e eficiência, sendo assim indicado para utilização na coordenação da proteção de relés de sobrecorrente.

Nessa metodologia, os valores iniciais do AG são escolhidos aleatoriamente. O múltiplo de tempo dos relés de sobrecorrente são as variáveis do problema de otimização. O cromossomo é codificado conforme mostrado na Figura 5.3.

Rn MTn	...	R3 MT3	R2 MT2	R1 MT1
--------	-----	--------	--------	--------

Figura 5.3 – Codificação do cromossomo

Onde, Rn representa o número do relé, e MT é o Múltiplo de Tempo associado à esse relés.

Os valores iniciais dos múltiplos de tempo são escolhidos randomicamente como população inicial. O nº de MT's dependerá da população inicial.

A função objetivo a ser avaliada pelo AG é

$$OF = \alpha_1 \sum_{i=1}^N t_i^2 + \alpha_2 \sum_{k=1}^P (\Delta t_{mbk} - \beta_2 (\Delta t_{mbk} - |\Delta t_{mbk}|))^2 \quad (5.1)$$

Onde:

$$\Delta t_{mbk} = t_{bk} - t_{mk} - IC \quad (5.2)$$

Sendo que:

$\Delta t_{mbk}$ : Diferença de tempo de operação para o k-ésimo par de relés, em que  $t_i$  é o tempo de operação do i-ésimo relé para uma falta perto do disjuntor do mesmo,  $t_{mk}$  e  $t_{bk}$  são os tempos de operação dos relés primários e de retaguarda para uma falta exatamente no local do disjuntor associado ao relé primário,  $N$  é o número total de relés,  $P$  é o número total de pares de relés primário/retaguarda,  $k$  representa a corrente de cada par de relés primário/retaguarda e  $i$  representa cada relé,  $IC$  é o intervalo de coordenação e pode ser 0,3 ou 0,4 (s) dependendo da precisão nas curvas dos relés, transformadores de corrente e velocidade do disjuntor.

Na equação 5.1,  $\beta_2$  é o parâmetro que considera a descoordenação.  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são usados para controlar as parcelas  $\sum_{i=1}^N t_i^2$  e  $\sum_{k=1}^P (\Delta t_{bmk} - \beta_2 (\Delta t_{mbk} - |\Delta t_{mbk}|))^2$ , respectivamente, onde  $\beta_2 (\Delta t_{mbk} - |\Delta t_{mbk}|)$  funciona como um fator de penalização, no caso de  $\Delta t_{bmk}$  ser negativo, o que seria consequência de uma descoordenação. O fluxograma do algoritmo proposto por RAZAVI et al. (2010) é mostrado na Figura 5.4.

Após cada iteração, os novos MT's pertencentes a cada relé são fornecidos ao AG. O processo estará finalizado quando for atingido o número máximo de iterações.

Para encontrar o tempo de operação dos relés, utiliza-se a equação abaixo.

$$t = \left( \frac{A}{(M)^{C-1}} + B \right) MT, \quad \left( M = \frac{I_{cc}}{I_{Pickup}} \right) \quad (5.3)$$

Onde:

$A = 0,14$ ;  $B = 0$ ;  $C = 0,02$  (Curva IEC Normalmente Inversa)

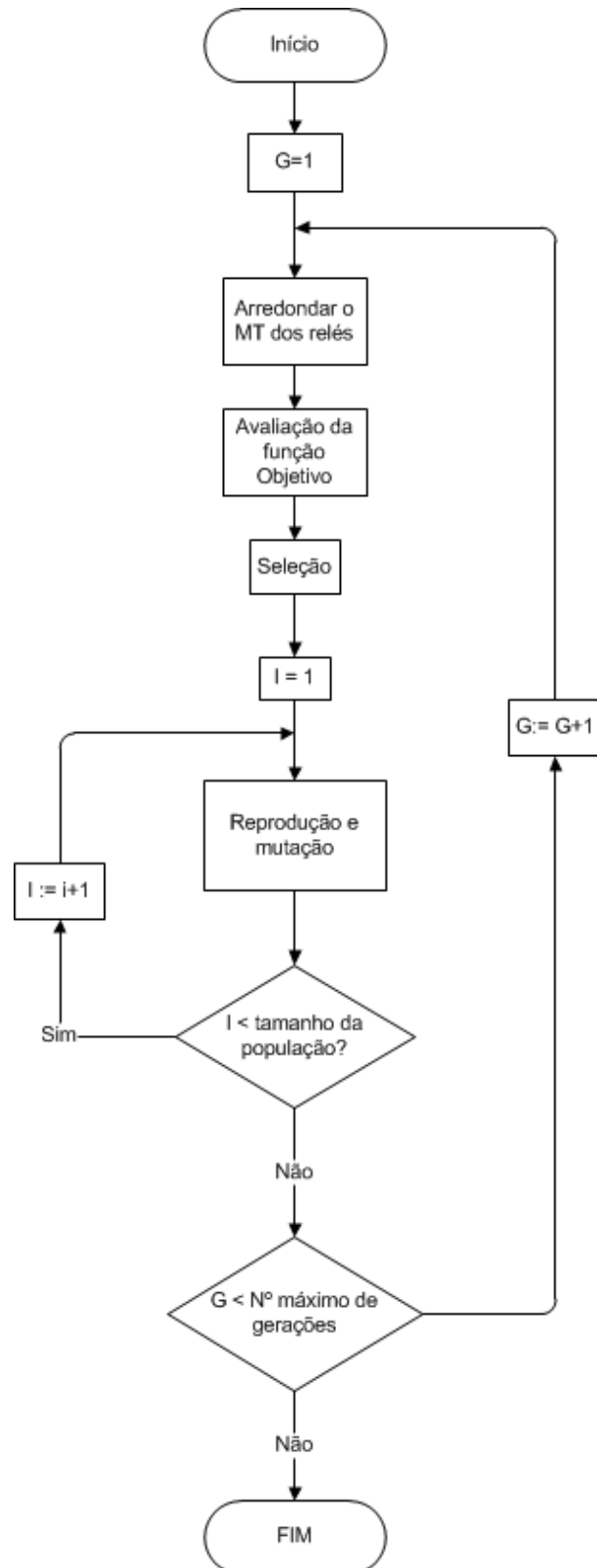


Figura 5.4 – Fluxograma do AG utilizado para coordenar os relés.

## 5.4 Restauração da coordenação original dos relés de sobrecorrente

Com a inserção das fontes de GD, o sentido e o valor do fluxo de potência, além das correntes de curto-circuito sofrerão alterações e isso poderá implicar na descoordenação dos relés de sobrecorrente. O objetivo da metodologia desenvolvida nesse trabalho foi de restaurar os ajustes iniciais, utilizando para isso, limitadores de corrente de falta. Essa metodologia é apresentada no fluxograma da Figura 5.5.

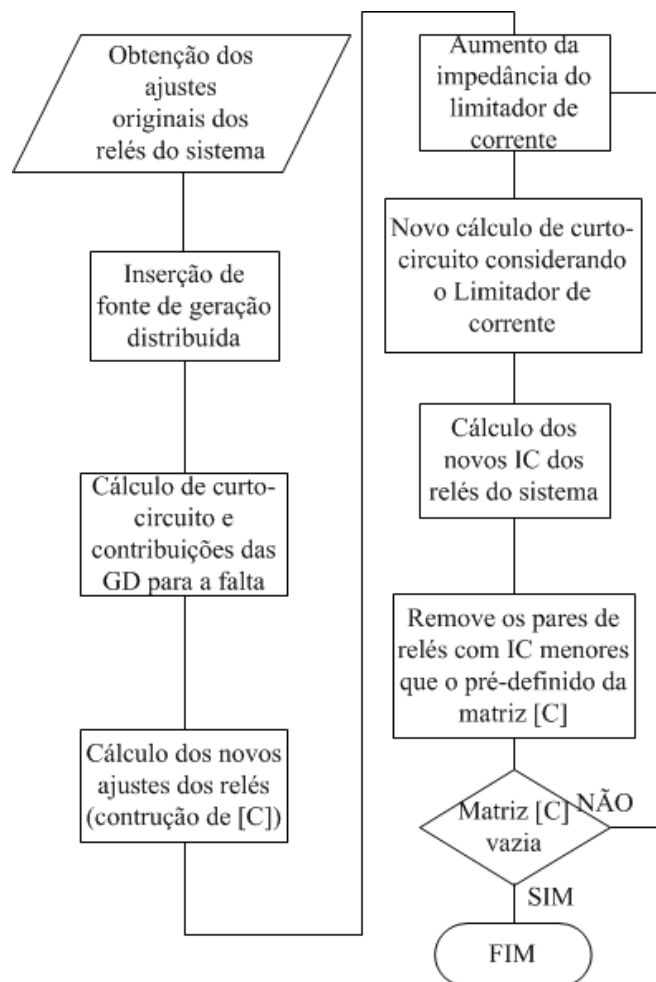


Figura 5.5 – Fluxograma da metodologia de restauração da coordenação

Na metodologia proposta foi desenvolvida no software Matlab®. Para cada inserção de fonte de GD, é realizada uma análise de curto-circuito de modo a se obter a contribuição dessas para a falta. Considerando esses novos níveis de corrente, são obtidos novos ajustes para os relés, juntamente com o seu intervalo de

coordenação (IC). Em seguida, a matriz [C] é construída, e essa inclui todos os pares de relés (retaguarda/primário) que possuem um IC menor que o valor predefinido. Para limitar a contribuição da GD para a falta, o valor da impedância do LCF é incrementado de modo iterativo. Para cada incremento na impedância do limitador, uma nova análise de curto-circuito é realizada, levando em consideração esse novo valor. Os novos IC dos pares de relés são calculados e [C] é modificada, removendo os pares de relés que possuem os IC maiores que o IC predefinido. O processo é repetido até que o mínimo valor para a impedância do limitador de corrente seja atingido, ou seja, quando todos os IC dos pares de relés forem maiores ou iguais ao IC predefinido (matriz [C] vazia). Este processo é repetido para cada combinação de fontes de GD inseridas no sistema, então o mais alto valor de impedância do limitador de corrente é escolhido, e este é considerado como o mínimo valor viável para a impedância do limitador.

## **5.5 Aplicação da metodologia proposta**

Para obter uma validação da eficiência da metodologia proposta, vários testes foram conduzidos em diversas configurações de sistema. Um deles é o subsistema de 33 kV do sistema teste IEEE 30 barras mostrado na Figura 5.6. O sistema é alimentado por três subestações (132/33 kV), representadas nas barras 1, 6 e 13. Cada linha de transmissão é composta por dois relés de sobrecorrente direcionais, um em cada extremidade. O sistema de proteção é composto por 38 relés, e teve sua coordenação realizada previamente, considerando um IC predefinido de 0,3 s.

As fontes de GD são geradores do tipo síncrono, com potência de 10 MVA e 0,15 pu de reatância subtransitória.

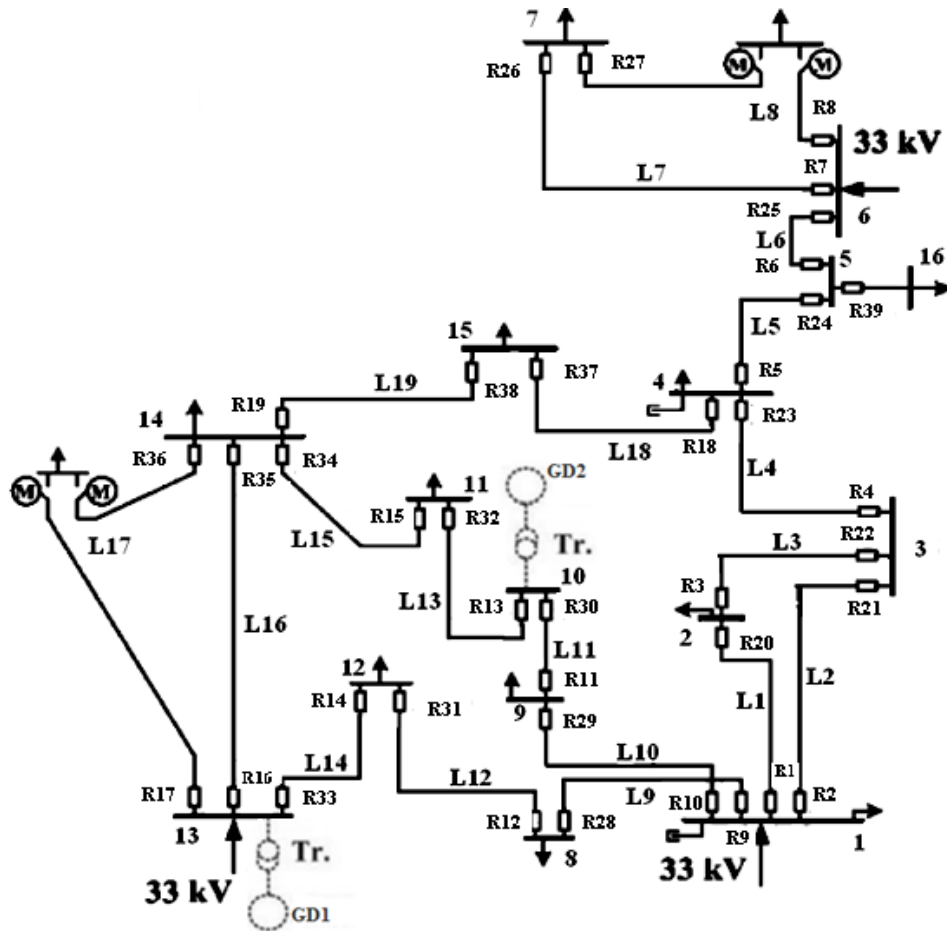


Figura 5.6 – Sistema teste IEEE 30 barras

As correntes de curto-circuito trifásico foram calculadas no início da zona de proteção primária de cada relé pelo software DigSilent®, para situação sem inserção de fontes de GD e com a inserção de fontes de GD nas barras 10 e 13. Esses valores de corrente são mostrados no Apêndice A.

Os tempos de operação dos relés de sobrecorrente utilizados no sistema teste da Figura 5.6 são mostrados na Tabela 5.1.

Com a inserção das fontes de GD nas barras 10 e 13, ocorrem alterações nos intervalos de coordenação dos relés, como é mostrado na Tabela 5.2.



Tabela 5.1 – Múltiplos de Tempo e Tempos de operação dos relés para um curto-circuito no início da zona de proteção primária

<b>Nº Relé</b>	<b>MT</b>	<b>Tempo de Operação (s)</b>	<b>Nº Relé</b>	<b>MT</b>	<b>Tempo de Operação (s)</b>
<b>1</b>	1.17	1.29	<b>20</b>	0.53	0.71
<b>2</b>	1.42	1.07	<b>21</b>	0.69	0.62
<b>3</b>	2	1.37	<b>22</b>	1.33	0.94
<b>4</b>	1.33	1.25	<b>23</b>	0.83	0.97
<b>5</b>	0.94	0.67	<b>24</b>	1.81	1.44
<b>6</b>	0.50	0.48	<b>25</b>	2	1.77
<b>7</b>	0.28	0.23	<b>26</b>	0.05	0.07
<b>8</b>	0.26	0.21	<b>27</b>	0.05	0.05
<b>9</b>	1.60	1.33	<b>28</b>	0.94	1.36
<b>10</b>	1.45	1.32	<b>29</b>	0.65	0.98
<b>11</b>	1.24	1.40	<b>30</b>	0.95	1.15
<b>12</b>	1.67	1.21	<b>31</b>	1.33	1.38
<b>13</b>	1.51	1.23	<b>32</b>	1.58	1.29
<b>14</b>	1.15	1.13	<b>33</b>	1.57	1.36
<b>15</b>	0.90	1.06	<b>34</b>	1.44	1.27
<b>16</b>	0.97	1.13	<b>35</b>	0.61	0.92
<b>17</b>	0.67	0.58	<b>36</b>	1.20	0.77
<b>18</b>	1.93	1.32	<b>37</b>	1.33	1.05
<b>19</b>	1.33	1.12	<b>38</b>	1.20	1.33

Tabela 5.2 – Descoordenações entre os pares de relés considerando a inserção da GD

Relé Primário	Relé retaguarda	Intervalo de Coordenação	Relé Primário	Relé retaguarda	Intervalo de Coordenação
1	28	-0,074	12	9	-0,061
1	29	-0,4285	14	12	-0,0546
2	29	-0,235	18	4	-0,131
3	1	-0,0525	19	15	-0,1546
4	3	-0,1118	23	37	-0,0505
9	29	-0,4854	29	30	-0,066
9	21	-0,0577	32	34	-0,0585
9	20	-0,0969	33	35	-0,146
10	28	-0,1268	34	16	-0,1
10	21	-0,0503	34	17	-0,107
10	20	-0,087	38	18	-0,0856

A Tabela 5.2 mostra todos os pares de relés que apresentaram valores do IC negativos, indicando que o dispositivo de retaguarda atuará antes do primário.

## 5.6 Resultados obtidos

Depois de aplicada a metodologia, foram estimados os valores ótimos de impedância para os limitadores de corrente conectados juntamente com as fontes de GD. Nas Figuras 5.7 e 5.8 é mostrada a relação entre o aumento da impedância dos LCF e a consequente redução no nível de corrente de falta, considerando o par de relés 9 – 29, pois apresentou a maior descoordenação.

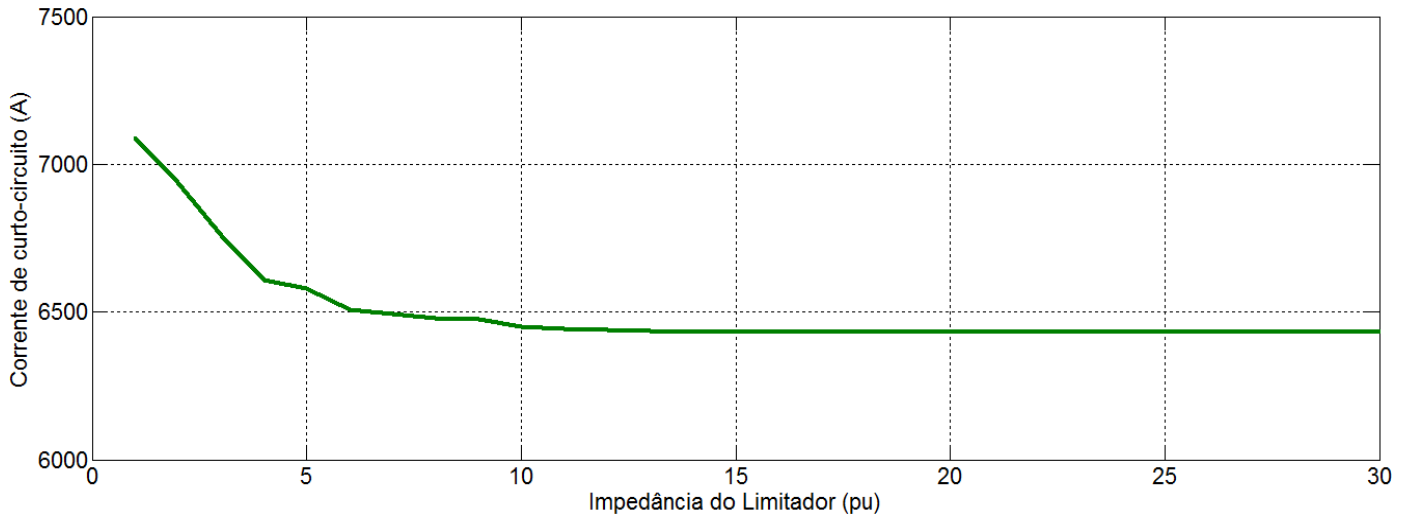


Figura 5.7 – Relação entre Impedância do LCF dimensionado e a redução da corrente de curto-circuito no relé principal (9)

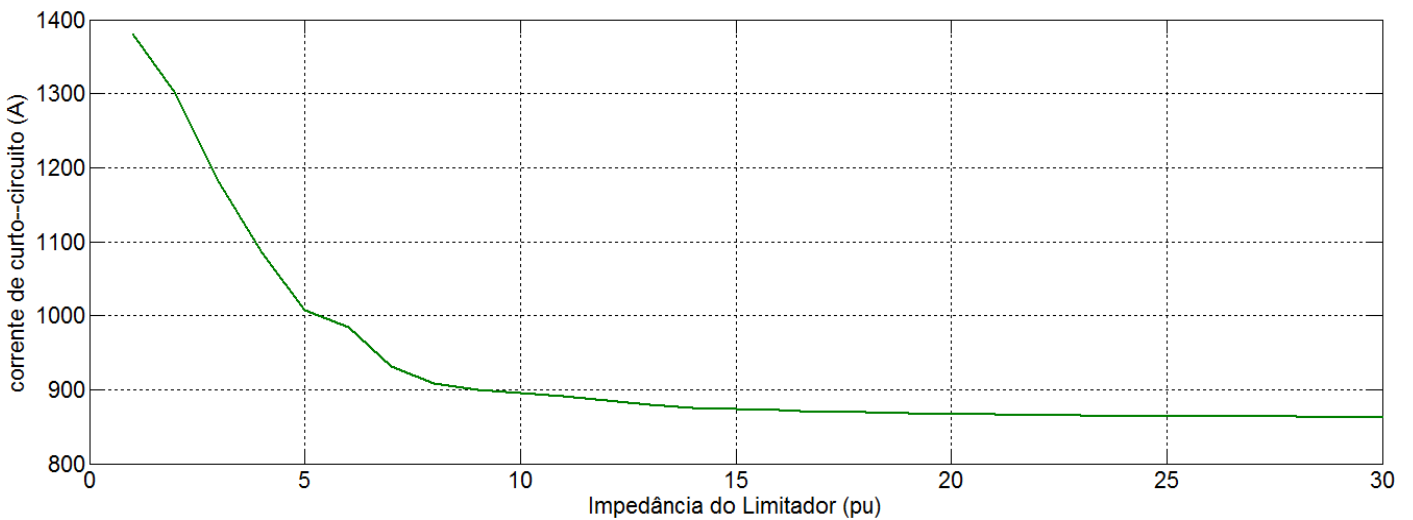


Figura 5.8 – Relação entre impedância do LCF dimensionado e a redução da corrente de curto-circuito no relé de retaguarda (29)

Analisando graficamente, nota-se que a partir de 15 pu ocorre uma variação muito pequena na corrente de curto-circuito, sendo este o valor escolhido para os limitadores de corrente de falta em conjunto com as fontes de GD. Com esse valor de limitador de corrente, os intervalos de coordenação foram restaurados, tendo o seus valores mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Intervalos de Coordenação restaurados pelo algoritmo proposto

<b>Relé Primário</b>	<b>Relé retaguarda</b>	<b>Intervalo de Coordenação</b>	<b>Relé Primário</b>	<b>Relé retaguarda</b>	<b>Intervalo de Coordenação</b>
<b>1</b>	<b>28</b>	0,3105	<b>12</b>	<b>9</b>	0,2983
<b>1</b>	<b>29</b>	0,3105	<b>14</b>	<b>12</b>	0,3142
<b>2</b>	<b>29</b>	0,3314	<b>18</b>	<b>4</b>	0,3144
<b>3</b>	<b>1</b>	0,3233	<b>19</b>	<b>15</b>	0,3058
<b>4</b>	<b>3</b>	0,2985	<b>23</b>	<b>37</b>	0,3014
<b>9</b>	<b>29</b>	0,3233	<b>29</b>	<b>30</b>	0,2988
<b>9</b>	<b>21</b>	0,2874	<b>32</b>	<b>34</b>	0,2936
<b>9</b>	<b>20</b>	0,3258	<b>33</b>	<b>35</b>	0,3512
<b>10</b>	<b>28</b>	0,3005	<b>34</b>	<b>16</b>	0,3067
<b>10</b>	<b>21</b>	0,3102	<b>34</b>	<b>17</b>	0,3125
<b>10</b>	<b>20</b>	0,3046	<b>38</b>	<b>18</b>	0,3043

## 5.7 Considerações finais

A aplicação da metodologia proposta foi capaz de reduzir drasticamente as contribuições das fontes de GD para a corrente de curto-circuito, e assim evitou alterações nos ajustes dos relés de sobrecorrente do sistema. Os ajustes sem GD foram corretamente obtidos através do algoritmo genético proposto por RAZAVI et al. (2010) e considerados como valores iniciais para o algoritmo desenvolvido.

Calculadas as correntes de curto-circuito trifásico no início da zona de proteção primária de cada relé e a respectiva contribuição de cada fonte de GD para a falta, foi verificada uma alteração considerável nos tempos de operação de cada

relé e, conseqüentemente, no intervalo de coordenação dos pares de relés, ocorrendo a operação do relé de retaguarda antes do principal.

Calculando os valores de LCF e considerando-os instalados juntamente com a fonte de GD, os intervalos de coordenação entre os pares de relés, que anteriormente apresentavam valores negativos, tiveram seus valores corrigidos para o valor do IC que foi predefinido ao início da execução do mesmo (0,28 s).

## **6 ALOCAÇÃO ÓTIMA DE LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA PARA SOLUCIONAR O PROBLEMA DE DESCOORDENAÇÃO RELIGADOR – FUSÍVEL EM SISTEMAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

### **6.1 Considerações gerais**

Faltas temporárias são responsáveis pela maioria das falhas que ocorrem em sistemas de distribuição de energia elétrica. Os esquemas de proteção utilizados nesses sistemas são cuidadosamente projetados a fim de realizar a proteção de equipamentos quando os curtos-circuitos são do tipo permanente, mas também evitar o desligamento desnecessário de consumidores e ramais quando houver a ocorrência de faltas temporárias.

Devido ao fato de os dispositivos de proteção operarem de acordo com curvas tempo-corrente, a inserção de fontes de GD pode causar uma descoordenação entre os diversos dispositivos, bem como, a alteração do fluxo de corrente de sua natureza radial para um fluxo bidirecional.

A metodologia para a alocação de LCF em sistemas de distribuição, com o intuito de eliminar a descoordenação entre religadores e fusíveis devido à inserção de fontes de GD é apresentada ao longo do capítulo.

### **6.2 Fusíveis**

O elo-fusível é o elemento responsável pela detecção das sobrecorrentes. As dimensões e resistividade elétrica determinam os valores de correntes e tempos de fusão associados ao elemento fusível (características operativas). Independente do tipo e material, um fusível apresenta diferentes funções básicas. Primeiramente ele deve ser capaz de perceber uma condição de sobrecorrente no sistema que está protegendo. Essa sobrecorrente causa um aumento de temperatura no elemento fusível que leva a sua fusão parcial (baixa sobrecorrente) ou completa (elevada sobrecorrente) do elemento. Nesse instante, o

fusível deve interromper essa sobrecorrente e suportar a tensão de restabelecimento transitória (TRT) durante ou após a interrupção.

De acordo com as características de atuação, os elos fusíveis utilizados na proteção de sistemas de distribuição são classificados em H, K e T.

Elos do tipo H possuem corrente nominais até 8 A, e são empregados na proteção de transformadores de distribuição de baixa potência. São chamados fusíveis de alto surto, pois não fundem devido a surtos transitórios, como energização de transformadores. Possuem uma característica de operação lenta, não possuindo capacidade de sobrecarga (GIGUER, 1988).

Os elos tipo K e T são empregados na proteção de ramais, tendo como principal diferença a velocidade de atuação. O elo K possui uma característica de atuação rápida e o tipo T possui característica lenta (GIGUER, 1988).

O fusível deve facilitar sua coordenação com os outros dispositivos de proteção do sistema, minimizando assim o número de consumidores afetados pela sua atuação. Esta coordenação na maioria das vezes é realizada com dispositivos que são protegidos (do lado da carga) e dispositivos que realizam a proteção de retaguarda (do lado da fonte) do elo fusível. Por essa razão, os fabricantes disponibilizam curvas de tempo – corrente (TCC's) de seus fusíveis, que são as principais ferramentas utilizadas em estudos de coordenação.

Os elos tipo K e T são divididos em dois grupos, de acordo com as correntes nominais:

- Preferenciais: 6, 10, 15, 25, 40, 65, 100, 140 e 200 A;
- Não preferenciais: 8, 12, 20, 30, 50 e 80 A.

Essa classificação é estabelecida devido ao fato de não existir seletividade entre elos preferenciais e não preferenciais adjacentes. Desta forma, foram considerados nesse trabalho apenas os elos preferenciais.

Os elos K e T suportam 150% de sobrecarga por tempo indefinido. Essa capacidade de sobrecarga mostra-se importante em aplicações onde a coordenação limita a escolha da capacidade nominal do elo (SHORT, 2004). Na Figura 6.1 é mostrada uma curva tempo – corrente característica de um elo tipo K.

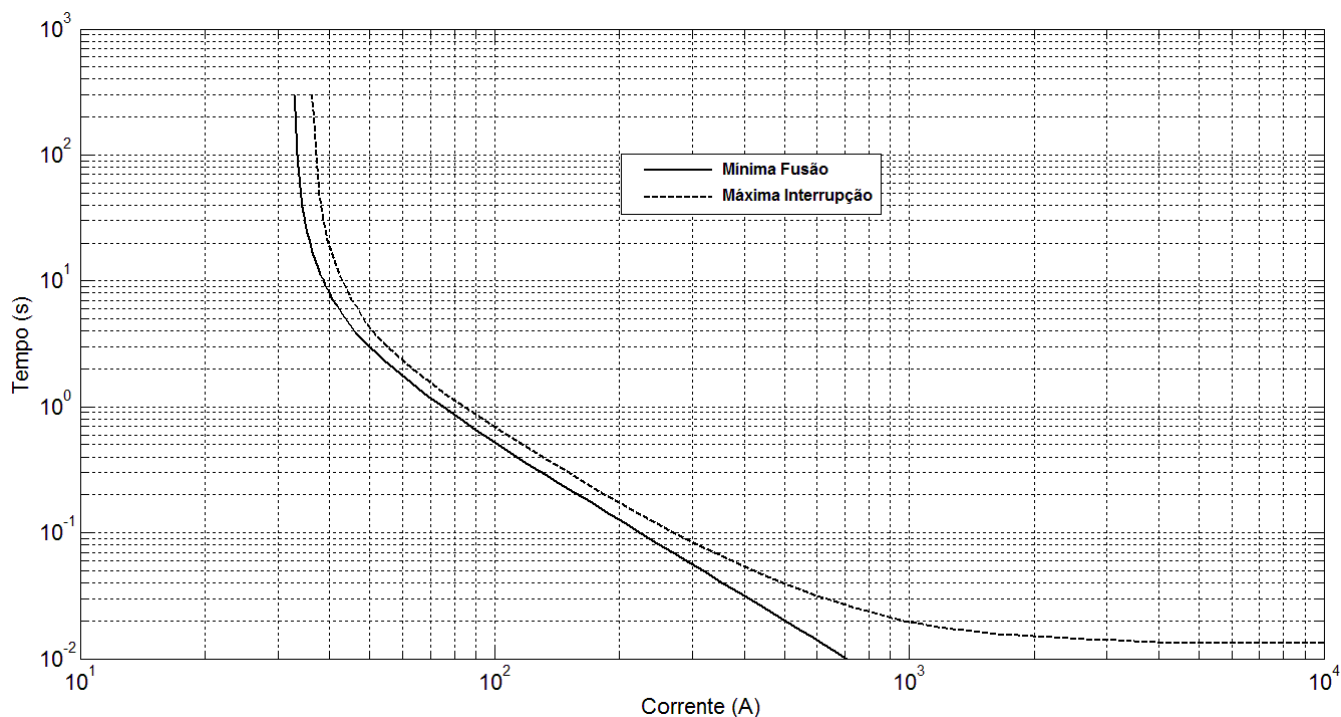


Figura 6.1 – Curvas de mínima fusão e máxima interrupção de fusível tipo K

O dimensionamento dos elos fusíveis deve levar em consideração os aspectos referentes ao crescimento de carga, possibilidades de manobra e capacidade de interrupção da chave fusível.

A corrente de curto-circuito máxima simétrica, no ponto de instalação do elo-fusível, deve ser menor que a corrente de interrupção simétrica do elo-fusível.

A corrente nominal do fusível deverá ser aproximadamente igual a 150% do valor da máxima corrente de carga no ponto considerado. Também deverá ser no máximo,  $\frac{1}{4}$  da corrente de curto-circuito fase-terra mínimo no final do trecho, considerando também o fim do trecho para o qual serve como proteção de retaguarda (GIGUER, 1988).

### 6.3 Religadores

Dispositivos religadores são dispositivos de sobrecorrente que automaticamente atua e religa o circuito um número predefinido de vezes com o intuito de eliminar faltas temporárias ou isolar faltas permanentes.

Religadores podem ser programados para diferentes números de operações:



- Duas instantâneas e duas temporizadas;
- Três instantâneas e uma temporizada;
- Uma instantânea e três temporizadas;
- Todas instantâneas;
- Todas temporizadas.

A operação dos religadores é ilustrada na Figura 6.2, onde ocorre um curto-circuito entre fases com valor de 600 A.

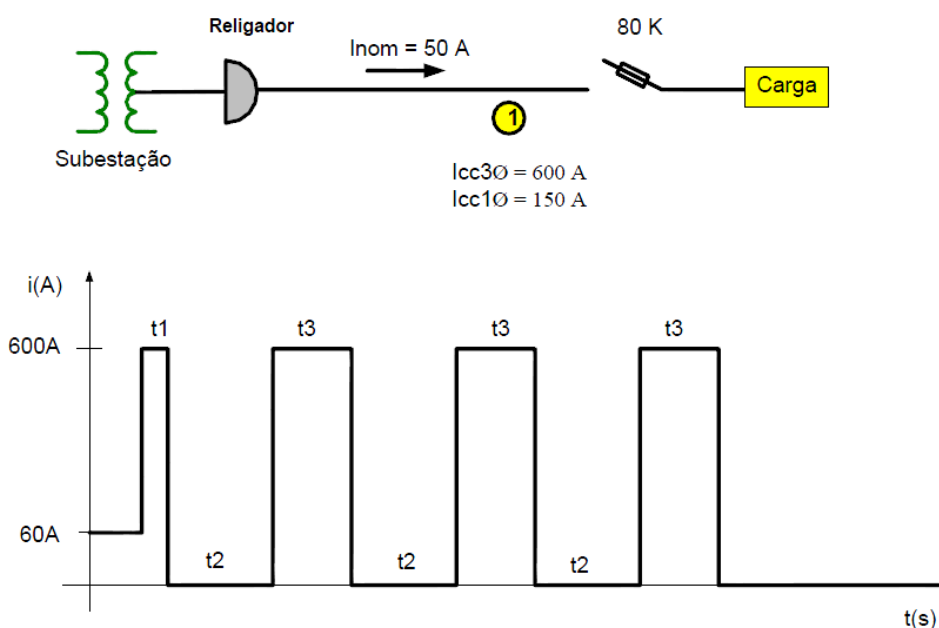


Figura 6.2 – Funcionamento do religador

O religador da figura 6.2 é programado para realizar uma operação rápida (t1) e três operações lentas (t3). O tempo t2 representa o tempo de religamento entre operações, que deve ser ajustado com o intuito de permitir a coordenação entre equipamentos a jusante e a montante, cuja operação dependa desse tempo.

O religador foi dimensionado de acordo com critérios utilizados por diversas empresas concessionárias de energia. Esses dispositivos são dimensionados para suportar a corrente nominal de carga e interromper a corrente de curto-circuito máxima no ponto onde são instalados.

### 6.3.1 Ajuste do “Pickup” de fase do religador

Os critérios para o ajuste da operação de fase do religador devem-se obedecer dois critérios principais:

- A corrente nominal de operação do religador deve ser mais que a corrente de carga a que está sujeito o equipamento, multiplicada por um fator de crescimento dentro de um horizonte de estudo.

$$I_n > FC * I_{CARGA} \quad (6.3.1)$$

ou também:

$$I_{pickup-fase} > 2 * FC * I_{CARGA} \quad (6.3.2)$$

$FC$  pode ser calculado através de:

$$FC = \left(1 + \frac{\%}{100}\right)^n \quad (6.3.3)$$

onde:

$I_n$ : Corrente nominal da bobina série do religador;

$I_{CARGA}$ : Corrente de carga máxima passante pelo ponto de instalação do religador (já levando em consideração manobras);

$FC$ : Fator de crescimento de carga dentro de um horizonte de estudo em anos;

%: Fator de crescimento anual de carga, em porcentagem;

$n$ : Número de anos em que é considerado o horizonte de estudo.

O fator multiplicativo “2” é utilizado, pois, para religadores eletromecânicos, a corrente de pick-up é o dobro da nominal.

- O pick-up deverá ser menor que a corrente de curto-circuito bifásico, dividida por um fator de segurança, do final do trecho onde se deseja

que haja coordenação e seletividade entre o religador e outros dispositivos de proteção.

$$I_{pickup-fase} < \frac{I_{cc-2Fmin}}{FS} \quad (6.3.4)$$

onde:

$I_{cc-2Fmin}$ : Menor valor para o curto-circuito bifásico do trecho protegido pelo religador;

$FS$ : é um fator de segurança que leva em consideração erros envolvidos no cálculo das correntes de curto-circuito, erros nas relações de transformação e erros do dispositivo. Deve estar na faixa de 1,5 a 2.

#### 6.4 Coordenação religador-fusível com geração distribuída

A coordenação entre o religador e o fusível é considerada satisfatória quando a operação rápida do religador prevenir a atuação do fusível para faltas transitórias, mas garanta a atuação do fusível durante a operação temporizada do religador. Com a inserção de fontes de GD, haverá um aumento na corrente de falta, o que acarretará em uma operação errada de fusíveis e religadores, causando uma desconexão desnecessária de trechos do sistema de distribuição. A Figura 6.3 mostra um sistema de distribuição típico, sem fontes de GD, enquanto que o seu coordenograma é mostrado na Figura 6.4.

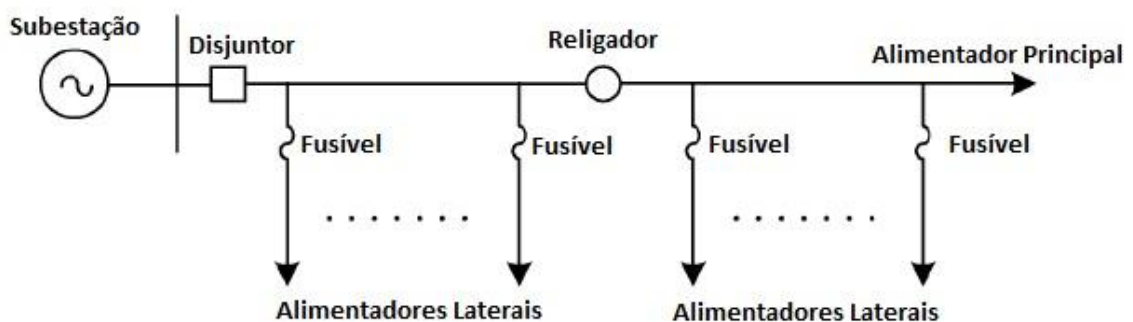


Figura 6.3 – Sistema Elétrico de distribuição

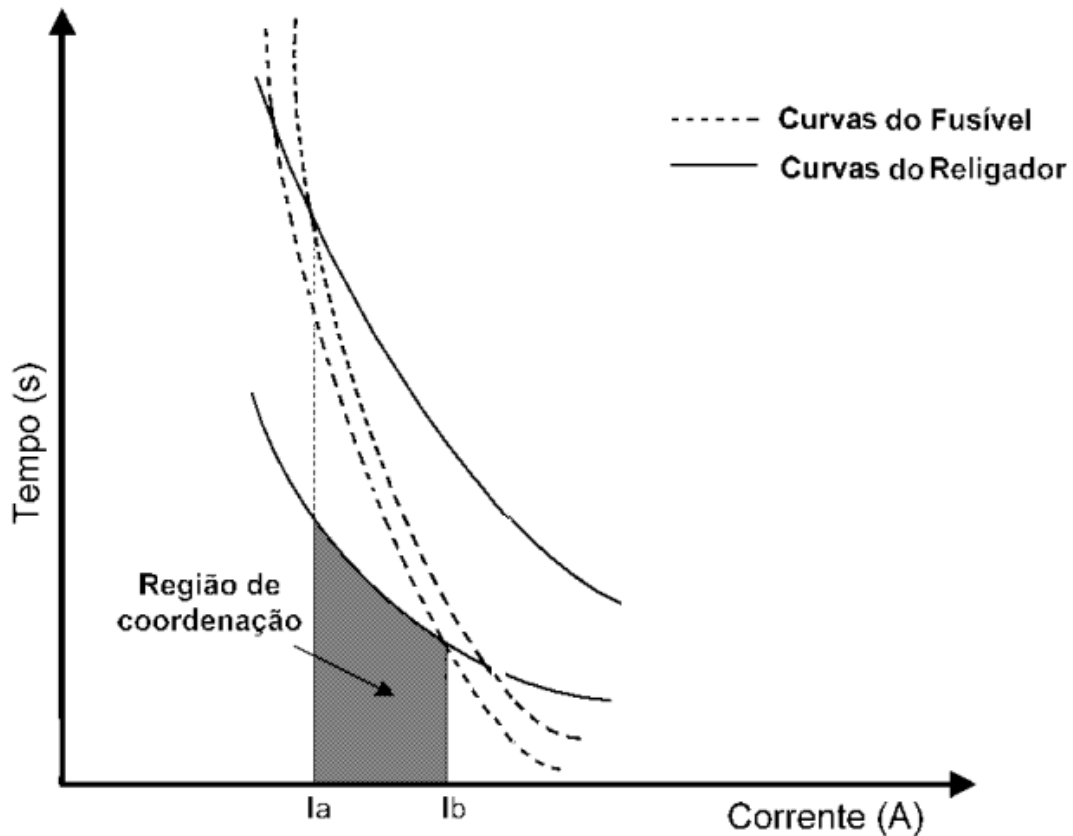


Figura 6.4 – Coordenação Religador-Fusível sem inserção de GD

Pelo gráfico da Figura 6.4 pode-se notar que a interseção entre a curva de máxima interrupção do fusível e a curva de operação lenta do religador delimitam o limite inferior da zona de coordenação, já a interseção da curva de mínima fusão do fusível com a curva de operação rápida do religador determina o limite superior da zona de coordenação. Segundo a filosofia de proteção comumente utilizada, durante uma situação de falta, deverá primeiramente ocorrer a operação rápida do religador, a fim de discriminar faltas temporárias e também evitar a operação do fusível desnecessariamente. Caso a falta seja permanente, deverá ocorrer a fusão do elo e a imediata interrupção do circuito com defeito. Se houver falha na operação do fusível, a curva de operação lenta do religador servirá como proteção de retaguarda, desligando o circuito definitivamente.

No caso do sistema da Figura 6.5, duas fontes de GD são inseridas intercaladamente e sua influência na corrente de curto-circuito em cada dispositivo de proteção é mostrada na Tabela 6.1.

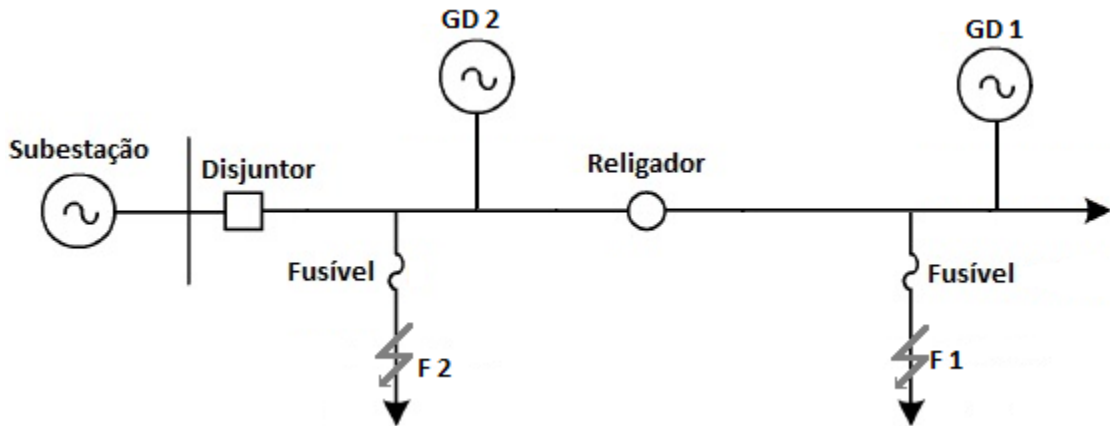


Figura 6.5 – Sistema Elétrico de Distribuição com a inserção de Fontes de GD

Tabela 6.1 – Corrente de curto-circuito nos dispositivos de proteção

Fonte de GD	Local da Falta	Corrente no Religador	Corrente no elo-fusível
<b>GD1</b>	F1	$I_{rel} = I_{SE}$	$I_{elo} = I_{SE} + I_{GD1}$
<b>GD1</b>	F2	$I_{rel} = I_{GD1}$	$I_{elo} = I_{SE} + I_{GD1}$
<b>GD2</b>	F1	$I_{rel} = I_{SE} + I_{GD2}$	$I_{elo} = I_{SE} + I_{GD2}$
<b>GD2</b>	F2	$I_{rel} = 0$	$I_{elo} = I_{SE} + I_{GD2}$

Com a inserção da fonte de GD, a corrente de curto-circuito que cada equipamento é sujeito aumenta, causando assim a má operação e conseqüente descoordenação dos mesmos, como é mostrado no coordenograma da Figura 6.6.

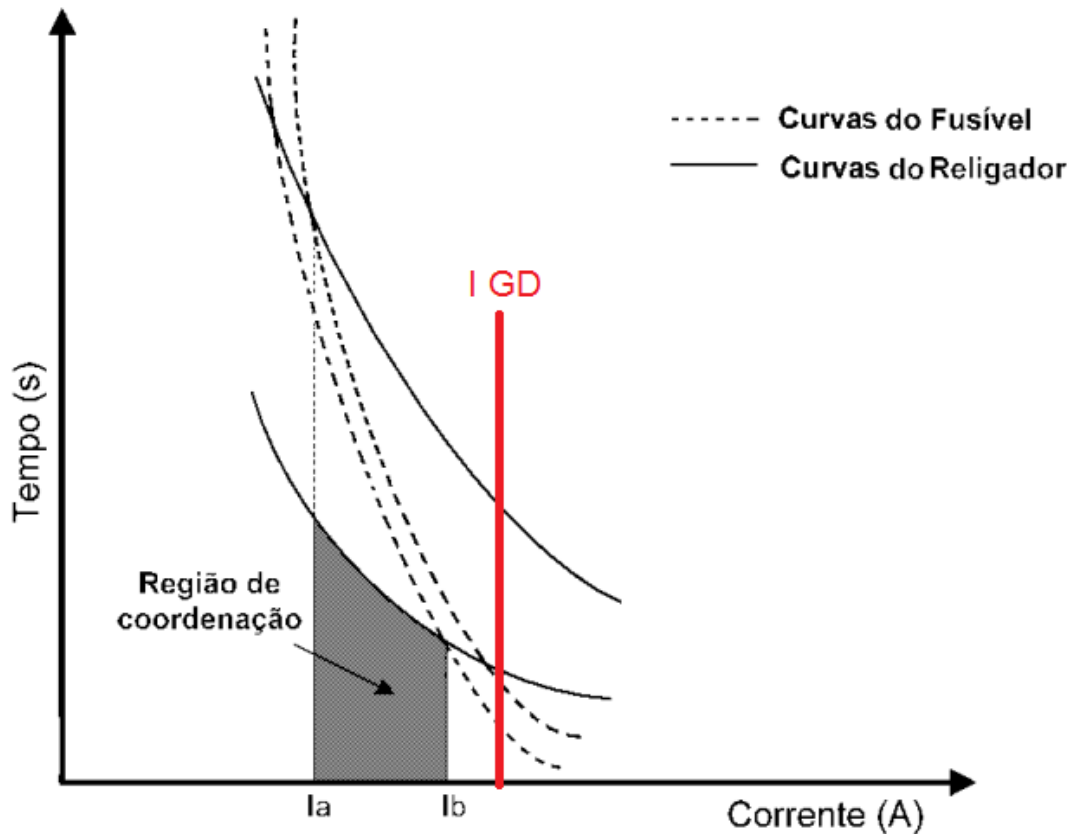


Figura 6.6 – Coordenação Religador-Fusível com a inserção de GD

Se considerarmos mantidos os mesmos elos e religador, a corrente de curto-circuito, considerando a contribuição da GD, fará com que haja a operação do elo antes do religador, caracterizando uma descoordenação.

## 6.5 Metodologia para alocação de LCF

A metodologia para alocação ótima de LCF proposta faz uso dos Algoritmos Genéticos e visa encontrar a solução com o menor custo para a instalação de LCF e modificações em dispositivos de proteção. Nessa metodologia, o objetivo é encontrar a quantidade, dimensão e os locais indicados para a instalação dos LCF, considerando as zonas de coordenação definidas pelas curvas de religadores e elos-fusíveis.

### 6.5.1 Codificação do Problema

A população foi codificada binariamente considerando três parâmetros: O número de LCF a serem instalados, seu dimensionamento e sua localização. O primeiro valor do cromossomo representa o alimentador onde deverá ser instalado o LCF. O segundo valor informa se haverá ou não um LCF instalado no alimentador. Caso o valor do gene seja 0, não haverá LCF instalado, e se for 1, estará presente no respectivo alimentador. O terceiro valor representa o dimensionamento ótimo de cada LCF. A configuração de cada indivíduo da população é mostrada na Figura 6.7.

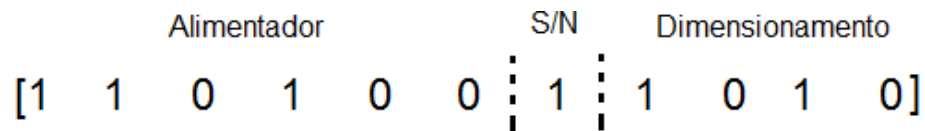


Figura 6.7 – Codificação dos indivíduos

Na codificação dos indivíduos, os seis primeiros genes representam o número do alimentador em que o LCF é alocado. O sétimo valor informa se há ou não limitador instalado no alimentador e os quatro últimos valores são referentes ao dimensionamento do LCF.

### 6.5.2 Função Aptidão

A função objetivo será avaliada para cada indivíduo da população. *Aptidão* é uma medida de qualidade usada para comparar as diferentes soluções, então é de extrema importância uma correta modelagem do problema. A função objetivo a ser minimizada será:

$$f = N_{fus} \times C_{fus} + N_{rel} \times C_{rel} + N_{LCF} \times C_{LCF} + C_p \quad (6.5.1)$$

Onde:

*N<sub>fus</sub>*: Número de fusíveis a serem substituídos;

*C<sub>fus</sub>*: Custo de cada fusível;

*N<sub>rel</sub>*: Número de religadores substituídos;

$C_{rel}$ : Custo de cada religador;

$N_{LCF}$ : Número de LCF instalados;

$C_{LCF}$ : Custo de cada LCF;

$C_p$ : Fator de penalização;

$C_p = 0$ , caso a corrente de falta na barra seja menor que a corrente de falta trifásica máxima na mesma. Se a corrente de falta for maior que a máxima,  $C_p$  recebe o valor de 10000.

### 6.5.3 População Inicial

A população inicial é gerada automaticamente, com a quantidade de indivíduos escolhida previamente, buscando um equilíbrio entre a qualidade de soluções e o desempenho computacional do algoritmo. O aumento da população inicial aumenta a probabilidade do algoritmo encontrar um mínimo global em detrimento de sua velocidade de execução. Neste trabalho foram considerados diversos tamanhos de população inicial, chegando ao número de 200 indivíduos, valor que apresentou uma solução consistente, bem como uma velocidade de convergência aceitável.

### 6.5.4 Funcionamento do Algoritmo Proposto

Na Figura 6.8 é mostrado o fluxograma de funcionamento do AG para melhor visualização. Inicialmente, uma população inicial é gerada aleatoriamente. Para cada geração, é obtida a matriz  $Y_{bus}$  e é realizado o cálculo das correntes de curto-circuito nas barras. Em seguida, cada indivíduo da população é avaliado pela função objetivo, que constrói um ranking crescente de custos. Os indivíduos que apresentarem o menor custo são selecionados para realizarem o cruzamento, gerando assim uma nova população a ser avaliada pela função objetivo.

Para cada geração são determinadas soluções factíveis para a alocação e dimensionamento dos LCF, mas ao final da execução do algoritmo é apresentada



apenas a solução com o menor custo de substituição de equipamentos e instalação de LCF.

Depois de obtidos os valores de instalação dos limitadores e também os equipamentos substituídos, é realizada a avaliação em relação à coordenação entre elos-fusíveis e religador.

Considerando o religador como um equipamento previamente dimensionado, com suas curvas de tempo-corrente rápidas e lentas predefinidas, são verificadas todas as correntes de falta após a instalação dos LCF. Se o valor da corrente de falta ultrapassar o limite de coordenação delimitado pelas curvas de elo-fusível e religador, este elo é marcado para ser substituído.

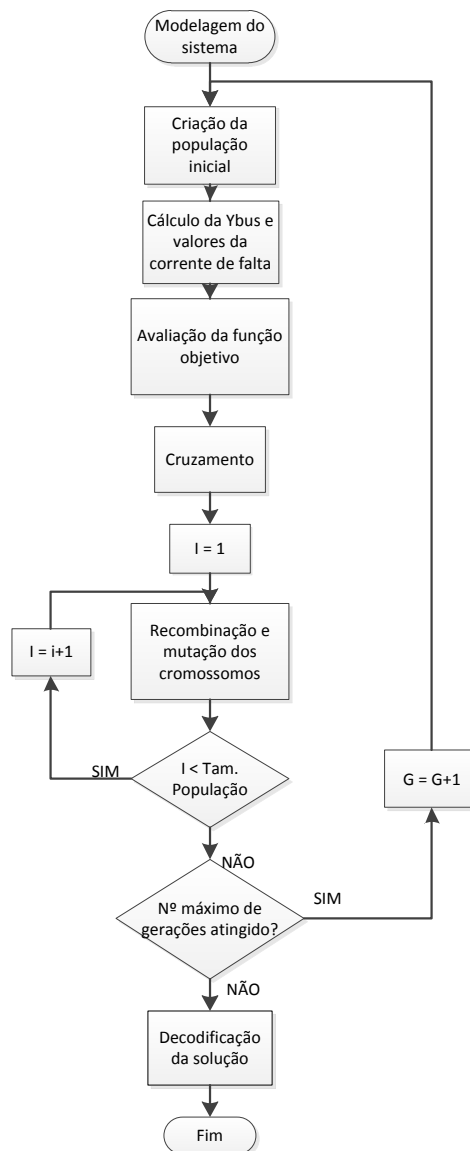


Figura 6.8 – Fluxograma de funcionamento da metodologia de Alocação de LCF

### 6.5.5 Restrições impostas ao AG

As restrições impostas à função objetivo para garantir o desempenho ótimo do algoritmo foram:

- Capacidade de interrupção do dispositivo religador: Se ultrapassada essa capacidade, o algoritmo sinaliza uma troca de equipamentos, o que elevará o custo e por consequência, da função objetivo;
- Superação da corrente dos elos-fusíveis: Após realizar a alocação otimizada dos LCF, se a corrente de falta exceder a corrente máxima admitida, esse elo deverá ser substituído.
- Corrente máxima de coordenação delimitada pelos dispositivos de proteção principal e de retaguarda;

## 6.6 Resultados obtidos

Para validação da metodologia proposta, foram conduzidos testes no sistema IEEE 37 nós modificado, alimentado por uma subestação cujo transformador considerado possui a ligação  $\Delta - Y$ , simulado no software ATP®, ilustrado na Figura 6.9. O ponto de partida foi a verificação do dimensionamento e coordenação entre os elos presentes e a coordenação elo-religador. A tabela dos curtos-circuitos completa encontra-se no Anexo E

Os dados de configuração do AG desenvolvido foram:

- Tamanho da população: 200 indivíduos;
- Forma de seleção: Roleta;
- Taxa de cruzamento: 0.5;
- Taxa de mutação: 0.015;
- Critério de parada: 2000 gerações;

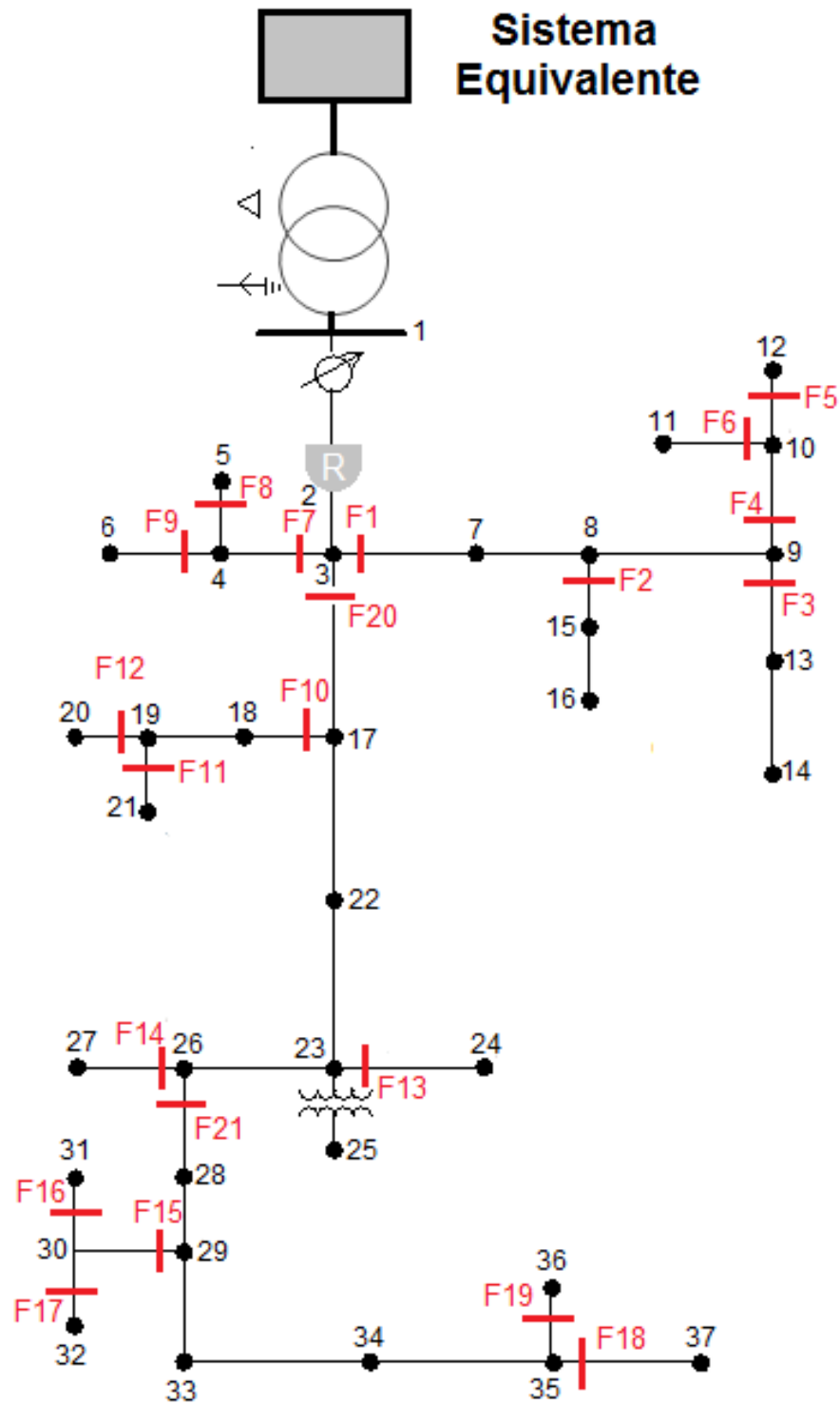


Figura 6.9 – Sistema teste IEEE 37 nós modificado

Esse sistema é composto por 21 elos fusíveis (em vermelho) e por um relógio situado na subestação. Os dados completos desse sistema são encontrados no Anexo B.

Tabela 6.2 – Elos fusíveis originais coordenados

<b>Posição do Elo</b>	<b>Elo-Fusível</b>
F1	40K
F2	25K
F3	15K
F4	25K
F5	6K
F6	15K
F7	15K
F8	10K
F9	10K
F10	25K
F11	6K
F12	6K
F13	10K
F14	6K
F15	15K
F16	6K
F17	10K
F18	6K
F19	10K
F20	100K
F21	65K

A coordenação entre os elos é realizada previamente considerando os critérios vistos na seção 6.2.

O algoritmo desenvolvido fornece a opção de as fontes de GD serem inseridas em qualquer nó do sistema. No caso estudado, foram inseridas 2 fontes de GD para realizar o estudo, nos nós 27 e 37, como é mostrado na Figura 6.10.

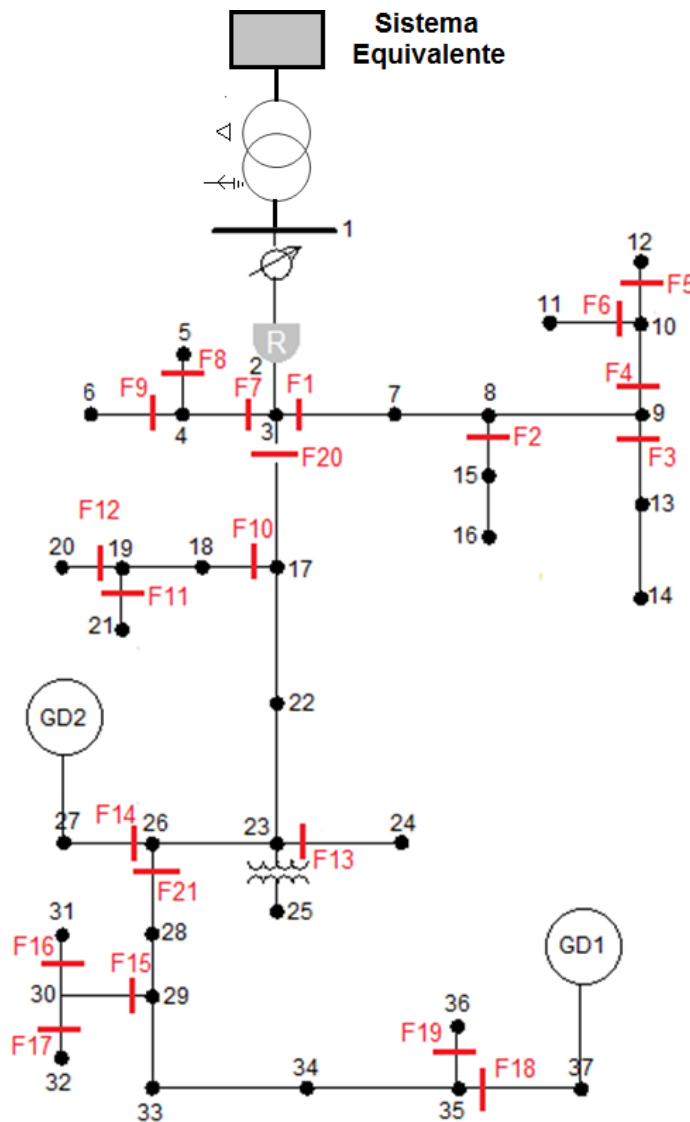


Figura 6.10 – Sistema teste IEEE 37 nós modificado com inserção de fontes de GD

Aplicando o algoritmo proposto e considerando as inserções de fontes de GD, obtiveram-se os seguintes valores:

- Limitador de corrente 1: 7  $\Omega$ , instalado entre os nós 2 e 3;
- Limitador de corrente 2: 6  $\Omega$ , instalado entre os nós 23 e 26.

Após a inserção dos LCF, 10 elos deverão ser substituídos para manter a coordenação.

Tabela 6.3 – Elos-fusíveis a serem substituídos considerando fontes de GD nos nós 27 e 37

<b>Elo substituído</b>	<b>Novo elo</b>
<b>F1</b>	65K
<b>F2</b>	40K
<b>F3</b>	25K
<b>F5</b>	10K
<b>F11</b>	10K
<b>F14</b>	10K
<b>F15</b>	25K
<b>F16</b>	10K
<b>F17</b>	15K
<b>F18</b>	10K
<b>F19</b>	15K

Com a substituição destes elos e a instalação dos LCF indicados, o custo total das modificações no sistema foi baseado nos seguintes valores:

- Custo do LCF: R\$ 40.000,00 + valor dependente do valor da impedância; (ABB)
- Elos-Fusíveis: (CERTEL Engenharia)
  - 6K: R\$ 2,23;
  - 10K: R\$ 2,23;
  - 15K: R\$ 2,23;

- 25K: R\$ 2,24;
  - 40K: R\$ 5,63;
  - 65K: R\$ 8,58;
  - 100K: R\$ 10,67;
  - 200K: R\$ 14,25.
- Chave fusível Porcelana: R\$ 143,00 (Eletrosud Materiais Elétricos);
  - Religador: ARTECHE: R\$ 30.000,00 (CERTEL Engenharia).

Considerando os valores acima e a relação de LCF instalados e equipamentos substituídos, foi obtido o valor de R\$ 85.780,00. Esse valor é referente a dois LCF (R\$ 82.000,00) e a substituição de 11 elos fusíveis (R\$ 3.780,00).

## **6.7 Considerações finais**

O capítulo apresentou uma metodologia destinada a amenizar os efeitos negativos oriundos da inserção de fontes de GD na coordenação elo-religador de um sistema de distribuição de energia. A alocação e dimensionamento de dispositivos LCF foram feitas de modo que o mínimo custo de alteração nos dispositivos de proteção e instalação dos LCF foi obtido através de um Algoritmo Genético. Os valores dos equipamentos foram obtidos através das empresas fabricantes. Os valores finais de custo alcançados pelo algoritmo mostram que, considerando a inserção de fontes de GD e a aplicação de LCF corretamente alocados e dimensionados, compensam em relação a uma expansão do sistema elétrico como um todo, visto que seria necessária a construção de alimentadores extras para suprir a demanda de carga.

## **7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

### **7.1 Conclusões**

Este trabalho sugere soluções que visam minimizar as influências da inserção de fontes de geração distribuída na proteção de sistemas elétricos de potência, utilizando, para isso, dispositivos chamados limitadores de corrente de falta. Esses dispositivos são imperceptíveis quando o sistema está em operação normal, mas quando ocorre um curto-circuito, rapidamente inserem na rede uma impedância em série, limitando as correntes de falta.

Apresentou-se uma metodologia que propõe a instalação dos limitadores de corrente juntamente com as fontes de geração distribuída, o que elimina a necessidade de um estudo para determinar o local de instalação dos mesmos. Por meio dessa pode-se realizar a inserção das fontes de GD e manter a coordenação original dos relés de sobrecorrente presentes no sistema. Nos resultados foram percebidas significantes reduções nas contribuições das fontes de GD para as faltas, e com isso foi capaz de manter as configurações originais obtidas utilizando o algoritmo genético desenvolvido por RAZAVI et al. (2010).

Mais além, outra metodologia foi desenvolvida utilizando os mesmos dispositivos limitadores de corrente, porém para resolver o problema da descoordenação elo-religador em sistemas de distribuição de energia elétrica e ao mesmo tempo, reduzir ao máximo os custos de instalação ou substituição de equipamentos necessários. Utilizando Algoritmos Genéticos, foram encontrados os melhores locais para instalação dos limitadores, bem como, seu dimensionamento. Se mesmo com a inserção desses dispositivos houver uma superação de dispositivos de proteção, esses últimos são selecionados para serem substituídos. O custo mínimo foi obtido considerando valores comerciais dos dispositivos.



## 7.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Implantação de melhorias no Algoritmo Genético a fim de melhorar a qualidade dos resultados. Considerar o comportamento transitório dos limitadores de corrente de falta, pois esses efeitos causam a passagem de uma alta corrente de falta pelos relés de sobrecorrente, o que pode gerar descoordenações dos pares de relés. Essa corrente de falta pode causar também uma atuação do relé antes da operação do LCF;
- Considerar as influências dos diferentes tipos de geradores utilizados na operação das fontes de GD;
- Formulação do problema de alocação dos LCF utilizando algoritmos multiobjetivos, o que permitirá não só a determinação da alocação dos dispositivos de proteção, como também a alocação ótima das fontes de GD.
- Desenvolver estudos do comportamento dinâmico do sistema, com o intuito de analisar o impacto da alocação dos LCF nos locais determinados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-GALIL, T. K. *et al.* **Protection Coordination Planning with Distributed Generation**. Canmet Energy Technology Centre, 2007.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Resolução nº 395, de 04 de dezembro de 1998**. Estabelece os procedimentos gerais para registro e aprovação de estudos de viabilidade e projeto básico de empreendimentos de geração hidrelétrica. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/cedoc/res1998395.pdf>. Último acesso em Junho, 2012.

BARAN M., EL-MARKABI I, **Adaptive Over Current Protection for Distribution Feeders with Distributed Generators**, IEEE PES Power Systems Conference and Exposition”, Vol. 2, pp. 715-719, 2004.

BARIN, A.; **Metodologia para a análise dos efeitos da geração distribuída sobre as características operacionais dos sistemas de distribuição utilizando técnicas multicriteriais**. Dissertação de Mestrado. UFSM, 2007.

BARKER, P. P. and MELLO, R. W.. **Determining the impact of distributed generation on power systems, Radial Distribution Systems**, Vol. 3, Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, EUA, pp. 1645–1656. Part 1, 2000.

BASSO, T.; FRIEDMAN, N.R.; **IEEE 1547 National Standard for Interconnecting Distributed Generation: How Could It Help My Facility?**, 2003. Disponível em <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34875.pdf> Último acesso em Junho de 2012.

BRAHMA, S.; GIRGIS, A.A.; **Development of Adaptive Protection Scheme for Distribution Systems With High Penetration for Distributed Generation**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, Nº 1, 2004.

CAMPITELLI, E. M. **Análise e Estudos para Alocação e Ajustes de Dispositivos de Proteção em Redes de Média Tensão de Energia Elétrica com Geração Distribuída**. Dissertação de Mestrado, UNESP, 2007.

CELG. **Norma Técnica NTD-08: Critérios de projetos de redes de distribuição aéreas urbanas nas classes 15 e 36,2 kV**. Goiás, 1996.

CHAITUSANEY S., YOKOYAMA A.. **Prevention of Reliability Degradation from Recloser-Fuse Miscoordination Due to Distributed Generation**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, Nº 4, pp. 2545-2554, 2008.

CONCEIÇÃO, C.L. **Impactos da Geração Distribuída no Sistema de Potência**, Trabalho individual, apresentado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2003.

CORRÊA, R.; OBREGON, L.C.; CARDOSO JUNIOR, G.; MORAIS, A.P.; SANTOS, E.M & FARIAS, P.E. **Coordenação Ótima de Relés de Sobrecorrente por Meio de um Algoritmo Genético que Incorpora Programação Linear**. 3º Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos SBSE, 2010.

CPFL. **Norma técnica: Proteção de redes aéreas de distribuição – Sobrecorrente**. [s.i.], 2003.

DONNELLY, M. K. **Impacts of the distributed utility on transmission system stability**, IEEE Transactions on Power Systems 11: 741–746, 1996.

DOYLE M.T, **Reviewing the Impacts of Distributed Generation on Distribution System Protection**, IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, pp. 103-105, 2002.

EDWARDS, F. V. et al. **Dynamics of Distribution Networks with Distribution Generation**. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Glasgow, Vol.2, pp. 1032 – 1037, 2002.

ELETROBRÁS. Comitê de Distribuição. **Proteção de sistemas aéreos de distribuição**. Centrais Elétricas Brasileiras – Eletrobrás. V.2. Rio de Janeiro: Campus Eletrobrás, 1982.

EL-KHATTAM, W. & SIDHU, T.S., **Resolving the Impact of Distributed Renewable Generation on Directional Overcurrent Relay Coordination: A Case Study**. IET Renewable Power Generation, Vol 3, n°4, pp. 415-425, 2009.

FARRET, F.A.; SIMÕES, M. G.; **Integration of alternative sources of energy**. 1ª Ed. Editora Wiley-Interscience, Estados Unidos, 2006.

GEIDL, M., **Protection of Power Systems with Distributed Generation: State of the Art**. Swiss Federal Institute of Technology, 2005.

GIGUER, S. **Proteção de sistemas de distribuição**. Porto Alegre: SAGRA, 244 p, 1988.

GIRGIS A.A., BRAHMA S.M. **Effect of Distributed Generation on Protective Device Coordination in Distribution System**, Large Engineering Systems Conference on Power engineering, pp. 115 – 119, 2001.

GOLDBERG, D. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. Addison-Wesley Professional, 1989.

GÖNEN, T. **Electric power distribution system engineering**. 2<sup>nd</sup> ed. Boca Raton: CRC Press LCC, 2008.

GUARDA, F.G.K.; SILVA, C.D.L.; CARDOSO JR., G.; MORAIS, A. P.; CORRÊA, R.; MINUSSI, J.P; **Restauração da Coordenação Original de Relés de Direcionais de Sobrecorrente em um Sistema Elétrico com Geração Distribuída Utilizando**

**Limitadores de Corrente.** IX Simpósio de Automação de Sistemas Elétricos – SIMPASE, 2011.

GUARDA, F.G.K; SILVA, C.D.L.; CARDOSO Jr., G.; ARAÚJO, O.C.B.; MORAIS, A. P.; CORRÊA, R.; **Restauração da Coordenação Original de Relés de Sobrecorrente Direcionais em um Sistema Elétrico de Potência Considerando a Inserção de Fontes de Geração Distribuída Utilizando Limitadores de Corrente de Falta.** 9th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, 2011.

HONGESOMBUT, K.; MITANI, Y.; TSUJI, K. **Optimal Location Assignment of Superconducting Fault Current Limiters Applied to Loop Power Systems.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 13, Nº 2, pp. 1828-1831, 2003.

JÄGER J., KEIL T., SHANG L., KREBS R. **New Protection Co-ordination Methods In The Presence of Distributed Generation,** 8th IEE International Conference on Developments in Power System Protection, vol. 1, pp. 319 – 322, 2004.

JAYAWEERA, D. et al. **A Sampling Approach for Intentional Islanding of Distributed Generation.** IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, Nº 2, pp. 514-521, 2007.

KAGAN, N.; KAGAN, H.; SCHMIDT, H. P.; OLIVEIRA, C. C. C.; **Métodos de otimização aplicados a sistemas elétricos de potência.** 1ª Ed., Editora Blucher, São Paulo, Brasil, 2009.

KAUHANIEMI, K. & KUMPULAINEN, L. **Impact of Distributed Generation on the Protection of Distribution Networks.** Eighth IEE International Conference on Developments in Power System Protection, Vol. 1, pp. 315-318, 2004.

KINDERMANN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência.** Vol. 1, 2ª ed., UFSC, Santa Catarina, 2005.

KOVALSKY L., YUAN X., TEKLETSADIK K., KERI A., BOCK J., BEUER F, **Applications of Superconducting Fault Current Limiters in Electric Power Transmission Systems”,** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 15, pp. 2130-2133, 2005.

KUMARA J.R.S.S., ATPUTHARAJAH A., EKANAYAKE J.B., MUMFORD F.J, **Over Current Protection Coordination of Distribution Networks with Fault Current Limiters,** IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 8, 2006.

KUNDUR, P., **Power System Stability and Control.** Vol. 1. Ed. McGraw-Hill. Nova York, EUA, 1994.

LIJUN, Q.; YING, W.; SHENRUI, Z.; QING, G. **Situation of Study on Distribution Network Protection Containing Distributed Generation and Application Scheme**

**of Intelligent Protection.** Electric Utility Deregulation and Power Technologies (DRPT), pp. 916-921, 2011.

MCDERMOTT, T. E.; DUGAN, R. C. **Distributed Generation Impact on Reliability and Power Quality Indices.** Rural Electric Power Conference 2002. IEEE, v. 4, p.D3 D3-7. 2000.

MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithm + data structures = evolutionary programs.** 3<sup>rd</sup> ed. New York: Springer-Verlag, 1996.

MUMFORD, F. **Superconducting Fault Current Limiters.** IEEE Colloquium on Fault Current Limiters – A Look at Tomorrow, London, pp. 6/1-6/7, 1995.

N. HADJSAID, J. CANARD, and F. DUMAS, “**Dispersed generation impact on distribution networks,**” IEEE Computer. Applications in Power, vol. 12, pp. 22–28, Apr. 1999.

PROINFA (**Programa de Incentivo a Fontes de Energia alternativas**); Lei 10.438/2002. Anais eletrônicos. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/programs\\_display.do?chn=877](http://www.mme.gov.br/programs_display.do?chn=877). Último acesso: Fevereiro de 2012.

PUTRUS, G. A.; JENKINS, N.; COOPER, C. B. **A Static Fault Current Limiting and Interrupting Device.** IEEE Colloquium on Fault Current Limiters – A Look at Tomorrow, London, pp. 5/1-5/6, 1995.

RASOLONJANAHARY, J-L. et al. **Design and Construction of a Magnetic Fault Current Limiter.** The 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Dublin, pp. 681-685, 2006.

RAZAVI, F.; ABYANEH, H.A.; AL-DABBAGH, M.; MOHAMMADI, R.; **A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination.** Electric Power Systems Research. Vol. 78, Issue 4, pp. 712-720, 2008.

ROWLEY, A. T. **Superconducting Fault Current Limiters.** IEEE Colloquium on **High Tc Superconducting Materials as Magnets**, Cambridge, pp. 10/1-10/3, 1995.

SATO, T. et al. **Study on the Effect of Fault Current Limiter in Power System with Dispersed Generators.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, N° 2, pp. 2331-2334, 2007.

SEO, H.C.; KO, Y.T.; RHEE, S.B.; KIM, C.H.; AGGARWAL, R.K. **A novel reclosing algorithm considering the recovery time of a superconducting fault current limiter in a distribution system with distributed generation.** Developments in Power System Protection (DPSP 2010), pp 1-5, 2010.

SHAHRIARI, S.A.A. & YAZDIAN, A., **Fault Current Limiter Allocation and Sizing in Distribution System in Presence of Distributed Generation.** IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp: 1-6, 2009.

SHAHRIARI, S.A.A.; ABAPOUR, M.; YAZDIAN A. & HAGHIFAM, M.R., **Minimizing the Impact of Distributed Generation on Distribution Protection System by Solid State Fault current Limiter**. Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp: 1-7, 2010.

SHORT, T. **Electric power distribution handbook**. Boca Raton: CRC Press LCC, 2004.

SLOOTWEG, J.G.; KLING, W.L.; **Impacts of distributed generation on power system transient stability**. Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 2, pp. 862 – 867, 2002.

TANG, G. & IRAVANI, M.R., **Application of a Fault Current Limiter to Minimize Distributed Generation Impact on Coordinated Relay Protection**. International Conference on Power Systems Transients, 2005.

UEDA T., MORITA M., ARITA H., KIDA Y., KUROSAWA Y., YAMAGIWA T, **Solid-State Current Limiter for Power Distribution System**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, pp. 1796-1801, 1993.

YU C., PAN Z., CONG W., WANG W. **The Study on Fault Directional Relay in Protection System for Distribution System Under High DG Penetration Level**, Power and Energy Engineering Conference, pp. 1-4, 2009.

ZEINELDIN, H. H. & EL-SAADANY, E. F. **Fault Current Limiters to Mitigate Recloser-Fuse Miscoordination with Distributed Generation**. Managing the Change, 10th IET International Conference on Developments in Power System Protection, Manchester, pp. 1-4, 2010.

ZEINELDIN, H.H; XIAO, W.; **Optimal fault current limiter sizing for distribution systems with DG**. Power and Energy Society Meeting, pp 1-5, 2011.

## ANEXO A

Tabela 1: Correntes de curto-circuito trifásico no início das zonas primárias de proteção dos relés sem GD

<b>Relé Primário</b>	<b>Relé Secundário</b>	<b>Icc Primário (A)</b>	<b>Icc Secundário (A)</b>
3	1	3724	3724
4	2	4941	1953
22	2	3865	1960
4	3	4941	2988
21	3	4851	2962
5	4	4291	2787
18	4	4501	2784
6	5	2248	2248
7	6	5585	1696
8	6	5526	1681
27	7	1464	1464
26	8	1021	1021
12	9	4579	4579
11	10	3337	3337
13	11	2798	2798
14	12	2676	2676
15	13	2074	2074
16	14	5891	1498
17	14	6838	1476
19	15	4996	1169

35	15	3317	1174
36	15	5486	1158
19	16	4996	3056
34	16	5176	3053
36	16	5486	2993
19	17	4996	783
34	17	5176	782
35	17	3317	777
38	18	2226	2226
37	19	2789	2789
2	20	7141	906
9	20	6414	948
10	20	6933	943
1	21	6866	601
9	21	6415	621
10	21	6933	616
20	22	3104	3104
21	23	4851	1916
22	23	3865	1925
18	24	4501	1718
23	24	3230	1725
24	25	2695	2695
1	28	6866	1394
2	28	7141	1389
10	28	6933	1381
1	29	6866	836
2	29	7141	833

---



<b>9</b>	<b>29</b>	6415	837
<b>29</b>	<b>30</b>	1723	1723
<b>28</b>	<b>31</b>	1863	1863
<b>30</b>	<b>32</b>	2020	2020
<b>31</b>	<b>33</b>	3017	3017
<b>32</b>	<b>34</b>	2714	2714
<b>17</b>	<b>35</b>	6838	1388
<b>33</b>	<b>35</b>	5821	1445
<b>16</b>	<b>36</b>	5891	361
<b>33</b>	<b>36</b>	5821	370
<b>5</b>	<b>37</b>	4291	1504
<b>23</b>	<b>37</b>	3230	1507
<b>34</b>	<b>38</b>	5176	1360
<b>35</b>	<b>38</b>	3317	1368
<b>36</b>	<b>38</b>	5486	1350
<b>10</b>	<b>20</b>	6933	943
<b>1</b>	<b>21</b>	6866	601

Tabela 2: Correntes de curto-circuito com GD nas barras 10 e 13

<b>Relé Primário</b>	<b>Relé Secundário</b>	<b>Icc Primário</b>	<b>Icc Secundário</b>
3	1	4091	4091
4	2	5430	2146
22	2	4188	2155
4	3	5430	3284
21	3	5272	3256
5	4	4690	3006
18	4	4723	3005
6	5	2348	2348
7	6	5632	1752
8	6	5571	1737
27	7	1468	1468
26	8	1024	1024
12	9	4951	4951
11	10	3431	3431
13	11	3706	2854
14	12	2864	2864
15	13	2645	2645
16	14	6915	1603
17	14	7989	1576
19	15	5850	1515
35	15	3833	1522
36	15	6282	1500
19	16	5850	3460
34	16	5749	3458

<b>36</b>	<b>16</b>	6282	3385
<b>19</b>	<b>17</b>	5850	886
<b>34</b>	<b>17</b>	5748	886
<b>35</b>	<b>17</b>	3833	881
<b>38</b>	<b>18</b>	2327	2327
<b>37</b>	<b>19</b>	3107	3107
<b>2</b>	<b>20</b>	7945	971
<b>9</b>	<b>20</b>	7057	1019
<b>10</b>	<b>20</b>	7259	1012
<b>1</b>	<b>21</b>	7654	644
<b>9</b>	<b>21</b>	7057	666
<b>10</b>	<b>21</b>	7259	661
<b>20</b>	<b>22</b>	3360	3360
<b>21</b>	<b>23</b>	5272	2042
<b>22</b>	<b>23</b>	4188	2052
<b>18</b>	<b>24</b>	4723	1718
<b>23</b>	<b>24</b>	3414	1725
<b>24</b>	<b>25</b>	2695	2695
<b>1</b>	<b>28</b>	7654	1612
<b>2</b>	<b>28</b>	7945	1606
<b>10</b>	<b>28</b>	7259	1598
<b>1</b>	<b>29</b>	7654	1366
<b>2</b>	<b>29</b>	7945	1361
<b>9</b>	<b>29</b>	4057	1365
<b>29</b>	<b>30</b>	2502	2502
<b>28</b>	<b>31</b>	2107	2107

<b>30</b>	<b>32</b>	2980	2131
<b>31</b>	<b>33</b>	3404	3404
<b>32</b>	<b>34</b>	2908	2908
<b>17</b>	<b>35</b>	7989	1600
<b>33</b>	<b>35</b>	6959	1669
<b>16</b>	<b>36</b>	6915	417
<b>33</b>	<b>36</b>	6959	428
<b>5</b>	<b>37</b>	4690	1684
<b>23</b>	<b>37</b>	3414	1690
<b>34</b>	<b>38</b>	5749	1424
<b>35</b>	<b>38</b>	3833	1433
<b>36</b>	<b>38</b>	6282	1411
<b>10</b>	<b>20</b>	7259	1012
<b>1</b>	<b>21</b>	7654	644

---

## ANEXO B

Tabela B1 – Dados das cargas no sistema teste IEEE 37 nós

Cargas Pontuais							
Nó	Modelo de Carga	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-4
		kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
701	PQ	140	70	140	70	350	175
712	PQ	0	0	0	0	85	40
713	PQ	0	0	0	0	85	40
714	I	17	8	21	10	0	0
718	Z	85	40	0	0	0	0
720	PQ	0	0	0	0	85	40
722	I	0	0	140	70	21	10
724	Z	0	0	42	21	0	0
725	PQ	0	0	42	21	0	0
727	PQ	0	0	0	0	42	21
728	PQ	42	21	42	21	42	21
729	I	42	21	0	0	0	0
730	Z	0	0	0	0	85	40
731	Z	0	0	85	40	0	0
732	PQ	0	0	0	0	42	21
733	I	85	40	0	0	0	0
734	PQ	0	0	0	0	42	21
735	PQ	0	0	0	0	85	40
736	Z	0	0	42	21	0	0
737	I	140	70	0	0	0	0
738	PQ	126	62	0	0	0	0
740	PQ	0	0	0	0	85	40
741	I	0	0	0	0	42	21
742	Z	8	4	85	40	0	0
744	PQ	42	21	0	0	0	0
Total		727	357	639	314	1091	530

Tabela B2 – Dados de resistências e indutâncias do sistema IEEE 37 nós

Nó A	Nó B	Comprimento (ft.)	R ( $\Omega$ /milhas)	X ( $\Omega$ /milhas)	Comprimento (mi)	R ( $\Omega$ )	X( $\Omega$ )
2	3	960	0,4488	0,2678	0,181818	0,0816	0,048691
3	4	400	2,1068	0,7398	0,075758	0,159606	0,056045
3	7	360	1,3022	0,6326	0,068182	0,088786	0,043132
3	17	1320	0,4488	0,2678	0,25	0,1122	0,06695
17	18	240	2,1068	0,7398	0,045455	0,095764	0,033627
17	22	600	1,3022	0,6326	0,113636	0,147977	0,071886
8	15	80	2,1068	0,7398	0,015152	0,031921	0,011209
8	9	800	1,3022	0,6326	0,151515	0,197303	0,095848
4	6	320	2,1068	0,7398	0,060606	0,127685	0,044836
4	5	240	2,1068	0,7398	0,045455	0,095764	0,033627
13	14	280	2,1068	0,7398	0,05303	0,111724	0,039232
10	12	760	2,1068	0,7398	0,143939	0,303252	0,106486
10	11	120	2,1068	0,7398	0,022727	0,047882	0,016814
26	28	320	1,3022	0,6326	0,060606	0,078921	0,038339
26	27	320	2,1068	0,7398	0,060606	0,127685	0,044836
23	24	600	1,3022	0,6326	0,113636	0,147977	0,071886
23	26	320	1,3022	0,6326	0,060606	0,078921	0,038339
30	32	200	2,1068	0,7398	0,037879	0,079803	0,028023
30	31	1280	2,1068	0,7398	0,242424	0,510739	0,179345
35	37	400	1,3022	0,6326	0,075758	0,098652	0,047924
35	36	200	2,1068	0,7398	0,037879	0,079803	0,028023
7	8	520	1,3022	0,6326	0,098485	0,128247	0,062302
15	16	520	2,1068	0,7398	0,098485	0,207488	0,072859
9	10	920	2,1068	0,7398	0,174242	0,367094	0,128905
9	13	600	1,3022	0,6326	0,113636	0,147977	0,071886
18	19	280	1,3022	0,6326	0,05303	0,069056	0,033547
22	23	200	1,3022	0,6326	0,037879	0,049326	0,023962
28	29	560	1,3022	0,6326	0,106061	0,138112	0,067094
29	33	640	1,3022	0,6326	0,121212	0,157842	0,076679
29	30	520	2,1068	0,7398	0,098485	0,207488	0,072859
33	34	400	1,3022	0,6326	0,075758	0,098652	0,047924
34	35	400	1,3022	0,6326	0,075758	0,098652	0,047924
19	21	200	2,1068	0,7398	0,037879	0,079803	0,028023
19	20	280	2,1068	0,7398	0,05303	0,111724	0,039232
25	23	0	0,2646	0,19	0	0	0
1	2	1850	0,2646	0,19	0,350379	0,09271	0,066572

## ANEXO C

Tabela C.1: Correntes de Fusão para os Elos Fusíveis tipo “K”

Grupo	Corrente Nominal (A)	Corrente de Fusão (A)						Relação de Rapidez
		300 ou 600 (s)		10 (s)		0,1(s)		
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Preferenciais	6	12,0	14,4	13,5	20,5	72,0	86,4	6,0
	10	19,5	23,4	22,5	34,0	128,0	154,0	6,6
	15	31,0	37,2	37,0	55,0	215,0	258,0	6,9
	25	50,0	60,0	60,0	90,0	350,0	420,0	7,0
	40	80,0	96,0	98,0	146,0	565,0	680,0	7,1
	65	128,0	153,0	159,0	237,0	918,0	1100,0	7,2
	100	200,0	240,0	258,0	388,0	1520,0	1820,0	7,6
	140	310,0	372,0	430,0	650,0	2470,0	2970,0	8,0
	200	480,0	576,0	760,0	1150,0	3880,0	4656,0	8,1
Não Preferenciais	8	15,0	18,0	18,0	27,0	97,0	116,4	6,5
	12	25,0	30,0	29,5	44,0	166,0	199,4	6,6
	20	39,0	47,0	48,0	71,0	273,0	328,0	7,0
	30	63,0	76,0	77,5	115,0	447,0	546,0	7,1
	50	101,0	121,0	126,0	188,0	719,0	862,0	7,1
	80	160,0	192,0	205,0	307,0	1180,0	1420,0	7,4





## ANEXO D

Correntes de curto-circuito Trifásico máximo em cada nó do sistema IEEE 37 nós modificado, considerando a corrente de carga pré-falta:

<b>Nó</b>	<b>Icc 3<math>\phi</math> sem GD</b>	<b>Icc 3<math>\phi</math> com GD's Consideradas</b>
<b>1</b>	3897,036	4446,641
<b>2</b>	1530,503	1786,289
<b>3</b>	1601,853	1842,599
<b>4</b>	1506,231	1730,068
<b>5</b>	1420,429	1665,254
<b>6</b>	1435,965	1644,187
<b>7</b>	1541,74	1768,302
<b>8</b>	1421,105	1667,167
<b>9</b>	1321,569	1526,208
<b>10</b>	1121,013	1330,457
<b>11</b>	1141,959	1307,575
<b>12</b>	1030,463	1195,188
<b>13</b>	1242,77	1431,733
<b>14</b>	1201,069	1373,88
<b>15</b>	1435,992	1646,5
<b>16</b>	1325,955	1518,662
<b>17</b>	1673,969	1924,885
<b>18</b>	1616,772	1852,775
<b>19</b>	1551,319	1792,925
<b>20</b>	1492,852	1713,66

<b>21</b>	1516,416	1735,984
<b>22</b>	1769,944	2028,69
<b>23</b>	1801,247	2064,408
<b>24</b>	1681,647	1923,376
<b>25</b>	1526,025	1750,37
<b>26</b>	1853,099	2122,431
<b>27</b>	1848,547	2121,802
<b>28</b>	1883,383	2155,845
<b>29</b>	1936,127	2213,747
<b>30</b>	1778,948	2035,541
<b>31</b>	1431,568	1633,464
<b>32</b>	1721,436	1967,635
<b>33</b>	1993,228	2277,758
<b>34</b>	2018,42	2315,632
<b>35</b>	2054,425	2351,01
<b>36</b>	2002,896	2283,086
<b>37</b>	2091,488	2383,03

## ANEXO E

Correntes de carga no sistema IEEE 37 nós modificado:

<b>Nó</b>	<b>Fase A</b>	<b>Fase B</b>	<b>Fase C</b>
2	18,82701	18,82701	47,06751
5	0	0	11,29941
7	0	0	11,29941
15	2,259881	2,797671	0
16	11,29941	0	0
9	0	0	11,29941
11	0	18,82701	2,797671
12	0	5,648097	0
14	0	5,648097	0
18	0	0	5,648097
21	5,648097	5,648097	5,648097
20	5,648097	0	0
22	0	0	11,29941
24	0	11,29941	0
27	0	0	5,648097
28	11,29941	0	0
29	0	0	5,648097
32	0	0	11,29941
31	0	5,648097	0
33	18,82701	0	0
34	16,89085	0	0
36	0	0	11,29941
37	0	0	5,648097
6	1,075832	11,29941	0
19	5,648097	0	0

## ANEXO F

Correntes de curto-circuito monofásico e monofásico mínimo (com impedância de falta de 40  $\Omega$ ) em cada nó do sistema IEEE 37 nós modificado obtidos no software ATP®, desconsiderando a corrente pré-falta:

Nó	ICC 1 $\phi$			Icc 1 $\phi$ mínimo		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
1	97,1917	97,1917	242,9794	77,56727	77,56727	193,9181
2	58,3316	58,3316	58,3316	46,55355	46,55355	46,55355
3	58,3316	58,3316	58,3316	46,55355	46,55355	46,55355
4	11,6663	14,4425	11,6663	9,310711	11,5264	0
5	58,3316	58,3316	58,3316	46,55355	46,55355	46,55355
6	58,3316	58,3316	58,3316	46,55355	46,55355	46,55355
7	14,4425	97,1917	14,4425	11,5264	77,56727	11,5264
8	29,1575	29,1575	29,1575	23,27016	23,27016	23,27016
9	29,1575	29,1575	29,1575	23,27016	23,27016	23,27016
10	29,1575	29,1575	29,1575	23,27016	23,27016	23,27016
11	29,1575	29,1575	29,1575	23,27016	23,27016	23,27016
12	29,1575	29,1575	29,1575	23,27016	23,27016	23,27016
13	58,3316	58,3316	58,3316	46,55355	46,55355	46,55355
14	58,3316	58,3316	58,3316	46,55355	46,55355	46,55355
15	29,1575	29,1575	29,1575	23,27016	23,27016	23,27016
16	58,3316	58,3316	58,3316	46,55355	46,55355	46,55355
17	23,27016	23,27016	29,1575	23,27016	23,27016	23,27016
18	58,3316	58,3316	58,3316	46,55355	46,55355	46,55355
19	29,1575	29,1575	29,1575	23,27016	23,27016	23,27016
20	97,1917	97,1917	97,1917	77,56727	77,56727	77,56727

<b>21</b>	87,1966	87,1966	87,1966	69,59031	69,59031	69,59031
<b>22</b>	58,3316	58,3316	58,3316	46,55355	46,55355	46,55355
<b>23</b>	29,1575	29,1575	29,1575	23,27016	23,27016	23,27016
<b>24</b>	5,55383	58,3316	5,55383	4,432428	46,55355	46,55355
<b>25</b>	29,1575	29,1575	29,1575	23,27016	23,27016	23,27016
<b>26</b>	97,1917	97,1917	242,9794	77,56727	77,56727	193,9181
<b>27</b>	58,3316	58,3316	58,3316	46,55355	46,55355	46,55355
<b>28</b>	58,3316	58,3316	58,3316	46,55355	46,55355	46,55355
<b>29</b>	11,6663	14,4425	11,6663	9,310711	11,5264	9,310711
<b>30</b>	58,3316	58,3316	58,3316	46,55355	46,55355	46,55355
<b>31</b>	58,3316	58,3316	58,3316	46,55355	46,55355	46,55355
<b>32</b>	14,4425	97,1917	14,4425	11,5264	77,56727	11,5264
<b>33</b>	29,1575	29,1575	29,1575	23,27016	23,27016	23,27016
<b>34</b>	29,1575	29,1575	29,1575	23,27016	23,27016	23,27016
<b>35</b>	29,1575	29,1575	29,1575	23,27016	23,27016	23,27016
<b>36</b>	29,1575	29,1575	29,1575	23,27016	23,27016	23,27016
<b>37</b>	29,1575	23,27016	23,27016	23,27016	23,27016	23,27016

## ANEXO G

Coordenograma original completo do sistema teste IEEE 37 nós modificado:

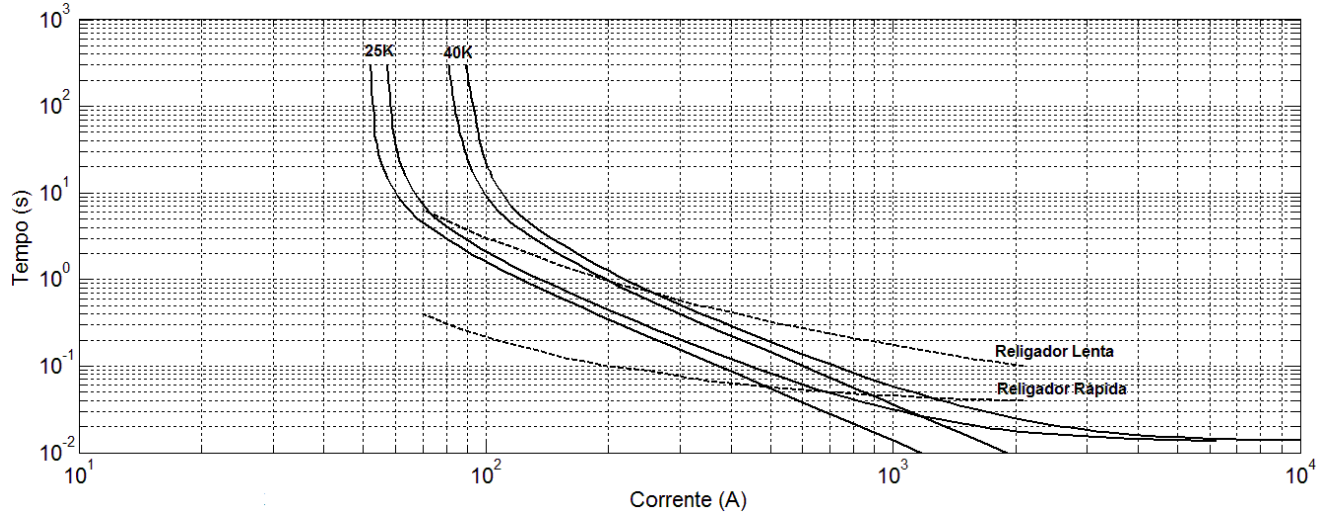


Figura G.1 – Coordenograma seção F5-F4-F1-R

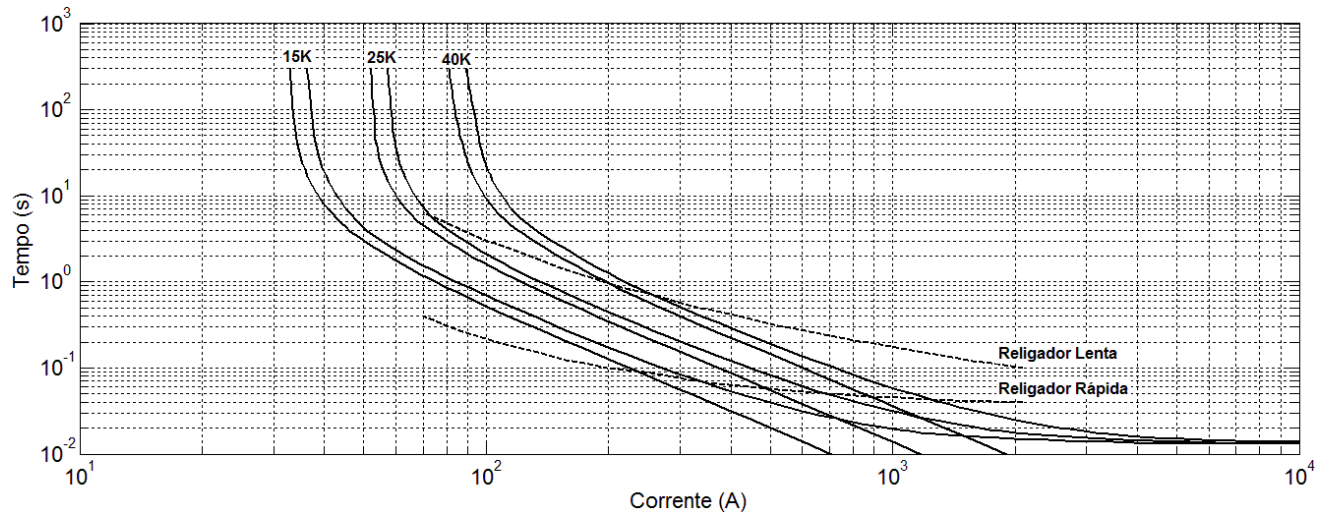


Figura G.2 – Coordenograma seção F6-F4-F1-R

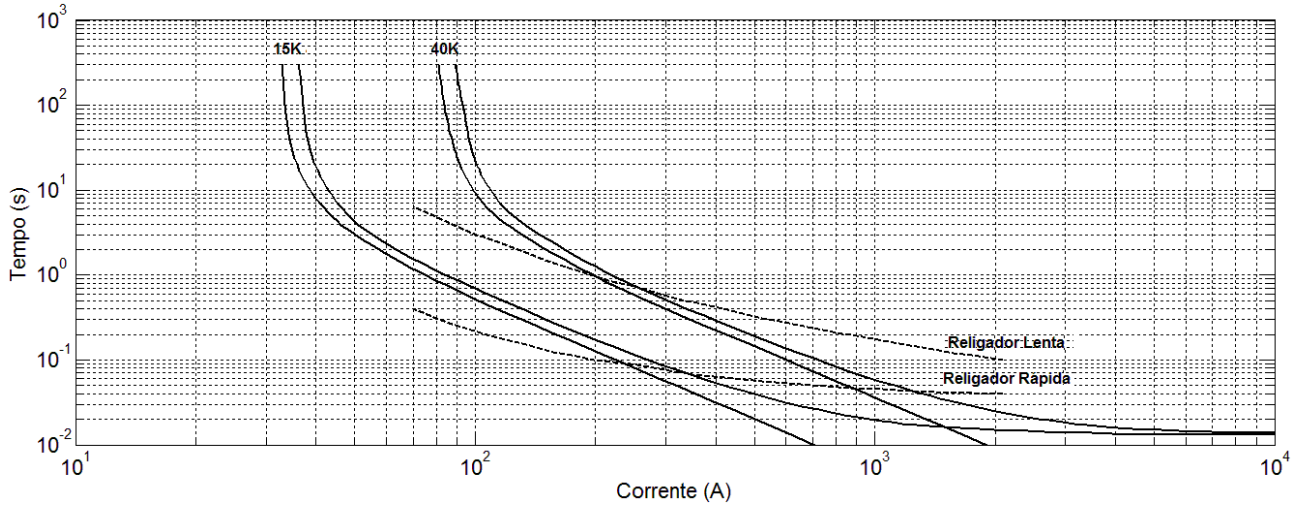


Figura G.3 – Coordenograma seção F3 -F1-R

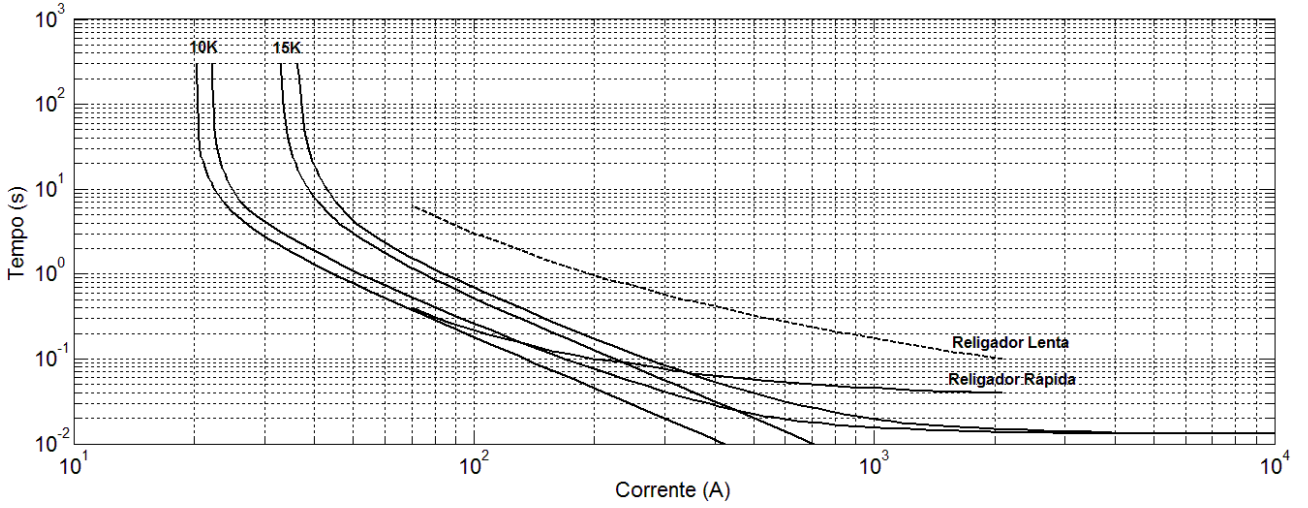


Figura G.4 – Coordenograma seção F9-F7-R

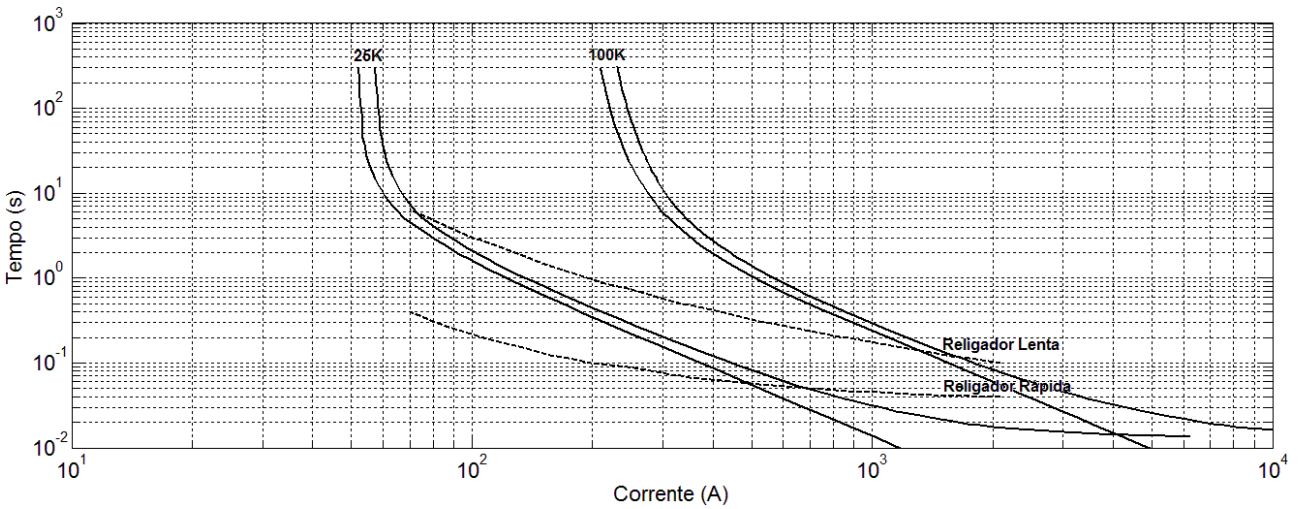


Figura G.5 – Coordenograma seção F11-F10-F20-R

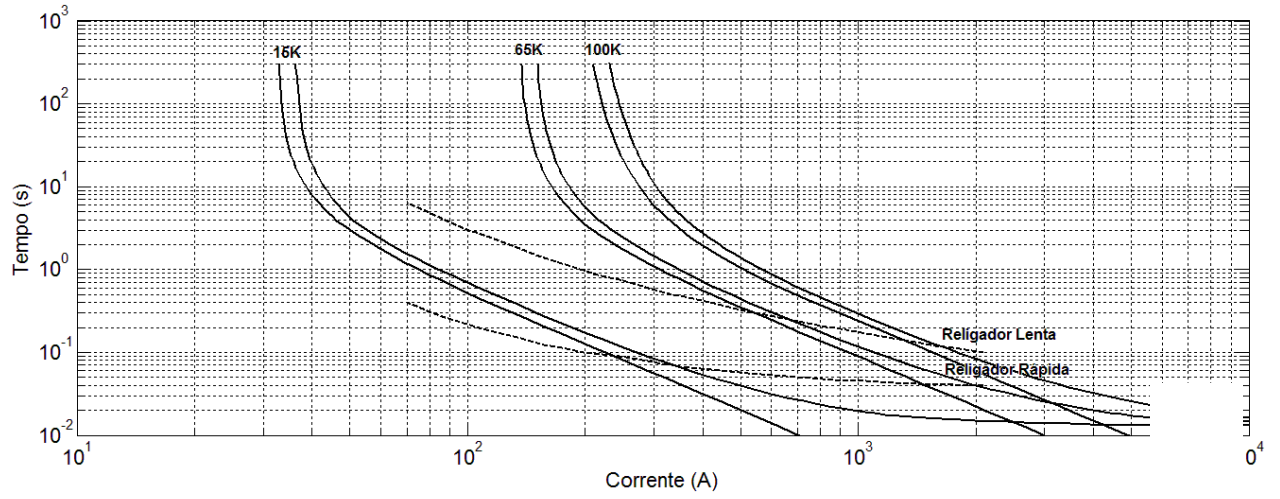


Figura G.6 – Coordenograma seção F16-F15-F21-F2-R