



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Departamento de Engenharia Elétrica

GEORGIA DE SOUZA ROLIM

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE RELÉ DIRECIONAL EM
SISTEMAS ELÉTRICOS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

João Pessoa - PB

Junho – 2018

GEORGIA DE SOUZA ROLIM

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE RELÉ DIRECIONAL EM SISTEMAS
ELÉTRICOS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de Engenharia
Elétrica como um dos pré-requisitos para a
obtenção do título em Bacharel em
Engenharia Elétrica sob orientação do Prof.
Dr. Rogério Gaspar de Almeida.**

**João Pessoa - PB
Junho - 2018**

R748a Rolim, Georgia de Souza.

Análise da Utilização de Relé Direcional em Sistemas Elétricos com Geração Distribuída / Georgia de Souza Rolim. - João Pessoa, 2018.

78 f. : il.

Orientação: Rogério Gaspar de Almeida.
Monografia (Graduação) - UFPB/CEAR.

1. Geração Distribuída. 2. Relé Direcional. 3. Proteção de Sistemas Elétricos. I. De Almeida, Rogério Gaspar. II. Título.

UFPB/BC

Georgia de Souza Rolim

**Análise da Utilização de Relé Direcional em Sistemas Elétricos com
Geração Distribuída**

**Trabalho de Conclusão de Curso Submetido ao Departamento de
Engenharia Elétrica como parte dos requisitos necessários para à
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.**

Data de Aprovação: ____/____/____

Nota: _____

Aprovado por:

Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Alexandre César de Castro (Membro)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Yuri Molina Rodrigues (Membro)
Universidade Federal da Paraíba

Paraíba – PB
Junho - 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, minha fortaleza e esperança. Ele que esteve sempre à frente dos meus passos, guiando o caminho e abrindo as portas. E a Nossa Senhora, que não cessa de interceder por mim junto a Ele. Com Eles sou mais forte e vou mais longe.

Agradeço aos meus familiares, em especial, a minha mãe, meu pai e minha irmã, Patricia, Evandro e Isabela, que sempre foram meus maiores incentivadores e motivadores, acreditando mais no meu sucesso do que eu mesma. Sou grata também, de forma especial, ao meu primo, Gutemberg Lira, professor e doutor em Engenharia Elétrica, que sempre se mostrou entusiasmado com todas as minhas conquistas e foi uma das minhas inspirações para escolha da profissão.

Agradeço ao meu namorado, Igor, por todo apoio e suporte nos momentos de desânimo, bem como por toda a paciência para compreender minhas ausências ao longo desses anos de curso.

Sou imensamente grata ao professor Rogério por ter estado sempre disponível, com toda a paciência do mundo, para me auxiliar desde a idealização inicial ao desenvolvimento deste trabalho. Sem ele, nada teria sido possível. Também sou grata ao professor Alexandre por sempre ter acreditado no meu potencial, encorajando-me sempre durante as dificuldades. Agradeço então ao professor Yuri por ter aceitado colaborar com a finalização deste trabalho.

O meu muito obrigada aos demais professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba por todos os ensinamentos. Agradeço também a todos os colegas que dividiram comigo salas de aula e puderam contribuir para o meu crescimento pessoal e profissional.

Por último, agradeço aos meus amigos que vibraram com as minhas conquistas até aqui como se fossem próprias. Sou grata pelo tempo que cada um dedica a mim diariamente, pelas palavras de apoio e conforto quando necessárias e pelo entusiasmo de sempre. Não teria sido possível administrar todas as minhas crises de ansiedade se não fossem vocês.

RESUMO

Geração Distribuída é o tipo de geração caracterizada por ter sua instalação situada em local próximo ao consumidor. A tendência atual é que haja cada vez mais modelos deste tipo inseridos na rede elétrica, uma vez que este tipo de geração é diretamente, mas não exclusivamente, ligada à utilização de fontes de energias renováveis. Além de propiciar um consumo sustentável, sua utilização também é atraente ao setor elétrico, posto que adia gastos com a construção de novas linhas de transmissão e subestações, reduzindo o custo da energia entregue a medida que aumenta a confiabilidade desta. Porém, a inserção destes pontos distribuídos tende a tornar ineficiente o funcionamento do supervisor, posto que gera cenários mais propícios à inversão do fluxo de potência da rede. Devido a isso, após estudados alguns modelos disponíveis, foi realizada a modelização de um relé direcional em ambiente computacional MATLAB/SIMULINK®. O dispositivo foi testado por meio de simulações em cenários distintos, com e sem a descentralização da geração. Em todos os casos foi comprovada a sua eficácia frente a uma mudança no sentido de circulação da corrente no circuito.

Palavras-Chaves: Geração Distribuída. Relé Direcional. Proteção de Sistemas Elétricos.

ABSTRACT

Distributed Generation is the type of generation characterized by having its installation located close to the consumer. Nowadays, there is a tendency for more adoption of such models inserted into the grid, since this type of generation is directly, but not exclusively, linked to the use of renewable energy sources. In addition to providing a sustainable consumption, its use is also attractive to the electricity sector, since postponing spending on the construction of new transmission lines and substations, reducing the cost of energy delivered as it increases the reliability of this. However, the insertion of these points of distributed generation into the network tends to render inefficient the operation of the protection system, since it generates scenarios more conducive to the inversion of the power flow of the network. Due to this, after studying some available models, the modeling of a directional relay in MATLAB/SIMULINK® computational environment was carried out. The device was tested through simulations in distinct scenarios, with and without the decentralization of generation. In all cases it has been proven effective against a change in the direction of current flow in the circuit.

Keywords: Distributed Generation. Directional Relay. Protection of Electrical Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da Matriz Elétrica Brasileira.	21
Figura 2 – Sistema de Fasores Unitários.	26
Figura 3 – Esquemático da Interligação dos Equipamentos de Medição e Proteção no SEP. .	28
Figura 4 – Diagrama Unifilar do Relé Direcional 67.	30
Figura 5 – Polarização em Quadratura ou a 90°.	31
Figura 6 – Polarização a 60°.	31
Figura 7 – Polarização a 30°.	32
Figura 8 – Diagrama Fasorial do Limiar de Operação do Relé Direcional.	34
Figura 9 – Biblioteca dos Modelos dos Relés Digitais de Proteção.	37
Figura 10 – Biblioteca dos Modelos dos Relés Digitais de Proteção.	37
Figura 11 – Relé 67 de Sobrecorrente Direcional.	39
Figura 12 – Composição Trifásica do Relé 67.	40
Figura 13 – Relé 67 Fase A.	41
Figura 14 – Trip Relé 67.	42
Figura 15 – Comando do relé 50/51 a partir do relé 67.	43
Figura 16 – Topologia da Rede Teste.	44
Figura 17 – Rede Adotada para a Parametrização dos Equipamentos da Barra 2.	45
Figura 18 – Máximos Valores de Corrente de Curto Encontrados para as Barras 2 e 3 para Análise da Barra 2.	46
Figura 19 – Rede Adotada para a Parametrização dos Equipamentos da Barra 3.	47
Figura 20 – Máximos Valores de Corrente de Curto Encontrados para as Barras 2 e 3 para Análise da Barra 3.	47
Figura 21 – Correntes de Carga do Sistema para as Duas Configurações de Análise Apresentadas.	48
Figura 22 – Curva Inversa Norma IEC para relé digital de sobrecorrente 51.	51
Figura 23 – Cenário de Teste 1.	53
Figura 24 – Cenário de Teste 2.	53
Figura 25 – Cenário de Teste 3.	53
Figura 26 – Cenário de Teste 3.	53

Figura 27 – Torque Calculado pelo Relé 67 nas Fases A, B e C na Barra 3 para o Cenário de Teste 1.	54
Figura 28 –Comportamento dos Relés da Barra 3 no Instante do Curto-Circuito para o Cenário de Teste 1.....	54
Figura 29 – Comparação entre o Comportamento dos Relés das Barras 2 e 3 no Instante do Curto-Circuito para o Cenário de Teste 1.....	55
Figura 30 – Comportamento das Correntes nas Barras 2 e 3 para o Cenário de Teste 1.	55
Figura 31 – Comportamento das Correntes na Carga para o Cenário de Teste 1.....	56
Figura 32 – Torque Calculado pelo Relé 67 nas Fases A, B e C na Barra 3 para o Cenário de Teste 2.	56
Figura 33 – Comportamento dos Relés da Barra 3 no Instante do Curto-Circuito para o Cenário de Teste 2.....	57
Figura 34 – Comparação entre o Comportamento dos Relés das Barras 2 e 3 no Instante do Curto-Circuito para o Cenário de Teste 2.....	58
Figura 35 – Comportamento das Correntes nas Barras 2 e 3 para o Cenário de Teste 2.	58
Figura 36 – Comportamento das Correntes na Carga para o Cenário de Teste 2.....	59
Figura 37 – Torque Calculado pelo Relé 67 nas Fases A, B e C na Barra 3-A para o Cenário de Teste 3.	59
Figura 38 – Torque Calculado pelo Relé 67 nas Fases A, B e C na Barra 3 B para o Cenário de Teste 3.	60
Figura 39 – Comportamento do Trip 67 e do Trip de Comando nas Barras 3 no Instante do Curto-Circuito para o Cenário de Teste 3.....	60
Figura 40 – Comportamento do Trip 50 nas Barras 2 e 3 no Istante do Curto-Circuito para o Cenário de Teste 3.	61
Figura 41 – Comportamento do Trip 51 nas Barras 2 e 3 no instante do curto-circuito para o Cenário de Teste 3.	61
Figura 42 – Comportamento das Correntes nas Barras 2 e 3 para o Cenário de Teste 3.	62
Figura 43 – Análise do Comportamento das Correntes na Carga para o Cenário de Teste 3. .	62
Figura 44 – Torque Calculado pelo Relé 67 nas Fases A, B e C na Barra 3-A para o Cenário de Teste 4.	63
Figura 45 – Torque Calculado pelo Relé 67 nas Fases A, B e C na Barra 3-B para o Cenário de Teste 4.	63
Figura 46 – Comportamento do Trip 67 e do Trip de Comando na Barra 3 no instante do curto-circuito para o Cenário de Teste 4.	64

Figura 47 – Comportamento do Trip 50 nas Barras 2 e 3 no instante do curto-circuito para o Cenário de Teste 4.	64
Figura 48 – Comportamento do Trip 51 nas Barras 2 e 3 no instante do curto-circuito para o Cenário de Teste 4.	65
Figura 49 – Comportamento das Correntes nas Barras 2 e 3 para o Cenário de Teste 4.	65
Figura 50 – Comportamento das Correntes na Carga para o Cenário de Teste 4.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geração Eólica por Estado Brasileiro (GWh).	21
Tabela 2 – Capacidade Instalada de Geração de Energia Elétrica no Brasil em dezembro de 2016.	23
Tabela 3 – Frequências típicas de ocorrências de curtos-circuitos.....	25
Tabela 4 – Critérios para Escolha do TC.....	49

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
FS	Fator de Sobrecorrente
GD	Geração Distribuída
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PRODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SEP	Sistema de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial

LISTA DE NOMECLATURA ANSI

- 50 - relé de sobrecorrente instantâneo
- 51 - relé de sobrecorrente temporizado
- 67 - relé de sobrecorrente direcional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Motivação	17
1.2. Objetivos.....	17
1.2.1. Objetivo Geral	17
1.2.2. Objetivos específicos	18
1.3. Organização do documento	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1. Sistema Elétrico Brasileiro	19
2.1.1. Matriz Elétrica Brasileira.....	20
2.1.2. Geração Distribuída.....	22
2.2. Sistema de Proteção.....	24
2.2.1. Tipos de Curto-Circuito.....	25
2.2.1.1. Componentes Simétricas	25
2.2.2. Relé.....	27
2.2.3. Transformador de Corrente e Transformador de Potencial.....	28
2.2.4. Relé Direcional.....	29
2.2.4.1. Técnicas de Polarização	30
2.2.4.2. Princípio de Funcionamento.....	32
2.3. Revisão da Literatura.....	35
3. MODELAGEM DO RELÉ DE SOBRECORRENTE DIRECIONAL.....	39
3.1. Modelo do Relé Digital Direcional 67	39
3.1.1. Análise Monofásica	40
3.1.2. Acionamento do Trip do 67.....	42
3.1.3. Comando do Relé de Sobrecorrente 50/51	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1. Caracterização da Rede Teste	44
4.2. Cálculo dos Parâmetros da Rede	45
4.2.1. Cálculo das Correntes de Curto-Circuito.....	45

4.2.2. Cálculo da Corrente de Carga.....	47
4.3. Seleção dos Transformadores de Instrumento	48
4.4. Ajustes dos Relés 50/51	49
4.4.1. Unidade Instantânea (50).....	49
4.4.2. Unidade Temporizada (51).....	50
4.5. Ajustes dos Relés Direcionais	51
4.6. Cenários de Teste.....	52
4.6.1. Linha Única com Geração Centralizada.....	54
4.6.2. Linha Única com Geração Distribuída	56
4.6.3. Rede em Anel com Geração Centralizada.....	59
4.6.4. Rede em Anel com Geração Distribuída	62
4.7. Comparação entre os Cenários de Teste	66
5. CONCLUSÃO.....	67
6. REFERÊNCIAS	69
ANEXO A	73
APÊNDICE A	74

1. INTRODUÇÃO

Devido à necessidade constante da utilização da energia elétrica e cada vez mais em maior escala, a procura por meios de energia alternativos aos convencionais vem ganhando bastante espaço no cenário global. Esta exigência leva não só à busca por novas fontes de energia elétrica, mas também a uma maior descentralização da geração da energia.

Com a preocupação atual pela adoção de fontes de energias renováveis, grandes empresas ou ainda pequenos consumidores que têm o intuito de reduzir seus gastos com o consumo de energia, optam por instalar suas próprias centrais de geração de energia, de acordo com a sua necessidade. Entretanto, a maior parte desses consumidores não se torna totalmente independente das concessionárias.

Tendo em vista que a maior parte desses centros de Geração Distribuída (GD) são usualmente mantidos por fontes inconstantes e também estão sujeitos à intempéries, para garantir o seu abastecimento quando da ocorrência de anomalias, essas unidades geradoras são incorporadas à rede das concessionárias. Estas, por sua vez, devem se adequar à existência de uma unidade geradora onde costumava-se ter apenas unidades consumidoras.

Como discutido por Barbosa e Azevedo (2013), a introdução de GD tende a aumentar a complexidade do sistema elétrico desde o seu planejamento até a sua operação. Dessa forma, uma imposição trazida pela utilização da GD é a revisão dos sistemas de proteção de acordo com a configuração do sistema elétrico no qual elas estão inseridas. Posto que a proteção do sistema é garantida, em sua maior parte, por dispositivos que se preocupam em sentir variações de intensidade do fluxo de carga, a necessidade agora é também de avaliar as mudanças na direcionalidade deste fluxo, uma vez que há geração em mais de um ponto do circuito.

Ainda, a GD aparece como uma alternativa para as concessionárias frente ao aumento do número de consumidores e às limitações de expansão das suas fontes de geração usuais, visto que no Brasil, a maior parte da energia elétrica produzida é proveniente de hidrelétricas. Os centros de GD oferecem uma redução nos gastos com transmissão e distribuição, uma vez que encontram-se próximos dos consumidores, fato que também lhes concede uma maior qualidade e constância na energia entregue, de acordo com Matos e Catalão (2013).

Na ocorrência de uma falta no sistema elétrico composto por pontos de geração distribuída, se este não estiver protegido de forma a enxergar variações na direcionalidade do fluxo de potência do conjunto é possível que o circuito continue a alimentar o ponto de falta a

partir de uma inversão de seu fluxo, uma vez que a corrente terá maior facilidade em fluir para o ponto defeituoso.

Portanto, dado este cenário é imprescindível o estudo da implementação de relés direcionais considerando este novo paradigma de redes. Ainda, com o intuito de melhor visualizar a atuação deste tipo de proteção, ela será analisada e testada tanto em um cenário de geração centralizada, como em um onde há GD.

1.1. Motivação

Com base no exposto, este trabalho visa analisar a eficácia associada à utilização de relés direcionais em sistemas elétricos onde há GD, ponderando a sua atuação com a de relés de sobrecorrente não direcionais em diferentes cenários. Esta análise é importante e se faz necessária não só pelo espaço que esse tipo de geração vem ganhando no cenário atual dos sistemas elétricos como um todo, mas sobretudo devido à falta de exemplos e de modelos de simulação dos relés direcionais na grande maioria das literaturas da especialidade.

1.2. Objetivos

Os objetivos deste trabalho de conclusão de curso estão divididos em objetivo geral e específicos conforme se descreve a seguir.

1.2.1. Objetivo Geral

Comprovar a necessidade da utilização de relés direcionais em sistemas elétricos nos quais há geração distribuída, provando a sua eficiência e eficácia a partir do estudo de diferentes cenários possíveis envolvendo faltas em um modelo de rede definido, com e sem GD.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar o relé direcional de modo a se determinar seu modelo matemático para simulação computacional;
- Implementar o modelo do relé digital de sobrecorrente direcional em ambiente computacional MATLAB/SIMULINK®;
- Implementar a rede elétrica que possibilite a análise do modelo do relé obtido;
- Avaliar o desempenho do modelo implementado em MATLAB/SIMULINK® em diferentes cenários de simulação computacional de uma rede elétrica;
- Introduzir ponto de geração distribuída à rede inicial analisando a atuação do relé modelado para as faltas ocorridas neste ambiente.

1.3. Organização do documento

O presente documento foi organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: São apresentados a introdução, a motivação para a realização deste trabalho e os objetivos associados ao desenvolvimento dele;
- Capítulo 2: É realizada uma fundamentação teórica sobre geração distribuída e conceitos ligados ao sistema de proteção, como também é feita uma revisão da literatura disponível sobre a modelagem computacional do relé direcional;
- Capítulo 3: É explicado o modelo do relé direcional implementado pela autora em ambiente computacional MATLAB/SIMULINK®;
- Capítulo 4: São apresentados os resultados dos testes de funcionamento do modelo de relé desenvolvido, realizados por meio de simulações no MATLAB/SIMULINK®;
- Capítulo 5: É exposta a conclusão do trabalho desenvolvido apresentando os objetivos alcançados;
- Capítulo 6: São indicadas as referências bibliográficas utilizadas como fonte de pesquisa para a realização do trabalho;
- Por fim, são apresentados o anexo e o apêndice do trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será caracterizado, de modo geral, o sistema elétrico brasileiro, apresentando características do seu desenvolvimento desde o seu advento à situação atual com o crescimento da utilização de GD, com maior ênfase neste tipo de geração. Além disso, será apresentada a filosofia de funcionamento do relé direcional e todo o conteúdo necessário para o melhor entedimento do trabalho que será apresentado.

2.1. Sistema Elétrico Brasileiro

Como todos os outros setores sociais, o elétrico também é movido pelas necessidades atuais da sociedade, acompanhando as mudanças tecnológicas e ideológicas. É possível perceber esta linha de desenvolvimento analisando-o desde o seu advento ao ponto em que se encontra atualmente.

À medida que seguiu-se o aumento da industrialização e conseqüentemente da urbanização, foi preciso que o sistema elétrico, antes primordialmente isolado, garantisse maior confiabilidade e continuidade no suprimento de energia elétrica. Então, a construção de um extenso sistema de transmissão conectando às diversas regiões do país, culminou na formação do Sistema Interligado Nacional (SIN) atual, que representa 98% do parque nacional. O restante é formado por pequenos sistemas isolados, principalmente na região amazônica (SILVA, 2012). O panorama atual das conexões desta rede de transmissão está apresentado no Anexo A.

Neste contexto foi criado o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no SIN, sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (TOMALSQUIM, 2016).

A capacidade instalada de geração do SIN é composta, principalmente, por usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país (ONS, 2018a). Logo, o tipo predominante de geração é o centralizado, no qual o fluxo de energia é unidirecional posto que os grandes centros geradores encontram-se em um ponto do processo e os consumidores no oposto.

Segundo Tomalsquim (2000), tendo em vista a aleatoriedade das chuvas, os reservatórios de água das hidrelétricas são projetados com uma capacidade de armazenamento que considera não só o uso atual, mas leva em conta também uma projeção para os anos subsequentes. Contudo, a crise hídrica de 2001 mostrou que este planejamento só é eficaz se for associado a outros meios de geração que possam vir a completá-lo, posto que não é possível garantir a confiabilidade do sistema se este estiver sujeito a apenas um tipo de fornecedor.

Com o intuito de garantir maior segurança e desempenhando um papel relevante no SIN, as usinas térmicas conquistaram espaço neste setor da indústria de energia e são acionadas em função das condições hidrológicas vigentes (ONS, 2018).

Contudo, o imediatismo das termelétricas frente às hidrelétricas, tanto por terem uma construção mais rápida como por poderem estar localizadas próximas aos centros consumidores, reduzindo a necessidade de longas linhas de transmissão e reformas na rede, não incobriu suas desvantagens. Além de ter um custo mais elevado ao consumidor devido ao elevado preço dos combustíveis fósseis utilizados, a poluição causada pela queima destes no processo de geração de energia, também gerou um alerta sobre sua utilização.

Com o objetivo de encontrar alternativas aos altos preços pagos pela energia consumida e graças à crescente conscientização da sociedade à adoção de práticas sustentáveis aliada aos grandes avanços tecnológicos no setor de eletricidade, grandes empresas ou consumidores unitários recorrem à geração da sua própria energia. Dessa forma, a GD vem ganhando cada vez mais espaço no sistema elétrico brasileiro (SEB).

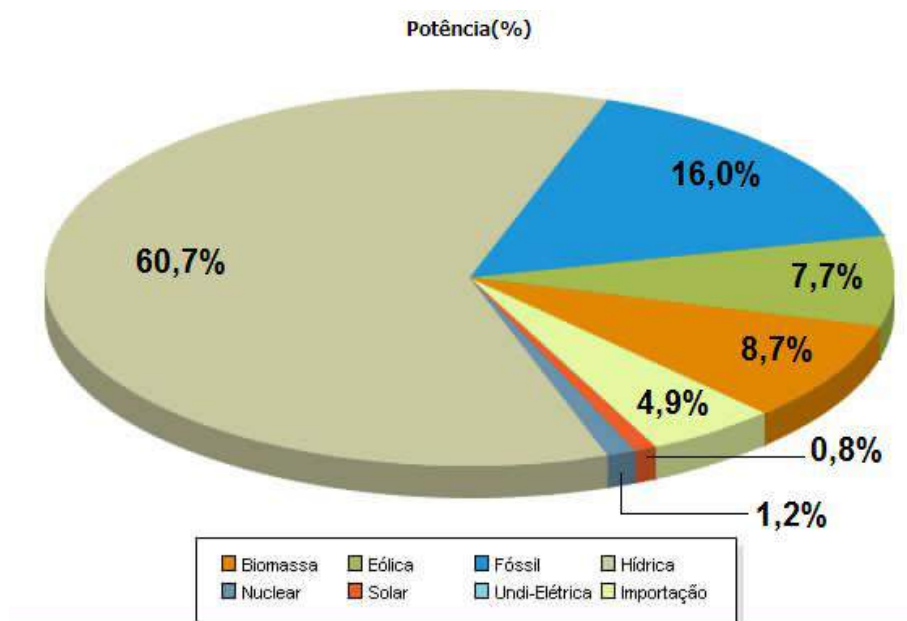
2.1.1. Matriz Elétrica Brasileira

Além de levar em consideração a demanda em si ou quaisquer ideologias, a escolha do método de geração de energia mais apropriado para uma determinada localidade depende também da matriz elétrica disponível à exploração.

Na Figura 1, está representado graficamente a diversidade da matriz elétrica brasileira. Dentre as fontes disponíveis para a geração de energia elétrica a predominante é a hídrica, o que explica o fato de ela ser a mais explorada e aproveitada no país. Para os valores mostrados na Figura 1 a ANEEL contabiliza a quantidade total de potência fiscalizada para cada um dos meios de geração apontados na legenda do gráfico, levando em consideração todas as usinas instaladas e todas as formas de aproveitamento daquela fonte específica.

Segundo a ANEEL (2018a), no Brasil há quase sete mil empreendimentos destinados à geração de energia, totalizando pouco mais que 159 TW de potência instalada. Porém, seguindo a tendência deste mercado, para atender à demanda de energia elétrica sempre crescente, mais 194 centros estão sendo construídos e outros 392 estão sendo planejados. Atualmente no Brasil há investimentos na utilização de fontes de energia eólica, solar, hidráulica, maremotriz e térmica.

Figura 1 – Representação da Matriz Elétrica Brasileira.



Fonte: (ANEEL, 2018b).

Ainda, em uma análise apresentada pelo Ministério de Minas e Energia (MME) sobre os resultados no setor elétrico no ano de 2016, vê-se que inclusive no estado da Paraíba a adoção de fontes alternativas ganhou espaço significativo. Na Tabela 1 é possível ver o comparativo de geração eólica produzida em alguns estados brasileiros, incluindo a Paraíba, comprovando o interesse crescente pela utilização de GD.

Tabela 1 – Geração Eólica por Estado Brasileiro (GWh).

Ano	CE	RN	BA	RS	SC	PI	PB	RJ	PE	SE	PR	Total
2015	4.472	7.469	3.999	3.499	320	898	158	76	648	65	21	21.625
2016	4.956	11.616	6.295	4.671	283	3.133	163	68	2.238	63	3	33.489
%n/n-1	10,8	55,5	57,4	33,5	-11,8	248,8	3,5	-10,5	245,6	-2,9	-84,1	54,9
%2016	14,8	34,7	18,8	13,9	0,8	9,4	0,5	0,2	6,7	0,2	0,01	100,0

Fonte: (MME, 2017).

2.1.2. Geração Distribuída

GD é uma expressão usada para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor(es) independente da potência, tecnologia e fonte de energia (INEE, 2018). A demanda por esse método de descentralização da geração de energia é mundial e nos países onde ela está em maior desenvolvimento, vê-se seu crescimento aliado a um grande incentivo governamental e conseqüentemente, privado.

Como exemplo, temos os países com os maiores índices de geração distribuída como os Estados Unidos, o Canadá, o Japão e a Alemanha, que se utilizam do incentivo fiscal denominado *Feed In Tariff* ou *FIT* para encorajar o crescimento da geração distribuída no país. (NARUTO, 2017).

Dessa forma, é notório que o rumo atual do setor elétrico mundial tenda cada vez mais à descentralização da geração da energia comercializada, seja por meio de fontes renováveis ou não. O MME através da Resenha Energética Brasileira apresentada em 2017, mostra-nos por meio de gráficos e informativos que aqui no Brasil, a adesão a esta tendência está ganhando cada vez mais expressividade.

Na Tabela 2 é possível observar que aproximadamente 0,6% da potência total instalada no país é referente à GD, ao passo que ela corresponde a 65,43% da quantidade do número de usinas no Brasil, das quais cerca de 98% são solares. Posto que este método é de fácil exploração, inclusive em pequenas unidades consumidoras, é justificável a sua expansão.

Acompanhando a tendência, com o objetivo de regulamentar a utilização destes meios de produção de energia, a ANEEL, por meio do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), módulo 3: Acesso ao Sistema de Distribuição, estabelece critérios técnicos e operacionais para conexão de unidades consumidoras e produtoras ao sistema de distribuição e para o acesso de micro e minigeração distribuída.

Ainda, a modalidade de registro de Centrais Geradoras de Capacidade Reduzida que permite a compensação da energia injetada na rede em relação a energia consumida está regulada pela Resolução Normativa ANEEL nº 482, desde 17 de abril de 2012.

Os estímulos à geração distribuída se justificam pelos potenciais benefícios que tal modalidade pode proporcionar ao sistema elétrico. Entre eles, estão o adiamento de investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição, o baixo impacto

ambiental, a redução no carregamento das redes, a minimização das perdas e a diversificação da matriz energética (ANEEL, 2016).

Tabela 2 – Capacidade Instalada de Geração de Energia Elétrica no Brasil em dezembro de 2016.

Fonte	Nº Usinas	Potência Instalada (MW)	Estrutura % da Potência	Expansão n-(n-1) MW
Hidroelétrica (*)	1.259	96.925	64	5.205
<i>UHE</i>	220	91.499	60,9	5.002
<i>PCH</i>	453	4.941	3,3	203
<i>CGH</i>	586	484	0,3	0
Biomassa	534	14.187	9	785
<i>Baçaço de Cana</i>	399	10.903	7,3	371
<i>Bioqãs</i>	29	119	0,1	40
<i>Lixívia e outras</i>	106	3.166	2,1	375
Eólica	413	10.124	7	2.564
Solar	44	24	0	4
Urânio	2	1.990	1	0
Gás	192	14.671	10	773
<i>Gás Natural</i>	156	12.965	8,6	537
<i>Gás Industrial</i>	36	1.707	1,1	237
Óleo	2.220	8.877	6	196
<i>Do qual Óleo Combustível</i>	41	4.057	2,7	-84
Carvão Mineral	13	3.389	2	0
Desconhecidas	30	150	0	-5
Subtotal	4.707	150.338	100	9.523
Geração Distribuída	8.908	84	100	68
<i>Solar</i>	8.691	61	72,9	48
<i>Eólica</i>	47	5	6,2	5
<i>Hidro</i>	24	5	6,5	5
<i>Térmica</i>	146	12	14,4	10
Total Nacional	13.615	150.422		9.591
<i>Dos quais renováveis</i>	11.158	121.344	80,7	8.626
Disponibilidade com importação		156.271		

Fonte: (MME, 2017).

A propensão à reformulação na matriz elétrica do país traz consigo a necessidade de adaptação da estrutura do SEB atual em vários estágios. Segundo Ferreira (2015), a ONS vem enfrentando grandes mudanças devido ao aumento da complexidade do SIN, graças à crescente introdução destas fontes intermitentes de energia, por exemplo. Dessa forma, faz-se necessário realizar atualizações nos modelos computacionais utilizados hoje no planejamento e na programação da operação, como no sistema de proteção do SEB.

São inúmeros os tipos de mecanismos já utilizadas na proteção das linhas de distribuição e transmissão e no SEB como um todo, porém, estes foram adequados a uma realidade que não mais é conveniente. Os dispositivos de proteção mais usuais basicamente monitoram as variações da corrente no circuito, sendo sensíveis a um aumento na intensidade do fluxo de potência. São estes os relés de sobrecorrente 50 e 51, segundo a classificação da

American National Standards Institute (ANSI), estes têm atuação instantânea ou temporizada, respectivamente.

Porém, a ocorrência de uma anomalia em um sistema com GD demandaria uma tratativa diferente, tornando necessária a adoção em maior escala do relé direcional 67. Este dispositivo monitora a direcionalidade do fluxo de potência do sistema, sendo sensível a uma inversão deste. Ele então seria uma opção para sistemas com configuração em anel ou com GD, enquanto que o relé 50/51 continuaria uma opção eficiente para sistemas radiais.

2.2. Sistema de Proteção

Posto que os SEPs estão expostos a intempéries e anomalias, com o objetivo de garantir o resguardo destes são utilizados inúmeros dispositivos e equipamentos com as mais variadas finalidades. Os curto-circuitos que ocorrem na rede podem ser produzidos por diversos fatores, tanto externos – como uma árvore caída sobre uma linha –, quanto internos ao sistema – como um defeito em um equipamento. Por sua vez, a natureza do curto-circuito varia também de acordo com a sua causa e o cenário no qual está inserido, podendo ser de alta impedância, franco, trifásico ou monofásico.

O sistema de proteção é basicamente comandado por relés. Estes por sua vez, devem sensibilizar a defeitos na rede, enviando comandos aos equipamentos aos quais servem de sensores, propiciando o desligamento da parte do circuito onde se encontra o defeito ou que não está funcionando nas condições normais. Sendo então seu objetivo garantir a integridade não só material, minimizando os possíveis danos, como também das pessoas, reduzindo os riscos à vida (ROLIM, 2017).

Além dos relés podem ser citados disjuntores, chaves fusíveis e religadores como equipamentos essenciais à proteção dos sistemas elétricos. Porém, para cada novo equipamento instalado no circuito, é necessário que seja revisto todo o esquema já em operação afim de garantir a coordenação e a seletividade do sistema como um todo, que são os princípios básicos da proteção.

2.2.1. Tipos de Curto-Circuito

Segundo Sato (2015), os curto-circuitos são as perturbações mais comuns ocorridas no SEP e são ocasionadas pela ruptura do isolamento entre as fases ou entre as fases e o neutro. Na Tabela 3 tem-se a indicação da frequência com a qual cada tipo de falta é verificado.

Tabela 3 – Frequências típicas de ocorrências de curtos-circuitos.

Curto-Circuito	Frequência(%)
Trifásico	5,0
Bifásico	15,0
Bifásico-Terra	10,0
Monofásico	70,0

Fonte: (Sato, 2015).

No evento de um curto-circuito, a magnitude da corrente causada depende de vários fatores, dentre eles: tipo de curto-circuito, capacidade do sistema de geração, topologia da rede elétrica, tipo de aterramento do neutro dos equipamentos (SATO, 2015). Neste instante também é verificada um afundamento de tensão que afeta todo o sistema podendo comprometer o funcionamento de motores conectados à rede.

Logo, o cenário criado na ocorrência de um curto-circuitio pode fazer com que um sistema antes equilibrado apresente um desbalanceamento devido às perturbações sofridas, geralmente na ocasião de um curto bifásico, bifásico-terra ou monofásico.

2.2.1.1. Componentes Simétricas

Conforme apresentado por Sato (2015), sendo o sistema elétrico equilibrado, pode-se afirmar que seus fasores de tensão, por exemplo, apresentam mesmo módulo e estão simetricamente defasados entre si com um ângulo de 120° , devido ao desacoplamento entre as fases. O mesmo aplica-se aos fasores de corrente. Desta forma, o conhecimento de uma destas variáveis para uma fase, assegura a determinação de sua correspondente nas outras.

Contudo, quando o sistema é desequilibrado este princípio não é válido. A análise de circuitos elétricos polifásicos desbalanceados é feita com base no Método das Componentes

Simétricas desenvolvido por *Charles Le- Geyt Fortescue* que diz que: um sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto em três sistemas equilibrados e esta decomposição é única.

Estes sistemas equilibrados são:

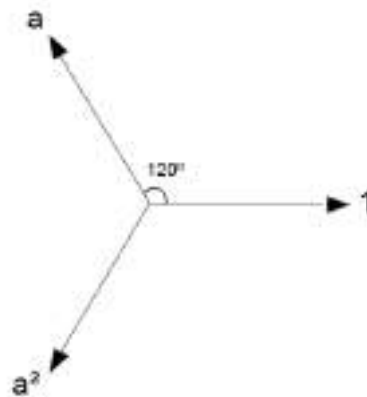
- Componente de Sequência Positiva: composto por três fasores de mesmo módulo e defasados 120° entre si, seguindo a sequência de fases do sistema original;
- Componente de Sequência Negativa: mesma composição da sequência positiva, mas com sequência inversa;
- Componente de Sequência Zero: consiste em três fasores de mesmo módulo e que estão em fase.

Para o desenvolvimento do Método das Componentes Simétricas os fasores são decompostos a partir do operador definido na Equação (1).

$$a = 1 \angle 120^\circ \quad (1)$$

A partir deste definição tem-se a representação do sistema de fasores unitários apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Sistema de Fasores Unitários.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Aplicando tal técnica à análise de circuitos trifásicos desequilibrados, tem-se que a decomposição fasorial mostradas nas Equações (2), (3) e (4), onde cada vetor é decomposto em função das suas respectivas componentes de sequência positiva, negativa e zero.

$$\hat{A} = \hat{A}_+ + \hat{A}_- + \hat{A}_0 \quad (2)$$

$$\hat{B} = \hat{B}_+ + \hat{B}_- + \hat{B}_0 \quad (3)$$

$$\hat{C} = \hat{C}_+ + \hat{C}_- + \hat{C}_0 \quad (4)$$

Tomando a fase A como referência para a utilização do sistema de fasores unitário, as equações acima podem ser reescritas, de forma a obter o que esta apresentado nas Equações (5), (6) e (7), e reduzir o número de incógnitas do sistema.

$$\hat{A} = \hat{A}_+ + \hat{A}_- + \hat{A}_0 \quad (5)$$

$$\hat{B} = a^2 \hat{A}_+ + a \hat{A}_- + \hat{A}_0 \quad (6)$$

$$\hat{C} = a \hat{A}_+ + a^2 \hat{A}_- + \hat{A}_0 \quad (7)$$

Este conjunto de equações é comumente representado em sua forma matricial, como na Equação (8). A matriz formada pelo operador a é conhecida como matriz de transformação de componentes simétricas.

$$\begin{bmatrix} \hat{A} \\ \hat{B} \\ \hat{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \hat{A}_+ \\ \hat{A}_- \\ \hat{A}_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Da mesma forma, a partir da inversa da matriz de transformação, é possível determinar a contribuição de cada sequência, como mostrado na Equação (9).

$$\begin{bmatrix} \hat{A}_+ \\ \hat{A}_- \\ \hat{A}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \hat{A} \\ \hat{B} \\ \hat{C} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Todos os elementos do sistema elétrico podem ser representados a partir das componentes de sequência, este desenvolvimento está disponível em Sato (2015).

2.2.2. Relé

De acordo com Blackburn e Domin (2006) para o *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) relés são dispositivos eletrônicos projetados para responder a variações nas condições de entrada de uma maneira específica, de modo a causar mudanças abruptas na operação dos circuitos elétricos aos quais estão associados. Seus dados de entrada normalmente são elétricos, mas podem ser de outra natureza ou ainda combinações de vários sinais.

Blackburn e Domin (2006) expõem ainda que, segundo o IEEE, relés de potência têm a função de detectar linhas ou equipamentos defeituosos no sistema de potência (SEP), ou ainda qualquer situação anormal e de risco e iniciar a ação de controle necessária. Sendo neste caso

o envio de comandos de abertura ao religador ou disjuntor monitorado por ele, de modo a isolar o local defeituoso.

Para a tomada de decisão, os relés comparam os valores medidos, corrente e tensão, já transformadas em grandezas secundárias a partir dos transformadores de instrumentos, transformadores de corrente (TC) e de potencial (TP), respectivamente, como mostrado na Figura 3. Estes equipamentos compõem o sistema de medidas analógicas do SEP.

Segundo Sato (2015), os relés de proteção foram os primeiros dispositivos automatizados utilizados nos SEPs. Os relés eletromecânicos dominaram o mercado até a década de 1970. Com o avanço das tecnologias de microprocessadores, a construção dos relés passou a contar com componentes altamente integrados que propiciaram inclusive a capacidade de detecção de falhas de operação no próprio equipamento, evitando atuações indevidas deste. Atualmente muitos fabricantes já deixaram de produzir relés eletromecânicos e a quantidade de relés digitais instalados no SEB só tende a aumentar.

Figura 3 – Esquemático da Interligação dos Equipamentos de Medição e Proteção no SEP.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Ainda, a versão digital destes equipamentos é considerada de fácil uso pelo operador e devido ao fato de terem a capacidade de armazenamento de dados adicionam maior robustez e informatividade ao sistema. O relé digital direcional é o modelo de estudo deste trabalho e terá suas características mais detalhadas adiante.

2.2.3. Transformador de Corrente e Transformador de Potencial

Um TC é um transformador cuja função é reproduzir com precisão a corrente do primário em seu secundário, preservando tanto a magnitude quanto a sua posição fasorial. Usualmente o TC fornece em seu secundário uma corrente padrão de 5 A, porém, na Europa, por exemplo, este valor é reduzido a 1 A.

Devido à padronização da corrente no secundário do TC, a relação de transformação do transformador de corrente (RTC) é expressa pela relação $\frac{X}{5}$. Pela Norma Brasileira (NBR) 6856 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), as correntes primárias do TC são de 5, 10, 15, 20, 25, 40, 50, 60, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 6000 e 8000 A. Os valores sublinhados são os usados segundo a norma ANSI (KINDERMANN, 2012).

Para a escolha do RTC deve-se levar em conta a corrente de carga do circuito I_N , e também a máxima corrente de curto-circuito nele que costuma ser a trifásica para os relés de proteção de fase e a monofásica para os relés de neutro. De posse das correntes de curto, faz-se uso da relação apresentada na Equação (10).

$$I_{Pnominal_TC} = \frac{I_{Pmáximo_curto-circuito}}{FS} \quad (10)$$

Na Equação (10), o Fator de Sobrecorrente (FS) é utilizado para garantir a precisão imposta pela classe de exatidão do relé. Tanto pela ANSI, quanto pela ABNT o valor definido para FS é 20. Em se tratando de precisão, para os TCs de proteção ela pode variar, sendo de 2,5%, 5% ou 10%. Este valor indica quanto de erro incidirá no valor apontado no secundário do TC, desde que respeitado o FS. Contudo, para a ANSI a precisão está relacionada a um valor de tensão máxima, enquanto que para a ABNT ela é diretamente ligada a um específico valor de potência aparente.

Então, o valor do RTC necessário para um funcionamento eficiente do equipamento deve ser, no mínimo, imediatamente superior ao maior valor encontrado entre o da carga nominal e o de curto obtido através da Equação (10).

Por sua vez, segundo Kindermann (2012) um TP é uma unidade monofásica que tem o papel de replicar a tensão do sistema elétrico em menor escala com o menor erro possível. Estes têm, normalmente, sua tensão de secundária normalizada a 115 V. Dessa forma, a relação de transformação do transformador de potencial (RTP) é expressa pela relação $\frac{X}{115}$.

2.2.4. Relé Direcional

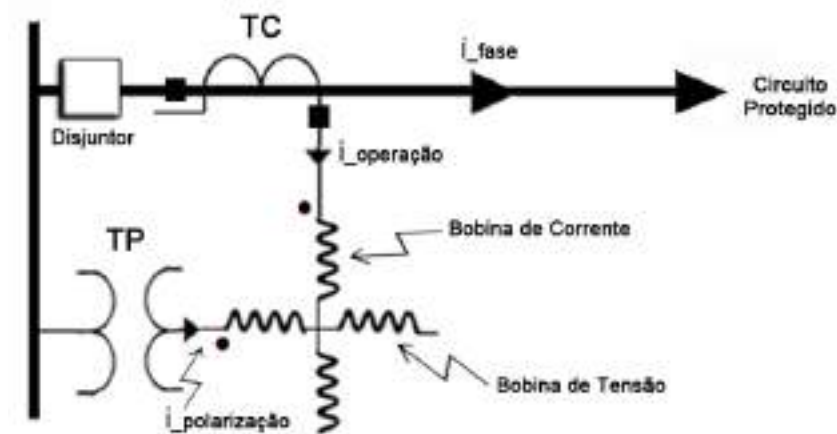
O relé direcional é adotado em sistemas onde há GD ou ainda que apresentam configuração em anel, mas sempre associado a um relé 50/51. Desta forma, o relé 67, que monitora o relé de sobrecorrente, confere característica radial ao sistema em anel. Ou seja, o

sistema em anel se comporta como dois sistemas radiais em sentidos opostos (KINDERMANN, 2012).

Para que haja atuação do relé 67 é preciso que a corrente verificada seja maior que a de ajuste e também que esta tenha seu sentido concordante com o pré-estabelecido a partir da referência de polarização adotada, que é única para cada fase e depende da técnica de polarização usada.

Como mostrado na Figura 4, este relé apresenta dois conjuntos de bobinas em quadratura que são alimentados pelas grandezas de operação (corrente elétrica de operação) e de polarização (tensão de polarização). É a defasagem entre estas duas medidas que estabelece a direcionalidade da corrente de operação e de curto-circuito. Ainda, a polaridade de cada bobina está representada pelo ponto preto associado a cada uma delas.

Figura 4 – Diagrama Unifilar do Relé Direcional 67.



Fonte: (Da Autora, 2018).

2.2.4.1. Técnicas de Polarização

Neste trabalho será adotada a técnica de polarização em quadratura ou 90° para caracterização da direcionalidade do relé. Porém de acordo com a conveniência e a necessidade do sistema, outras técnicas podem ser adotadas, como a de 60° e a de 30° .

Tendo a fase A como referência de um sistema trifásico, por exemplo, para a polarização dela e das demais fases, será levada em consideração a tensão V_{AN} como referência para a determinação dos ângulos das demais fases, seguindo a sequência positiva. Logo, o que

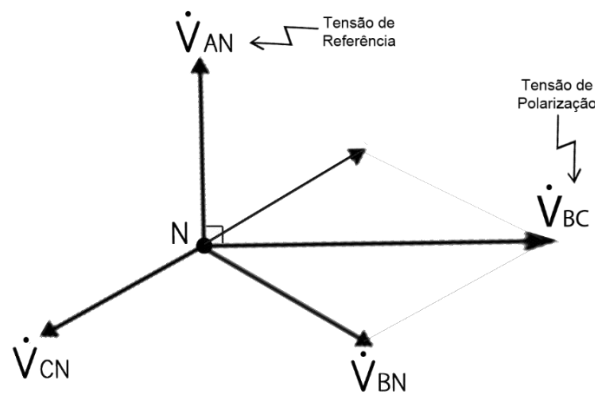
diferencia cada uma das técnicas citadas é o valor de interesse para a defasagem entre a tensão de referência e a tensão de polarização, podendo esta assumir os valores de 90° , 60° ou 30° .

A partir da composição fasorial das tensões do circuito é possível estabelecer qual será a tensão de polarização mais conveniente para cada fase de acordo com o método empregado, de tal forma que ela garanta o funcionamento eficaz e eficiente do relé 67.

a) Polarização em quadratura ou a 90°

Como indicado na Figura 5 abaixo, a tensão que está a 90° da V_{AN} é a V_{BC} . Para as demais fases o procedimento segue o mesmo, de forma que para a fase B, a tensão de polarização será V_{CA} e para a fase C será V_{AB} .

Figura 5 – Polarização em Quadratura ou a 90° .

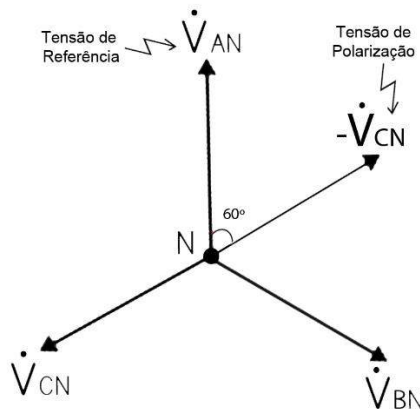


Fonte: (Da Autora, 2018).

b) Polarização a 60°

Agora, como o interesse é de uma defasagem de 60° , a tensão de polarização para o relé direcional da fase A poderá ser $-V_{CN}$ ou ainda $(V_{AN} + V_{BN})$, como observado na Figura 6.

Figura 6 – Polarização a 60° .

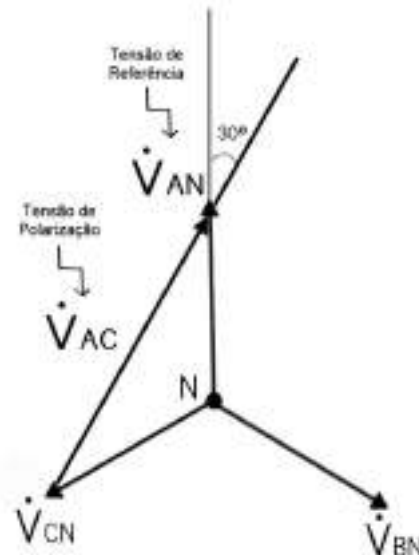


Fonte: (Da Autora, 2018).

c) Polarização a 30°

Desta vez o interesse é de que a tensão de polarização seja 30° defasada da tensão de referência. Como pode ser visto na Figura 7, para a fase A, esta tensão que satisfaz esta necessidade é V_{AC} .

Figura 7 – Polarização a 30°.



Fonte: (Da Autora, 2018).

2.2.4.2. Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento dos relés direcionais está diretamente ligado à defasagem medida entre a tensão de polarização e a corrente de operação. Para tanto, segundo Kindermann (2012), o acionamento destes é movido pela equação geral dos motores bifásicos, mostrada na Equação (11). A explicação que segue nesta seção será aplicada a um caso de curto-circuito na fase A.

$$\tau_{motor\ do\ relé} = K\phi_{I_a}\phi_{polarização}\text{sen}(\alpha) \quad (11)$$

Onde:

K → constante relacionada à posição da alavanca entre os contatos fixos e móvel do relé;

ϕ_{I_a} → fluxo magnético criado pela corrente secundária da fase A (I_a) – corrente de operação – na bobina de corrente do relé. Este está em fase com a corrente que o gerou;

$\phi_{polarização}$ → fluxo magnético na bobina de tensão decorrente da corrente de polarização. Este está em fase com a corrente que o gerou;

α → ângulo entre os fluxos ϕ_{I_a} e $\phi_{polarização}$.

Ainda de acordo com Kindermann (2012), devido à natureza indutiva das linhas de transmissão e distribuição, quando da ocorrência de um curto-circuito, verifica-se uma grande defasagem entre a corrente I_a e a tensão de fase V_{AN} . O valor deste ângulo é dado por $90^\circ - \theta$, sendo θ o ângulo entre a corrente de operação (I_a) e a tensão de polarização (V_{BC}).

Sabe-se que a reta normal é perpendicular a I_a e que o ângulo entre ela e V_{BC} é o de máximo torque motor do relé (r), este definido por características construtivas do equipamento, logo definido pelo fabricante. Desta forma, tem-se a relação exposta na Equação (12):

$$\alpha = 90^\circ - r + \theta = 90 - (r - \theta) \quad (12)$$

Reescrevendo a Equação (13) a partir da relação encontrada na Equação 3 obtem-se a Equação 4:

$$\tau_{motor\ do\ relé} = K_1 I_a V_{BC} \text{sen}[90 - (r - \theta)] \quad (13)$$

Onde K_1 corresponde à nova constante resultante do rearranjo realizado na Equação 1.

Desenvolvendo a Equação (13) utilizando relações trigonométricas, pode-se chegar a Equação (14), na qual vê-se propriamente que a intensidade do torque do relé depende diretamente da tensão de polarização e da corrente de operação e sua direcionalidade varia de acordo com a defasagem entre estas duas grandezas, posto que o valor de r é fixo.

$$\tau_{motor\ do\ relé} = K_1 I_a V_{BC} \text{cos}(r - \theta) \quad (14)$$

Contudo, considerando os aspectos construtivos do relé, sabe-se que o torque efetivo que atua neste não é o torque total apresentado na Equação (14), posto que deve-se levar em conta o efeito restaurador da mola, como mostrado na Equação (15).

$$\tau = \tau_{motor\ do\ relé} - \tau_{restaurador} \quad (15)$$

Para definir a região de atuação do relé será analisado o seu comportamento no limiar de operação. Sabe-se que neste ponto o torque resultante sobre ele é nulo. Dessa forma, tem-se o apresentado na Equação (16).

$$0 = K_1 I_a V_{BC} \text{cos}(r - \theta) - \tau_{restaurador} \quad (16)$$

Sabe-se que durante o curto-circuito a tensão de polarização é praticamente constante. Logo, reescrevendo a equação anterior, obtém-se a Equação (17), que só é válida no limiar de operação do relé.

$$I_a \cos(r - \theta) = K_2 \quad (17)$$

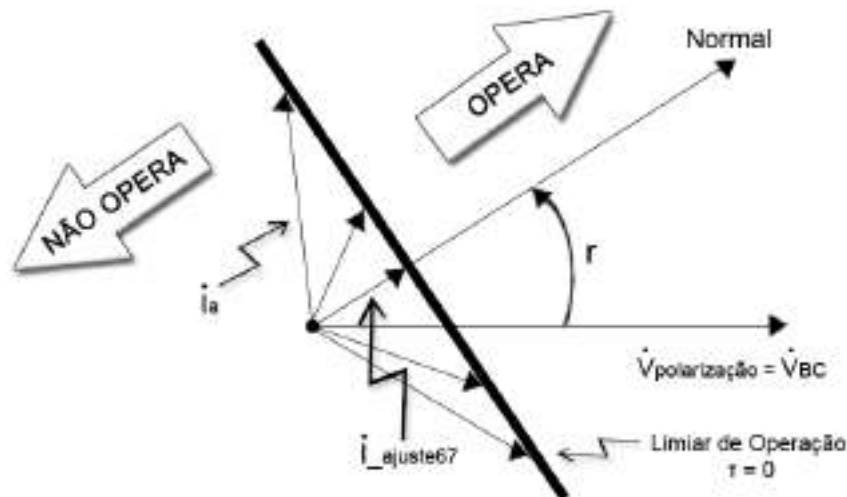
Onde K_2 representa a junção das constantes presentes na Equação (16), como apresentado na Equação (18).

$$K_2 = \frac{\tau_{restaurador}}{K_1 V_{BC}} \quad (18)$$

Seguindo ainda o demonstração apresentada por Kindermann (2012), adotando V_{BC} como referência do sistema, tem-se que o ângulo de I_a será o próprio θ , sendo estas grandezas as únicas variáveis, de acordo com a Equação (17).

Finalmente, na Figura 8 é apresentado o diagrama fasorial do limiar de operação do relé. Nota-se então que a reta do limiar, que é ortogonal à reta Normal, divide o plano em duas partes: para correntes de curto-circuito posicionadas no lado esquerdo desta, o relé não atua, enquanto que para as correntes cujos fasores estiverem localizados à direita da reta, o relé atuará.

Figura 8 – Diagrama Fasorial do Limiar de Operação do Relé Direcional.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Ainda, como mostrado na Figura 8, existem infinitas correntes de curto que estão no limiar de operação do relé 67, porém, apenas a menor dentre estas corresponde à corrente de ajuste do relé, de forma que ela tem fase igual ao ângulo r de máximo torque do relé. Esta situação ocorre quando o valor de θ é tal que o I_a está em fase com a reta Normal.

O valor de r , como dito anteriormente, é definido pelo fabricante, mas pode ser ajustado de acordo com o tipo do relé. Em relés eletromecânicos, normalmente, há três possibilidades de escolha, já nos digitais a escolha é livre dentro de uma faixa limitada de valores, entre 20° e 80°, por exemplo.

É possível que essa corrente de ajuste seja pequena de tal forma que a corrente nominal de carga seja suficiente para a atuação do dispositivo, ainda assim, este é um cenário interessante para funcionamento do relé 67, posto que a fase do vetor em questão é mais importante que a sua intensidade. Além disso, como o objetivo é monitorar a direção do fluxo de potência do circuito, por menor que seja a inversão, ela deve ser sentida e o relé deve ser sensível o suficiente para atuar na presença dela.

2.3. Revisão da Literatura

Previamente ao desenvolvimento do dispositivo apresentado neste artigo foram revisados trabalhos que compartilhavam do mesmo gênero de pesquisa, o estudo de relés de proteção, tendo em vista que trabalhos relacionados especificamente ao de sobrecorrente direcional foram difíceis de se encontrar.

A partir do levantamento realizado podem ser citados com maior destaque Salles (2007) e Izaguirre (2016) por seus trabalhos sobre o relé 67, porém, antes deles foram consideradas as pesquisas realizadas por Breda (2009), De Matos (2010), Dos Santos (2012) e Prudêncio (2016). Estas últimas citadas não tiveram o relé direcional como objeto de pesquisa, mas apresentaram contribuições para o presente estudo a partir das pesquisas realizadas sobre o sistema de proteção e outros dispositivos associados a ele, com foco no relé de sobrecorrente.

Tendo em vista que o relé de sobrecorrente é um dos componentes fundamentais do sistema de proteção da distribuição, por exemplo, Breda (2009), teve como objetivo principal modelar, caracterizar e avaliar o desempenho deste aplicado a um determinado sistema de distribuição. Para tanto, o sistema foi desenvolvido em *software Alternative Transient Program* (ATP), enquanto que o desenvolvimento do relé propriamente se deu no ambiente MATLAB/SIMULINK®.

Em um primeiro momento foram simuladas situações de falta sobre o sistema visando entender melhor o comportamento deste frente às adversidades aplicadas. O modelo desenvolvido por Breda (2009) foi então validado a partir da realização de rotinas casos-testes,

as quais envolveram a aplicação de curtos simétricos e assimétricos ao sistema base. Os resultados obtidos foram satisfatórios, comprovando o funcionamento do modelo desenvolvido.

Por sua vez, em seu trabalho de conclusão de curso, Matos (2010) visou estudar a seletividade e coordenação dos elementos de proteção contra sobrecorrente e pôde concluir que não existe um ajuste ideal e único para os dispositivos de proteção aplicados a um sistema, isto porquê cada estudo pode indicar situações diferentes a serem priorizadas, levando a alteração dos ajustes.

De forma mais ampla, Santos (2012) criou modelos para os relés de sobrecorrente, de distância e o diferencial. Todos os citados foram desenvolvidos com lógica baseada em fasores das componentes fundamentais de correntes e tensões. Os modelos foram implementados em conjunto com o objetivo de garantir a funcionalidade completa do sistema, respeitando as noções de seletividade e coordenação entre os diferentes dispositivos.

Os modelos de Santos (2012) foram desenvolvidos também no MATLAB/SIMULINK[®]. No entanto, foi observado, a partir das simulações, que estes não correspondem totalmente ao comportamento real do relé, apresentando um atraso no momento esperado para atuação. Ainda assim, os resultados encontrados por meio dos testes foi satisfatório, ao passo em que foram verificadas também possibilidades de aperfeiçoamentos.

Ainda sobre os relés de sobrecorrente, Prudêncio (2016) desenvolveu outro modelo para tais dispositivos na mesma plataforma que Breda (2009) e Santos (2012), este aqui apresentado foi o adotado como base para este trabalho, tendo em vista que o relé direcional opera a partir do monitoramento do relé 50/51.

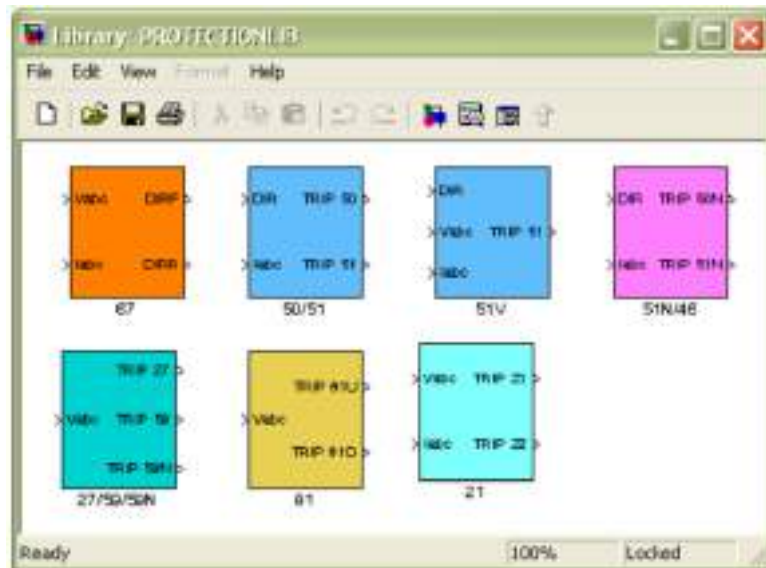
Prudêncio (2016) além de se preocupar em desenvolver um modelo para testes computacionais, teve também como objetivo estudar a seletividade destes componentes a partir de simulações em um sistema fictício, criado e implementado por Prudêncio (2016).

Iniciando os estudos dos relés direcionais, em sua dissertação Salles (2007) desenvolveu não só um modelo computacional para para o relé direcional 67, mas sim um acervo que incluiu diversos tipos de relés, como mostrado na Figura 9. Tais modelos foram desenvolvidos para uso no MATLAB/SIMULINK[®], sendo então possível a sua utilização em diversos ambientes de simulação de transitórios eletromagnéticos como o PSCAD/EMTDC, o SimPowerSystems e o ATP.

O dispositivo direcional implementado por Salles (2007) foi elaborado para identificar o tipo de curto-circuito em sua primeira etapa de ação, tendo sido polarizado por tensão de sequência positiva para a discriminação da direcionalidade em faltas trifásicas, e por tensão de sequência negativa para as assimétricas.

Com o objetivo de eliminar a dependência da atuação do relé à defasagem entre as grandezas de polarização, o autor desenvolveu um elemento direcional que mede as impedâncias das sequências positiva e negativa. Esta passou então a ser medida que delimita a região de atuação do equipamento.

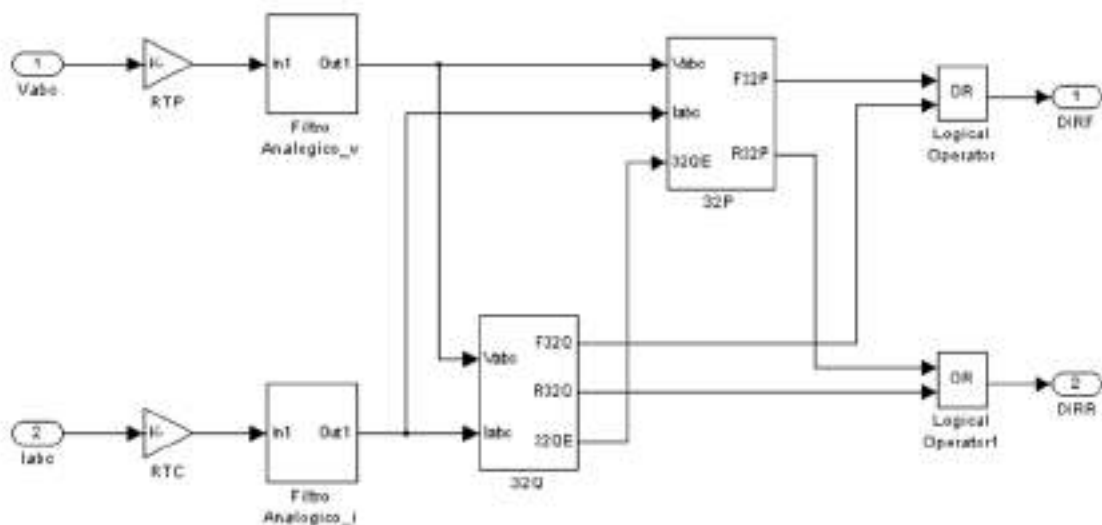
Figura 9 – Biblioteca dos Modelos dos Relés Digitais de Proteção.



Fonte: Salles, 2007.

Na Figura 10 é mostrada a implementação realizada por Salles (2007). As entradas correspondem às tensões e correntes trifásicas do circuito protegido, o bloco 32Q representa o subsistema do elemento direcional de sequência negativa e o 32P, o de sequência positiva.

Figura 10 – Biblioteca dos Modelos dos Relés Digitais de Proteção.



Fonte: Salles, 2007.

A primeira etapa da lógica criada por Salles (2007) é determinar o tipo de falta, se ela for desbalanceada, a saída em nível lógico alto do 32Q que controla o 32P, desabilitará este último. Ainda, as saídas DIRR e DIRF indicam se a atuação do dispositivo foi por uma falta no sentido reverso ou à frente da proteção, respectivamente.

Por sua vez, em Izaguirre (2016) foi feita a modelagem de um relé direcional em ATP usando a linguagem *MODELS* para avaliar seu funcionamento quando aplicado para proteção de linhas de transmissão na ocorrência de curtos-circuitos desequilibrados, monofásico, bifásico e bifásico-terra.

O ATP é um dos programas mais utilizados para simulação digital de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética em sistemas elétricos de potência. Com ele, redes complexas e sistemas de controle podem ser simulados (IZAGUIRRE, 2016). Fato que justificou a escolha da plataforma a ser utilizada.

Os relés foram implementados a partir de três métodos de polarização distintos: tensão, corrente e análise de impedância. Em seu código do modelo de relé direcional implementado com polarização por tensão de sequência zero ou sequência negativa, fez-se necessário o ajuste do ângulo de torque, como também da corrente de opeção e da tensão de polarização. Os valores mínimos adotados que levarão à atuação do dispositivo foram denominados de grandezas de arranque.

A validação dos testes neste estudo foi baseada na variação das correntes não de fase, mas também de sequência negativa e zero. Estes foram realizados em dois sistemas de linhas de transmissão longas de 300 e 600 km, e os resultados mostraram que a direcionalidade da falta foi identificada pelas três lógicas de polarização.

Para a elaboração deste trabalho foi levada em consideração as referências aqui mencionadas, bem como as demais presentes na bibliografia. Sobretudo, porém, o trabalho de Salles (2007) foi tido como inspiração maior.

3. MODELAGEM DO RELÉ DE SOBRECORRENTE DIRECIONAL

Este capítulo apresenta o modelo funcional implementado, destacando suas características e os dados de entrada para os blocos utilizados. Destacando que o relé 67 desenvolvido será utilizado para comandar a atuação do relé 50/51 realizado e apresentado por Prudêncio (2016), complementando e acrescentando uma nova funcionalidade ao seu estudo.

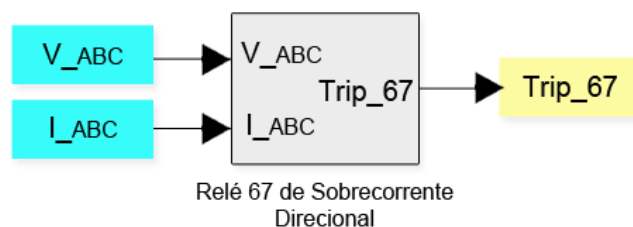
Para a explicação do modelo lógico desenvolvido para o relé será adotada a fase A como exemplo e a medida que for necessário, serão detalhadas alterações realizadas nas demais fases do sistema. No Apêndice A estão disponibilizados todos os blocos implementados diretamente no *software* MATLAB/SIMULINK®.

Nas ilustrações apresentadas nesta seção, os blocos em azul representam as sinais de entrada do sistema; os cinzas assumem o papel de funções, operadores ou ainda subsistemas; os vermelhos simbolizam constantes; os lilás configuram os ganhos; e os amarelos são equivalentes às saídas.

3.1. Modelo do Relé Digital Direcional 67

Na Figura 11, tem-se o bloco representando o relé 67, de sobrecorrente direcional que foi desenvolvido no MATLAB/SIMULINK®, com os dados necessários de entrada para o cálculo do trip de saída do dispositivo.

Figura 11 – Relé 67 de Sobrecorrente Direcional.

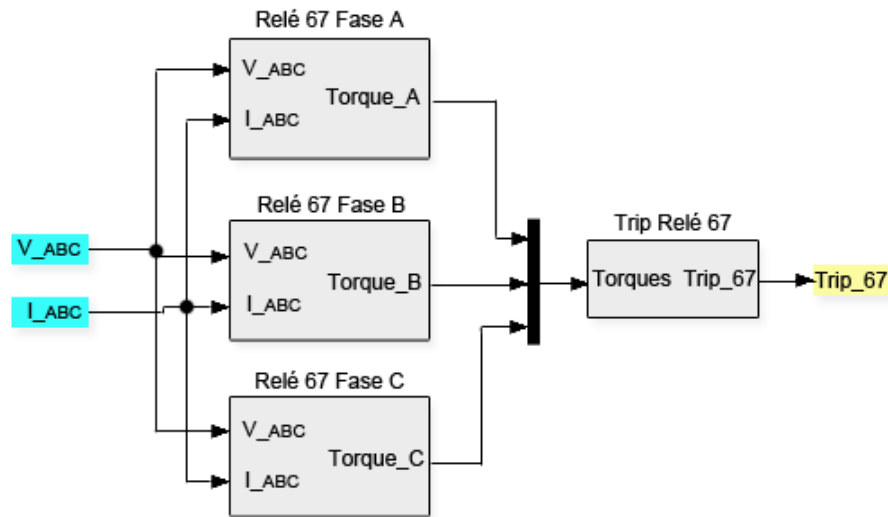


Fonte: (Da Autora, 2018).

Na Figura 12 é mostrado o desenvolvimento interno do bloco do Figura A. Como explicado na seção anterior, o funcionamento do relé 67 baseia-se no torque calculado, se este for positivo, o relé deve atuar, mas se ele for negativo indica que não há anormalidade quanto

à direção do fluxo de potência no circuito analisado, logo não deve haver nenhuma ação do equipamento.

Figura 12 – Composição Trifásica do Relé 67.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Para tanto, as fases são analisadas individualmente de forma que seja possível recuperar o torque em cada uma delas, para então poder haver uma análise geral como mostrado na Figura 12.

3.1.1. Análise Monofásica

O relé 67 da fase A é mostrado na Figura 13. A partir das tensões disponíveis de entrada é obtida a tensão de polarização V_{BC} , a partir da diferença entre as tensões V_{BN} e V_{CN} . Vale ressaltar que o ângulo da tensão V_{AN} de referência é 30° e não 0° , devido à ligação Δ -Y do transformador ligado ao barramento. Devido a este fato, o fator r adotado para os cálculos em todas as fases é na verdade $r + 30^\circ$, pois é necessário levar em conta a defasagem inicial.

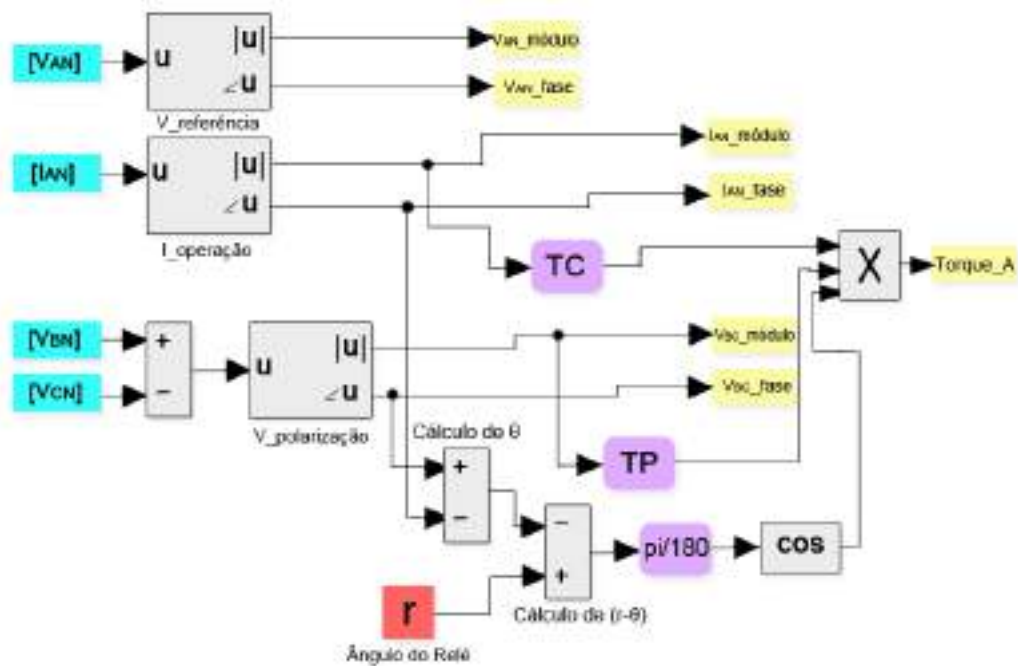
Posto que o MATLAB/SIMULINK[®] não segue um padrão para o cálculo dos fasores e apenas assume como correto o valor mais próximo da referência, para seguir a sequência positiva, obedecendo o sentido anti-horário em todos os casos, fez-se necessário realizar uma correção em algumas grandezas nas demais fases, tomando como correto o resultado da diferença entre o valor disponível e 360° , como mostrado na Equação (19).

$$\angle V_{CN_final} = \angle V_{CN_calculado} - 360^\circ \quad (19)$$

Na fase B foi aplicada esta retificação para a tensão de polarização V_{CA} e na fase C, a aplicação desta se fez necessária em todas as grandezas de interesse, V_{CN} , V_{AB} e I_{CN} .

Cada grandeza de interesse é decomposta em módulo e fase a partir da aplicação da transformada de Fourier, de forma que são recuperados os valores fundamentais das tensões e da corrente de cada fase aplicadas ao relé.

Figura 13 – Relé 67 Fase A.



Fonte: (Da Autora, 2018).

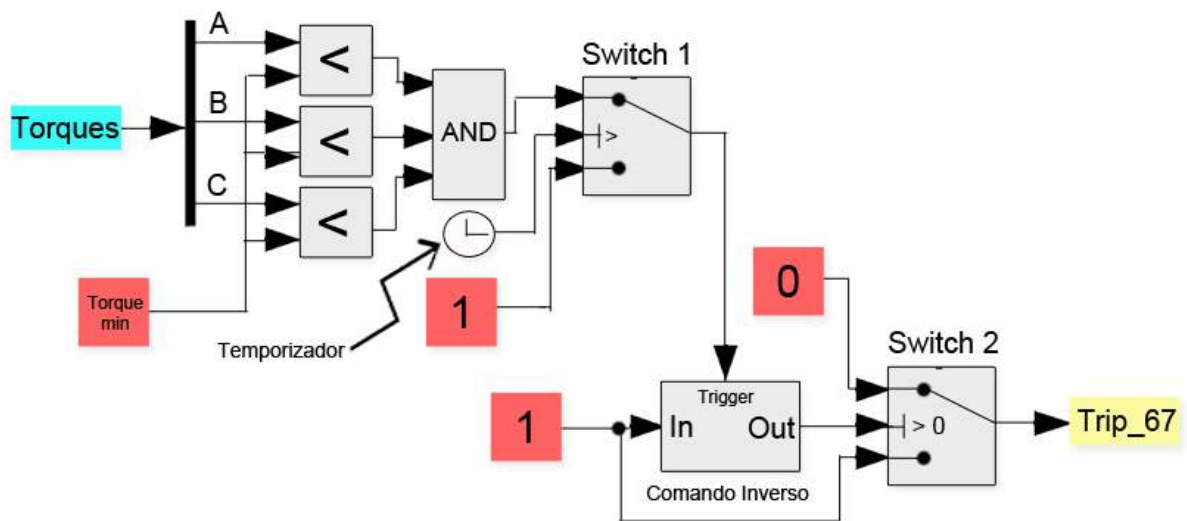
Mais uma vez, o objetivo da implementação lógica realizada é encontrar o torque associado à fase A do sistema trifásico. Dessa forma, retomando à Equação 5, na Figura Y é determinado o valor de θ , e este é então subtraído do valor de r . Após a conversão dos valores para radianos – aplicando o ganho de $\frac{\pi}{180}$ –, posto que o *software* adota esta unidade como base para cálculos trigonométricos, é possível obter o valor do cosseno de $r - \theta$.

Por fim, para completar os valores necessários à determinação do torque, a partir dos blocos TC e TP, tem-se a representação dos valores de corrente de operação e tensão de polarização no secundário, respectivamente. Nesta etapa apenas são reproduzidos os valores do circuito primário por meio da aplicação de um ganho igual ao RTC e ao RTP, separadamente.

3.1.2. Acionamento do Trip do 67

A partir dos valores individuais de torque de cada fase, por meio da lógica implementada e apresentada na Figura 14, é definido se será enviado ou não o comando de abertura para o equipamento.

Figura 14 – Trip Relé 67.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Os torques indicados pelas letras A, B e C, são comparados ao valor mínimo de torque definido como necessário para atuação. Como para um valor de torque negativo o dispositivo não deve atuar, o resultado da operação lógica *and* só será falso quando algum dos torques ultrapassar o valor mínimo de atuação. O temporizador na entrada do *Switch 1* serve para evitar a atuação no período inicial de instabilidade do sistema.

Satisfeita a condição de comparação, a saída do *Switch 1* que atua como *Trigger* do bloco Comando Inverso será nula, de forma que este bloco não será ativado. Neste caso, a entrada ativa do *Switch 2* também será nula, o que indica que será enviado o trip, comando de abertura, para o relé, posto que os dispositivos chaves no MATLAB/SIMULINK® têm a abertura ativada em nível lógico baixo.

Analisando a situação oposta, quando o relé não deve atuar, posto que a operação lógica *and* será verdadeira, a saída do *Switch 1* será um, de modo a disparar o *Trigger* do Comando Inverso. Este bloco por sua vez tem sua entrada setada em nível lógico alto e este é o valor enviado diretamente para sua saída quando o seu gatilho é ativado. Desse modo, a

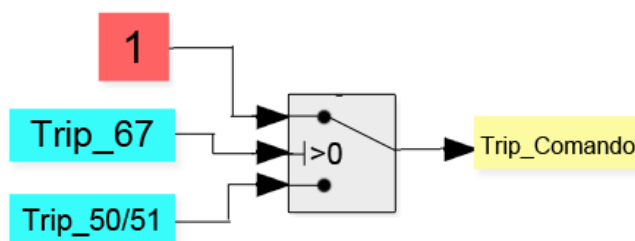
entrada do *Switch 2* será alternada para um e este será o valor entregue em sua saída e desta forma não será enviado comando de abertura à chave.

3.1.3. Comando do Relé de Sobrecorrente 50/51

Como exposto, o relé 67 é utilizado para monitoramento do relé 50/51. Para esta aplicação foi utilizada a lógica implementada por Prudêncio (2016) como modelo do relé de sobrecorrente instantâneo e temporizado, associado ao aqui desenvolvido.

O relé 50/51 não será mais o único responsável pela resposta à falha no sistema, deste modo, o seu sinal de saída não será enviado diretamente à chave. Na Figura 15, tem-se a configuração do relé 50/51 comandado pelo relé 67. O sinal de *Trip_Comando* é o que comandará diretamente a abertura da chave do circuito.

Figura 15 – Comando do relé 50/51 a partir do relé 67.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Como indicado, o comando de abertura só será enviado para o equipamento monitorado se, e somente se houver sensibilização por parte do relé 67 e do relé 50/51 simultaneamente. Se o 67 for sensibilizado, porém, o defeito não for sentido pelo 50/51, ainda assim não haverá atuação do equipamento sobre a falha.

Porém, para o caso do sistema usado e levando em conta que as situações de curto testadas correspondem a cenários favoráveis, implicando que a corrente de defeito tenderá sempre a aumentar resultando em uma atuação do relé de sobrecorrente, a implementação realizada é satisfatória para o estudo da performance do relé 67.

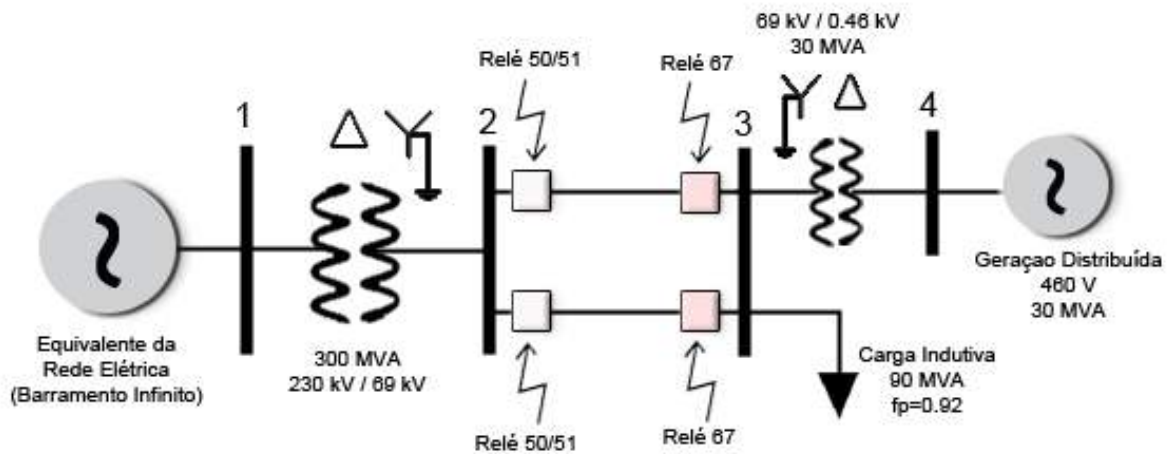
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados o sistema base utilizado para os testes e os diferentes cenários produzidos a partir deste, para a verificação do funcionamento do relé direcional. Como dito anteriormente, todos os blocos implementados no MATLAB/SIMULINK® estão disponíveis no Apêndice A.

4.1. Caracterização da Rede Teste

Na Figura 16 é apresentado o modelo base da rede teste implementada, esta sendo então composta por um circuito de duas linhas associadas em anel alimentando uma carga indutiva com uma instalação de GD associada ao mesmo barramento que a carga.

Figura 16 – Topologia da Rede Teste.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Para a GD supõe-se um parque eólico formado por quinze aerogeradores com capacidade de geração de 2 MVA cada um.

4.2. Cálculo dos Parâmetros da Rede

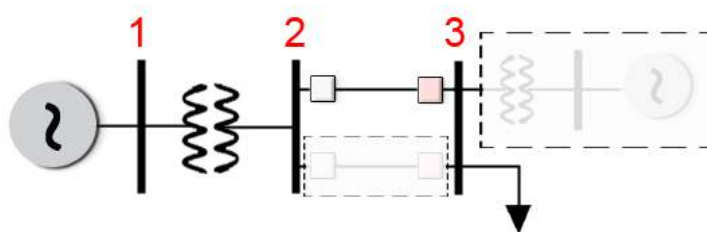
Antes de ser inserido no circuito, tanto o modelo de Prudêncio (2016) quanto o que está sendo testado neste trabalho precisam ser parametrizados de acordo com o sistema adotado. Assim também deve ser feito para os elementos de medição associados a eles, sendo então necessária a determinação das correntes de curto do sistema, bem como o conhecimento de seu comportamento nominal, de acordo com Kindermann (2012).

Para as ilustrações apresentadas nesta seção, os elementos rodeados por linhas tracejadas são considerados desconectados do circuito.

4.2.1. Cálculo das Correntes de Curto-Circuito

Para ajustar adequadamente os dispositivos de Prudêncio (2016) para este circuito, mais precisamente para atuarem como proteção da barra 2, é necessário entender o comportamento do sistema, ilustrado na Figura 17, conhecendo seu funcionamento nominal e suas limitações em situações de curto.

Figura 17 – Rede Adotada para a Parametrização dos Equipamentos da Barra 2.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Nesta representação foi admitido o pior cenário possível de funcionamento para o circuito base, tendo como referência o relé instalado na barra 2. Este aconteceria quando da ausência de GD e com apenas uma linha em operação. O objetivo é ajustar a sensibilidade dos relés desta barra para todos os cenários possíveis de teste.

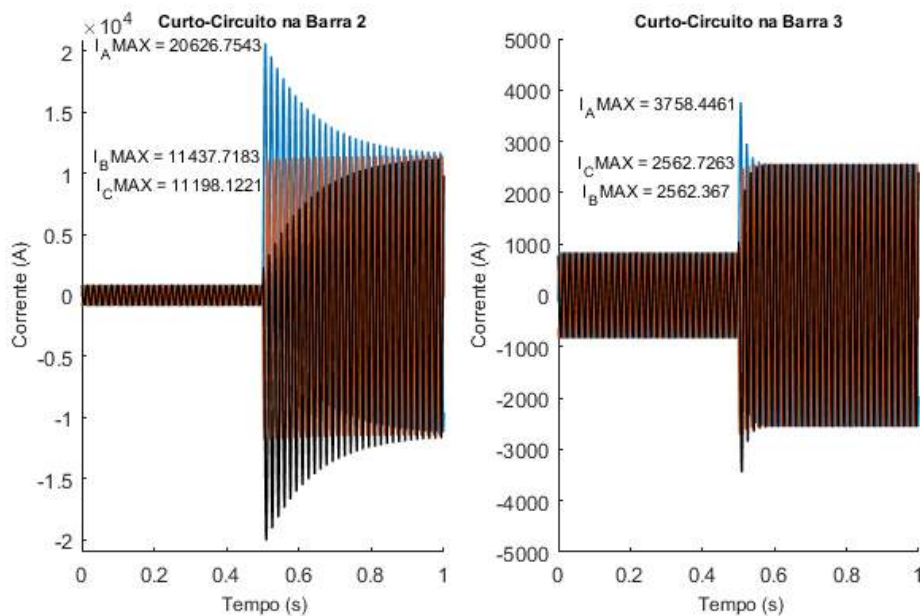
A partir da simulação foram determinados os níveis máximos de corrente de curto registrados na barra 2 e na 3 para esta configuração de rede, com a aplicação da falta à frente de cada barra, respectivamente. Estes são apresentadas na Figura 18. Os testes foram realizados considerando o sistema de proteção desativado, logo as chaves foram retiradas do circuito.

Para os cálculos de ajustes serão utilizadas os valores eficazes das correntes encontradas, estes foram calculados conforme as Equações (20) e (21).

$$I_{CC_MAX_Curto_2} = I_{A_MAX} = \frac{20.626,75}{\sqrt{2}} = 14.585,31 \text{ A} \quad (20)$$

$$I_{CC_MAX_Curto_3} = I_{A_MAX} = \frac{3.758,45}{\sqrt{2}} = 2.657,63 \text{ A} \quad (21)$$

Figura 18 – Máximos Valores de Corrente de Curto Encontrados para as Barras 2 e 3 para Análise da Barra 2.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Em um segundo momento, o ponto de interesse passa a ser o relé da barra 3. Na Figura 19 é apresentada a configuração de rede utilizada para o cálculo dos ajustes dos equipamentos associados ao sistema de proteção dela.

Para que seja justificada a necessidade da instalação de equipamentos de proteção na barra 3 é preciso que haja um cenário no qual seja possível acontecer a inversão do fluxo de potência do circuito, por exemplo. Desta forma, faz-se necessário a utilização de um dispositivo que monitore tais variações. Logo, para a análise das proteções da barra 3 foram consideradas as duas linhas operando em paralelo caracterizando a configuração em anel.

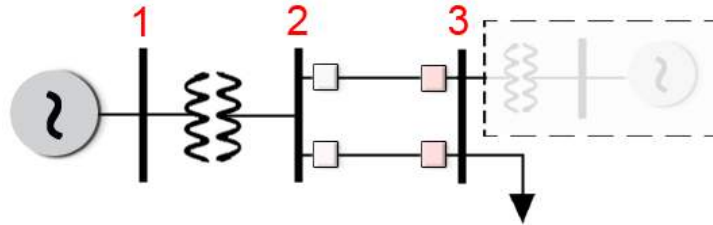
Na Figura 20 vê-se os valores encontrados para este cenário. O princípio dos testes foi o mesmo utilizado anteriormente.

Novamente, nas Equações (22) e (23) são calculadas as correntes máxima de curto-circuito nas barras 2 e 3, respectivamente.

$$I_{CC_MAX_Curto_2} = I_{A_MAX} = \frac{20.840,54}{\sqrt{2}} = 14.736,49 \text{ A} \quad (22)$$

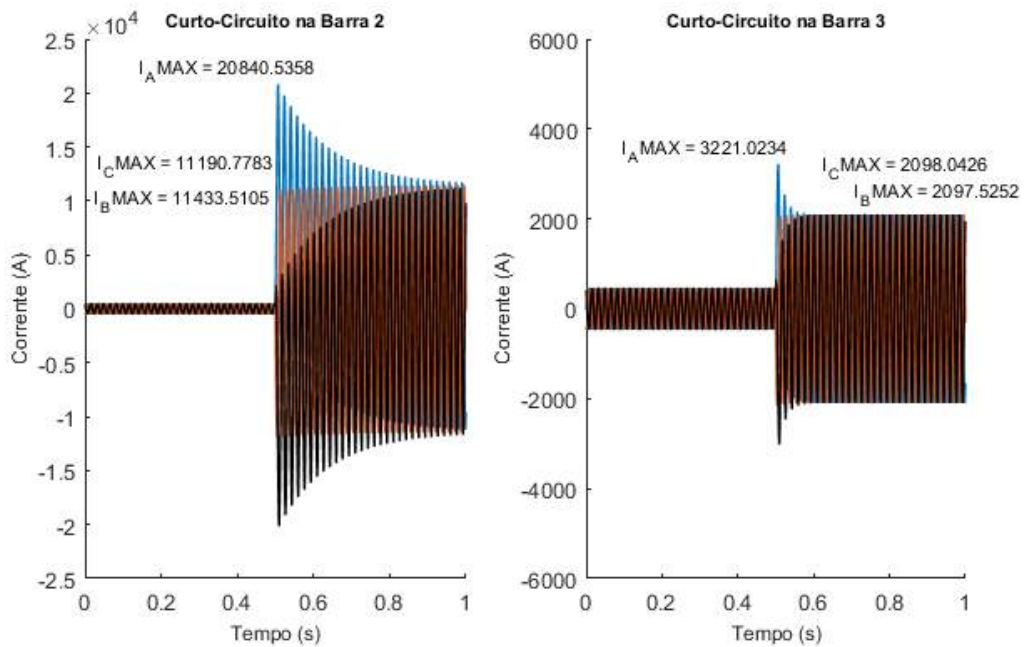
$$I_{CC_MAX_curto_3} = I_{A_MAX} = \frac{3.221,02}{\sqrt{2}} = 2.277,61 \text{ A} \quad (23)$$

Figura 19 – Rede Adotada para a Parametrização dos Equipamentos da Barra 3.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Figura 20 – Máximos Valores de Corrente de Curto Encontrados para as Barras 2 e 3 para Análise da Barra 3.



Fonte: (Da Autora, 2018).

4.2.2. Cálculo da Corrente de Carga

A corrente de carga I_N foi calculada a partir da Equação (24), levando em conta a potência demandada pela carga instalada e a tensão de operação.

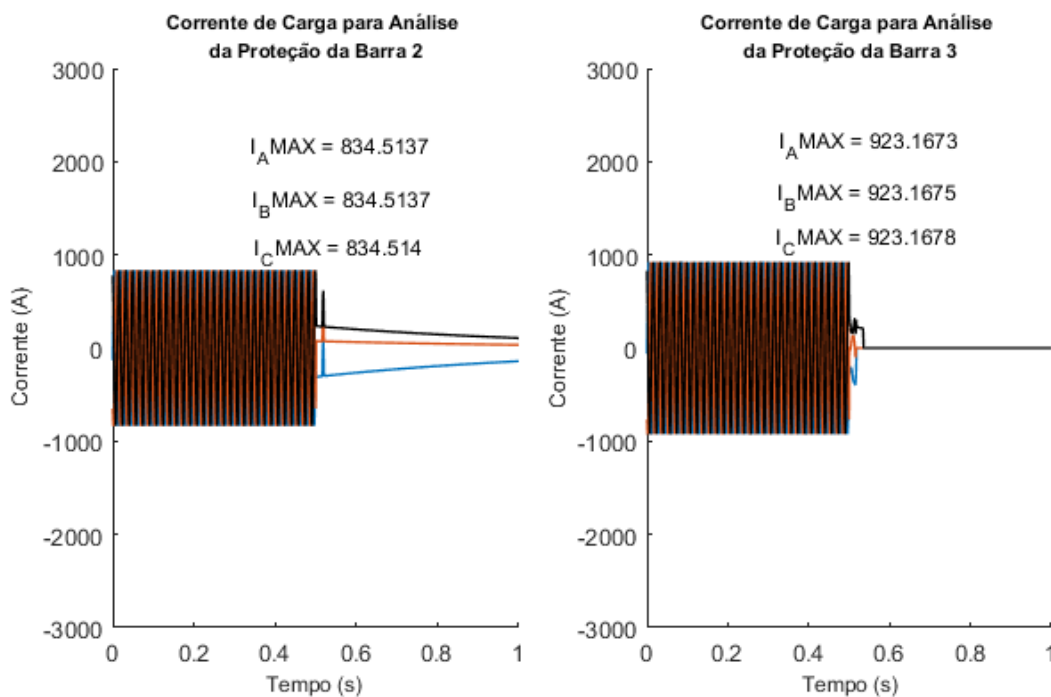
$$I_N = \frac{90 \text{ M}}{\sqrt{3} \cdot 69 \text{ k} \cdot 0,92} = 818,55 \text{ A} \quad (24)$$

Porém, o valor de I_N real entregue à carga foi obtido a partir das simulações, como mostrado na Figura 21. Seus valores eficazes são apresentados nas Equações (25) e (26) para a análise da barra 2 e da barra 3, respectivamente. Devido às perdas verificadas nas linhas e à queda de tensão associada à rede, I_{N_real} é reduzido.

$$I_{N_real_2} = I_{A_MAX} = \frac{834,51}{\sqrt{2}} = 590,09 \text{ A} \quad (25)$$

$$I_{N_real_3} = I_{A_MAX} = \frac{923,17}{\sqrt{2}} = 652,78 \text{ A} \quad (26)$$

Figura 21 – Correntes de Carga do Sistema para as Duas Configurações de Análise Apresentadas.



Fonte: (Da Autora, 2018).

4.3. Seleção dos Transformadores de Instrumento

Como discutido na seção 2, é necessário que seja feita a representação da corrente de curto no secundário a partir da Equação (10), de forma que o valor do TC adotado seja maior que o valor de I_N e de I_{CC_MAX} na barra em questão.

Na Tabela 4 são mostrados os valores analisados para cada critério tanto no caso da barra 2, quanto na 3. Retornando à seção 2, a partir dos valores disponíveis para TCs, respeitando os critérios da ANSI e da ABNT, o RTC escolhido foi de $\frac{1200}{5}$.

Tabela 4 – Critérios para Escolha do TC.

Local do Curto-Circuito	Critério de Carga	Critério de Curto-Circuito	TC
Barra 2	590,09 A	729,27 A	1200
Barra 3	652,78 A	113,88 A	1200

Fonte: (Da Autora, 2018).

Para a escolha do TP, por meio da Equação (27) foi definido o RTP que será o mesmo para os relés das duas barras, posto que ambos os pontos do circuito estão sob a mesma tensão.

$$RTP = \frac{69k}{115} = 600 \quad (27)$$

4.4. Ajustes dos Relés 50/51

O modelo adotado, como já mencionado, foi o de Prudêncio (2016), e para garantir o funcionamento correto dos equipamentos foram realizados alguns ajustes de acordo com as características da rede.

4.4.1. Unidade Instantânea (50)

Tendo calculado os valores de curto-circuito para as duas condições de teste apresentadas, segundo Kindermann (2012), o ajuste da unidade instantânea dos relés de sobrecorrente é feito com base nas correntes máximas de curto-circuito para cada barra do sistema.

Supondo um ponto de ocorrência da falta situado a 85% da barra 2, admitindo os valores obtidos nas Equações (20) e (21), tem-se o valor da corrente visto na Equação (28).

$$I_{CC_B2} = \frac{14.585,31 * 2.657,63}{0,85 * 14585,31 + 0,15 * 2657,63} = 3.029,22 A \quad (28)$$

Da mesma forma, supõe-se um curto a 85% da barra 3, adotando os valores calculados nas Equações (22) e (23), obtém-se o valor apresentado na Equação (28).

$$I_{CC_B3} = \frac{14.736,49 * 2.277,61}{0,15 * 14.736,49 + 0,85 * 2.277,61} = 8.094,65 A \quad (29)$$

Logo, a corrente de ajuste, para a atuação do relé 50 em cada uma das barras é vista nas Equações (30) e (31), conforme indicação.

$$I_{ajuste_50_B2} = \frac{3.029,22}{\frac{1200}{5}} = 12,6 A \quad (30)$$

$$I_{ajuste_50_B3} = \frac{8.094,65}{\frac{1200}{5}} = 33,73 A \quad (31)$$

Lembra-se no entanto, que estes valores sugerem a proteção do trecho à montante de cada relé. Para a barra 2 I_{ajuste_B2} é válido, mas mesmo assim foi preciso realizar uma leve alteração para a garantia do funcionamento. O I_{ajuste_B2} realmente implementado foi de 12,29 A, pois para este valor foi verificada atuação correta da proteção em todos os cenários.

Por outro lado, o emprego do relé de sobrecorrente na barra 3 foi realizado com o intuito de viabilizar a instalação da unidade de monitoramento direcional. Posto isso, I_{ajuste_B3} foi escolhido de forma a maximizar a sua sensibilidade, sem interferir no funcionamento nominal da rede. O valor mínimo de referência adotado para a proteção instantânea da barra 3 foi portanto de 6,6 A.

4.4.2. Unidade Temporizada (51)

Em se tratando da unidade temporizada, tem-se que segundo, Mamede (2013), esta deverá atuar quando a corrente registrada atingir, pelo menos, o valor determinado nas Equações (32) e (33), nas barras 2 e 3, respectivamente.

$$I_{ajuste_51_B2} = \frac{1,5*590,09}{\frac{1200}{5}} = 3,6 A \quad (32)$$

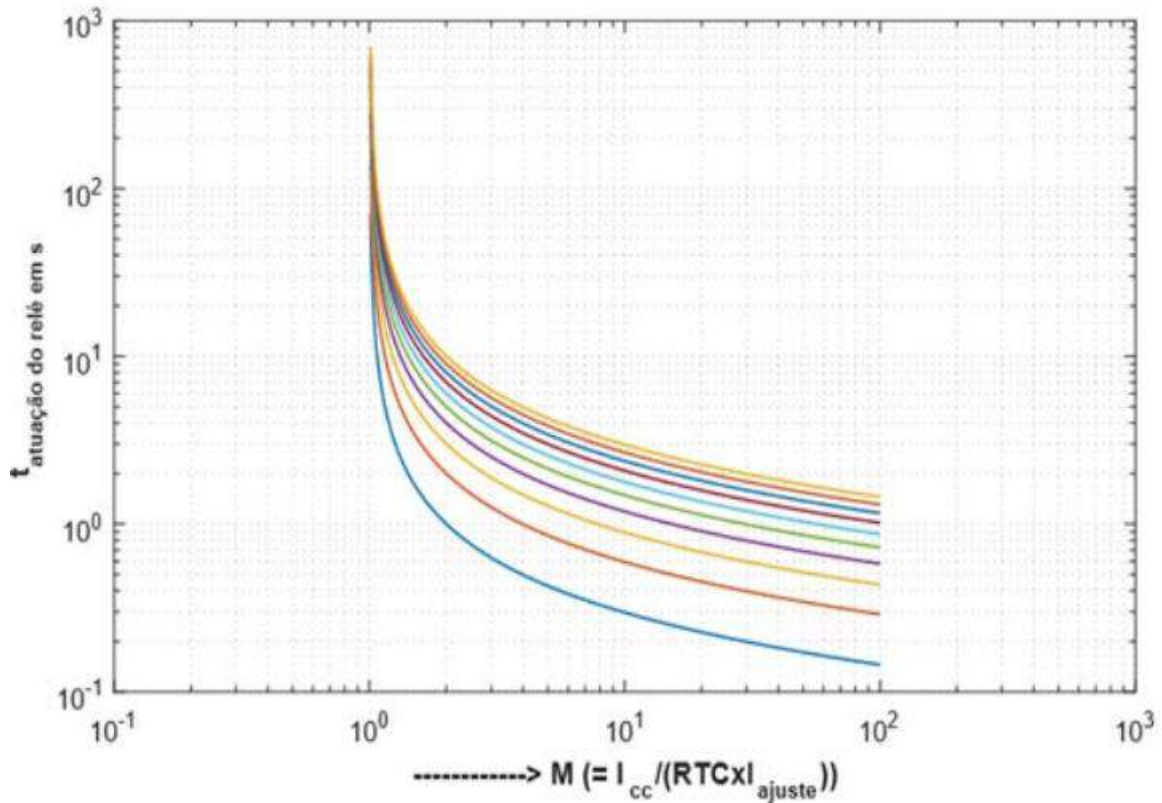
$$I_{ajuste_51_B3} = \frac{1,5*652,78}{\frac{1200}{5}} = 4,1 A \quad (33)$$

Como explicado na seção anterior, os valores encontrados são coerentes e válidos apenas para a barra 2, já na barra 3 este é regulado conforme a necessidade justificada por simulação. Neste caso, os valores adotados foram os mesmos para os quatro equipamentos instalados, sendo este de 3,7 A.

Foi adotada a curva de tempo de funcionamento inverso, vista na Figura 22, onde cada curva indicada refere-se a um dial de tempo único. Como não é necessário garantir a coordenação entre os elementos temporizados das barras 2 e 3, posto suas funções distintas na

proteção do circuito em questão, o dial de tempo definido foi de 0,1 para todos, o que corresponde à curva mais baixa na figura apresentada.

Figura 22 – Curva Inversa Norma IEC para relé digital de sobrecorrente 51.



Fonte: (Prudêncio, 2016).

4.5. Ajustes dos Relés Direcionais

Como enunciado na seção 2, retomando os conceitos apresentados na Figura 8, o relé entrará em sua região de operação desde que a corrente de curto esteja posicionada à direita do limiar de operação. Ainda, pela Equação (14) tem-se que o módulo do torque é diretamente relacionado aos valores das grandezas de polarização da fase analisada.

Sabe-se que uma corrente pequena, até próxima da corrente de carga, é satisfatória para o ajuste do relé. Desta forma, no modelo utilizado aqui foi definido que o torque mínimo necessário à atuação da unidade direcional implementada na linha A seria de 5 Nm.

Por respeito aos princípios de proteção, para o dispositivo correspondente situado na linha B foi admitido um valor mínimo mais elevado, uma vez verificado em simulação que o

reflexo gerado após a abertura da chave da linha A, seria suficiente para ocasionar a atuação incorreta deste segundo elemento. Logo, para este o valor mínimo estipulado foi de 80 Nm, suficiente para garantir e não interferir em sua atuação.

Sendo este um modelo digital, como mencionado anteriormente, o ângulo r pode assumir qualquer valor dentro de uma faixa delimitada pelo fabricante. Assumindo esta faixa entre 20° e 80°, dentre estes valores disponíveis foi adotado um ângulo r de 50°.

A escolha foi justificada por simulação, após testes de funcionamento realizados no bloco do relé, viu-se que este valor era suficiente para garantir sua atuação como esperado, uma vez que satisfazia o modelo matemático representado na Equação (14).

4.6. Cenários de Teste

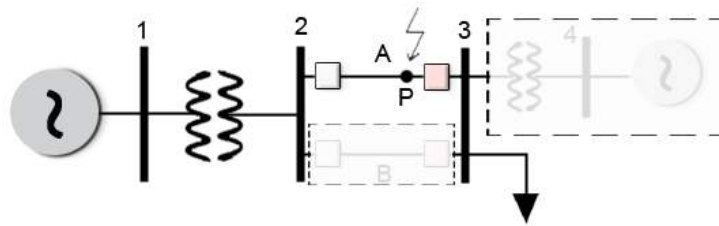
Foram desenvolvidos quatro cenários diferentes para a realização dos testes, sendo estes:

- a) Cenário 1: Rede radial composta por uma única linha de distribuição apenas com geração centralizada, como na Figura 23;
- b) Cenário 2: Rede radial composta por uma única linha de distribuição com instalação de GD, como na Figura 24;
- c) Cenário 3: Rede em anel com duas linhas de distribuição operando em paralelo e apenas com geração centralizada, como na Figura 25;
- d) Cenário 4: Rede em anel com duas linhas de distribuição operando em paralelo e com instalação de GD, como na Figura 26.

Para uma melhor comparação, em todas as situações foi aplicado um curto-circuito trifásico à rede no instante 0,5 s no ponto P, como ilustrado nas figuras abaixo, este por sua vez localizado há 85% da linha de distribuição vista pela barra 2.

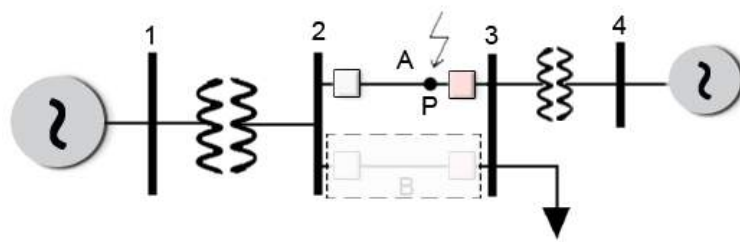
No que diz respeito à atuação do relé direcional, é esperado que ela ocorra em todos os ambientes implementados, com exceção do indicado na Figura 23. Uma vez que o cenário 1 não há caminho alternativo para a corrente que propicie uma inversão do fluxo de potência quando da ocorrência da falta.

Figura 23 – Cenário de Teste 1.



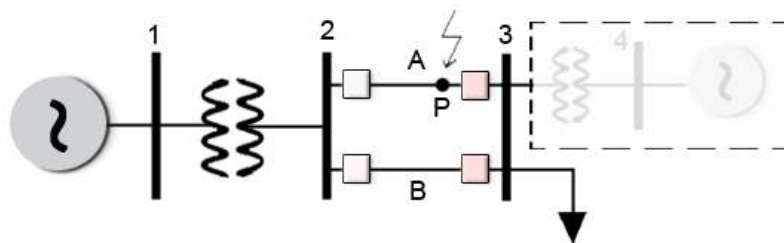
Fonte: (Da Autora, 2018).

Figura 24 – Cenário de Teste 2.



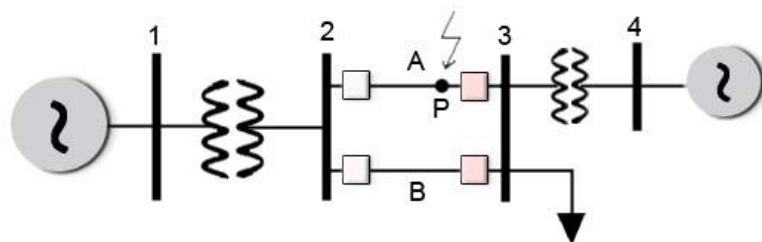
Fonte: (Da Autora, 2018).

Figura 25 – Cenário de Teste 3.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Figura 26 – Cenário de Teste 3.

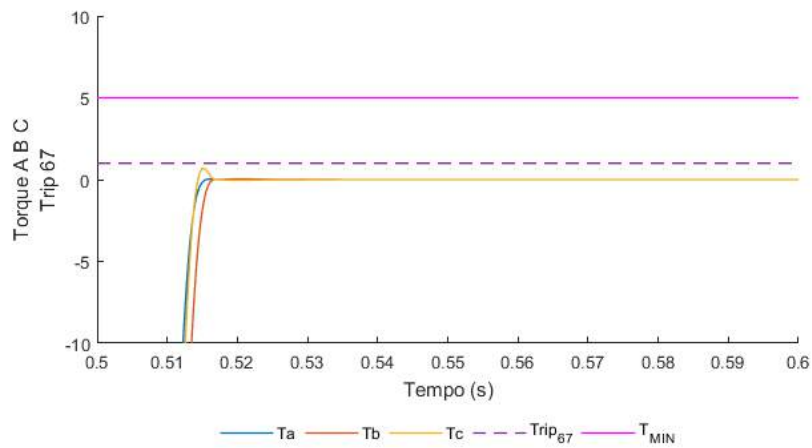


Fonte: (Da Autora, 2018).

4.6.1. Linha Única com Geração Centralizada

Como mencionado anteriormente, este é o único cenário no qual o relé 67 não deve atuar. Vê-se na Figura 27, portanto, que o torque registrado durante o período de atuação dos relés após a incidência do curto, não atingiu o valor mínimo necessário para a atuação da unidade direcional, sendo este valor mínimo indicado na figura pela linha rosa.

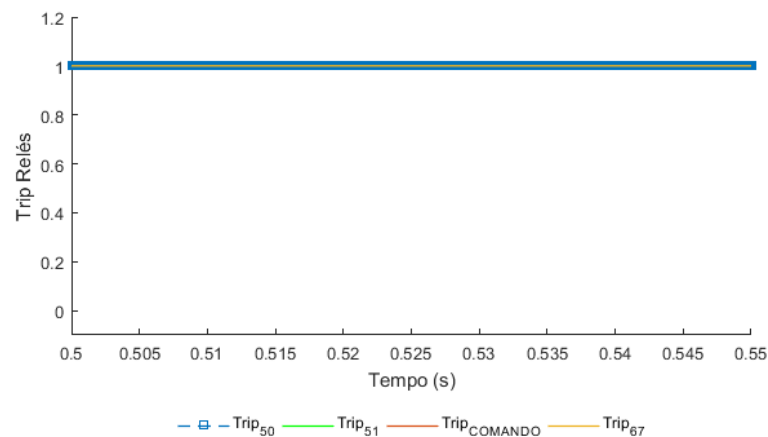
Figura 27 – Torque Calculado pelo Relé 67 nas Fases A, B e C na Barra 3 para o Cenário de Teste 1.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Na Figura 28 são mostrados os sinais de trip dos relés da barra 3 no instante da ocorrência da falta, percebe-se então que não houve nenhuma atuação de proteção neste ponto da rede.

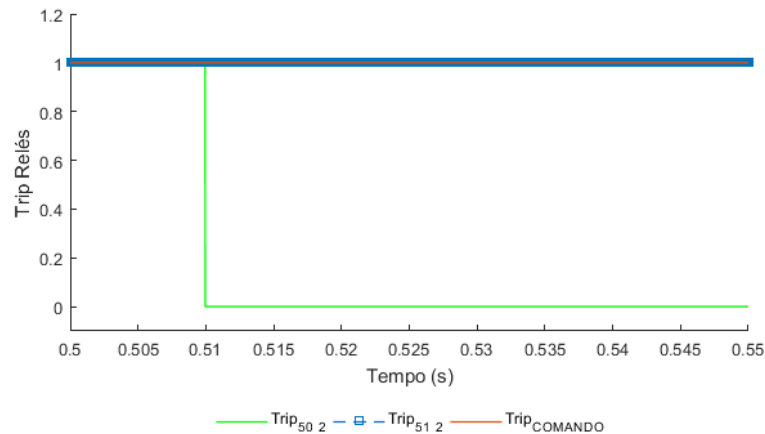
Figura 28 –Comportamento dos Relés da Barra 3 no Instante do Curto-Circuito para o Cenário de Teste 1.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Tem-se na Figura 29 a análise dos sinais de trip dos relés de sobrecorrente da barra 2. É evidenciado que houve sensibilização do relé 50 para o defeito em questão, tendo em vista a alteração do nível lógico do sinal de trip deste dispositivo no instante do curto. Enquanto que o relé 51 e o de comando da barra 3 permaneceram em nível alto.

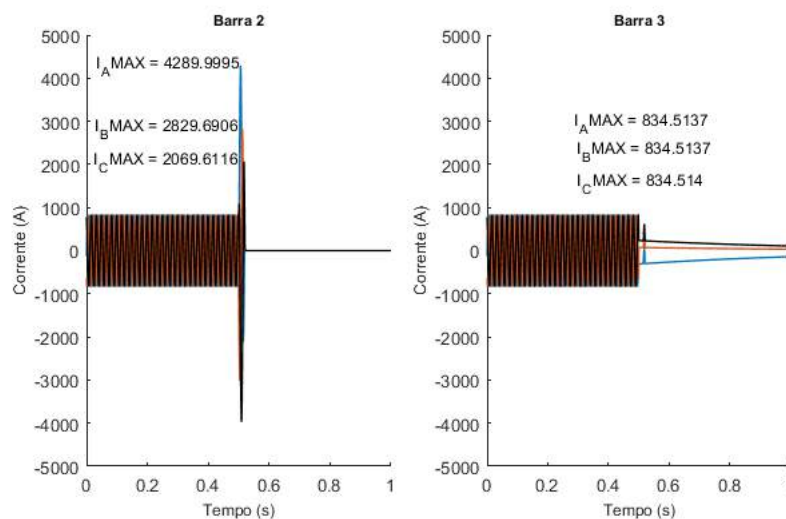
Figura 29 – Comparação entre o Comportamento dos Relés das Barras 2 e 3 no Instante do Curto-Circuito para o Cenário de Teste 1.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Ainda, a abertura da chave de proteção da barra 2 é comprovada mais uma vez a partir do estudo do comportamento das correntes do sistema apresentado na Figura 30.

Figura 30 – Comportamento das Correntes nas Barras 2 e 3 para o Cenário de Teste 1.

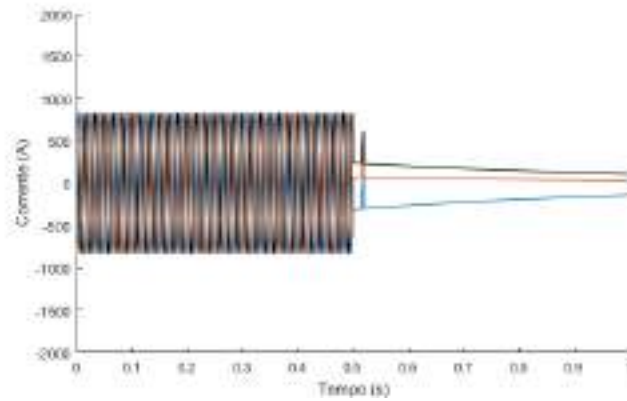


Fonte: (Da Autora, 2018).

Tem-se então que após registrada a falta, estas se anularam, ratificando que a circulação de corrente foi interrompida. Dessa forma, como nesta situação não há outro meio

de alimentação para a carga além da fonte de geração principal, esta tem sua alimentação cortada após a atuação da proteção, como visto na Figura 31.

Figura 31 – Comportamento das Correntes na Carga para o Cenário de Teste 1.

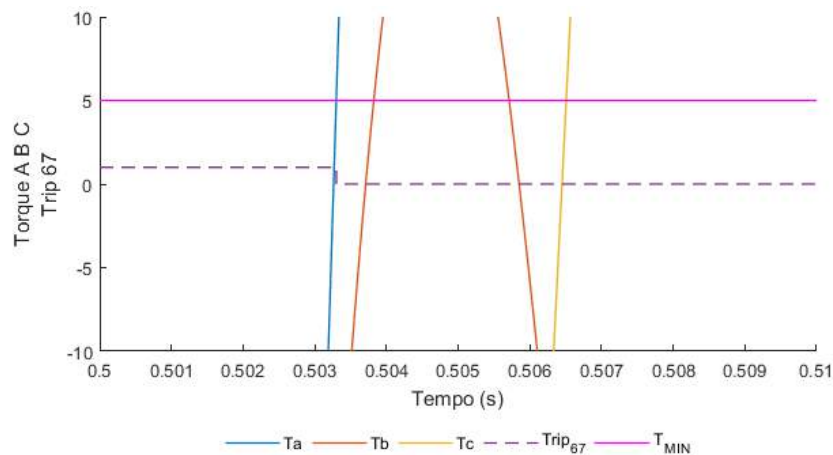


Fonte: (Da Autora, 2018).

4.6.2. Linha Única com Geração Distribuída

Vê-se, na Figura 32, que diferentemente da situação anterior, neste caso o torque calculado a partir da Equação (14) internamente ao relé 67, atingiu o valor mínimo necessário para entrar na zona de operação. Isto se deve ao fato de a presença da GD propiciar a inversão do fluxo de potência do circuito quando da ocorrência de uma falta.

Figura 32 – Torque Calculado pelo Relé 67 nas Fases A, B e C na Barra 3 para o Cenário de Teste 2.

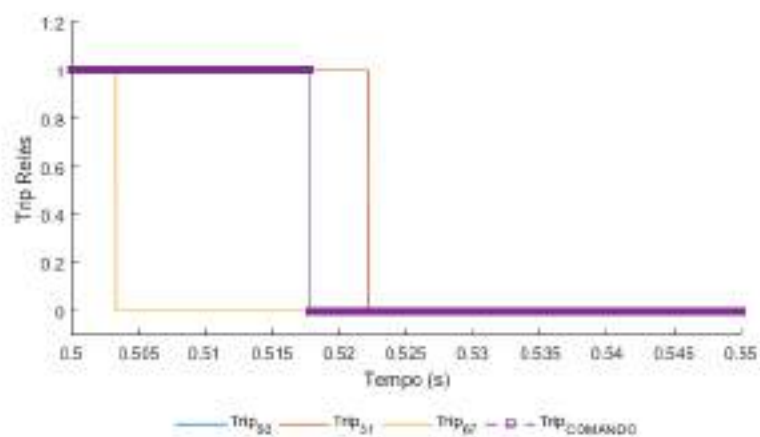


Fonte: (Da Autora, 2018).

Ainda, é possível observar detalhadamente que o nível lógico do sinal do trip do 67, representado pela linha tracejada, só é alterado no instante após o torque ultrapassar o valor de atuação necessário, assumindo então o valor zero.

Tem-se na Figura 33 o detalhamento da atuação do relé direcional da barra 3. O primeiro equipamento a sensibilizar é o relé 67, porém, seguindo a lógica implementada, esta é apenas a primeira etapa a ser obedecida para que haja o real envio de comando de abertura à chave monitorada.

Figura 33 – Comportamento dos Relés da Barra 3 no Instante do Curto-Circuito para o Cenário de Teste 2.



Fonte: (Da Autora, 2018).

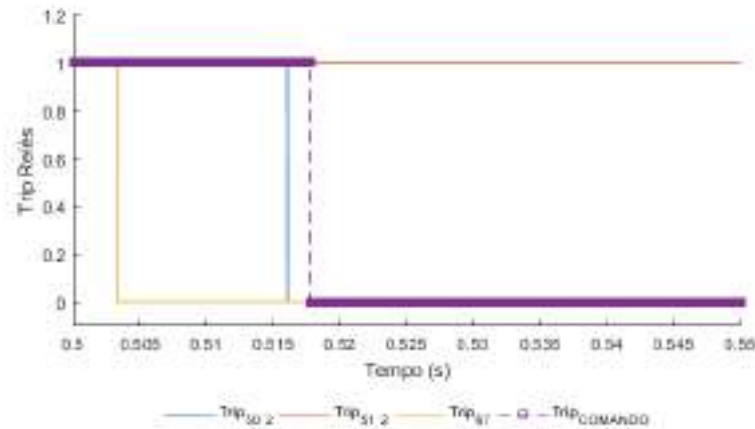
Em seguida, é verificado que o relé 50 monitorado por ele, reagiu à presença do curto e também atuou. Neste instante, é possível então observar a mudança de nível do sinal do trip de comando, indicando que neste momento foi enviado o trip de abertura para a chave da barra 3. Logo, como esperado, a instrução de abertura só foi destinada à chave após satisfeitas as duas condições lógicas, sendo representada pela ação conjunto dos relés de sobrecorrente e direcional.

Ainda, instantes após, é registrada também a ação do relé 51. A ação conjunta das unidades instantânea e temporizada do elemento de sobrecorrente monitorado pelo direcional é verificada sempre quando o trip do 67 é ativado.

Comparando a atuação dos dispositivos de proteção das duas barras, conforme apresentado na Figura 34, percebe-se que há também atuação do relé 50 da barra 2, esta, porém, mais lenta que a ação do relé 67. Contudo, mais rápida que a da unidade de sobrecorrente associada ao direcional, indicando que a chave da barra 2 abriu primeiro que a da barra 3.

Esta atuação confirma que a associação de diferentes dispositivos de monitoramento no sistema não compromete o funcionamento destes, uma vez que tenha sido feito o correto ajuste de todos os elementos envolvidos.

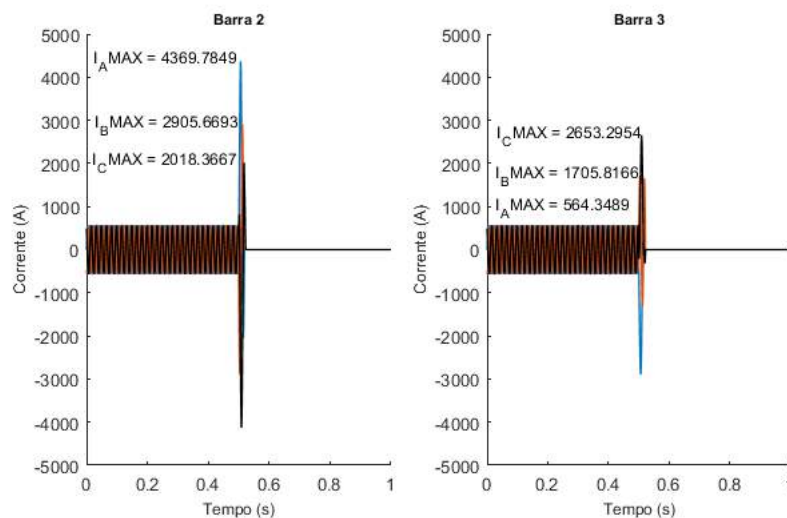
Figura 34 – Comparação entre o Comportamento dos Relés das Barras 2 e 3 no Instante do Curto-Circuito para o Cenário de Teste 2.



Fonte: (Da Autora, 2018).

É fato que a corrente de curto-circuito registrada na barra 2 tende a se elevar mais rapidamente que a da barra 3 chegando a atingir altos valores, como verificado na Figura 35, onde são confrontados os comportamentos das correntes nestes dois pontos da rede. Isto é justificado graças à fonte da alimentação da primeira barra ser o barramento infinito.

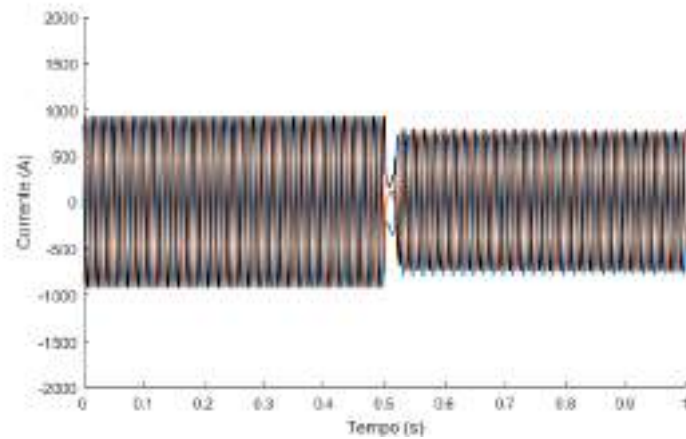
Figura 35 – Comportamento das Correntes nas Barras 2 e 3 para o Cenário de Teste 2.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Percebe-se na Figura 36 que a presença da GD, por sua vez, evita o corte total do fornecimento de corrente à carga, sendo este apenas reduzido. Também vê-se que a corrente entregue à carga nesta situação é maior que a das simulações do cenário 1. Vê-se então que a GD é um complemento útil no sistema à alimentação da carga em funcionamento normal.

Figura 36 – Comportamento das Correntes na Carga para o Cenário de Teste 2.

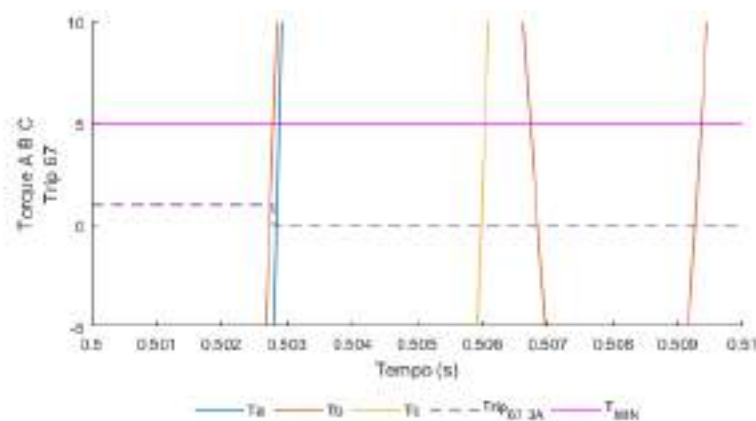


Fonte: (Da Autora, 2018).

4.6.3. Rede em Anel com Geração Centralizada

No sistema em anel com as duas linhas de distribuição operando em paralelo, tem-se um cenário propício à inversão do fluxo mesmo quando não há presença de GD. Tem-se na Figura 37 que o torque observado pelo relé 3-A ultrapassa o valor mínimo para operação, indicando a atuação da unidade direcional neste ponto.

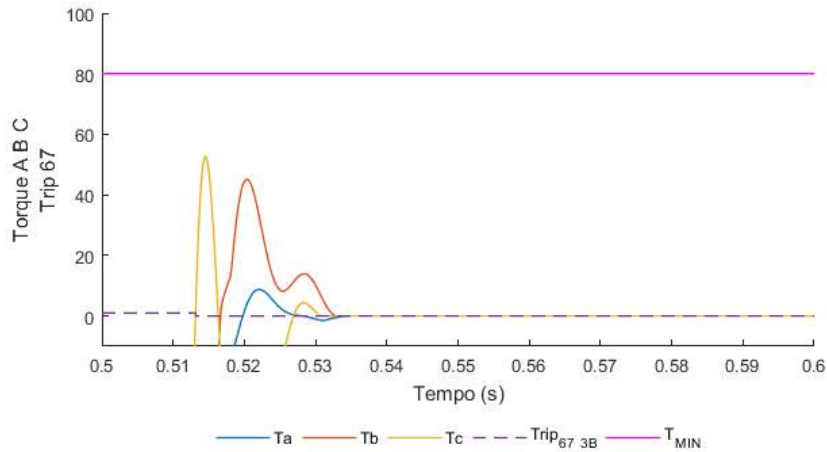
Figura 37 – Torque Calculado pelo Relé 67 nas Fases A, B e C na Barra 3-A para o Cenário de Teste 3.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Por sua vez, como o ajuste do relé 3-B é menos sensível, vê-se, na Figura 38, que o torque assume valores positivos por um certo período, porém, não é suficiente para levar o relé à sua região de operação. É verificada então a necessidade comentada anteriormente de se elevar o ajuste deste elemento para evitar uma atuação indesejada no período de instabilidade do sistema provocado pela abertura da chave da linha A.

Figura 38 – Torque Calculado pelo Relé 67 nas Fases A, B e C na Barra 3 B para o Cenário de Teste 3.

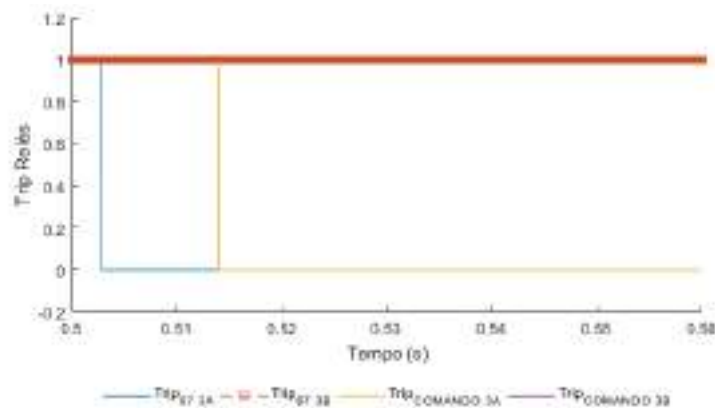


Fonte: (Da Autora, 2018).

Uma vez que a falta ocorre na linha A, a corrente que circula pela linha B é a que tende a alimentar o curto-circuito no sentido oposto ao fluxo, provocando, em primeiro lugar, a sensibilização do relé direcional da linha A.

Contudo, observa-se, na Figura 39, que a sobrecorrente ocasionada pela falta é sentida primeiro na linha B e leva à atuação da unidade instantânea do elemento 3-B. Só em seguida, é visto que há o ação do relé correspondente da linha A.

Figura 39 – Comportamento do Trip 67 e do Trip de Comando nas Barras 3 no Instante do Curto-Circuito para o Cenário de Teste 3.

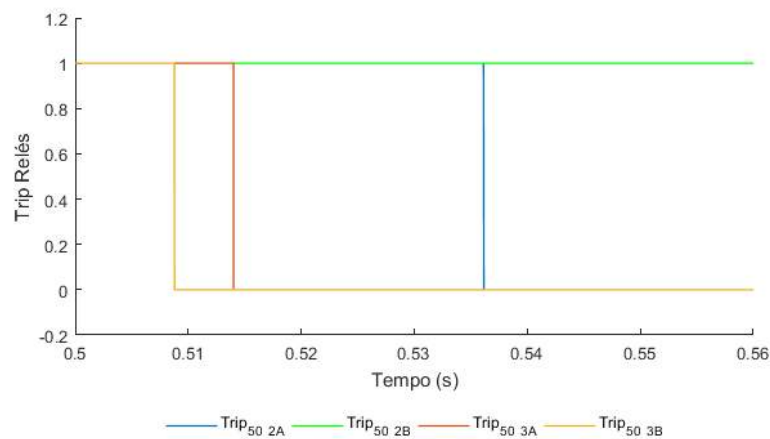


Fonte: (Da Autora, 2018).

Ainda, porém, como não é registrado comando de trip 67 no 3-B, a chave equivalente não é aberta. Já o comando de abertura da 3-A é enviado no instante da sensibilização do relé 50.

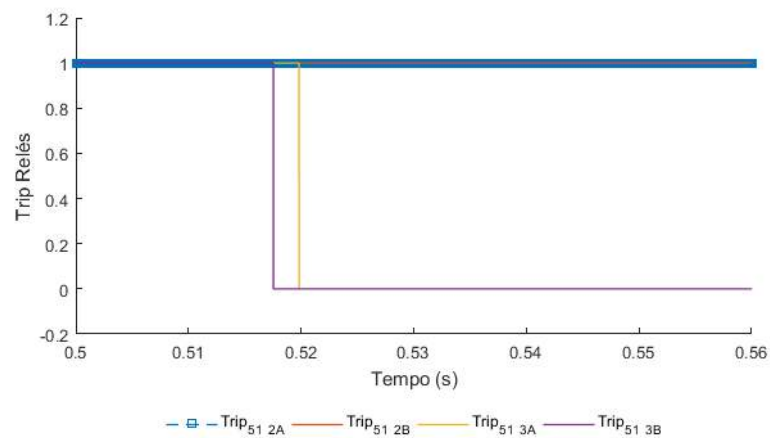
Na Figura 40 é visto que o dispositivo 2-A é o último a atuar, ocasionando finalmente o completo seccionamento do trecho defeituoso. Verifica-se também nas Figuras 40 e 41 que não há atuação do equipamento 2-B, como esperado.

Figura 40 – Comportamento do Trip 50 nas Barras 2 e 3 no Istante do Curto-Circuito para o Cenário de Teste 3.



Fonte: (Da Autora, 2018).

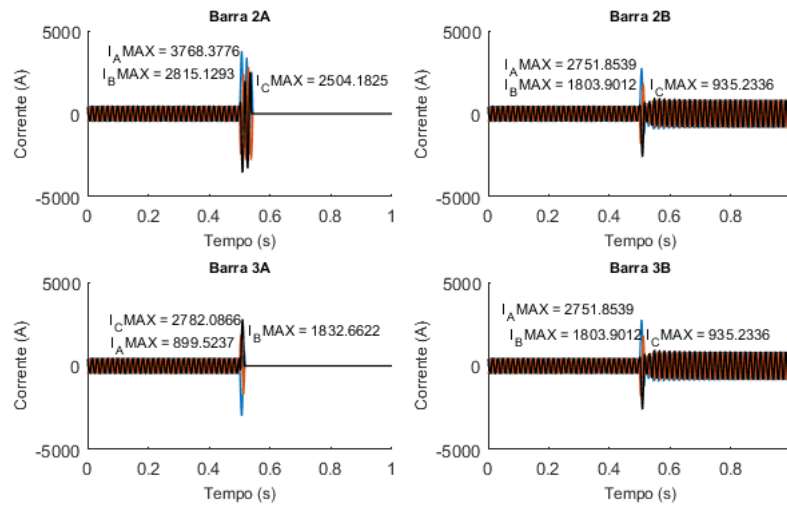
Figura 41 – Comportamento do Trip 51 nas Barras 2 e 3 no instante do curto-circuito para o Cenário de Teste 3.



Fonte: (Da Autora, 2018).

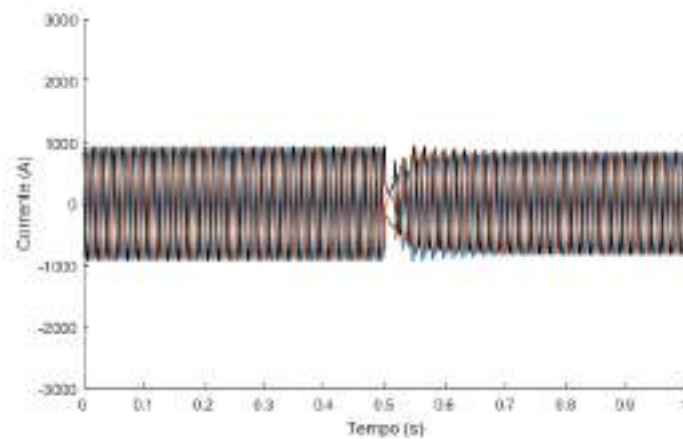
Por fim, nas Figuras 42 e 43, é mostrado o comportamento das correntes do sistemas nas barras 2 e 3 e na carga, respectivamente. Desta vez, não há a presença de GD, mas a configuração em anel propicia a continuidade no suprimento da carga, posto que uma das linhas seguiu sadia após o isolamento do trecho afetado pela falta.

Figura 42 – Comportamento das Correntes nas Barras 2 e 3 para o Cenário de Teste 3.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Figura 43 – Análise do Comportamento das Correntes na Carga para o Cenário de Teste 3.



Fonte: (Da Autora, 2018).

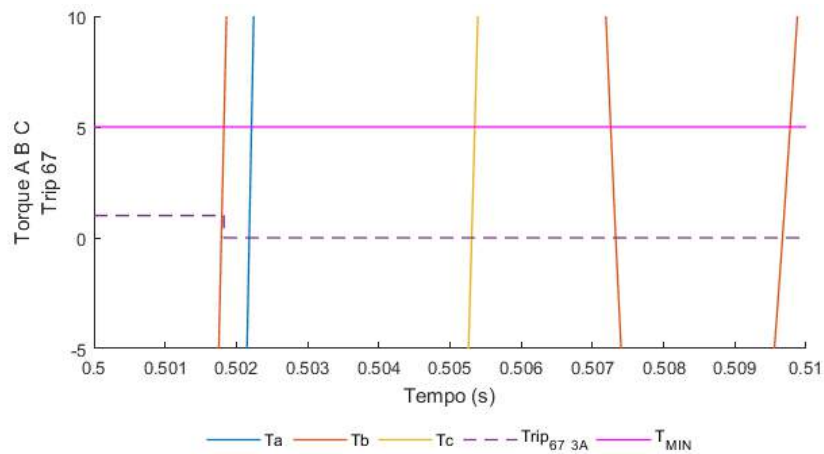
4.6.4. Rede em Anel com Geração Distribuída

Diferente do ocorrido no cenário 3, neste, por sua vez, a corrente de falta recebe contribuição da geração principal e da GD logo, a corrente que passa pela linha B não é mais a única que contribui à inversão do fluxo.

Tem-se nas Figuras 44 e 45, que o torque produzido no sistema devido à ocorrência do curto-circuito é suficiente para a atuação dos dois relés direcionais da barra 3. Mais uma vez,

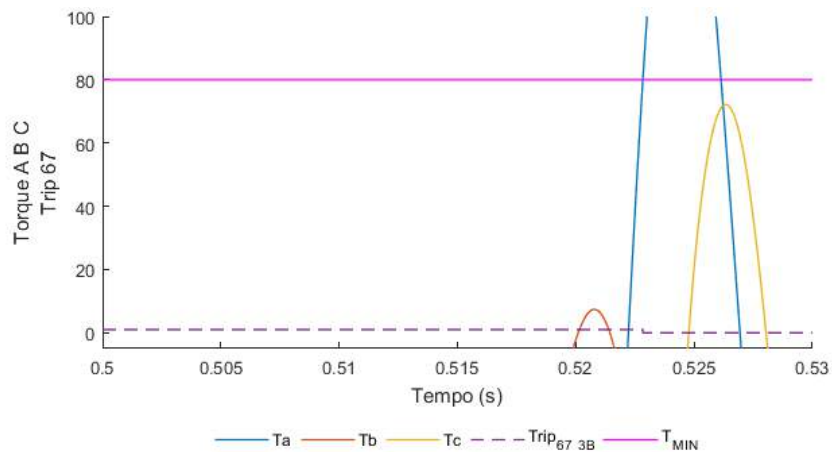
o relé 3-A é o primeiro a ter a sua unidade direcional sensibilizada, fato este justificado pela localização do ponto de defeito.

Figura 44 – Torque Calculado pelo Relé 67 nas Fases A, B e C na Barra 3-A para o Cenário de Teste 4.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Figura 45 – Torque Calculado pelo Relé 67 nas Fases A, B e C na Barra 3-B para o Cenário de Teste 4.



Fonte: (Da Autora, 2018).

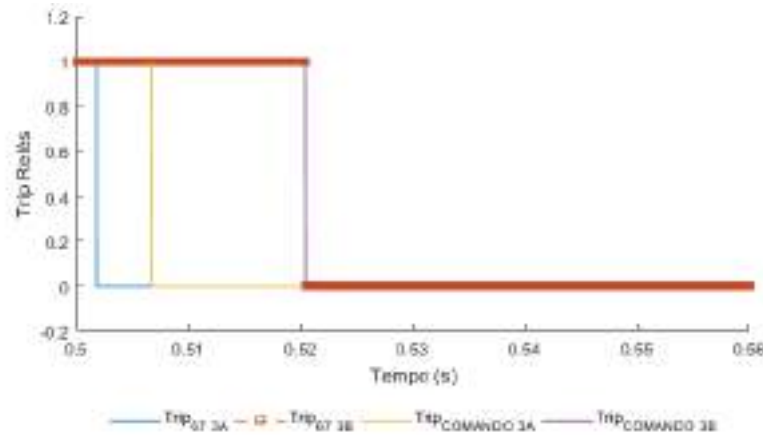
Como mostrado na Figura 46, para esta configuração de rede, o primeiro equipamento a receber o comando de abertura é a chave 3-A, posto que para neste cenário, a sobrecorrente é sentida logo neste ponto, devido ao acréscimo da contribuição da GD fluir diretamente para ele.

Por sua vez, o fluxo de corrente no sentido inverso mantido pela GD leva à atuação do relé da chave 3-B. Este então influencia na variação da corrente monitorada na barra 2 e é verificada a atuação da proteção instantânea do equipamento 2-A. Este ciclo de atuações é detalhadamente exposto por meio da Figura 47.

Ratifica-se, através dos resultados expostos na Figura 48, que a sensibilização dos relés direcionais é sempre acompanhada da atuação dos dois dispositivos de monitoramento da

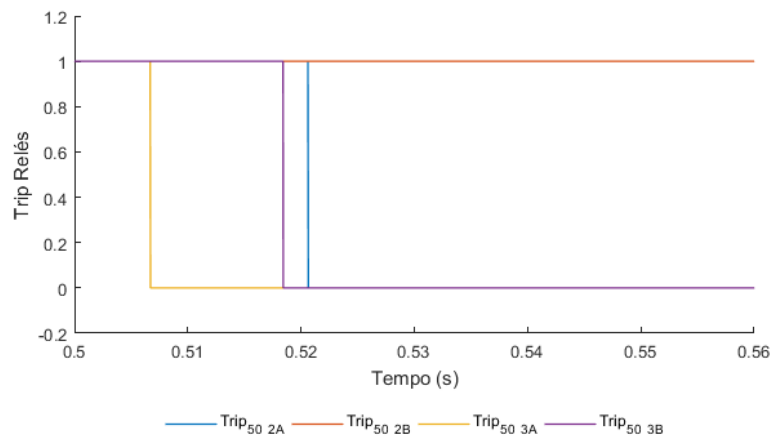
sobrecorrente da rede, sendo visto tanto o acionamento da unidade instantânea quanto da temporizada.

Figura 46 – Comportamento do Trip 67 e do Trip de Comando na Barra 3 no instante do curto-circuito para o Cenário de Teste 4.



Fonte: (Da Autora, 2018).

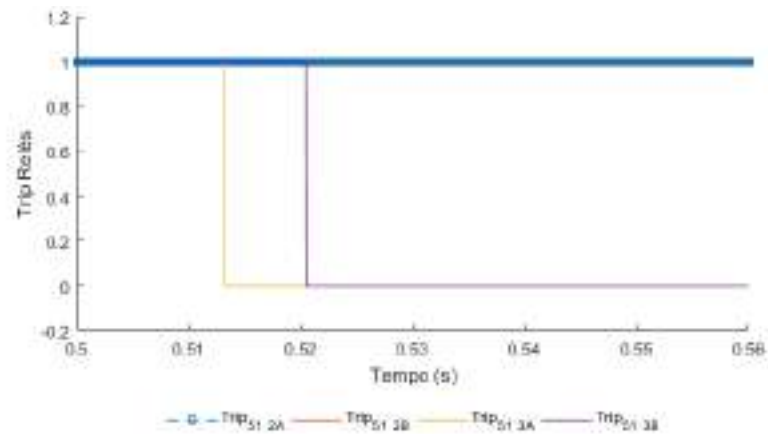
Figura 47 – Comportamento do Trip 50 nas Barras 2 e 3 no instante do curto-circuito para o Cenário de Teste 4.



Fonte: (Da Autora, 2018).

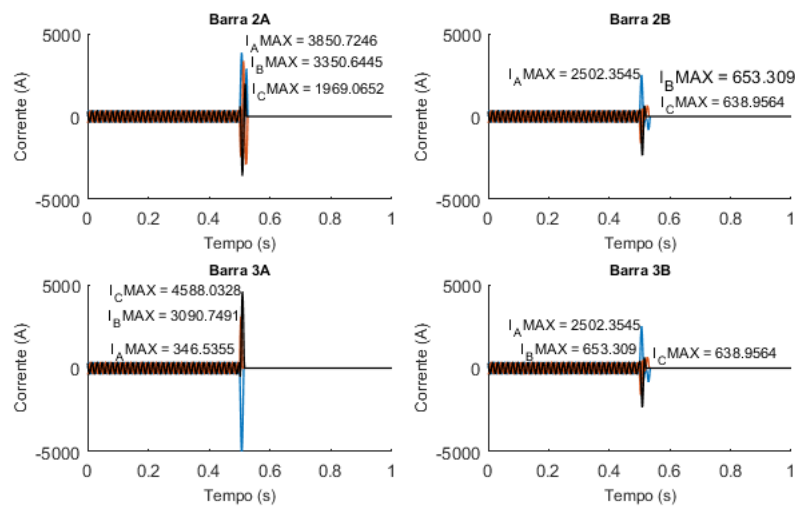
É exposto por último, nas Figuras 49 e 50, o comportamento das correntes do sistema nas barras 2 e 3 e na carga, respectivamente. Como no caso anterior, onde também há presença de GD na rede, a carga segue alimentada, mesmo após a abertura das chaves, sendo suprida parcialmente pela GD.

Figura 48 – Comportamento do Trip 51 nas Barras 2 e 3 no instante do curto-circuito para o Cenário de Teste 4.



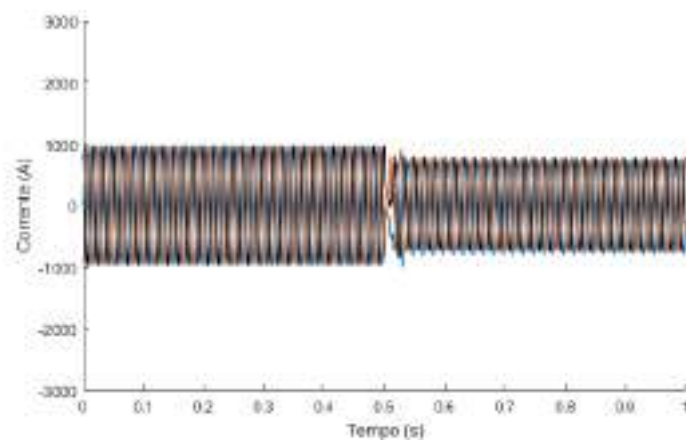
Fonte: (Da Autora, 2018).

Figura 49 – Comportamento das Correntes nas Barras 2 e 3 para o Cenário de Teste 4.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Figura 50 – Comportamento das Correntes na Carga para o Cenário de Teste 4.



Fonte: (Da Autora, 2018).

4.7. Comparação entre os Cenários de Teste

A partir das simulações apresentadas na seção anterior foi possível comprovar a eficácia do relé implementado frente à ocorrência de uma falta com caráter direcional no sistema, como abordado nos cenários 2, 3 e 4.

Uma vez que esta direcionalidade não foi identificada pelo componente, como nos cenários 1 e no cenário 3 para o relé 3-B, este não atuou, independentemente de ter havido sensibilização da unidade de sobrecorrente do dispositivo ou não.

Nas situações em que não há presença de GD, verifica-se que, como esperado, em uma rede unicamente radial, quando há o seccionamento do trecho defeituoso, uma vez que ele esteja localizado entre a fonte e a carga, como só há um caminho possível para a corrente fluir, tem-se que a carga fica completamente isolada.

Por outro lado, seguindo com o estudo da configuração radial, quando acrescenta-se um ponto de GD próximo à carga, com o defeito localizado na extensão da linha de distribuição, o suprimento da mesma por meio da GD não é afetado.

O não isolamento da carga também é identificado nos cenários 3 e 4, devido à configuração em anel no 3, e à presença de GD no 4. Mesmo tendo havido a sensibilização do relé direcional na linha onde ocorreu o curto-circuito, devido ao ajuste diferenciado realizado no relé da linha de distribuição associada em paralelo, a corrente seguiu seu fluxo normal por esta.

Em todos os cenários de atuação previstos para o relé direcional ele funcionou segundo a lógica implementada, tendo ocorrido a abertura definitiva da chave de seccionamento apenas após a ação também do relé de sobrecorrente.

5. CONCLUSÃO

A elaboração deste trabalho concentrou-se na caracterização e implementação em ambiente computacional MATLAB/SIMULINK® de um relé direcional. Para tanto, foi realizada uma revisão bibliográfica visando se apoiar em pesquisas centradas no desenvolvimento de dispositivos de proteção ou ainda, no estudo deste sistema.

A partir da revisão de literatura apresentada no início do trabalho, onde buscou-se entender melhor as técnicas adotadas em dispositivos já funcionais, foi visto, mesmo com a reduzida quantidade de material disponível sobre o assunto, que normalmente se faz uso da análise das sequências positiva e negativa do sistema a fim de verificar a sua direcionalidade. Foi escolhido, por sua vez, utilizar apenas a sequência positiva como parâmetro.

Definida a técnica a ser utilizada, foi realizado enfim a implementação do modelo no *software* auxiliar, de modo a propiciar a realização de testes. Estes com o objetivo de validar as deduções desenvolvidas que serviram de básica para a lógica de funcionamento programada.

Todo o desenvolvimento matemático, bem como a técnica implementada e os blocos desenvolvidos estão explicados em detalhes no decorrer dos capítulos anteriores, de forma a possibilitar um melhor acompanhamento do trabalho elaborado.

É sabido que no caso da geração centralizada de energia, o fluxo de potência em um alimentador radial típico da distribuição é sempre unidirecional. Porém, a medida que são acoplados pontos de GD à rede, esta direcionalidade não é mais mantida fixa. Ainda, quando da ocorrência de uma falta no sistema, se este não estiver propriamente protegido, a GD poderá intensificar a gravidade da anomalia, amplificando a dimensão dos danos causados à rede como um todo devido à sua contribuição com a corrente de curto.

Logo, a reformulação do modelo de geração afeta diretamente o supervisor, posto que ela confere características de configuração em anel a circuitos unicamente radiais. Dessa forma, é preciso que seja acoplado aos relés de sobrecorrente, um relé direcional para o monitoramento de uma possível inversão no fluxo de potência do sistema.

O dispositivo aqui desenvolvido foi associado a um modelo de monitoramento de sobrecorrente já validado e foi simulado em quatro cenários distintos. Em todos os casos onde foi verificada mudança no sentido do fluxo, foi registrada a atuação quase que imediata da unidade direcional. Da mesma forma, foi visto que para a incidência de uma falta em uma rede radial, sua presença não interfere no funcionamento dos demais equipamentos de proteção.

Foi possível perceber nitidamente a contribuição da GD tanto em seu funcionamento nominal, quando foi observado um melhor suprimento da carga instalada, quanto no evento de uma perturbação. Foi visto que nos cenários onde ela estava presente, o nível das correntes em circulação era mais elevado que nos de sua ausência.

Como citado nas literaturas, uma das vantagens observadas na utilização de GD é que em situações de falta, quando a carga é isolada da fonte principal devido ao seccionamento do trecho defeituoso, a GD segue suprindo a alimentação, mesmo que de forma parcial, do circuito.

O objetivo deste trabalho foi atingido, uma vez que foi implementado em ambiente computacional MATLAB/SIMULINK® um aparato capaz de supervisionar a mudança na direcionalidade do fluxo de potência no sistema monitorado.

6. REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **BIG – Banco de Informação de Geração**. 2018a. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 20 de maio de 2018.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Informações Técnicas**. 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introducao-1/656827?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Finformacoes-tecnicas%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_CegkWaVJWF5E%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D2>. Acesso em: 24 de maio de 2018.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Matriz de Energia Elétrica**. 2018b. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 20 de maio de 2018.

BARBOSA, W. P. F.; AZEVEDO, A. C. S. **Geração Distribuída: Vantagens e Desvantagens**. In: Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais na Amazônia, 2, 2013.

BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. **Protective Relaying – Principles and Applications**. 3. ed. New York: CRC Press, 2007. 638 p.

BREDA, J. F. D. **Um Modelo Computacional para o Relé Digital de Sobrecorrente Empregado na Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 2009. 118p. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

DE MATOS, F. M. **Estudo de Caso de Coordenação e Seletividade da Proteção Contra Sobrecorrente em um Sistema Elétrico Industrial**. 2010. 77p. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

DOS SANTOS, L. O. **Simulações e Ajustes de Funções de Proteção para Sistemas Elétricos de Potência**. 2012. 65p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2012.

FERREIRA, L. E. B. **Desafios da Operação do SIN**. 2015. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/arquivos/luiz_barata_ons_fgv-energia-seminario-matriz.pdf>. Acesso em: 19 de maio de 2018.

INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética. **O que é Geração Distribuída**. 2018. Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp>. Acesso em: 19 de maio de 2018.

IZAGUIRRE, J. P. **Modelagem de um Relé de Proteção Direcional de Linhas de Transmissão no ATP**. 2016. 176 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2016.

KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 3. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 2012. 288 p. v. 1.

MAMEDE, JOÃO. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. [Reimpr]. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MATOS, D. M. B.; CATALÃO, J. P. S. **Geração Distribuída e os seus Impactes no Funcionamento da Rede Elétrica: Parte 1**. In: International Conference on Engineering, 2013.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Resenha Energética Brasileira – Resultados de 2016**. 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02++Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2017++ano+ref.+2016+%28PDF%29/13d8d958-de50-4691-96e3-3ccf53f8e1e4?version=1.0.>>>. Acesso em: 20 de maio de 2018.

NARUTO, D. T. **Vantagens e Desvantagens da Geração Distribuída e Estudo de Caso de um Sistema Solar Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica**. 2017. 97 p. Trabalho de

Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **O Sistema Interligado Nacional**. 2018. Disponível em: <<http://ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>> Acesso em: 17 de maio de 2018.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Sistema de Transmissão – Horizonte 2017**. 2017. Disponível em: <<http://ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em : 17 de maio de 2018.

PRUDÊNCIO, G. M. R. **Análise de Coordenação de Relés Digitais de Sobrecorrente Utilizando Simulação Computacional**. 2016. 98 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica)- Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

ROLIM, G. S. **Relatório de Estágio Supervisionado Realizado no Centro de Operação Integrado da Energisa Paraíba**. 2017. 51 p. Relatório de Estágio Supervisionado - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

SALLES, N. J. **Modelagem e Análise Dinâmica de Sistemas de Proteção de Redes de Distribuição de Energia Elétrica na Presença de Geradores Síncronos**. 2007. 203 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SATO, F. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SILVA, H. T. D. **Análise dos Impactos da Utilização das Curvas de Aversão a Risco no Modelo de Planejamento da Operação Energética de Médio Prazo**. 2012. 112 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2012.

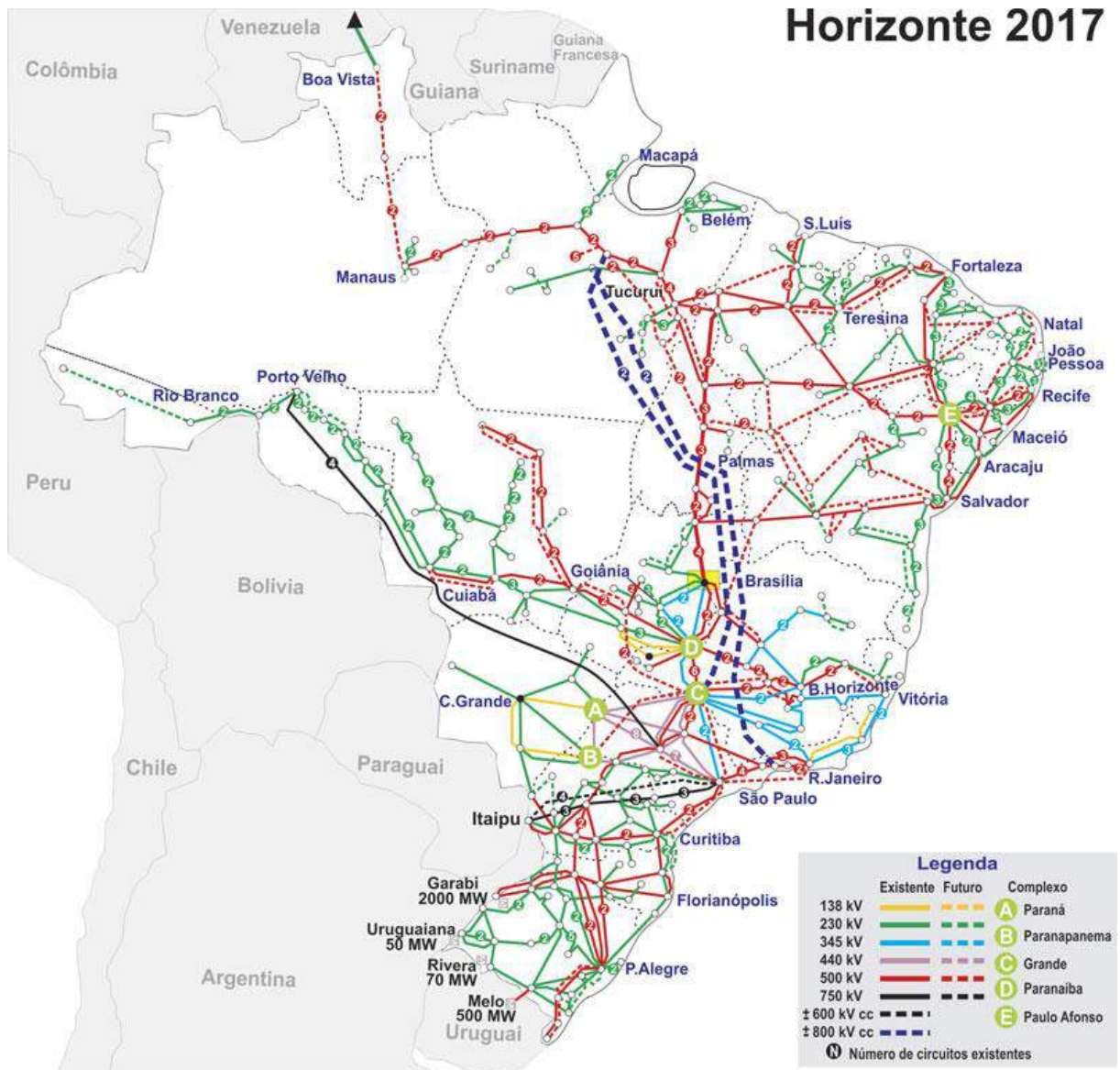
TOMALSQUIM, M. T. **As origens da Crise Energética Brasileira**. 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2000000100012>. Acesso em : 17 de maio de 2018.

TOMALSQUIM, M. T. **Energia Termelétrica – Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear.** Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016. 417 p. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-173/Energia%20Termel%C3%A9trica%20-%20Online%2013maio2016.pdf>> Acesso em: 20 de maio de 2018.

ANEXO A

Como indicado na seção 1 deste trabalho segue, na Figura AA-1, o panorama atual das conexões do SIN.

Figura AA-1 – Panorama Atual das Conexões do SIN – Horizonte 2017.



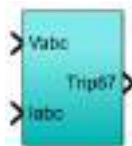
Fonte: (ONS, 2017).

APÊNDICE A

A seguir serão mostrados os blocos lógicos implementados no *software* MATLAB/SIMULINK®, bem como o sistema base utilizado na realização dos testes e a caracterização dos elementos da rede. Todos eles aqui apresentados já foram explicados nas seções anteriores e possuem uma ilustração gráfica equivalente.

Na Figura A-1 tem-se a máscara adotada para representar o relé 67 no sistema, vê-se então que são tratados dados trifásicos da rede.

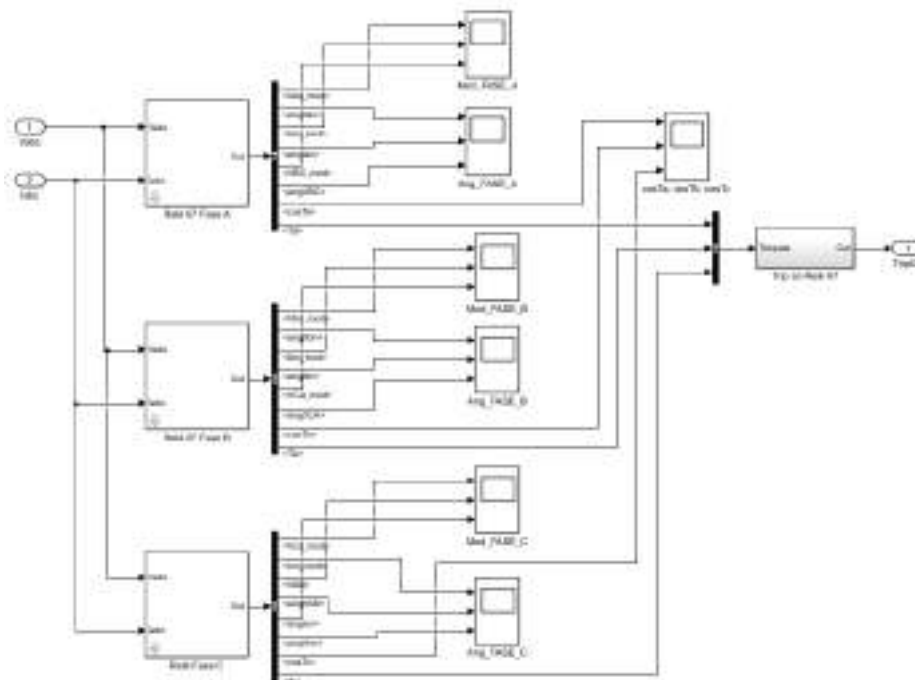
Figura A-1 – Máscara Adotada para Representação do Relé 67.



Fonte: (Da Autora, 2018).

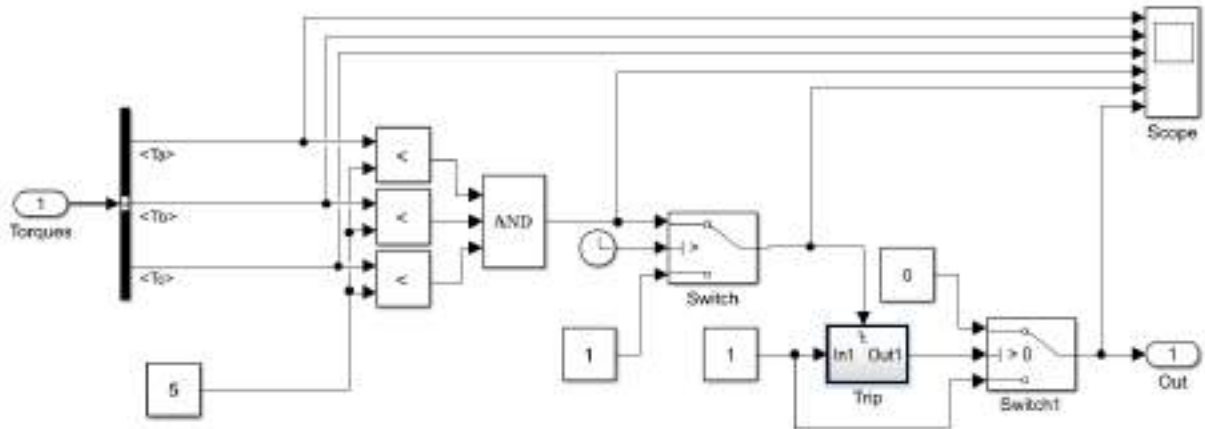
Na Figura A-2 é mostrado a lógica de implementação trifásica do relé, ao passo que na Figura A-3 tem-se o método utilizado para avaliar os torques das três fases e poder então gerar o comando de trip referente ao relé direcional.

Figura A-2 – Análise Trifásica do Relé 67.



Fonte: (Da Autora, 2018).

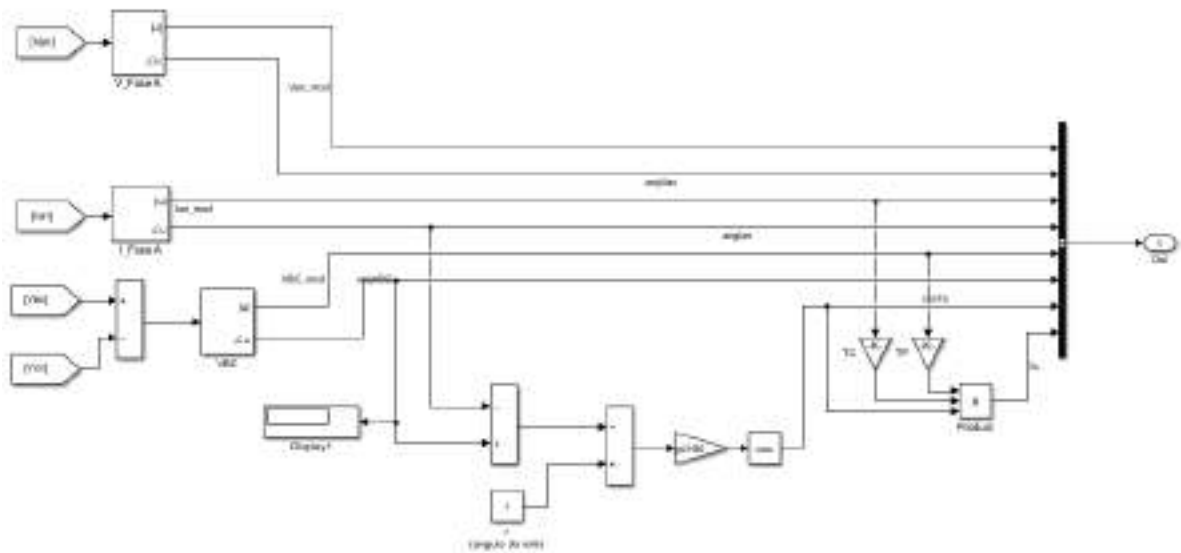
Figura A-3 – Bloco Lógico para Comparação dos Torques de Cada Fase.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Por sua vez, nas Figuras A-4, A-5 e A-6 é mostrada, individualmente, o raciocínio adotado para a elaboração da unidade monofásica nas fases A, B e C, respectivamente. Os blocos das fases B e C não foram ilustrados anteriormente, porém, foi citada a necessidade de correção de certos ângulos para o correto funcionamento do equipamento.

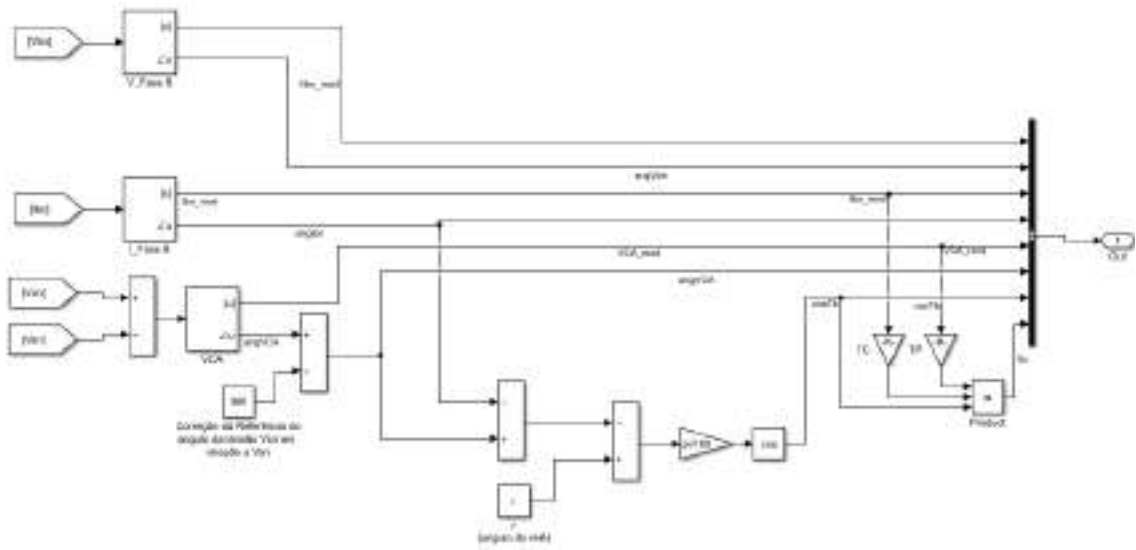
Figura A-4 – Relé 67 Fase A.



Fonte: (Da Autora, 2018).

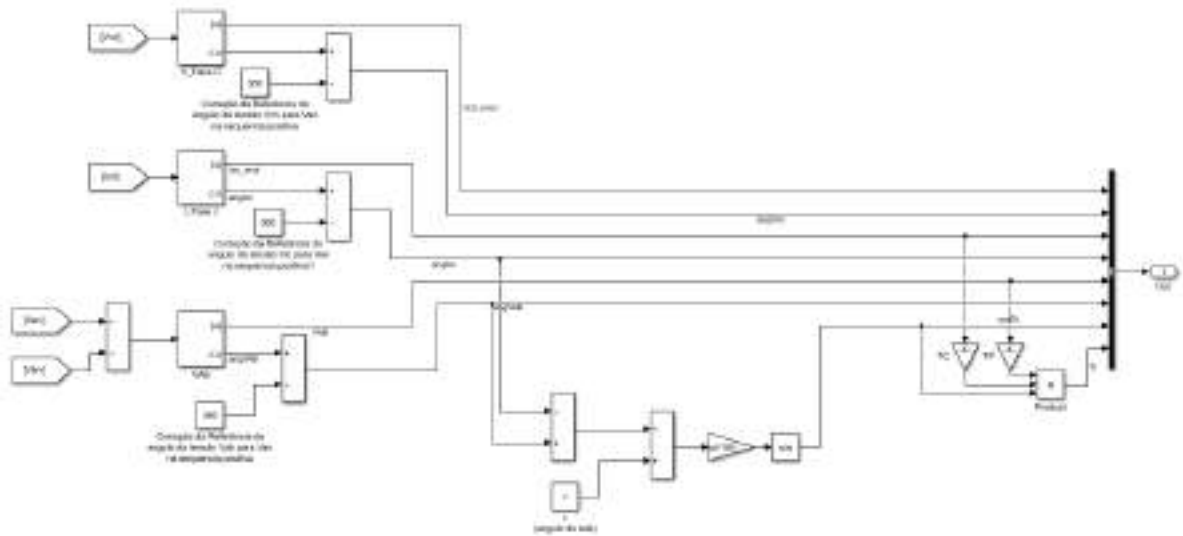
Tem-se na Figura A-7 a lógica adotada para a representação do controle do envio do comando de trip do relé de sobrecorrente, a partir da atuação do relé direcional.

Figura A-5 – Relé 67 Fase B.



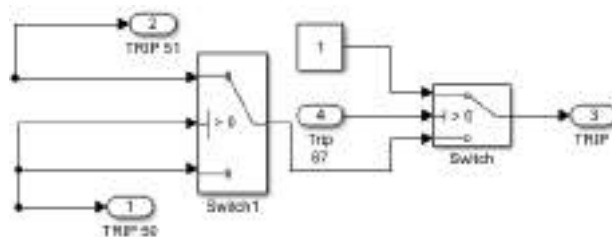
Fonte: (Da Autora, 2018).

Figura A-6 – Relé 67 Fase C.



Fonte: (Da Autora, 2018).

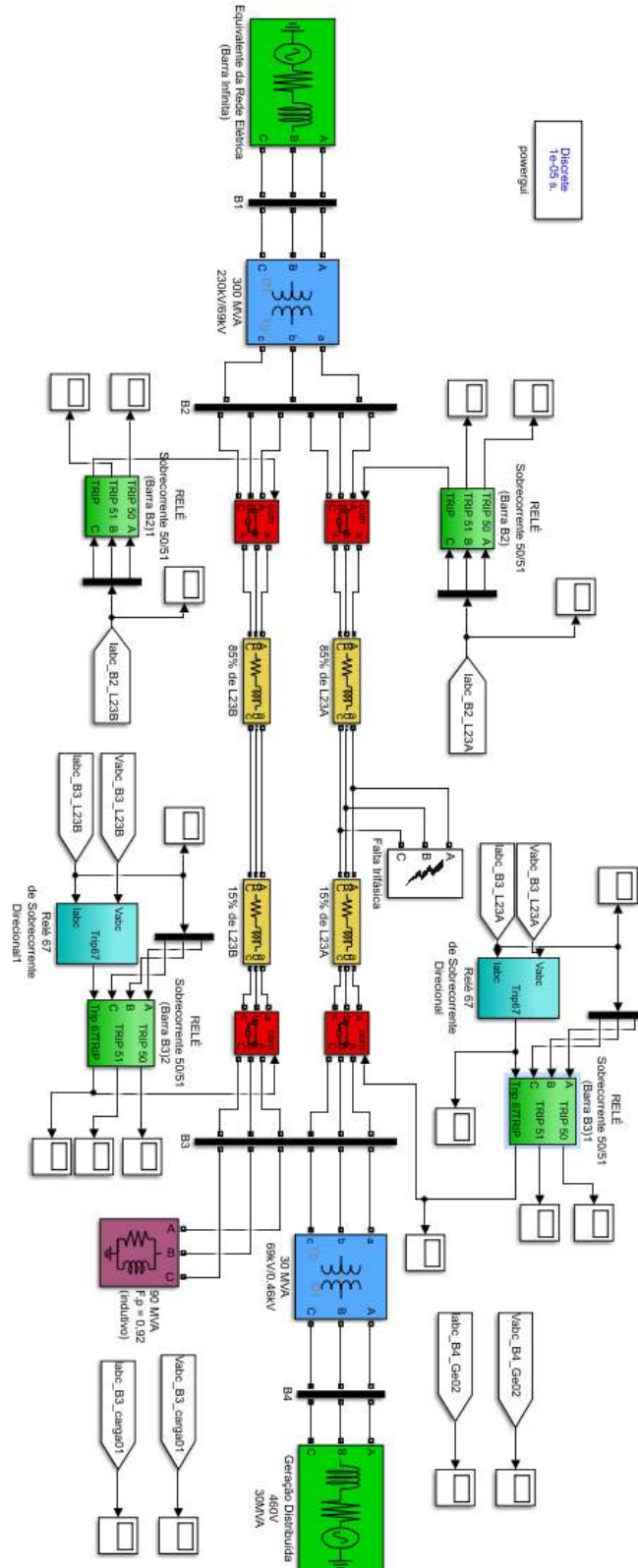
Figura A-7 – Acionamento do Relé 50/51.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Observa-se na Figura A-8 o sistema base, a partir do qual foram criados cenários para a realização de testes no relé 67.

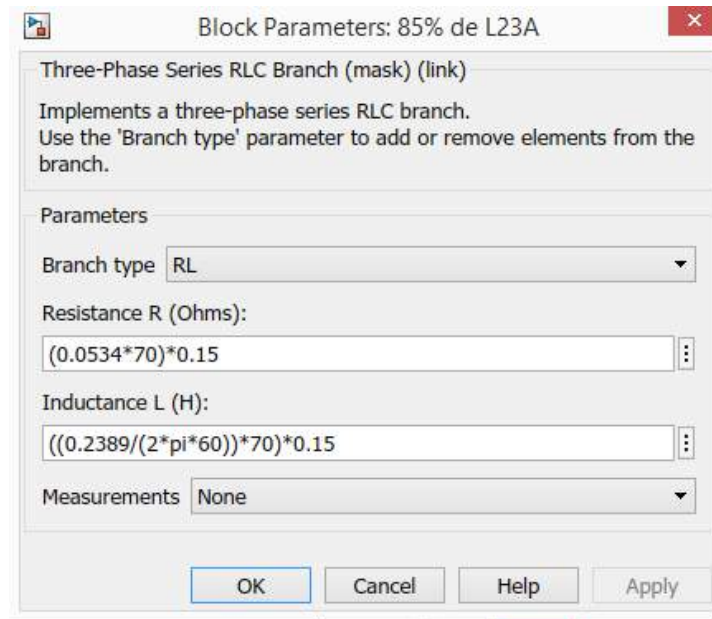
Figura A-8 – Sistema Teste.



Fonte: (Da Autora, 2018).

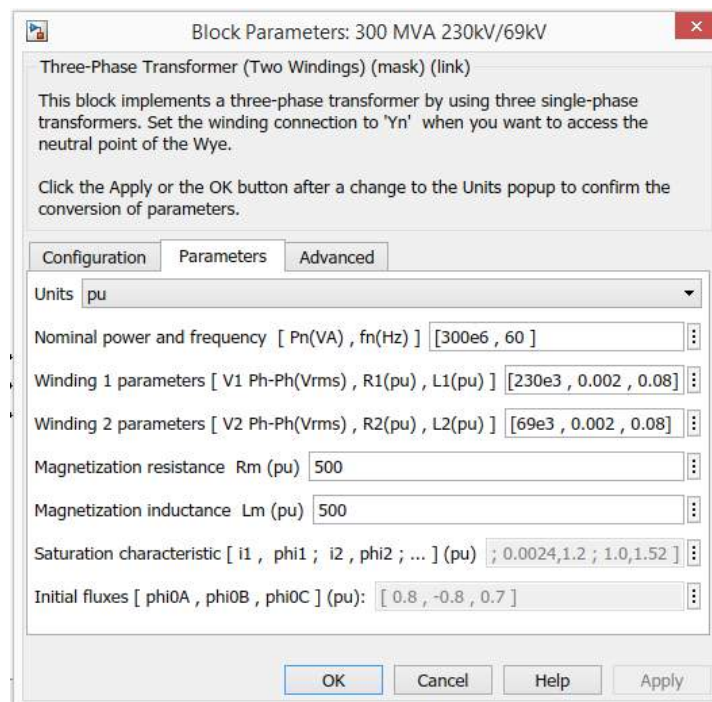
Com relação aos elementos do sistema, na Figura A-9 são apresentados os dados adotados às linhas de distribuição para modelagem do curto a 85% da mesma. Enquanto que na Figura A-10 tem-se os parâmetros associados aos transformadores da rede, os valores apresentados foram utilizados nos dois transformadores.

Figura A-9 – Parâmetros das Linhas de Distribuição.



Fonte: (Da Autora, 2018).

Figura A-10 – Parâmetros dos Transformadores.



Fonte: (Da Autora, 2018).