

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Fernanda Thais Bencke

**AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS PARA BLOQUEIO EM LINHAS DE TRÊS  
TERMINAIS**

Santa Maria, RS  
2019

**Fernanda Thais Bencke**

**AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS PARA BLOQUEIO EM LINHAS DE TRÊS TERMINAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

ORIENTADOR: Prof. Aécio de Lima Oliveira

COORIENTADOR: Prof. Adriano Peres de Morais

Santa Maria, RS  
2019

---

©2019

Todos os direitos autorais reservados a Fernanda Thais Bencke. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

End. Eletr.: [fernandabencke@gmail.com](mailto:fernandabencke@gmail.com)

**Fernanda Thais Bencke**

**AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS PARA BLOQUEIO EM LINHAS DE TRÊS TERMINAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

**Aprovado em 12 de dezembro de 2019:**

---

**Aécio de Lima Oliveira, Dr. Engenheiro Eletricista. (UFSM)**  
(Orientador)

---

**Adriano Peres de Moraes, Dr. Engenheiro Eletricista. (UFSM)**  
(Coorientador)

---

**Mairon Gallas, Engenheiro Eletricista. (UFSM)**

---

**Gustavo Marchesan, Engenheiro Eletricista. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2019

## RESUMO

### AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS PARA BLOQUEIO EM LINHAS DE TRÊS TERMINAIS

AUTORA: Fernanda Thais Bencke  
ORIENTADOR: Aécio de Lima Oliveira  
COORIENTADOR: Adriano Peres de Moraes

As linhas de três terminais expandem-se na medida em que existem boas razões para utilizá-las, como a redução do custo associado à necessidade de construir uma subestação no ponto de conexão. No entanto, a proteção de linhas de três terminais apresenta sérios desafios e exige projeto e aplicação muito cuidadosos para manter a confiabilidade geral do sistema. Neste trabalho é apresentada a avaliação do desempenho dos métodos mais tradicionais para bloqueio do relé de distância na ocorrência de oscilações de potência: Características Concêntricas e Duplo *Blinder*. Os métodos foram submetidos, por meio de simulações computacionais, a oscilações de potência em uma linha de transmissão de três terminais.

**Palavras-chave:** Corrente de *Infeed*. Oscilação de Potência. Linhas de Três Terminais.

## **ABSTRACT**

### **EVALUATION OF POWER SWING BLOCKING METHODS ON THREE TERMINAL LINES**

**AUTHOR:** Fernanda Thais Bencke  
**ADVISOR:** Aécio de Lima Oliveira  
**CO-ADVISOR:** Adriano Peres de Morais

The three-terminal lines expand as there are good reasons to use them, such as the cost reduction associated with the need to build a substation at the point of connection. However, protection of three-terminal lines presents serious challenges and requires very careful design and application to maintain overall system reliability. This work presents the performance evaluation of the most traditional methods for distance relay blocking in the occurrence of power swings: Concentric Characteristics and Double Blinder. The methods were submitted, through computational simulations, to power swings in a three-terminal transmission line

**Keywords:** Infeed current. Power Swing. Three-terminal lines.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ajuste das características concêntricas aplicado em relé mho. ....	17
Figura 2.2 – Relés de distância: a) mho; b) impedância; c) reatância; d) impedância com direcional; e) Tomate; f) Lenticular; (g) Quadrilateral; (h) Poligonal. .	18
Figura 2.3 – Capacidade de carga de um relé de distância com característica mho. . .	19
Figura 2.4 – Característica típica de uma oscilação estável e instável em um relé mho.	20
Figura 2.5 – Método das Características Concêntricas aplicado ao relé mho. ....	22
Figura 2.6 – Método do Duplo <i>Blinder</i> aplicado ao relé mho. ....	23
Figura 3.1 – Linha de transmissão de três terminais. ....	25
Figura 3.2 – Característica de operação do elemento de distância da zona 3 para linhas de dois e de três terminais. ....	27
Figura 3.3 – Potência ativa (P) x ângulo do rotor ( $\delta$ ). ....	29
Figura 3.4 – Ajuste das características concêntricas aplicado em relé mho. ....	30
Figura 3.5 – Ajuste dos blinders aplicado em relé mho. ....	32
Figura 4.1 – Configurações de linha simuladas: (a) $L_{AT} = L_{BT} = L_{CT}$ , (b) $L_{AT} = 0,5 L_{CT}$ ; $L_{BT} = 1,5 L_{CT}$ e (c) $L_{AT} = 1,5 L_{CT}$ ; $L_{BT} = 0,5 L_{CT}$ . ....	34
Figura 4.2 – Trajetória da impedância vista pelo relé A para $f_A = 60Hz$ , $f_B = 64Hz$ e $f_C = 67Hz$ . ....	36
Figura 4.3 – Trip da zona mais externa do relé de distância A e dos métodos para $f_A = 60Hz$ , $f_B = 64Hz$ e $f_C = 67Hz$ . ....	36
Figura 4.4 – Trip da zona mais externa do relé de distância A e dos métodos para $f_A = 60Hz$ , $f_B = 61Hz$ e $f_C = 63Hz$ . ....	37
Figura 4.5 – Trip da zona mais externa do relé de distância A e dos métodos para $f_A = 60Hz$ , $f_B = 61Hz$ e $f_C = 63Hz$ . ....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Configurações simuladas a partir da linha de três terminais. ....	25
Tabela 5.1 – Configurações simuladas a partir da linha de três terminais. ....	41
Tabela A.1 – Configurações simuladas a partir da linha de três terminais. ....	45
Tabela A.2 – Parâmetros do sistema de transmissão de três terminais. ....	45
Tabela B.1 – Parâmetros de ajuste do relé de distância. ....	46
Tabela C.1 – Parâmetros de ajuste dos métodos para bloqueio de oscilação de potência. ....	47

## LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Resposta dos Métodos de Bloqueio de Oscilação de Potência para a Configuração I . . . . .	35
Quadro 4.2 – Resposta dos Métodos de Bloqueio de Oscilação de Potência para a Configuração II . . . . .	38
Quadro 4.3 – Resposta dos Métodos de Bloqueio de Oscilação de Potência para a Configuração III . . . . .	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>BI</i>	<i>Blinder</i> Interno
<i>BID</i>	<i>Blinder</i> Interno Direito
<i>BIE</i>	<i>Blinder</i> Interno Esquerdo
<i>BE</i>	<i>Blinder</i> Externo
<i>BED</i>	<i>Blinder</i> Externo Direito
<i>BEE</i>	<i>Blinder</i> Externo Esquerdo
<i>CC</i>	Método das Características Concêntricas
<i>DB</i>	Método do Duplo <i>Blinder</i>
<i>LE</i>	Limite externo dos métodos para detecção de oscilação de potência
<i>LI</i>	Limite interno dos métodos para detecção de oscilação de potência
<i>LT</i>	Linha de Transmissão

## LISTA DE SÍMBOLOS

$Ang_{BE}$	Ângulo de abertura para o <i>blinder</i> externo
$Ang_{BI}$	Ângulo de abertura para o <i>blinder</i> interno
$Ang_{zona_3}$	Ângulo de abertura para o alcance resistivo da zona de proteção mais externa do relé de distância
$I_A$	Corrente da linha de transmissão A-T
$I_B$	Corrente da linha de transmissão B-T
$I_C$	Corrente da linha de transmissão C-T
$dR/dT$	Taxa de variação da resistência aparente
$E$	Tensão de linha da linha de transmissão
$f_A$	Frequência da fonte A
$f_B$	Frequência da fonte B
$f_C$	Frequência da fonte C
$f_{osc}$	Máxima frequência de oscilação
$L_{AT}$	Comprimento da linha de transmissão A-T
$L_{BT}$	Comprimento da linha de transmissão B-T
$L_{CT}$	Comprimento da linha de transmissão C-T
$P_{max}$	Potência ativa máxima
$R_{LE}$	Alcance resistivo do limite externo
$R_{LI}$	Alcance resistivo do limite interno
$S_{A_mho}$	Capacidade de carga do relé de distância conectado à barra A do sistema
$t_{blinder}$	Temporização do método Duplo <i>Blinder</i>
$t_{cc}$	Tempo que a impedância deve permanecer entre o limite externo e o limite interno para ser considerada uma oscilação
$Z_{AF}$	Impedância aparente do terminal A até a falta F
$Z_{AT}$	Impedância aparente do terminal A até o terminal T
$Z_{BT}$	Impedância aparente do terminal B até o terminal T
$Z_{CT}$	Impedância aparente do terminal C até o terminal T
$Zona_{1_2t}$	Zona de proteção 1 do relé de distância em linhas de dois terminais

$Zona_{2_{2t}}$	Zona de proteção 2 do relé de distância em linhas de dois terminais
$Zona_{3_{2t}}$	Zona de proteção 3 do relé de distância em linhas de dois terminais
$Zona_{1_{3t}}$	Zona de proteção 1 do relé de distância em linhas de três terminais
$Zona_{2_{3t}}$	Zona de proteção 2 do relé de distância em linhas de três terminais
$Zona_{3_{3t}}$	Zona de proteção 3 do relé de distância em linhas de três terminais
$Z_R$	Alcance da zona de proteção do relé de distância
$\alpha$	Margem de segurança
$\Delta Z$	<i>Offset</i> entre os limites externo e interno dos métodos para detecção de oscilação de potência
$\delta$	Carregamento máximo
$\theta$	Ângulo de máximo torque
$\phi$	Fator de potência

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	12
1.2	OBJETIVOS .....	13
1.3	JUSTIFICATIVA.....	13
1.4	ESTADO-DA-ARTE.....	14
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	15
<b>2</b>	<b>OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA EM LINHAS DE TRÊS TERMINAIS</b> .....	<b>16</b>
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	16
2.2	LINHAS DE TRÊS TERMINAIS .....	16
2.3	RELÉS DE DISTÂNCIA PARA LINHAS DE TRÊS TERMINAIS .....	17
2.4	INFLUÊNCIA DAS OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA NA PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE TRÊS TERMINAIS .....	19
2.5	MÉTODOS DE BLOQUEIO.....	21
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	22
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>24</b>
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	24
3.2	SIMULINK/MATLAB .....	24
3.3	SISTEMA .....	24
3.4	AJUSTES DO RELÉ DE DISTÂNCIA .....	26
3.5	AJUSTES DOS MÉTODOS DE BLOQUEIO .....	29
3.5.1	<b>Método das Características Concêntricas (CC)</b> .....	<b>29</b>
3.5.2	<b>Método Duplo Blinder (DB)</b> .....	<b>32</b>
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>34</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	34
4.2	CONFIGURAÇÃO I: $L_{AT} = L_{BT} = L_{CT}$ .....	35
4.3	CONFIGURAÇÃO II: $L_{AT} = 0,5 L_{CT}$ ; $L_{BT} = 1,5 L_{CT}$ .....	38
4.4	CONFIGURAÇÃO III: $L_{AT} = 1,5 L_{CT}$ ; $L_{BT} = 0,5 L_{CT}$ .....	39
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>43</b>
	<b>APÊNDICE A – PARÂMETROS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE TRÊS TERMINAIS</b> .....	<b>45</b>
	<b>APÊNDICE B – PARÂMETROS DE AJUSTE DO RELÉ DE DISTÂNCIA</b> .....	<b>46</b>
	<b>APÊNDICE C – PARÂMETROS DE AJUSTE DOS MÉTODOS PARA BLOQUEIO DE OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA</b> .....	<b>47</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Linhas de transmissão de três terminais são frequentemente usadas para explorar os benefícios econômicos, técnicos e ambientais em linhas de dois terminais, uma vez que economiza o custo associado à necessidade de construir uma subestação no ponto de conexão. No entanto, o uso da linha de três terminais impõe desafios a diferentes esquemas de proteção locais que não fazem uso de comunicação (ABDELAZIZ; RAHMAN; MOUSSA, 2011; HOROWITZ; PRADKE, 2006; NAYAK; PRADHAN; BAJPAI, 2015; NERC, 2006).

A presença de um terceiro terminal de fonte faz com que as zonas de proteção do relé de distância (função ANSI 21) fiquem maiores, o que limita a capacidade de transporte de carga da linha e aumenta a possibilidade de operação indevida devido a oscilações de potência.

Em sistemas elétricos interconectados, a probabilidade da ocorrência de oscilações de potência é maior e a abertura de uma linha sem defeito, durante as oscilações das quais o sistema pode se recuperar, é quase sempre indesejável (KHORADSHADI-ZADEH, 2005). Os relés de proteção da linha devem distinguir condições normais, curtos-circuitos e oscilações de potência estáveis e instáveis.

Quando o sistema está sob efeito de oscilação de potência a impedância vista pelo relé de distância adquire caráter oscilatório, e esta poderá migrar para o interior da região de proteção delimitada pelo relé de distância, causando atuações indevidas da proteção. Os métodos denominados Características Concêntricas (CC) e o Duplo *Blinder* (DB) são comumente utilizados para bloquear a atuação do relé de distância na ocorrência de uma oscilação de potência. Basicamente, estes esquemas de bloqueio são fundamentados na taxa de variação da impedância aparente vista pelo relé de distância, que é alta para curtos-circuitos e baixa para oscilações (PSRC, 2005; BENMOUYAL; HOU; TZIOUVARAS, 2012; ANDERSON, 1999; HOLBACH, 2006).

Os relés que possuem a função de bloquear os relés de distância (função ANSI 68) são amplamente utilizados em linhas de dois terminais. No entanto, em linhas de três terminais o seu comportamento ainda é desconhecido. Diante desses problemas, este trabalho analisa dois esquemas tradicionalmente utilizados para bloqueio dos relés de distância durante as oscilações de potência em um sistema de três terminais. Toda modelagem do sistema e controle foi desenvolvido na plataforma Simulink do Matlab.

## 1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho objetiva a avaliação de métodos tradicionais para detecção de oscilações de potência, Características Concêntricas e Duplo *Blinder*, em linhas de transmissão de três terminais.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Estudar os métodos tradicionais para detecção de oscilação de potência, seus critérios, ajustes, vantagens e desvantagens;
- Implementar a lógica dos métodos em ambiente programável, evidenciando os ajustes utilizados;
- Definir critérios a serem utilizados durante a avaliação dos métodos;
- Comparar os métodos por meio de simulações computacionais.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Mudanças repentinas no carregamento de um sistema elétrico de potência podem ser causadas por um curto-circuito, pela desconexão de linhas energizadas ou por um religamento (HOLBACH, 2006). Quando alguma mudança ocorrer no sistema elétrico haverá oscilação no módulo e no ângulo da tensão e da corrente, uma vez que os geradores são forçados a se ajustarem a uma nova condição de carga. Como existe inércia nos geradores, para alcançar essa nova condição de carga é necessário um determinado período de tempo. As linhas de transmissão quando submetidas a estas condições sofrem variações na potência ativa e reativa, caracterizando um fenômeno denominado oscilação de potência (BENMOUYAL; HOU; TZIOUVARAS, 2012; PSRC, 2001).

Em linhas de três terminais, a presença do terceiro terminal de fonte faz com que as zonas de proteção do relé de distância aumentem, tornando-as mais suscetíveis a oscilações de potência. Neste cenário, é importante que os relés de proteção sejam capazes de identificar uma situação de oscilação de potência e eliminem as falhas dentro do tempo de operação projetado.

O bloqueador de oscilação de potência e o relé de distância são utilizados em conjunto para distinguir uma situação de oscilação de potência de uma situação de curto-circuito. O comportamento destes relés já é conhecido quando aplicados em linhas de dois terminais. Porém, quando se trata de linhas de três terminais, o comportamento ainda é desconhecido. Desta forma, neste trabalho é analisado o comportamento dos relés que

possuem a função de bloquear os relés de distância durante oscilações de potência em linhas de três terminais, utilizando como base dois esquemas de bloqueio frequentemente utilizados para este fim.

#### 1.4 ESTADO-DA-ARTE

A impedância vista por um relé de distância durante uma oscilação de potência adquire caráter oscilatório. Muitas vezes, tal variação na impedância faz com que esta migre para o interior da região delimitada pelo relé, causando atuações indevidas da proteção. Na literatura técnica são relatados diversos casos de operações indevidas do relé de distância devido a oscilações de potência, em alguns casos, gerando *blackouts* (PSRC, 2005).

Holbach (2003) comenta que um critério muito utilizado para detectar uma oscilação é a taxa de variação da impedância aparente. Quando ocorre um curto-circuito, a impedância migra instantaneamente para o interior das regiões características do relé. Porém, quando ocorre uma oscilação de potência, devido à inércia dos geradores, a impedância descreve uma trajetória no plano de impedâncias mais lentamente do que durante uma falta. Assim, Mooney e Fischer (2006) detalharam dois métodos baseados na medição do tempo em que a impedância aparente leva para atravessar determinada área no plano  $R-X$ . O método das Características Concêntricas é o mais simples. Esse utiliza duas regiões concêntricas às zonas de proteção do relé. Outro método que utiliza o mesmo critério é o do Duplo *Blinder*. Nesse, os limites são definidos por retas paralelas a impedância da linha de transmissão no plano  $R-X$ . Quando a impedância atravessa o *blinder* externo é iniciada a contagem de tempo, a qual acaba quando o *blinder* interno é alcançado. Se o tempo necessário à impedância para atravessar esta região for maior do que aquele ajustado na lógica do relé, então uma condição de oscilação de potência é detectada e o relé de distância é bloqueado.

Porém, os métodos citados anteriormente exigem um minucioso estudo do sistema ao qual serão aplicados, uma vez que as condições de carregamento máximo do sistema e o ângulo da impedância da linha influenciam nos seus ajustes. Assim, Blumschein, Yelgin e Kereit (2008) propuseram o método da detecção baseado em cálculos contínuos da impedância aparente do sistema. Tal método utiliza critérios como o da continuidade e suavidade. O primeiro avalia o estado da impedância, ou seja, estacionário ou não-estacionário. O segundo verifica modo como a impedância se move, ou seja, abrupto ou suave. Uma lógica E entre os critérios citados mais a averiguação de que a impedância se encontra em determinada área é responsável por detectar uma condição de oscilação de potência.

Benmouyal, Hou e Tziouvaras (2005) detalharam o método baseado na magnitude

da tensão no centro elétrico (*Swing Center Voltage - SCV*) e na sua taxa de variação. Este método requer alguns conhecimentos sobre a estabilidade do sistema.

Jonsson e Daalder (2001) propuseram um método que se diferencia muito dos anteriores, pois não utiliza critérios como taxa de variação da impedância em sua lógica. O método baseia-se em blocos matemáticos lógicos, e faz uso das componentes simétricas e a derivada do ângulo da corrente de sequência positiva.

Seguindo uma filosofia diferente dos métodos anteriores, Moore e Johns (1996) sugeriram um método no qual o relé de distância permanece constantemente bloqueado. Essa técnica utiliza um detector de curto-circuito baseado na transformada discreta de Hartley, cuja finalidade é desbloquear o relé de distância durante a falta.

Cada um dos métodos citados anteriormente apresenta suas peculiaridades em termos de ajuste e resposta. Portanto a escolha da melhor alternativa, ou seja, a que apresenta simplicidade nos ajustes e melhores resultados, deve ser realizada de maneira cuidadosa, uma vez que diversas condições de operação do sistema devem ser analisadas.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O que são linhas de transmissão de três terminais e os motivos para utilizá-las são apresentados no Capítulo 2. Além disso, são analisadas as causas e consequências das oscilações de potência e a influência destas nos relés de distância de linhas de três terminais, evidenciando os desafios que impõe e como adequar o sistema de proteção para estas situações.

No Capítulo 2 também é descrito os métodos de detecção de oscilações de potência considerados ao longo do trabalho. São apresentados os métodos convencionais, Características Concêntricas e Duplo *Blinder*. A parametrização destes será descrita em detalhes a seguir, no Capítulo 3.

As condições de operação do sistema para as quais os métodos serão analisados são mostradas no Capítulo 3. Outras informações importantes, como a definição do sistema teste, a parametrização dos métodos de oscilação de potência e dos relés de distância também são apresentados neste Capítulo.

Os resultados e discussões das simulações são apresentados no Capítulo 4. Nesse, são expostos os resultados das simulações computacionais, para todos os métodos e condições de operação apresentados no Capítulo 3.

Para finalizar, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho.

## 2 OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA EM LINHAS DE TRÊS TERMINAIS

### 2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste Capítulo, são apresentadas as linhas de transmissão de três terminais, justificando o seu uso através de vantagens.

Além disso, são analisadas as causas e consequências das oscilações de potência e a influência destas nos relés de distância de linhas de três terminais, evidenciando os desafios que impõe e como adequar o sistema de proteção para estas situações.

Discute-se o efeito da diminuição da capacidade de carga da linha de transmissão e o impacto disso no tamanho das zonas de proteção do relé de distância.

### 2.2 LINHAS DE TRÊS TERMINAIS

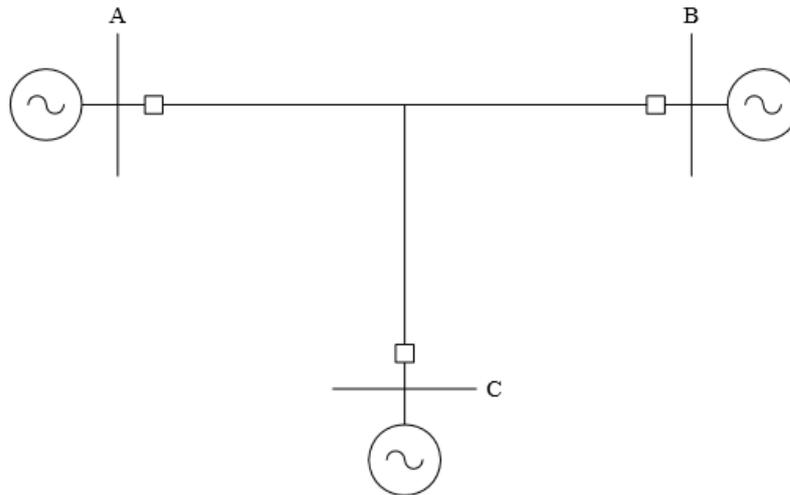
Ocasionalmente, as linhas de transmissão podem ser derivadas para fornecer conexões intermediárias às cargas ou para reforçar a rede de baixa tensão subjacente através de um transformador. Essa configuração é conhecida como linha multiterminal e geralmente é construída como uma medida temporária e barata para fortalecer o sistema de energia (HOROWITZ; PRADKE, 2008).

Neste trabalho será analisado o comportamento das proteções de distância e bloqueadores de oscilação de potência quando utilizados em linhas de três terminais. Uma linha de três terminais é demonstrada na Figura 2.1.

Segundo NERC (2006) há vários fatores que influenciam a decisão de configurar uma linha de transmissão com três terminais, como economia, tempo de construção restrito, aprovações regulatórias, sobrecargas de linha e requisitos de desempenho do sistema.

- Existe um benefício econômico na construção de linhas de três terminais, pois é evitada as despesas de toda ou parte de uma subestação e, normalmente, reduz o comprimento da linha de transmissão;
- O tempo de construção de uma linha de transmissão de três terminais é reduzido ao se comparar com o tempo necessário para a construção de uma nova subestação. Portanto, é interessante o uso de linhas de três terminais em aplicações, nas quais é necessário atender rapidamente às necessidades do sistema;
- Aprovações regulatórias podem ser problemáticas. Se houver oposição à construção

Figura 2.1 – Ajuste das características concêntricas aplicado em relé mho.



Fonte: Adaptado de BOLZAN, 2009.

de novas instalações, a construção de uma linha de três terminais pode reduzir o impacto geral do projeto;

- A configuração da linha de três terminais pode reduzir a possibilidade de sobrecargas na linha de transmissão devido a eventos de contingência únicos. No entanto, isso depende da topologia do sistema.

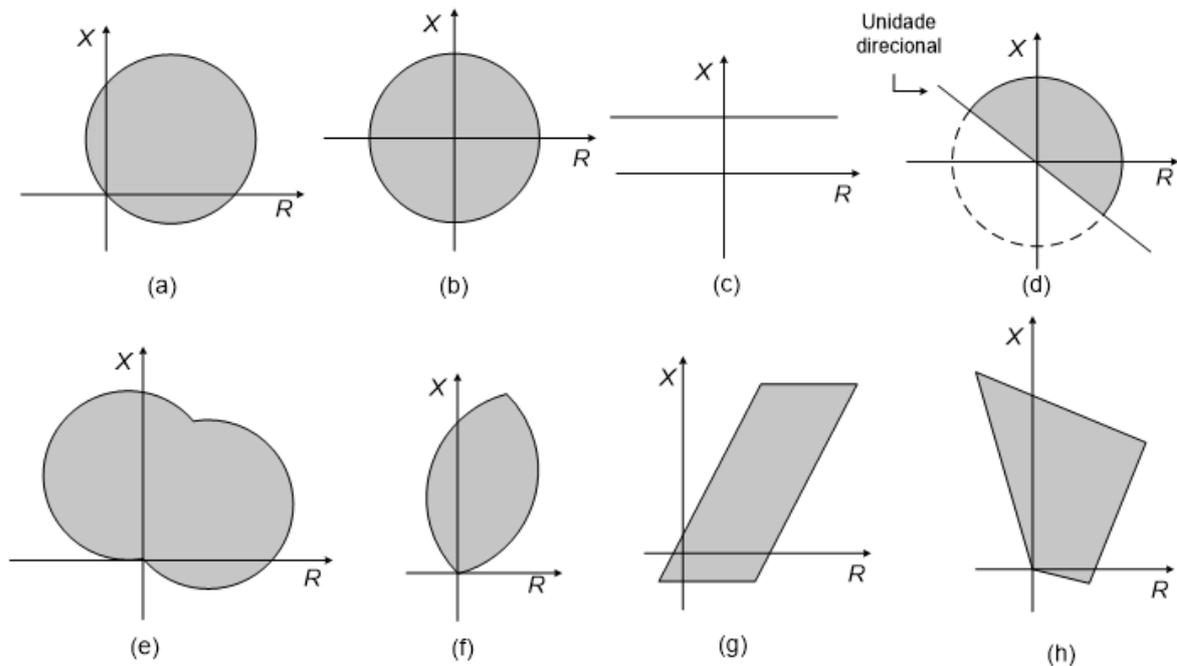
### 2.3 RELÉS DE DISTÂNCIA PARA LINHAS DE TRÊS TERMINAIS

O relé de distância (função ANSI 21) é baseado na variação da impedância, reatância ou admitância vista pelo relé, sendo estes parâmetros proporcionais à distância. Seu limite de carga é normalmente citado em MVA, na tensão operacional nominal em algum fator de potência especificado. Este ponto é escolhido para ser conservador o suficiente para exceder as expectativas dos níveis reais de carga da linha e fatores de potência (PSRC, 2001).

A característica de distância mais comumente encontrada é o mho. Outras características do relé de distância exibirão respostas diferentes ao carregamento e podem ser mais ou menos apropriadas para uso em situações em que o carregamento é um problema. Exemplos de configurações diferentes para relés de distância são demonstradas na Figura 2.2.

A Figura 2.3 mostra a impedância aparente da carga em relação a um relé de distância com uma característica mho de alcance à frente. No interior do círculo delimitado pela maior zona do relé de distância, o sistema de proteção de linha de transmissão deve

Figura 2.2 – Relés de distância: a)  $mho$ ; b) impedância; c) reatância; d) impedância com direcional; e) Tomate; f) Lenticular; (g) Quadrilateral; (h) Poligonal.



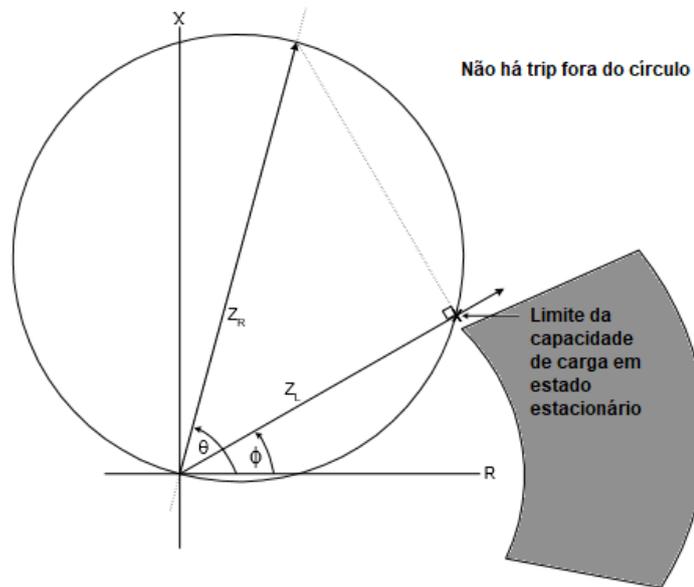
Fonte: (BOLZAN, 2009)

permitir que a carga máxima flua durante um curto período de tempo ou em condições de emergência sem disparar. Ainda, as zonas de proteção do relé de distância de diâmetro  $Z_R$  devem ser menores que a zona que impedância aparente ocupa em regime permanente definida em algum fator de potência especificado  $\phi$ , delimitado pela área em cinza, para que não atuem em condições de funcionamento normal do sistema.

Em linhas multiterminais, a capacidade de carga da linha de transmissão cria desafios adicionais para proteger todos os terminais de linha. A impedância aparente da linha, vista pelo relé de proteção, pode ser maior devido às correntes de alimentação, que na presença de um terceiro terminal, aumentam. É o efeito da impedância aparente que requer a necessidade de configurações de alta impedância, o que, por sua vez, pode violar o limite da capacidade de carga da linha de três ou mais terminais. Portanto, ao transformar uma linha de dois terminais em uma linha multiterminal, é necessário considerar o aumento da impedância aparente da linha para definir os parâmetros do relé de distância e, em consequência disso, do bloqueador de oscilação de potência, que é externo ao relé de distância.

Normalmente, os relés de distância possuem três zonas de proteção. A primeira zona é de subalcance e é a porção mais crítica do relé de distância, sendo mais propensa a atuar durante oscilações de potência, pois é construída sem atraso de tempo intencional. Esta zona é definida sem considerar o terceiro terminal de alimentação, cobrindo 80% do segmento de linha com menor impedância. É necessário considerar o fator de *infeed* ao

Figura 2.3 – Capacidade de carga de um relé de distância com característica mho.



Fonte: (PSRC, 2001)

caracterizar as zonas 2 e 3, em virtude de estas serem de sobrealcance. A segunda e terceira zonas protegem toda a linha, mais parte ou todo o segmento de linha adjacente mais longo, respectivamente (HOROWITZ; PRADKE, 2008; NERC, 2006).

Quando o nível de carga precisa ser preservado e as configurações do relé de distância violam a capacidade de carga do sistema, outros meios devem ser tomados para garantir a proteção adequada. Os sistemas de disparo sequencial ou piloto geralmente podem resolver esses problemas (NERC, 2006). Com trip sequencial, a velocidade de trip é sacrificada. Esse disparo mais lento deve ser pesado contra todos os outros fatores. O uso de um sistema piloto geralmente pode resolver o problema, mas pode ser a solução mais cara.

#### 2.4 INFLUÊNCIA DAS OSCILAÇÕES DE POTÊNCIA NA PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE TRÊS TERMINAIS

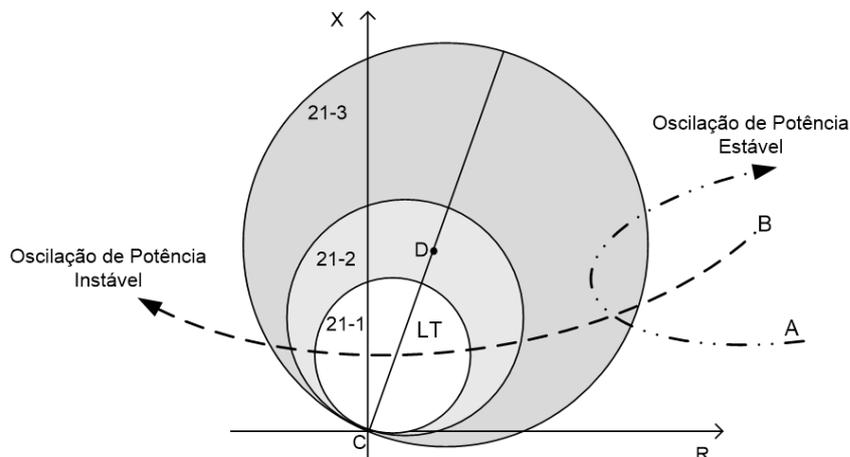
Os sistemas elétricos de potência, sob condições de regime permanente, operam tipicamente próximo da sua frequência nominal, variando de  $\pm 0,02$  Hz. Um equilíbrio entre a energia ativa gerada e consumida deve existir durante as condições de operação em estado estacionário (PSRC, 2005; BENMOUYAL; HOU; TZIOUVARAS, 2012).

Quando ocorrerem mudanças repentinas no carregamento do sistema elétrico, causadas por um curto-circuito, pela desconexão de linhas energizadas ou por um religamento, haverá oscilação no módulo e no ângulo da tensão e da corrente, uma vez que os gerado-

res são forçados a se ajustarem a uma nova condição de carga. Para alcançar esta nova condição de carga é necessário um determinado período de tempo devido à inércia existente nos geradores. As linhas de transmissão, quando submetidas a estas circunstâncias, sofrem variações na potência ativa e reativa, caracterizando um fenômeno denominado oscilação de potência (PSRC, 2005; ANDERSON, 1999).

As oscilações de potência estáveis podem alcançar um novo estado de operação aceitável, através da ação dos sistemas de controle. No entanto, haverá perda de sincronismo entre sistemas ou grupos de geradores quando ocorrer uma oscilação de potência do tipo instável, sendo necessário separar o sistema em áreas pré-determinadas, a fim de evitar blackouts (HOLBACH, 2006; MA et al., 2006). No entanto, mesmo durante oscilações de potência instáveis, os relés de distância não devem operar. Oscilações instáveis devem ser detectadas pela proteção contra a perda de sincronismo. A Figura 2.4 ilustra a característica típica de uma oscilação instável, onde a impedância aparente tende a cruzar o eixo X, e de uma do tipo estável, que busca outro operacional sem mudar de quadrante no plano R-X.

Figura 2.4 – Característica típica de uma oscilação estável e instável em um relé mho.



Fonte: (BOLZAN, 2009)

A proteção de distância pode atuar indevidamente em ambos os casos de oscilação de potência, estável e instável. Nestes casos, a impedância vista pelo relé de distância adquire caráter oscilatório e poderá migrar para o interior da região de proteção delimitada pelo relé.

Durante condições normais de operação do sistema, a impedância medida é a impedância de carga e seu lugar geométrico está longe das características de proteção do relé de distância. No entanto, em sistemas de três terminais, como evidenciado no Capítulo 2.3, o terceiro terminal de linha faz com que as zonas de proteção sejam aumentadas. Em consequência disso, a chance de atuações indevidas da proteção aumenta, já que as zonas de proteção do relé de distância estão mais próximas da zona de operação normal

do sistema.

Linhas de transmissão longas e pesadamente carregadas entre centros de carga e geração são geralmente muito mais vulneráveis a esses problemas do que linhas curtas de área metropolitana entre estações de carga. Quando existe o risco de disparos indesejados durante oscilações de potência estáveis, dispositivos de proteção auxiliares, que fornecem bloqueio de oscilação de potência, podem ser usados para garantir a segurança do relé de distância (PSRC, 2001).

## 2.5 MÉTODOS DE BLOQUEIO

Na ocasião de uma oscilação de potência a impedância vista pelo relé de distância (função ANSI 21) adquire caráter oscilatório, e esta poderá migrar para o interior da região de proteção delimitada pelo relé, causando atuações indevidas da proteção. De maneira a prevenir tais atuações indevidas são utilizados bloqueadores de oscilação de potência (função ANSI 68), e desta forma a proteção de distância atua somente para as condições de curto-circuito e permanece inoperante nos casos de oscilação de potência.

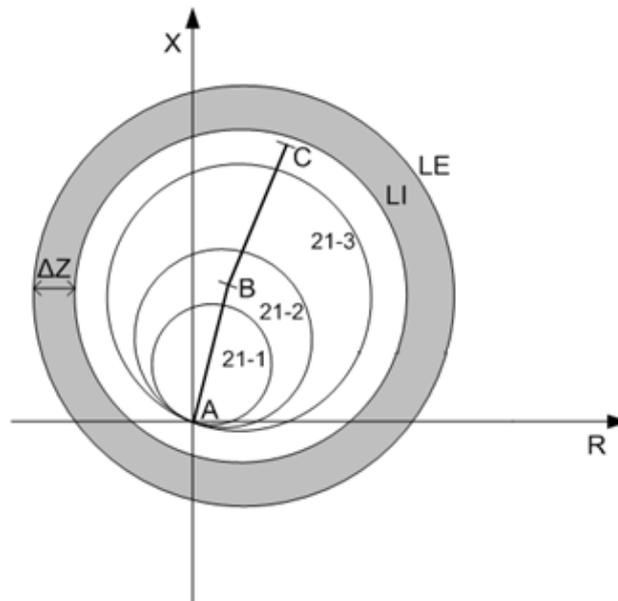
Os métodos comumente utilizados para bloquear a atuação do relé de distância na ocorrência de uma oscilação de potência são denominados Características Concêntricas e Duplo *Blinder*. Sobretudo, estes esquemas de bloqueio são fundamentados na taxa de variação da impedância aparente vista pelo relé de distância, que é alta para curtos-circuitos e baixa para oscilações.

Durante a operação do sistema, o relé de distância mede a impedância de carga, que deverá preferencialmente estar localizada eletricamente distante da característica operacional do relé, a fim de evitar atuações indevidas durante condições normais de operação do sistema. Quando ocorre um curto-circuito na linha de transmissão, a impedância aparente se movimenta imediatamente do local da impedância de carga para o local da falta, isto é, região delimitada pelo relé de distância. Por outro lado, durante uma oscilação de potência, a variação da impedância aparente, governada pela inércia mecânica das unidades geradoras, é lenta (HOLBACH, 2006).

Fundamentado nesse comportamento da variação da impedância, faz-se a diferenciação entre a oscilação de potência e o curto-circuito através do tempo que a impedância aparente leva para cruzar uma região pré-determinada, e compara com o ajuste de tempo do método.

A região pré-determinada é definida no plano  $R-X$ , restringida por dois limites, Limite Externo (LE) e Limite Interno (LI), separados entre si por um *offset* ( $\Delta Z$ ), conforme mostra a Figura 2.5 para o Método das Características Concêntricas e a Figura 2.6 para o Método do Duplo *Blinder*. O segmento ABC corresponde à linha de transmissão protegida pelo relé de distância.

Figura 2.5 – Método das Características Concêntricas aplicado ao relé mho.



Fonte: Adaptado de BOLZAN, 2009.

A contagem de tempo inicia quando a impedância aparente entra na característica externa (LE) e, finaliza quando a impedância atravessar a região mais interna (LI). Este tempo medido é comparado a um tempo pré-ajustado.

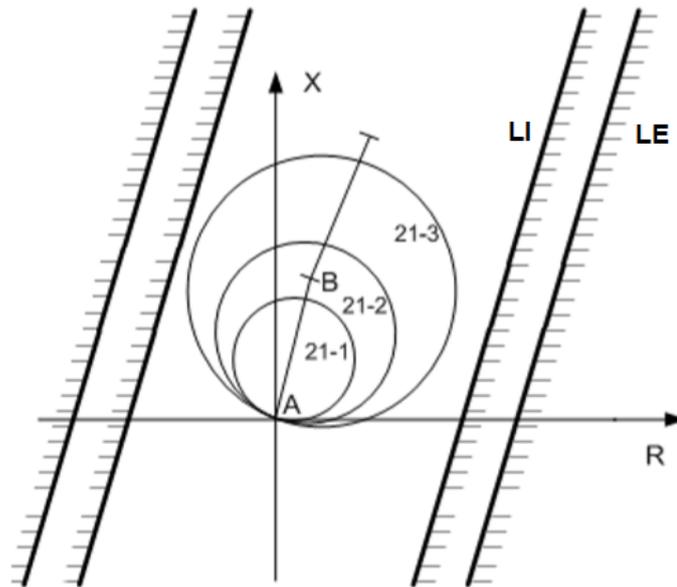
O relé de detecção de oscilação de potência assume que existe uma condição de oscilação de potência no sistema quando o tempo medido for maior ou igual ao ajuste do método. Nesta situação, é emitido um sinal de bloqueio ao relé de distância até que a trajetória da impedância saia das características concêntricas ou dos *blindings*. Caso o tempo medido seja menor que o valor pré-fixado, a situação de falta é detectada e o relé de distância não sofre nenhum bloqueio, ficando habilitado para atuar.

## 2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A oscilação de potência pode ter implicações desastrosas para o sistema elétrico de potência. Com relação à proteção de linhas de transmissão, a consequência mais severa é a operação indevida do relé de distância. Este fato pode levar o sistema ao colapso visto que as linhas de transmissão podem ser desligadas em cascata, sem necessidade. Além disso, o fato da proteção de distância, em virtude de uma oscilação de potência, enviar um sinal de abertura aos disjuntores poderá implicar em um tempo de restauração elevado, caso for necessário vistoriar a linha antes do religamento.

Os métodos convencionais para detecção de oscilações de potência, Característi-

Figura 2.6 – Método do Duplo *Blinder* aplicado ao relé mho.



Fonte: Adaptado de BOLZAN, 2009.

cas Concêntricas e Duplo *Blinder*, quando corretamente ajustados, possuem a vantagem de detectar oscilações antes que a impedância atinja o interior das zonas do relé de distância.

Quando utilizados nas linhas de três terminais apresentarão como desvantagem a diminuição da capacidade de carga da linha de transmissão, uma vez que, as zonas de proteção do relé de distância aumentam. Por este motivo também haverá maior probabilidade de atuações incorretas da proteção.

Neste capítulo foram discutidos conceitos básicos de linhas de três terminais e das proteções, de distância e bloqueador de oscilação de potência, para este tipo de linha de transmissão. Tal abordagem teórica teve por objetivo fornecer conhecimento básico sobre os temas discutidos neste trabalho.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O objetivo deste capítulo é apresentar o sistema teste e como parametrizá-lo nos *softwares* Simulink e Matlab. Para a linha de transmissão de três terminais são definidos os ajustes das proteções. Desta forma, a definição do tamanho das zonas de proteção do relé de distância e, conseqüentemente, dos ajustes dos métodos, é apresentada. A fim de identificar e eliminar as falhas dentro do tempo projetado de forma eficaz faz-se necessário a correta configuração da linha de transmissão e dos relés.

#### 3.2 SIMULINK/MATLAB

Os sinais de tensão e corrente utilizados para avaliar os métodos apresentados no Capítulo 2 foram obtidos com a ajuda do Simulink, tendo como base o sistema teste que será apresentado no próximo Capítulo.

Por outro lado, os algoritmos que descrevem cada um dos métodos e a lógica do relé foram implementados no MatLab.

Maiores detalhes destas implementações são apresentados nos capítulos a seguir.

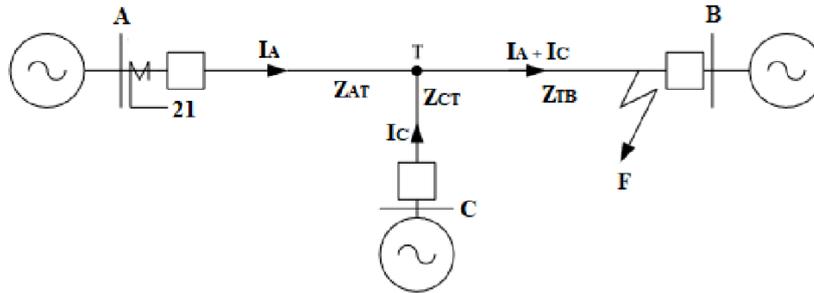
#### 3.3 SISTEMA

O sistema elétrico mostrado na Fig. 3.1 foi utilizado nos testes. Os parâmetros do sistema são descritos na Tabela A.1 do Apêndice. O sistema foi modelado no Matlab/Simulink.

O sistema apresentado possui três terminais, sendo T, o ponto de conexão do terceiro terminal a um sistema que anteriormente era de dois terminais. E, desta forma, o terceiro terminal de linha (Terminal C) é uma fonte adicional de corrente para uma falha (F) na linha. A corrente do Terminal C ( $I_C$ ) passa a influenciar o circuito e, conforme será apresentado no Capítulo 3.4, se fará necessário ajustar as zonas do relé de distância e, em consequência disso, o bloqueador de oscilação de potência, que deve ser externo ao relé de distância.

A localização do ponto T e o comprimento dos três segmentos de uma linha de três terminais podem variar com base na configuração da linha de transmissão.

Figura 3.1 – Linha de transmissão de três terminais.



Fonte: (NERC, 2006).

Três configurações foram consideradas, onde variou-se o comprimento da linha, conforme apresentado na Tabela 3.1. Considera-se  $L_{AT}$  como o comprimento de linha da barra A até o ponto de conexão T,  $L_{BT}$  da barra B até T e  $L_{CT}$  barra C até T. A partir destas configurações, os métodos para bloqueio de oscilação de potência, Características Concêntricas e Duplo Blinder, são avaliados perante oscilações de potência.

Para simular as frequências de oscilação foi fixado 60 Hz para a fonte da LT A ( $f_A$ ) enquanto as fontes da LT B ( $f_B$ ) da LT C foram variadas de 1 a 7 Hz ( $f_C$ ).

Tabela 3.1 – Configurações simuladas a partir da linha de três terminais.

Configuração	Comprimentos
I	$L_{AT} = L_{BT} = L_{CT}$
II	$L_{AT} = 0,5 L_{CT}$ ; $L_{BT} = 1,5 L_{CT}$
III	$L_{AT} = 1,5 L_{CT}$ ; $L_{BT} = 0,5 L_{CT}$

Fonte: Do autor.

A partir do sistema teste descrito acima são extraídos os sinais de tensão e de corrente no *software* Simulink. Estes sinais foram obtidos com uma taxa de amostragem de 5,76 kHz, o que, na frequência de 60 Hz, equivale a 96 amostras por ciclo. O tempo de simulação considerado é 6 segundos.

O desempenho correto dos métodos depende diretamente da qualidade do sinal por eles analisado. Os sinais de tensão e corrente, provenientes do Simulink, são sinais instantâneos compostos da componente fundamental, da componente em corrente contínua e certa combinação de harmônicos (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2007). À vista disso, a filtragem dos sinais é necessária, já que os relés analisam valores *rms*.

Dessa forma, os sinais de saída do sistema teste foram filtrados através de um Filtro Fourier de ciclo completo (PHADKE; THORP, 2009), desenvolvido no MatLab. Este filtro permitiu a extração dos sinais de módulo e ângulo a partir dos sinais instantâneos de saída do Simulink.

### 3.4 AJUSTES DO RELÉ DE DISTÂNCIA

O relé de distância é composto de três zonas de proteção. A zona mais externa representa a maior configuração de alcance; assim, é o elemento de proteção limitante da capacidade de carga e é mais vulnerável para partida indevida por oscilação de potência, no entanto, a sua temporização ajuda a inibir o *trip*. Para uma melhor coordenação entre os sistemas de proteção de linhas de transmissão adjacentes, a segunda e a terceira zonas de proteção são tradicionalmente temporizadas. A temporização utilizada na zona 2 e na zona 3 foi de 0,3 e 1,0 segundos, respectivamente.

A zona 1 é mais restritiva que a zona 3, porém é instantânea, sendo assim mais susceptível a disparos indevidos por oscilação de potência.

Para uma falta F na linha de transmissão de três terminais, apresentada na Figura 3.1, há uma contribuição para a corrente de falta de cada um dos três terminais. A corrente  $I_C$  é conhecida como corrente de *infeed* quando está em fase com  $I_A$  e como de *outfeed* quando sua fase é oposta à de  $I_A$ . É evidenciado na Equação 3.1 que quando a corrente de derivação está em fase com  $I_A$ , a impedância aparente, vista pelo terminal A, é maior que o valor da impedância verdadeira à falta:  $(Z_{AT} + Z_{AF})$  (MA et al., 2006). Portanto, o relé não cobre o mesmo comprimento de linha que no caso em que a fonte de corrente adicional não estiver presente.

$$Z_{app} = Z_{AT} + Z_{AF} \left( 1 + \frac{I_C}{I_A} \right) \quad (3.1)$$

Onde:

$Z_{app}$  é a impedância aparente vista pelo relé de distância no terminal A;

$I_C/I_A$  é o fator de *infeed* para o terminal A.

As zonas de proteção, para a configuração de linha de três terminais, serão maiores que a configuração necessária para linhas de transmissão com o terminal C aberto, resultando em uma diminuição da capacidade de carga da linha.

A primeira zona de proteção é de subalcance; assim, é definida sem considerar o terceiro terminal, cobrindo 80% do segmento de linha com menor impedância. É necessário considerar o fator de *infeed* ao caracterizar as zonas 2 e 3, em virtude de estas serem de sobrealcance. A segunda e terceira zonas protegem toda a linha, mais parte ou todo o segmento de linha adjacente mais longo, respectivamente (HOROWITZ; PRADKE, 2008; NERC, 2006). As zonas de proteção para o relé de distância conectado ao terminal A estão definidas a seguir.

$$Zona_{1-3t} = 0,8 \cdot (Z_{AT} + Z_{CT}) \quad (3.2)$$

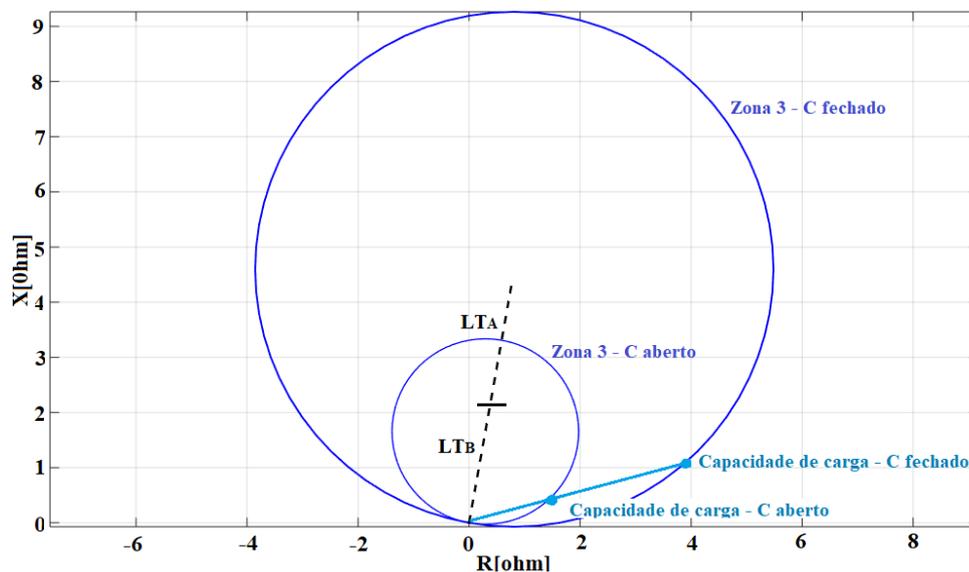
$$Zona_{2_{3t}} = 1,2 \cdot \left[ Z_{AT} + Z_{BT} \cdot \left( 1 + \frac{I_C}{I_A} \right) \right] \quad (3.3)$$

$$Zona_{3_{3t}} = 1,5 \cdot \left[ Z_{AT} + Z_{BT} \cdot \left( 1 + \frac{I_C}{I_A} \right) \right] \quad (3.4)$$

Para comparação da configuração necessária para cobertura de uma linha de três terminais em relação à uma linha de dois terminais utiliza-se a Figura 3.2. Esta demonstra o gráfico no plano  $R-X$  das características de operação do elemento de distância da zona 3 considerando o sistema C conectado ou não conectado ao sistema A-B, da Figura 3.1. Foram supostas duas situações:

- A linha foi originalmente configurada como uma linha de dois terminais entre os Terminais A e B - O Terminal C está aberto;
- A linha possui três terminais, ou seja, o Terminal C está conectado às linhas dos sistemas A e B.

Figura 3.2 – Característica de operação do elemento de distância da zona 3 para linhas de dois e de três terminais.



Fonte: do autor.

Ao configurar o sistema com o terminal C aberto, a linha é do tipo de dois terminais. A fim de definir as zonas de proteção do relé de distância para este caso são utilizadas as equações abaixo.

$$Zona_{1_{2t}} = 0,8 \cdot Z_{AT} \quad (3.5)$$

$$Zona_{2zt} = 1,2 \cdot Z_{AT} \quad (3.6)$$

$$Zona_{3zt} = 1,5 \cdot (Z_{AT} + Z_{BT}) \quad (3.7)$$

Para uma linha de três terminais, isto é, quando o terminal C estiver conectado, a impedância da zona 3 do relé de distância do terminal A é 2,8 vezes a configuração requerida para uma linha de dois terminais (terminal C aberto) e, portanto, representa uma característica operacional muito maior. Os parâmetros das zonas de proteção estão especificados na Tabela B.1 do Apêndice.

Os limites de carga do relé de distância costumam ser conservadores, com espaço para erros no equipamento e alguma flutuação no carregamento. A margem de segurança do relé para as zonas de proteção, definirá a quantidade de risco de disparos de proteção induzidos por carga que o usuário está disposto a aceitar. Portanto, é necessário conhecer os limites de carga a fim de definir qual a potência de carga máxima que este circuito pode assumir e, então, identificar uma margem de segurança adequada. Desta forma, o valor da potência de carga em que o relé está próximo do limite operacional é conhecido como capacidade de carga do relé, calculado na Equação 3.5, e fornece uma estimativa conservadora de se as configurações do relé representam um problema ou não (PSRC, 2001; HOROWITZ; PRADKE, 2006).

$$S_{A_{mho}} = 3 \cdot \left( \frac{E^2}{Z_R \cdot \cos(\theta + \phi)} \right) \quad (3.8)$$

Onde:

$E$  é a tensão de linha da linha de transmissão;

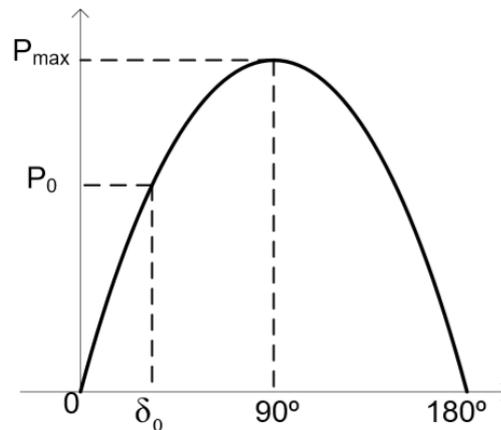
$Z_R$  é o alcance da zona;

$\theta$  é o ângulo de máximo conjugado;

$\phi$  é o fator de potência.

Ao manter-se constante o valor das tensões nas barras e da impedância da linha de transmissão, a potência ativa transferida entre dois terminais aumenta à medida que o valor do carregamento máximo  $\delta$  cresce. A máxima potência teórica transferida  $P_{max}$  acontece para  $\delta = 90^\circ$ . A partir de  $90^\circ$ , a quantidade de potência transferida diminui com o aumento de  $\delta$ , como mostra a Figura 3.3. A operação estável não pode ser mantida com  $\delta > 90^\circ$ , ou seja,  $90^\circ$  corresponde ao limite estático de estabilidade. Na prática, de modo a manter a operação com uma margem de segurança, o ângulo  $\delta$  dificilmente ultrapassa  $37,5^\circ$  (MOONEY; FISCHER, 2006). No sistema teste estudado, a capacidade de carga do relé do terminal A é  $60^\circ$ , e, neste caso, o carregamento máximo do sistema de potência não alcançará o limite operacional do relé.

Figura 3.3 – Potência ativa ( $P$ ) x ângulo do rotor ( $\delta$ ).



Fonte: (MOONEY; FISCHER, 2006).

Uma solução para problemas de capacidade de carga do relé é a seleção das configurações do relé. A captação do relé, bem como a forma característica do elemento afetado podem, na maioria dos casos, variar com a alteração das configurações do relé. Obviamente, quanto maiores as zonas de proteção do relé, maior a probabilidade de ocorrer um problema de carregamento. E desta forma, é necessário analisar criticamente se o relé mho atende às necessidades de confiabilidade do sistema. Em caso contrário, é possível modificar a característica do relé.

### 3.5 AJUSTES DOS MÉTODOS DE BLOQUEIO

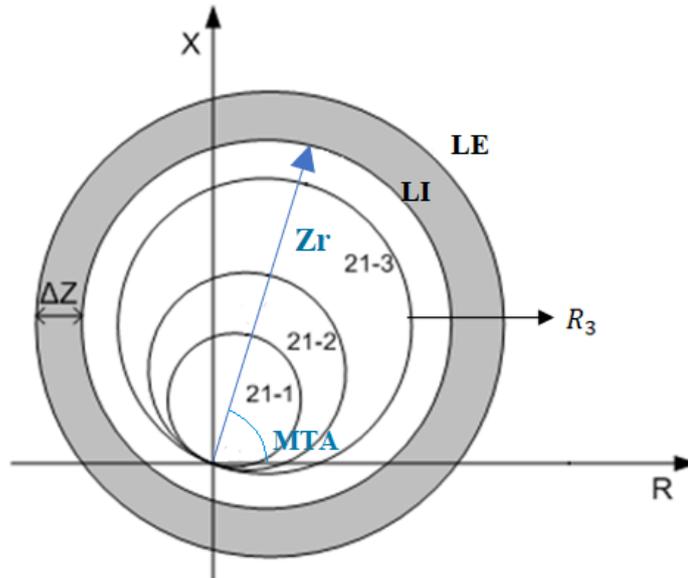
#### 3.5.1 Método das Características Concêntricas (CC)

O Método das Características Concêntricas é fundamentado no comportamento da variação da impedância aparente vista pelo relé, lenta nas oscilações e rápida nos curtos-circuitos (BENMOUYAL; HOU; TZIOUVARAS, 2012; PSRC, 2005). Para tanto, é determinado o tempo decorrido requerido pelo vetor de impedância para passar por uma zona limitada por duas características pré-definidas.

As zonas são restringidas por dois limites: Limite Externo (LE) e Limite Interno (LI), separados entre si por uma distância  $\Delta Z$ , apresentados na Figura 3.4. A contagem de tempo inicia quando a impedância aparente entra na característica externa (LE) e, finaliza quando a impedância atravessar a região mais interna (LI). Este tempo medido é comparado a um tempo pré-ajustado.

O relé de detecção de oscilação de potência assume que existe uma condição de oscilação de potência no sistema quando o tempo medido for maior ou igual ao ajuste do

Figura 3.4 – Ajuste das características concêntricas aplicado em relé mho.



Fonte: Adaptado de BOLZAN, 2009.

método. Nesta situação, é emitido um sinal de bloqueio ao relé de distância até que a trajetória da impedância saia das características concêntricas. Caso o tempo medido seja menor que o valor pré-fixado, a situação de falta é detectada e o relé de distância não sofre nenhum bloqueio, ficando habilitado para atuar.

O alcance resistivo do limite externo é obtido na Equação 3.9 e deve ser menor que o carregamento máximo do sistema para evitar que a operação do relé aconteça em consequência de cargas pesadas (BENMOUYAL; HOU; TZIOUVARAS, 2012; RINCON; PEREZ, 2012). Este valor de resistência compõe a impedância  $Z_R$  que determina o diâmetro do círculo mho.

$$R_{LE} = \frac{\sum Z}{2} \cdot \left( \frac{\delta}{2} \right) \quad (3.9)$$

Onde:

$R_{LE}$  é o alcance resistivo;

$\sum Z$  é o somatório do módulo das impedâncias de sequência positiva das fontes e da linha equivalentes;

$\delta$  é o ângulo de máximo torque.

Para uma determinada frequência de oscilação próxima ao ângulo máximo de carga, designa-se a taxa de variação da resistência aparente através da Equação 3.10.

$$\frac{dR}{dT} = \frac{\pi}{2} \cdot \left( \sum Z \right) \cdot f_{osc} \cdot \tan \left( \frac{\delta}{2} \right) \quad (3.10)$$

Onde:

$dR/dT$  é a taxa de variação da resistência aparente;  
 $\sum Z$  é o somatório do módulo das impedâncias de sequência positiva das fontes e da linha equivalentes;  
 $f_{osc}$  é a máxima frequência de oscilação;  
 $\delta$  é o ângulo de máximo torque.

Na Equação 3.11 é delimitada a mínima diferença entre os alcances resistivos de LE e de LI a partir da temporização mínima para que a máxima taxa de variação corresponda a uma oscilação de potência.

$$\Delta Z \geq t_{cc} \cdot \frac{dR}{dT} \quad (3.11)$$

Onde:

$\Delta Z$  é a diferença entre  $R_{LE}$  e  $R_{LI}$ ;  
 $t_{cc}$  é o tempo que a impedância deve permanecer entre LE e LI para ser considerada uma oscilação;  
 $dR/dT$  é a taxa de variação da resistência aparente.

O limite interno tem alcance resistivo ( $R_{LI}$ ) definido na Equação 3.12. Para garantir que haja tempo suficiente para realizar o bloqueio dos elementos de distância após uma oscilação de potência ser detectada, a característica concêntrica interna deve ser externa à maior característica do relé de distância que se deseja bloquear (BENMOUYAL; HOU; TZIOUVARAS, 2012).

$$R_{LI} = R_{LE} - \Delta Z \quad (3.12)$$

No decorrer de uma oscilação de potência, a taxa de variação da resistência aparente aumenta conforme o ângulo de carga aumentar (ZIEGLER, 2000). O  $R_{LI}$  está mais próximo da impedância da LT e, desta forma, tem ângulo de máximo torque maior. Por isso, conforme a Equação 3.7, a taxa de variação  $dR/dT$  será maior que quando comparado com a taxa de variação na vizinhança do LE. Por causa desta diferença é necessário recalcular o valor de  $\delta$  para  $R_{LI}$  através da Equação 3.13.

$$\delta = 2 \cdot \text{atan} \left( \frac{\sum Z/2}{R_{LI}} \right) \quad (3.13)$$

A partir do  $\delta$  obtido para o alcance resistivo interno, calcula-se a nova taxa de variação da resistência aparente com o auxílio da Equação 3.10 e, segundo a Equação 3.11 o novo *offset*. Logo, na Equação 3.12, o novo alcance resistivo do limite interno é definido.

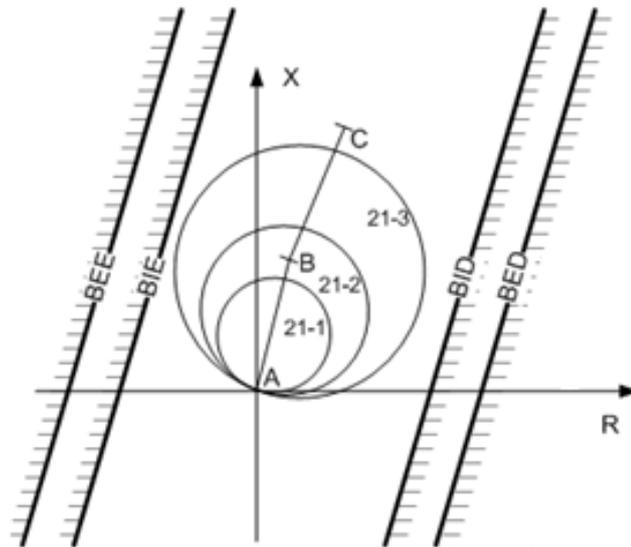
### 3.5.2 Método Duplo Blinder (DB)

Este método faz uso de o mesmo princípio de funcionamento do Método das Características Concêntricas, no qual é analisada a taxa de variação da impedância aparente de sequência positiva vista pelo relé (AMBEKAR; DAMBHARE, 2013). Para tanto, mede-se o tempo que a impedância aparente leva para atravessar a região entre dois limites (*blinders*).

Se os *blinders* forem configurados em paralelo à impedância da linha, a medição da taxa de variação da impedância será otimizada. Isso ocorre, porque os vetores de impedância normalmente entram nas zonas de proteção com um ângulo próximo ou igual a  $90^\circ$  em relação ao ângulo da linha (PSRC, 2005; AMBEKAR; DAMBHARE, 2013).

Os *blinders* internos (BI) devem ser ajustados fora das zonas de proteção do relé de distância, como demonstrado na Figura 3.5. Eles são divididos em *Blinder* Interno Direito (BID) e *Blinder* Interno Esquerdo (BIE), sendo que suas configurações são espelhadas. Na Equação 3.14, o ângulo do BI é definido através do ângulo do alcance resistivo da maior zona de proteção do relé que deve ser bloqueado quando ocorrer uma condição de oscilação. Assume-se que a impedância total do sistema é igual à soma das suas impedâncias de sequência positiva.

Figura 3.5 – Ajuste dos blinders aplicado em relé mho.



Fonte: (BOLZAN, 2009).

$$Ang_{BI} \leq Ang_{zona3} - \alpha \quad (3.14)$$

Onde:

$Ang_{BI}$  é o ângulo de abertura para o *blinder* interno;

$Ang_{zona_3}$  é o ângulo de abertura para o alcance resistivo da zona de proteção mais externa do relé de distância;

$\alpha$  é a margem de segurança, que vale  $90^\circ$ .

Os *blindings* externos (BE) devem ser definidos de maneira a não atingir os pontos de carga máxima do sistema, com uma margem de segurança (BENMOUYAL; HOU; TZIOUVARAS, 2012). Tendo os ângulos é possível definir a temporização deste método através da Equação 3.15.

$$t_{blinder} = \frac{(Ang_{BI} - Ang_{BE})}{360 \cdot f_{osc}} \quad (3.15)$$

Onde:

$Ang_{BI}$  é o ângulo de abertura para o *blinder* interno;

$Ang_{BE}$  é o ângulo de abertura para o *blinder* externo;

$f_{osc}$  é a máxima frequência de oscilação.

### 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os métodos convencionais para detecção de oscilações de potência, Características Concêntricas e Duplo *Blinder*, quando bem ajustados, possuem a vantagem de detectar oscilações antes que a impedância atinja o interior das zonas do relé, já que são externos à estas. No entanto, os ajustes destes métodos são baseados, principalmente, nas configurações do sistema de transmissão. Uma vez que mudem, é necessário reconfigurá-los para garantir a confiabilidade do sistema.

Todos os métodos foram descritos e analisados teoricamente. Nos capítulos seguintes é realizada uma análise prática dos métodos.

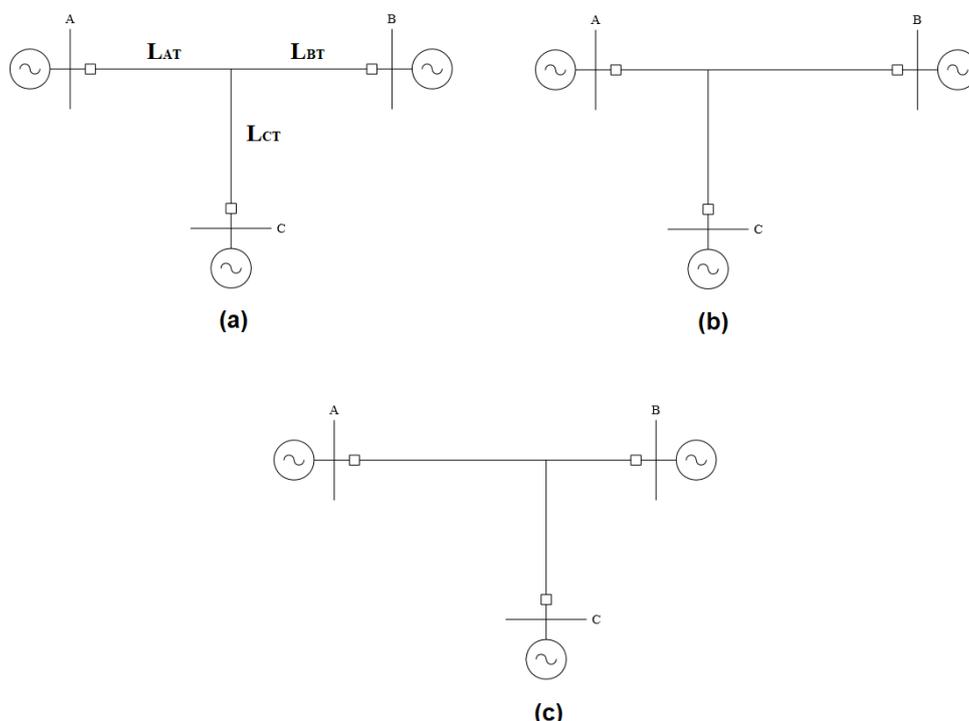
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O sistema elétrico utilizado nos testes é de três terminais e foi descrito em detalhes no Capítulo 3.3. Os parâmetros do sistema são descritos na Tabela A.1 do Apêndice. O sistema foi modelado no Matlab/Simulink.

Para simular diferentes pontos de conexão do terceiro terminal, foram consideradas três configurações. Na configuração I, os segmentos de linha A-T, B-T e C-T têm comprimentos iguais, ou seja,  $L_{AT} = L_{BT} = L_{CT}$ , simulando a conexão do terceiro terminal na metade da linha de transmissão A-B ( $L_{AT} + L_{BT}$ ). As configurações II e III consistem na aproximação do ponto de conexão T da fonte A ou da fonte B, respectivamente. As três configurações simuladas são demonstradas na Figura 4.1-(a), (b) e (c).

Figura 4.1 – Configurações de linha simuladas: (a)  $L_{AT} = L_{BT} = L_{CT}$ , (b)  $L_{AT} = 0,5 L_{CT}$ ;  $L_{BT} = 1,5 L_{CT}$  e (c)  $L_{AT} = 1,5 L_{CT}$ ;  $L_{BT} = 0,5 L_{CT}$ .



Fonte: Do autor.

A partir das configurações I, II e III, os métodos para bloqueio de oscilação de potência, Características Concêntricas e Duplo Blinder, são avaliados perante oscilações de potência. Para simular as frequências de oscilação foi fixado 60 Hz para a fonte da LT A ( $f_A$ ), enquanto as fontes da LT B ( $f_B$ ) e da LT C foram variadas de 1 a 7 Hz ( $f_C$ ).

#### 4.2 CONFIGURAÇÃO I: $L_{AT} = L_{BT} = L_{CT}$

No Quadro 4.1 é possível observar as respostas dos métodos para as frequências de oscilação ( $f_{osc}$ ) simuladas, onde 1 equivale ao bloqueio do relé de distância, isto é, operação correta, e 0 equivale a operação incorreta, isto é, casos que não ocorre bloqueio do relé de distância.

Quadro 4.1 – Resposta dos Métodos de Bloqueio de Oscilação de Potência para a Configuração I.

Caso	$f_{osc}$			Relé <sub>A</sub>		Relé <sub>B</sub>		Relé <sub>C</sub>	
	$f_A$	$f_B$	$f_C$	CC	DB	CC	DB	CC	DB
1	60	61	63	1	1	1	1	1	1
2	60	63	62	1	1	1	1	1	1
3	60	64	64	1	1	1	1	1	1
4	60	64	65	0	1	1	1	1	1
5	60	64	66	1	0	0	1	1	1
6	60	64	67	0	0	0	0	1	1
7	60	65	64	1	1	1	1	1	1
8	60	65	67	0	0	0	0	0	0
9	60	66	64	1	0	1	0	1	1
10	60	66	67	0	0	0	1	0	0
11	60	67	64	0	1	1	0	0	0
12	60	67	65	0	0	0	0	0	0
13	60	67	66	0	0	0	0	0	0
14	60	67	67	1	1	1	1	1	1

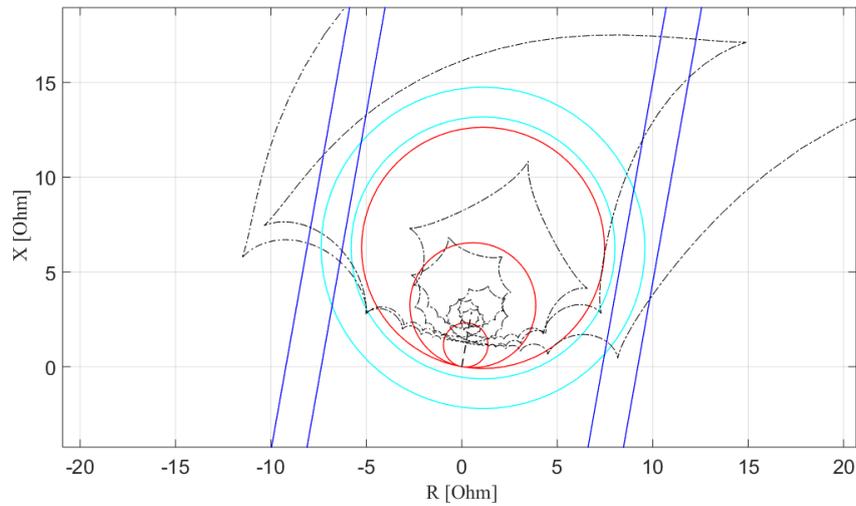
Fonte: Do autor.

A Figura 4.2 mostra o relé A, bem como, os dois métodos de bloqueio para o caso 6 da Tabela acima ( $f_A = 60Hz$ ,  $f_B = 64Hz$  e  $f_C = 67Hz$ ).

A Fig. 4.3 apresenta, através de níveis lógicos 1 e 0, o trip da zona mais externa do relé (Trip Z3) de distância para as mesmas condições de oscilação de potência da Fig. 4.2. Nos casos de oscilações como esta, os métodos de bloqueio não obtiveram bons resultados ao não detectar a oscilação de potência e bloquear a atuação do relé distância, ou seja, ao não apresentar nível lógico 1 no mesmo momento que a zona de proteção do relé de distância apresentou nível lógico 1. Isso aconteceu em função dos ajustes de tempo e distância entre as regiões pré-determinadas do bloqueador de oscilação mostrarem-se insuficientes.

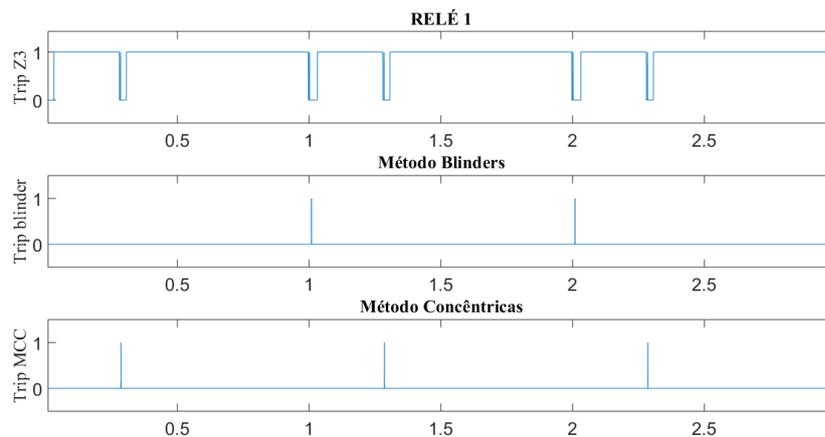
O comportamento dos métodos para uma oscilação como a do caso 1 ( $f_A = 60Hz$ ,  $f_B = 64Hz$  e  $f_C = 67Hz$ ) é apresentado na Figura 4.4. Ao comparar a Figura 4.3 com a Figura 4.4, percebe-se que oscilações de frequência mais severas fazem com que a trajetória da impedância cruze diversas vezes pela zona de proteção do relé de distância. Isto quer dizer que, para oscilações mais severas, aumentam as chances de os métodos para bloqueio do relé de distância atuarem incorretamente e o sistema de potên-

Figura 4.2 – Trajetória da impedância vista pelo relé A para  $f_A = 60Hz$ ,  $f_B = 64Hz$  e  $f_C = 67Hz$ .



Fonte: Do autor.

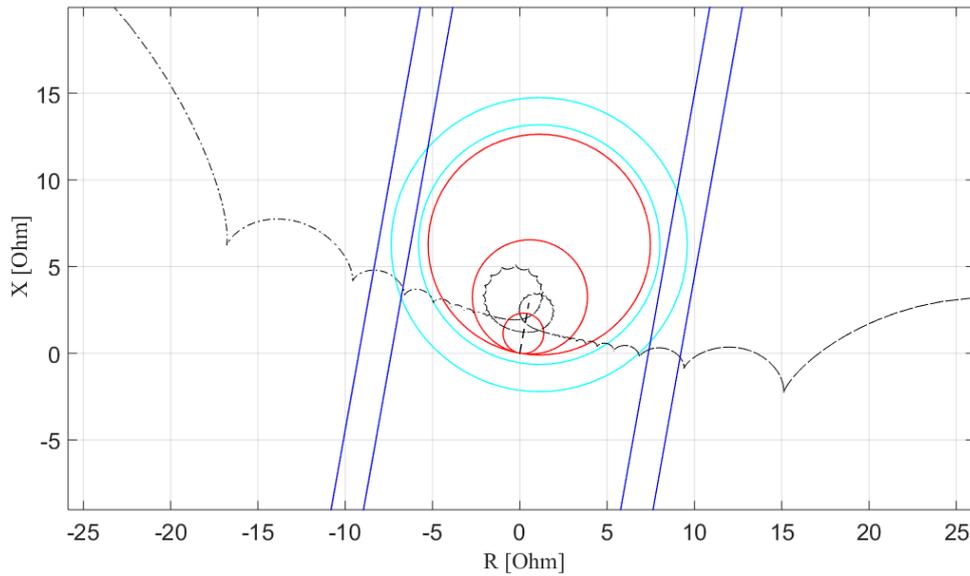
Figura 4.3 – Trip da zona mais externa do relé de distância A e dos métodos para  $f_A = 60Hz$ ,  $f_B = 64Hz$  e  $f_C = 67Hz$ .



Fonte: Do autor.

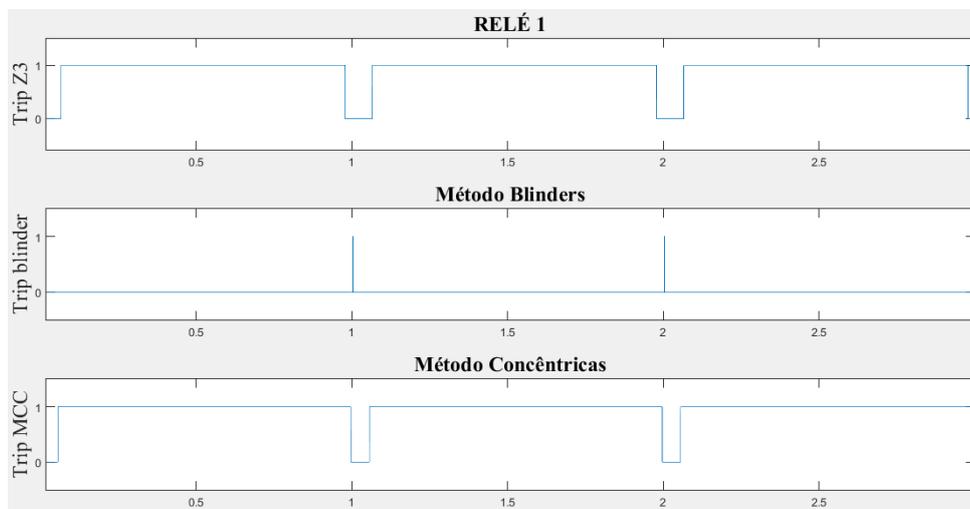
cia ser levado ao colapso. O mesmo é possível constatar ao comparar as Figuras 4.3 e 4.5. Na Figura 4.5, aconteceu *trip* da zona mais externa do relé de distância diversas vezes. Constatou-se, inclusive, que os métodos, CC e DB, não deram *trip* em diversos destes casos e, desta forma, o relé de distância atuou em uma situação sem necessidade devido ao não funcionamento correto dos métodos para bloqueio de oscilação de potência.

Figura 4.4 – Trip da zona mais externa do relé de distância A e dos métodos para  $f_A = 60Hz$ ,  $f_B = 61Hz$  e  $f_C = 63Hz$ .



Fonte: Do autor.

Figura 4.5 – Trip da zona mais externa do relé de distância A e dos métodos para  $f_A = 60Hz$ ,  $f_B = 61Hz$  e  $f_C = 63Hz$ .



Fonte: Do autor.

#### 4.3 CONFIGURAÇÃO II: $L_{AT} = 0,5 L_{CT}$ ; $L_{BT} = 1,5 L_{CT}$

O Quadro 4.2 demonstra o comportamento dos métodos para as mesmas frequências de oscilação ( $f_{osc}$ ) apresentadas no Quadro 4.1.

Constatou-se que ao comparar a Configuração I com a Configuração II, as zonas de proteção do relé de distância  $R_A$ , para o segundo caso, ficaram maiores. Isso acontece, porque ao definir, no Capítulo 3.4, a maior zona de proteção do relé de distância, ocorreu o aumento em 50% do comprimento da LT B, o que faz a impedância desta aumentar. Desta forma, a capacidade de carga do sistema é reduzida. Já, as zonas de proteção do relé  $R_B$  foram diminuídas, provocando o efeito contrário, ou seja, é possível aumentar a capacidade de carga do sistema sem provocar atuações indevidas da proteção. Isso pode ser afirmado para este caso em que as impedâncias por comprimento de linha dos trechos A-T, B-T e C-T são iguais, conforme descrito no Apêndice A.

Quadro 4.2 – Resposta dos Métodos de Bloqueio de Oscilação de Potência para a Configuração II.

Caso	$f_{osc}$			$Relé_A$		$Relé_B$		$Relé_C$	
	$f_A$	$f_B$	$f_C$	CC	DB	CC	DB	CC	DB
1	60	61	63	1	1	1	1	1	1
2	60	63	62	1	1	1	1	1	1
3	60	64	64	1	1	1	1	1	1
4	60	64	65	1	1	0	1	1	1
5	60	64	66	1	1	0	0	1	1
6	60	64	67	0	0	0	0	1	1
7	60	65	64	1	1	0	0	1	1
8	60	65	67	1	0	0	0	0	0
9	60	66	64	1	0	1	0	1	1
10	60	66	67	1	0	0	0	0	0
11	60	67	64	1	1	0	0	0	0
12	60	67	65	0	0	0	0	0	0
13	60	67	66	0	0	0	0	0	0
14	60	67	67	1	1	1	1	1	1

Fonte: Do autor.

#### 4.4 CONFIGURAÇÃO III: $L_{AT} = 1,5 L_{CT}$ ; $L_{BT} = 0,5 L_{CT}$

Os casos simulados e os resultados alcançados para a configuração III estão demonstrados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Resposta dos Métodos de Bloqueio de Oscilação de Potência para a Configuração III.

Caso	$f_{osc}$			$Relé_A$		$Relé_B$		$Relé_C$	
	$f_A$	$f_B$	$f_C$	CC	DB	CC	DB	CC	DB
1	60	61	63	1	1	1	1	1	1
2	60	63	62	1	1	1	1	1	1
3	60	64	64	1	1	1	1	1	1
4	60	64	65	0	1	1	1	1	1
5	60	64	66	0	0	1	1	1	1
6	60	64	67	0	0	1	1	1	1
7	60	65	64	1	0	1	1	1	1
8	60	65	67	0	0	1	0	0	0
9	60	66	64	0	0	1	1	1	1
10	60	66	67	0	0	0	1	0	0
11	60	67	64	0	0	1	1	0	0
12	60	67	65	0	0	0	0	0	0
13	60	67	66	0	0	0	0	0	0
14	60	67	67	1	1	1	1	1	1

Fonte: Do autor.

Ao avaliar o comportamento dos métodos para a Configuração III percebe-se que acontece o inverso do evidenciado ao comparar a Configuração I e II, ou seja, as zonas do  $R_A$  do terceiro caso são menores e as zonas de proteção de  $R_B$  ficam maiores.

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando os Quadros 4.2 e 4.3 verificou-se que ao aumentar a zona de proteção, a atuação do bloqueio de oscilação de potência apresentou, em média, melhores resultados que no caso base, onde os segmentos de linha possuem o mesmo comprimento. Enquanto que, ao diminuir as zonas de proteção, a atuação dos bloqueadores apresenta um pior desempenho. No entanto, estes resultados dependem da forma como a trajetória da impedância aparente entra nas zonas do CC e DB, o que acontece de forma aleatória.

Nos casos onde  $f_B = f_C$ , isto é, quando o sistema tem apenas duas frequências de oscilação, o bloqueador de oscilação de potência teve um bom desempenho, independente de qual a configuração estudada, indicando que se o terminal C for aberto, os bloqueadores têm bom desempenho. No entanto, a capacidade de carga da linha é reduzida, pois a zona

de proteção do relé de distância foi aumentada em consequência da corrente de *infeed*, conforme discutido no Capítulo 3.4.

Para os casos de número 1 e 2, que possuem frequências até 4 Hz de variação máxima entre as fontes, os métodos obtiveram resultados satisfatórios, independente de qual relé fez a leitura e de qual configuração é estudada. No entanto, para as demais simulações, com oscilações máximas entre fontes de 4 a 7 Hz, o CC e o DB não foram capazes de bloquear a atuação do relé de distância em inúmeros casos.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os percentuais de atuação correta de cada método para oscilações de potência são demonstrados na Tabela 5.1. Foram considerados os três relés conectados às barras A, B e C do sistema de três terminais descrito no Capítulo 3.3.

Para a construção da Tabela foram analisados os casos descritos nos Capítulos 4.2, 4.3 e 4.4 para as diferentes configurações de linha, nas quais foram variados o ponto de conexão do terceiro terminal.

- Configuração I:  $L_{AT} = L_{BT} = L_{CT}$ ;
- Configuração II:  $L_{AT} = 0,5 L_{CT}$  ;  $L_{BT} = 1,5 L_{CT}$ ;
- Configuração III:  $L_{AT} = 1,5 L_{CT}$  ;  $L_{BT} = 0,5 L_{CT}$ .

Tabela 5.1 – Configurações simuladas a partir da linha de três terminais.

Configuração de linha	<i>Relé<sub>A</sub></i>		<i>Relé<sub>B</sub></i>		<i>Relé<sub>C</sub></i>	
	CC	DB	CC	DB	CC	DB
Configuração I	50 %	50 %	57 %	57 %	64 %	64 %
Configuração II	79 %	57 %	36 %	36 %	64 %	64 %
Configuração III	36 %	36 %	79 %	79 %	64 %	64 %

Fonte: Do autor.

Quando o ponto de conexão do terminal C é no centro do segmento A-B, caso da Configuração I, os relés tiveram desempenho igual ou superior a 50 % em todos os casos simulados. No entanto, para as Configurações II e III, percebeu-se que quando o ponto de conexão do terceiro terminal se aproxima do segmento de linha, no qual o relé que está fazendo a leitura está localizado, os métodos tendem a apresentar resultados melhores.

O Relé C apresentou o mesmo percentual de atuações corretas independente da configuração de linha. Isso acontece porque o comprimento deste segmento de linha não foi variado e, desta forma, está, em todos os casos, localizado a aproximadamente a mesma distância das oscilações de potência.

## 6 CONCLUSÕES

O artigo realizou uma análise da proteção contra oscilação de potência em linhas de três terminais. Os métodos avaliados, Características Concêntricas e Duplo Blinder, se baseiam, principalmente, no equivalente de duas máquinas. A corrente do terceiro terminal faz com que o relé de distância não cubra o mesmo comprimento de linha que no caso de dois terminais, sendo necessário aumentar as suas zonas de proteção.

Os métodos CC e DB apresentam a vantagem de detectar as oscilações antes que a impedância alcance as regiões delimitadas pelo relé de distância. No entanto, para ajustar estes métodos são necessários muitos conhecimentos do sistema e exaustivos estudos de estabilidade devem ser realizados para encontrar uma parametrização correta. Isto evidencia a principal desvantagem destes métodos.

Ao variar o comprimento dos segmentos de linha A-T, B-T e C-T constatou-se que as zonas de proteção do relé de distância seriam aumentadas quando o comprimento de linha fosse diminuído. O aumento das zonas devido ao *infeed* faz com que a capacidade de transmissão de potência pelas linhas reduza, entretanto, a atuação do bloqueio de oscilação de potência apresentou, em média, melhores resultados quando as zonas foram aumentadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELAZIZ, A. Y.; RAHMAN, M. A.; MOUSSA, M. S. Distance protection for multi-terminal transmission line. **2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)**, 2011.

AMBEKAR, V. A.; DAMBHARE, S. S. Comparative evaluation of out of step detection schemes for distance relays. **IEEE Fifth Power India Conference**, 2013.

ANDERSON, P. M. **Power System Protection**. New York: Wiley, 1999. 1330 p.

BENMOUYAL, G.; HOU, D.; TZIOUVARAS, D. Zero-setting power-swing blocking protection. **Schweitzer Engineering Laboratories**, 2012.

BLUMSCHEIN, J.; YELGIN, Y.; KEREIT, M. Proper detection and treatment of power swing to reduce the risk of blackouts. **Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies**, 2008.

BOLZAN, R. **Análise Crítica de Métodos para Bloqueio da Proteção de Distância Durante Oscilações de Potência**. 2009. 84 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. SP: EDUSP, 2007. 378 p.

HOLBACH, J. New out of step blocking algorithm for detecting fast power swing frequencies. **Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources**, 2006.

HOROWITZ, S. H.; PRADKE, A. G. Third zone revisited. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2006.

\_\_\_\_\_. **Power System Relaying**. New York: Wiley, 2008. 398 p.

JONSSON, M.; DAALDER, J. A new protection scheme to prevent mal-trips due to power swings. **IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294)**, 2001.

KHORADSHADI-ZADEH, H. Evaluation and performance comparison of power swing detection algorithms. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, 2005.

MA, J. et al. Distance protection blocking and re-opening scheme in multi-machine power system oscillation scenes. **IEEE Transactions on Electric Energy System**, 2006.

MOONEY, J. P.; FISCHER, N. Application guidelines for power swing detection on transmission systems. **Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources**, 2006.

MOORE, P.; JOHNS, A. New method of power swing blocking for digital distance protection. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, 1996.

NAYAK, P. K.; PRADHAN, A. K.; BAJPAI, P. A three-terminal line protection scheme immune to power swing. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 3, p. 999–1006, 2015.

NORTH AMERICAN ELECTRIC RELIABILITY COUNCIL. **The Complexity of Protection Three-Terminal Transmission Lines:** Technical document prepared by the system protection and control task force of the nerc planning committee. North America, 2006. 35 p. Acesso em 06 nov. 2019. Disponível em: <<https://www.nerc.com/comm/PC/System%20Protection%20and%20Control%20Subcommittee%20SPCS%20DL/SPCTF-3TerminalLines091906.pdf>>.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer Relaying for Power Systems.** England: John Wiley Sons, 2009. 326 p.

POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. **TRANSMISSION LINE PROTECTIVE SYSTEMS LOADABILITY:** A report to the power system relay committee of the ieee power engineering society prepared by working group d6. ., 2001. 59 p. Acesso em 06 nov. 2019. Disponível em: <[http://www.pes-psrc.org/kb/published/reports/D6\\_Loadability.pdf](http://www.pes-psrc.org/kb/published/reports/D6_Loadability.pdf)>.

\_\_\_\_\_. **POWER SWING AND OUT-OF-STEP CONSIDERATIONS ON TRANSMISSION LINES:** A report to the power system relaying committee of the ieee power engineering society. ., 2005. 59 p. Acesso em 06 nov. 2019. Disponível em: <[http://www.ewh.ieee.org/r6/san\\_francisco/pes/pes\\_pdf/OutOfStep/PowerSwingOOS.pdf](http://www.ewh.ieee.org/r6/san_francisco/pes/pes_pdf/OutOfStep/PowerSwingOOS.pdf)>.

RINCON, C.; PEREZ, J. Calculating loadability limits of distance relays. **65th Annual Conference for Protective Relay Engineers**, 2012.

ZIEGLER, G. **Numerical Distance Protection: Principles and Applications.** Siemens: Wiley, 2000. 321 p.

## APÊNDICE A – PARÂMETROS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE TRÊS TERMINAIS

O sistema teste, definido no Capítulo 3.1, possui três fontes de alimentação, unidas através do ponto T. O ponto de conexão do terceiro terminal foi conectado em três configurações diferentes, tendo como base o comprimento de 100 km da linha de transmissão de C até T ( $L_{CT}$ ).

As variações dos comprimentos de linha da barra A até a barra T ( $L_{AT}$ ), da barra B até a barra T ( $L_{BT}$ ) e da barra C até a barra T ( $L_{CT}$ ) estão demonstrados na Tabela A.1.

Tabela A.1 – Configurações simuladas a partir da linha de três terminais.

Configuração	$L_{AT}$ (km)	$L_{BT}$ (km)	$L_{CT}$ (km)
I	100	100	100
II	50	150	100
III	150	50	100

Fonte: Do autor.

O relé de distância faz a leitura da variação da impedância aparente de sequência positiva do sistema. Desta forma, define-se as impedâncias de sequência positiva das fontes e das linhas conforme a Tabela A.2.

Tabela A.2 – Parâmetros do sistema de transmissão de três terminais.

Tensão da fonte	Impedância da fonte sequência positiva	Impedância da linha sequência positiva
$E_A = 345 \angle 20^\circ kV$	$Z_A = 0,091 + j \cdot 2.598 \Omega$	$Z_{AT} = 0,075 + j \cdot 0,423 \Omega$
$E_B = 345 \angle 0^\circ kV$	$Z_B = 0,091 + j \cdot 2.598 \Omega$	$Z_{BT} = 0,075 + j \cdot 0,423 \Omega$
$E_C = 345 \angle 10^\circ kV$	$Z_C = 0,091 + j \cdot 2.598 \Omega$	$Z_{CT} = 0,075 + j \cdot 0,423 \Omega$

Fonte: (NERC, 2006).

A partir destes parâmetros é criada a linha de transmissão de três terminais no *software* Simulink. Deste são obtidos os sinais de corrente e tensão utilizados para avaliar os métodos para bloqueio das oscilações de potência.

## APÊNDICE B – PARÂMETROS DE AJUSTE DO RELÉ DE DISTÂNCIA

A validação dos algoritmos de oscilação de potência só foi possível através da concepção de uma lógica de um relé de distância, uma vez que os métodos para detecção de oscilação de potência deve atuar em conjunto com este, bloqueando ou não seu sinal de operação.

Das Equações descritas no Capítulo 3.4 é que são obtidos os tamanhos das zonas de proteção do relé de distância. Na Tabela B.1, a zona 1 consiste menor das zonas de proteção com cobertura de 80% do segmento de linha com menor impedância. As zonas 2 e 3 protegem toda a linha, mais parte ou todo o segmento de linha adjacente mais longo, respectivamente.

Tabela B.1 – Parâmetros de ajuste do relé de distância.

	LT de 2 terminais	LT de três terminais
Zona 1	$7,8 + j \cdot 43,9 \Omega$	$7,8 + j \cdot 43,9 \Omega$
Zona 2	$2,7 + j \cdot 15,2 \Omega$	$22,1 + j \cdot 12,4 \Omega$
Zona 3	$3,4 + j \cdot 19,0 \Omega$	$2,2 + j \cdot 240,3 \Omega$

Fonte: Do autor.

Visando uma melhor coordenação entre os sistemas de proteção de linhas de transmissão adjacentes, a segunda e a terceira zonas de proteção do relé de distância são tradicionalmente temporizadas. A temporização utilizada na zona 2 ( $t_{Z2}$ ) e na zona 3 ( $t_{Z3}$ ) foi de 0,3 e 1,0 segundos, respectivamente.

## APÊNDICE C – PARÂMETROS DE AJUSTE DOS MÉTODOS PARA BLOQUEIO DE OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA

Uma vez definida a característica operacional do relé de distância, pode-se definir os ajustes para os métodos de detecção de oscilação de potência considerados, conforme descrição apresentada na Tabela C.1.

Tabela C.1 – Parâmetros de ajuste dos métodos para bloqueio de oscilação de potência.

CC	DB
$\delta = 90^0$	$Ang_{BE} = 90^0$
$f_{osc} = 60 Hz$	$f_{osc} = 60 Hz$
$t_{cc} = 0,005 s$	$\alpha = 90^0$

Fonte: Do autor.