



CLASSIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE  
TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE UTILIZANDO REDES NEURAIAS  
ARTIFICIAIS

Diego de Souza de Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Sebastião Ércules Melo de Oliveira  
Luiz Pereira Calôba

Rio de Janeiro  
Janeiro de 2016

CLASSIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE  
TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE UTILIZANDO REDES NEURAIAS  
ARTIFICIAIS

Diego de Souza de Oliveira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D. Sc.

---

Prof. Luiz Pereira Calôba, D. Ing.

---

Prof. Marco Antonio Macciola Rodrigues, D. Sc.

---

Prof. Ricardo Mota Henriques, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO DE 2016

Oliveira, Diego de Souza de

Classificação e Localização de Faltas em Sistemas de Transmissão com Compensação Série Utilizando Redes Neurais Artificiais / Diego de Souza de Oliveira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XIV, 159 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Luiz Pereira Calôba

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 136-138.

1. Classificação e Localização de Faltas.
2. Compensação Série. 3. Redes Neurais Artificiais.
- I. Oliveira, Sebastião Ércules Melo de *et al.*
- II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Dedicatória*

*Ofereço este trabalho*

*À minha família*

*Obrigado,*

*Diego*

## **AGRADECIMENTOS**

Meus agradecimentos são para Deus, que está sempre a me indicar o melhor caminho a ser seguido, e para os meus pais, pelo esforço incondicional na minha educação e na trajetória da vida.

Agradeço à minha esposa, Priscilla, meu amor, minha amiga e que nunca me impediu de sonhar. Minha grande companheira de todos os momentos.

Meus sinceros agradecimentos aos meus orientadores, Professores Sebastião e Luiz Calôba pelo irrestrito apoio durante toda esta jornada de pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CLASSIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE  
TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE UTILIZANDO REDES NEURAIAS  
ARTIFICIAIS

Diego de Souza de Oliveira

Janeiro/2016

Orientadores: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Luiz Pereira Calôba

Programa: Engenharia Elétrica

Esse trabalho tem como principal objetivo avaliar o desempenho de um esquema de detecção, classificação e localização de faltas em sistemas de transmissão com compensação série utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA), a partir da análise dos sinais trifásicos de tensões e correntes pós-falta obtidos de ambos os terminais da linha. A arquitetura das RNA foi definida a partir de conjuntos de dados de treinamento, validação e teste provenientes de um banco de dados gerado através de simulações dos casos de curto-circuito em um sistema de transmissão de alta tensão. As simulações foram realizadas com auxílio do software MATLAB e a modelagem dos elementos feita em sua toolbox "*Simulink*", a partir de modelos dos elementos disponíveis na biblioteca de sistemas de potência "*SimPowerSystems*".

São apresentados resultados que destacam as dificuldades de sistemas convencionais de proteção de distância sob o ponto de vista da compensação série. São enfatizados efeitos como os da ressonância subsíncrona, da componente DC e da ação da proteção de sobretensão de capacitores série com varistores de óxido de zinco (MOV) sobre a medição da impedância nos relés convencionais e os impactos causados por estes efeitos no desempenho das RNA.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

CLASSIFICATION AND FAULT DISTANCE LOCATION FOR SERIES  
COMPENSATED TRANSMISSION SYSTEMS USING ARTIFICIAL NEURAL  
NETWORKS

Diego de Souza de Oliveira

January/2016

Advisors: Sebastião Ércules Melo de Oliveira

Luiz Pereira Calôba

Department: Electrical Engineering

This work has as main objective the performance evaluation of a detection, classification and fault location scheme in transmission systems with series compensation using Artificial Neural Networks (ANN), starting from the analysis of the post-fault three-phase signals of voltages and currents obtained from both line terminals. The RNA architecture was set from training, validation and testing data sets contained in database generated through simulation of short-circuit situations on a high voltage transmission system. The simulations were performed using MATLAB software and modeling of elements carried out in its toolbox "*Simulink*" from models of system elements available in the power system library "*SimPowerSystems*".

Results are presented highlighting the difficulties of conventional distance protection schemes from the point of view of the series compensated systems. Emphasis is given to the effects associated to the subsynchronous resonance and DC current components, to the action of series capacitors overvoltage protection using metal oxide varistor protection (MOV) on the impedance measurement in conventional relays and the impacts of these effects on the RNA performance.

## ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Histórico .....	2
1.2.	Localização de Falhas em Sistemas de Transmissão .....	5
1.3.	Objetivo .....	8
1.4.	Estrutura do Texto .....	9
2.	PROTEÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS .....	11
2.1.	Transformador de Corrente e Transformador de Potencial .....	11
2.2.	Relés .....	17
2.2.1.	Relé de Sobrecorrente.....	18
2.2.2.	Relé Direcional .....	23
2.3.	Proteção de Distância .....	24
2.3.1.	Relé de Impedância .....	25
2.3.2.	Relé de Admitância .....	30
2.3.3.	Relé de Reatância .....	31
2.3.4.	Efeitos da Resistência de Falta Sobre a Proteção de Distância .....	32
2.3.5.	Efeitos Decorrentes da Compensação Série .....	33
2.3.6.	Saturação dos Transformadores de Corrente.....	34
2.4.	Processamentos dos Dados .....	34
2.4.1.	Filtragem Anti-aliasing.....	35
2.4.2.	Taxa de Amostragem e Efeito Aliasing.....	36
2.4.3.	Estimação dos Fasores na Frequência Fundamental .....	38
2.4.3.1.	Algoritmo de Fourier.....	39
2.4.3.2.	Algoritmo Cosseno.....	42
2.4.4.	Detecção do Instante de Falta.....	43
3.	REDES NEURAIS ARTIFICIAIS .....	46
3.1.1.	Modelo do Neurônio Artificial .....	47
3.1.2.	Tipos de funções de Ativação.....	48
3.1.3.	Arquitetura das RNA.....	52
3.1.4.	Processos de Aprendizagem .....	54

3.1.5. Os Perceptrons de Múltiplas Camadas e seu Treinamento.....	55
3.1.6. Algoritmo Levenberg-Marquardt .....	59
4. O SISTEMA ANALISADO .....	62
4.1. Topologia do Sistema de Transmissão .....	62
4.2. Transdução do Sinal de Corrente.....	64
4.3. Transdução do Sinal de Tensão .....	67
4.3.1. Modelagem do Divisor Capacitivo de Potencial .....	68
4.3.2. Especificação do Divisor Capacitivo e Transformador de Potencial para o Sistema Analisado. ....	69
4.4. Modelagem da Compensação Série .....	70
4.5. Varistor de Óxido de Zinco (MOV) .....	71
4.6. Esquema Completo para a Classificação e Localização de Falhas.....	74
5. EFEITOS DA PRESENÇA DA COMPENSAÇÃO SÉRIE SOBRE A OPERAÇÃO DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO.....	76
5.1. Medição da Tensão .....	76
5.1.1. Medição da Tensão Atrás da Compensação Série .....	77
5.1.2. Medição da Tensão Após a Compensação Série .....	78
5.2. Inversão da Tensão .....	78
5.3. Inversão da Corrente.....	81
5.4. Proteção do Capacitor Série.....	81
5.5. Presença de Oscilações Subsíncronas nos Sinais .....	84
5.6. Análise de Desempenho dos Canais de Transdução.....	85
5.6.1. Presença de Oscilações Subsíncronas.....	86
5.6.2. Presença de Componentes DC .....	99
6. SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	106
6.1. Variações das Condições de Curto-Circuito.....	106
6.1.1. Pré-Processamento e Normalização dos Dados.....	108
6.2. Arquitetura da RNA de Classificação.....	110
6.3. Arquitetura das RNA de Localização .....	117
6.3.1. Trecho 1 .....	117
6.3.2. Trecho 2 .....	121

6.3.3. Trecho 3 .....	124
6.3.4. Resultados das Simulações .....	128
6.3.5. Coeficiente de Correlação Linear de Pearson.....	130
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	133
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	136
APÊNDICE A.....	139

## PRINCIPAIS SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

A / D	=	Analógico / Digital
BCS	=	Banco de Capacitor Série
BP	=	BackPropagation = Propagação para trás
CA	=	Corrente Alternada
DC	=	Direct Current = Corrente Contínua
DCP	=	Divisor Capacitivo de Potencial
FF	=	Fase-Fase
FFT	=	Fase-Fase-Terra
3F	=	Trifásico
FS	=	Fator de Sobrecorrente
FT	=	Fase-Terra
LDF	=	Localização de Faltas
LM	=	Levenberg-Marquardt
LT	=	Linha de Transmissão
M	=	Múltiplo do Relé
MATLAB	=	Matrix Laboratory
ME	=	Mean Error
MLP	=	Multi Layer Perceptron = Perceptron multi-camada
MSE	=	Mean Square Error = Erro Médio Quadrático
RMSE	=	Root Mean Square Error = Raiz do Erro Médio Quadrático
TC	=	Transformador de Corrente
TDC	=	Transformada Discreta Cosseno
TDF	=	Transformada Discreta de Fourier
TP	=	Transformador de Potencial

$b_k$	=	bias do neurônio
$C_1$	=	Capacitância equivalente superior do DCP
$C_2$	=	Capacitância equivalente inferior do DCP
$C_F$	=	Capacitância do filtro analógico
$f_0$	=	Frequência fundamental (Hz)
$f_A$	=	Frequência de amostragem (Hz)
$f_c$	=	Frequência de corte do filtro de Butterworth (Hz)
$f_S$	=	Frequência síncrona (Hz)
$f_{MAX}$	=	Frequência máxima do sinal amostrado $i_{EXC}$
$I_{cc}$	=	Corrente de curto-circuito
$i_{EXC}$	=	Corrente de excitação do TC
$i_m$	=	Corrente de magnetização do TC referida ao secundário
$i_{mv}$	=	Corrente de magnetização do TP referida ao secundário
$i_p$	=	Corrente no enrolamento primário do TC
$i_{pV}$	=	Corrente no enrolamento primário do TP
$i'_p$	=	Corrente no primário do TC referida ao secundário
$i'_{pV}$	=	Corrente no primário do TP referida ao secundário
$i_R$	=	Corrente de perdas magnéticas do TC referida ao secundário
$i_{RV}$	=	Corrente de perdas magnéticas do TP referida ao secundário
$i_S$	=	Corrente no enrolamento secundário do TC
$i_{SV}$	=	Corrente no enrolamento secundário do TP
$K_1$	=	Constante de operação do relé de impedância
$K_2$	=	Constante de restrição do relé de impedância

$L_{BV}$	=	Indutância da carga do transformador de potencial
$L_D$	=	Indutância do reator do divisor capacitivo de potencial
$L_F$	=	Indutância do filtro analógico
$L_m$	=	Indutância de magnetização do transformador de corrente
$L_{mv}$	=	Indutância de magnetização do transformador de potencial
$L_P$	=	Indutância do primário do TC referida ao secundário
$L_{PV}$	=	Indutância do primário do TP referida ao secundário
$L_S$	=	Indutância do enrolamento secundário do TC
$L_{SV}$	=	Indutância do enrolamento secundário do TP
$L'_{SV}$	=	Indutância total no circuito secundário do TP ( $L_{SV} + L_D$ )
$NPC$	=	Número de pontos amostrados por ciclo
$R$	=	Parte resistiva da impedância vista pelo sistema de proteção
$R_{ad}$	=	Resistência (adicional) de carga do TC
$R_{arco}$	=	Resistência do arco elétrico
$R_B$	=	Resistência do sinal de tensão de saída do TC
$R_{BV}$	=	Resistência de carga do transformador de potencial
$R_D$	=	Resistência do reator do divisor capacitivo de potencial
$R_F$	=	Resistência do filtro analógico
$R_m$	=	Resistência de perdas magnéticas do TC
$R_{mv}$	=	Resistência de perdas magnéticas do TP
$R_P$	=	Resistência do enrolamento primário do TC
$R_{PV}$	=	Resistência do enrolamento primário do TP

$R_s$	= Resistência do enrolamento secundário do TC
$R_{SV}$	= Resistência do enrolamento secundário do TP
$R'_{SV}$	= Resistência total no circuito secundário do TP ( $R_{SV} + R_D$ )
$RTC$	= Relação de transformação do transformador de corrente
$RTP$	= Relação de transformação do transformador de potencial
$v_k$	= Saída do combinador linear do neurônio
$v_0$	= Tensão fase-neutro desenvolvida no circuito de transmissão no ponto de localização do relé (entrada do DCP)
$v'_0$	= Tensão $v_{0p}$ referida ao secundário do TP
$v_p$	= Tensão fase-neutro de saída do divisor capacitivo antes do reator do DCP
$v'_p$	= Tensão $v_p$ referida ao secundário do TP
$w_{km}$	= Peso sináptico relacionando a entrada $m$ ao neurônio $k$
$X_L$	= Parte indutiva da reatância vista pelo sistema de proteção
$X_C$	= Reatância capacitiva da compensação série
$X_m$	= Conjunto de sinais de entrada do neurônio
$y_k$	= Conjunto de sinais de saída do neurônio
$\varphi(\cdot)$	= Função de ativação do neurônio

## 1. INTRODUÇÃO

Sistemas de transmissão de energia elétrica estão expostos a falhas devido a causas mais variadas, entre elas: falhas em equipamentos, descargas atmosféricas e outros fatores externos, tais como vegetação em contato com as linhas de transmissão, vento e queimadas. Tendo em vista que, dentre os equipamentos de um sistema, a linha de transmissão é um dos que está mais sujeito a defeitos, o principal objetivo dos sistemas de proteção de linhas de transmissão é impedir que tais defeitos comprometam a integridade do sistema elétrico, de transformadores e de geradores, preservando a confiabilidade e a continuidade do fornecimento de energia elétrica.

Quando da ocorrência de uma falta, o papel dos sistemas de proteção é de eliminá-la o mais rápido possível para garantir que o sistema fique exposto às sobrecorrentes durante o menor intervalo de tempo possível, a fim de mitigar as consequências dos danos devidos a esforços elétricos e estruturais. No entanto, sistemas convencionais de proteção de distância revelam dificuldades frente a curtos-circuitos quando aplicados a sistemas longos de transmissão com compensação série.

Inicialmente o trabalho apresenta resultados de revisão bibliográfica cronológica incorporando alguns dos principais trabalhos desenvolvidos nesta área e, em seguida, discorre sobre os principais tópicos relacionados à proteção de linhas de transmissão, métodos de localização de faltas, redes neurais artificiais (RNA) e compensação série em linhas de transmissão. De forma detalhada, aborda a proteção em linhas de transmissão equipadas com capacitores série, apresentando características típicas destas instalações, como a proteção dos capacitores série e os desafios que estes elementos impõem aos relés para proteção destas linhas.

## 1.1. Histórico

A compensação série em sistemas de transmissão de longas distâncias tem sido uma opção eficiente e economicamente atrativa para elevar a capacidade de transmissão e os limites de estabilidade dos SEP. A utilização de Banco de Capacitor Série (BCS), no entanto, representa um desafio para os engenheiros de sistemas de potência no que diz respeito aos aspectos relacionados à interação entre a capacitância da compensação série e a indutância natural das linhas de transmissão.

Trabalhos recentes discorrem acerca do comportamento de sistemas de transmissão de energia sob o ponto de vista da compensação série. Uma abordagem dos efeitos adversos resultantes da interação entre sistemas compensados e o eixo de turbogeradores de máquinas térmicas é feita em (TAVARES, 2005), onde são discutidos aspectos de modelagem de máquinas síncronas considerando a inclusão do efeito dos BCS no surgimento de uma ou mais frequências subsíncronas no sistema compensado.

Com o aumento contínuo da disponibilidade de recursos digitais e seu emprego em sistemas de potência, mais especificamente no campo da engenharia de proteção, os sistemas de proteção digitais tem sido aprimorados em decorrência da maior aplicabilidade dos sistemas de computação, resultando ainda na melhoria nos processos de digitalização de sinais e resposta de filtros digitais e tornando tais sistemas mais rápidos e confiáveis, principalmente em relação aos sistemas de proteção convencionais. Uma avaliação detalhada das dificuldades para ação correta de um sistema de proteção baseado em relés digitais para linhas de transmissão compensadas por capacitores série é feita em (OLIVEIRA, 2005), onde são investigados os efeitos da compensação série sob a impedância vista pelos relés de distância a partir do comportamento dos canais transdutores de tensão e corrente em condições de curto-circuito.

Em (SANTOS, 2006) e (MOURA *et al*), é feita uma análise da resposta de algoritmos numéricos de proteção frente a situações de faltas em sistemas com compensação série e do desempenho de diferentes filtros digitais utilizados na estimação dos fasores. Em (LIMA, 2006) é estabelecida uma comparação dos relés distância com relés de sobrecorrente e diferenciais, destacando as principais vantagens e desvantagens da aplicação destes relés sob diversos aspectos operacionais dos SEP, inclusive no contexto da

aplicação da compensação série. Em (SANTOS, 2007) é feita uma avaliação detalhada do efeito do acoplamento em sistemas de transmissão em circuito-duplo sob o desempenho da proteção de distância. Em (SOUZA, 2007) é apresentada uma técnica de localização automática de faltas em LT de circuito duplo a partir de dados de corrente e tensão obtidos nos dois terminais de ambos os circuitos para os quais a metodologia proposta utiliza matrizes que transformam linhas de circuito duplo em dois circuitos perfeitamente desacoplados para, em seguida, serem tratados como dois circuitos simples pelo método de localização.

Com o aumento de publicações relacionadas ao tema inteligência computacional, com os recentes avanços nas técnicas de Redes Neurais Artificiais (RNA) e a difusão de softwares para projetos de RNA, observa-se nas últimas duas décadas o surgimento de diversos trabalhos direcionados para aplicações de RNA em Sistemas Elétricos de Potência (SEP). (HAQUE *et al*, 2000) fornece uma visão geral de aplicações de RNA em operação e controle de Sistemas de Potência, mencionando as áreas que merecem mais destaque em termos de publicações, tais como diagnóstico e localização de faltas, previsão de carga, estabilidade transitória, despacho econômico e avaliação de segurança.

Em (OLESKOVICZ *et al*, 2001) é introduzida uma aplicação em que o esquema de proteção proposto é subdividido em módulos de detecção, classificação e localização utilizando as tensões e correntes amostradas no período pós-falta como dados de entrada das RNA.

Em (ROSELLI, 2007) são abordados aspectos de saturação de TC sob condições de curto-circuito e indicado que é possível utilizar uma RNA para mitigar os efeitos da saturação destes TC, fato que compromete fortemente o desempenho dos sistemas convencionais de proteção de distância. (GOMES *et al*, 2009) apresenta uma aplicação de RNA para localização de faltas em linhas de transmissão a partir da análise espectral da corrente de fuga em situações de falta. Neste caso, os padrões de entrada para a RNA são provenientes das diversas decomposições harmônicas de corrente de fuga que, por sua vez, contém a informação sobre a falta. (BASHIER *et al*, 2012) utiliza abordagem semelhante a de (OLESKOVICZ *et al*, 2001), porém, a tarefa de localização da falta é cumprida aplicando-se o conceito de zonas de proteção, ou seja, a resposta do algoritmo de localização é a zona de proteção à qual determinada falta pertence. (RAYBOLT,

2011) sugere um esquema completo de classificação e localização de faltas para um sistema de transmissão em circuito duplo com curto-circuito de diferentes tipos e em diferentes localizações ao longo do sistema e apresenta resultados que mostram que o acoplamento mútuo entre as fases de um circuito duplo não afetam significativamente a precisão da RNA utilizadas para este fim. Para este caso, o esquema proposto, além de identificar o tipo de falta, informa a localização exata da incidência da falta, e não apenas a zona de proteção envolvida.

Ainda no campo de proteção de distância, em (BORGES, 2007) é feita uma abordagem da presença de compensação série em linhas de transmissão sob a ótica do efeito não linear provocado pela ação da proteção de sobretensão de capacitores série com varistores de óxido de zinco sobre o desempenho de um sistema de proteção. Para a simulação deste sistema é proposto um algoritmo para o mapeamento da queda de tensão do conjunto banco de capacitores-varistor de modo a compensar o efeito não linear provocado pela compensação série, permitindo assim melhorar o desempenho do sistema de proteção de distância. Em (SOLAT *et al*, 2012) é feita uma abordagem semelhante, onde é proposta uma aplicação em sistemas de transmissão compensados com TCSC (do inglês *Thyristor Controlled Series Capacitor*) através de um esquema de proteção adaptativo. Este sistema permite estimar a tensão sobre os terminais do TCSC durante as situações de curto-circuito e compensá-la diretamente no relé de distância, para mitigar os efeitos sobre a medição da impedância aparente.

Diversos outros trabalhos de pesquisa voltados para aplicação de RNA no campo de proteção de distância mostraram resultados satisfatórios e deram suporte ao desenvolvimento deste trabalho, embora não tenham sido mencionados aqui neste espaço. Novos trabalhos de novos autores e também de autores que já concentram suas pesquisas nesta área há algum tempo seguem sendo publicados contribuindo para que as soluções aproximem-se cada vez mais das necessidades dos sistemas de potência reais.

## **1.2. Localização de Falhas em Sistemas de Transmissão**

As faltas envolvendo curto-circuito em sistemas de transmissão são responsáveis pelo surgimento instantâneo e indesejável de correntes elevadas que percorrem os componentes do sistema durante o curto. A preocupação principal com este fenômeno é não só com a magnitude destas correntes, mas também com o seu tempo de duração, ou seja, o intervalo de tempo entre o surgimento e a extinção da mesma através da abertura do circuito sob falta.

A linha de transmissão corresponde ao elemento do SEP mais susceptível à faltas e estas podem ocorrer devido a diversos fatores tais como descargas atmosféricas, tempestades com ventos fortes, contato com a vegetação que cresce sob a linha, queimadas, colisão de balões e falhas nos elementos do próprio sistema como danos estruturais em torres de transmissão e isoladores.

Para que os elementos que compõem o SEP estejam sujeitos às elevadas correntes ocasionadas pela falta durante o menor tempo possível - a fim de evitar problemas relacionados à perda de estabilidade e danos materiais como superaquecimento e danos estruturais devidos às forças mecânicas envolvidas - um sistema eficiente de proteção deve atuar para que o circuito sob falta seja desligado e isolado do restante do sistema tão logo o defeito seja detectado. Não menos importante, a tarefa de localização de faltas deve cumprir de forma eficiente e o mais exata possível, a fim de que o ponto de ocorrência do defeito seja rapidamente localizado pelas equipes de manutenção e o fornecimento normal de energia seja reestabelecido, afetando minimamente os consumidores e preservando os índices de confiabilidade e continuidade do fornecimento.

A técnica mais antiga de localização de faltas em sistemas de transmissão é baseada em inspeção visual da linha que é feita por equipes que percorrem os trechos supostamente envolvidos na falta. No entanto, este método rudimentar, mas que mostrou-se muito útil no passado, é comprometido por fatores físicos como comprimento da linha, topologia do terreno e condições climáticas no momento da inspeção. Considerando que para o gerenciamento da operação dos SEP dispõe-se cada vez mais de recursos computacionais e que os consumidores se mostram cada vez mais exigentes por respostas mais rápidas e maior qualidade da energia, este método de localização está obsoleto e outras técnicas mais rápidas e robustas são necessárias.

A Figura 1.2.1 traz um resumo das técnicas mais conhecidas para localização de faltas (LDF).

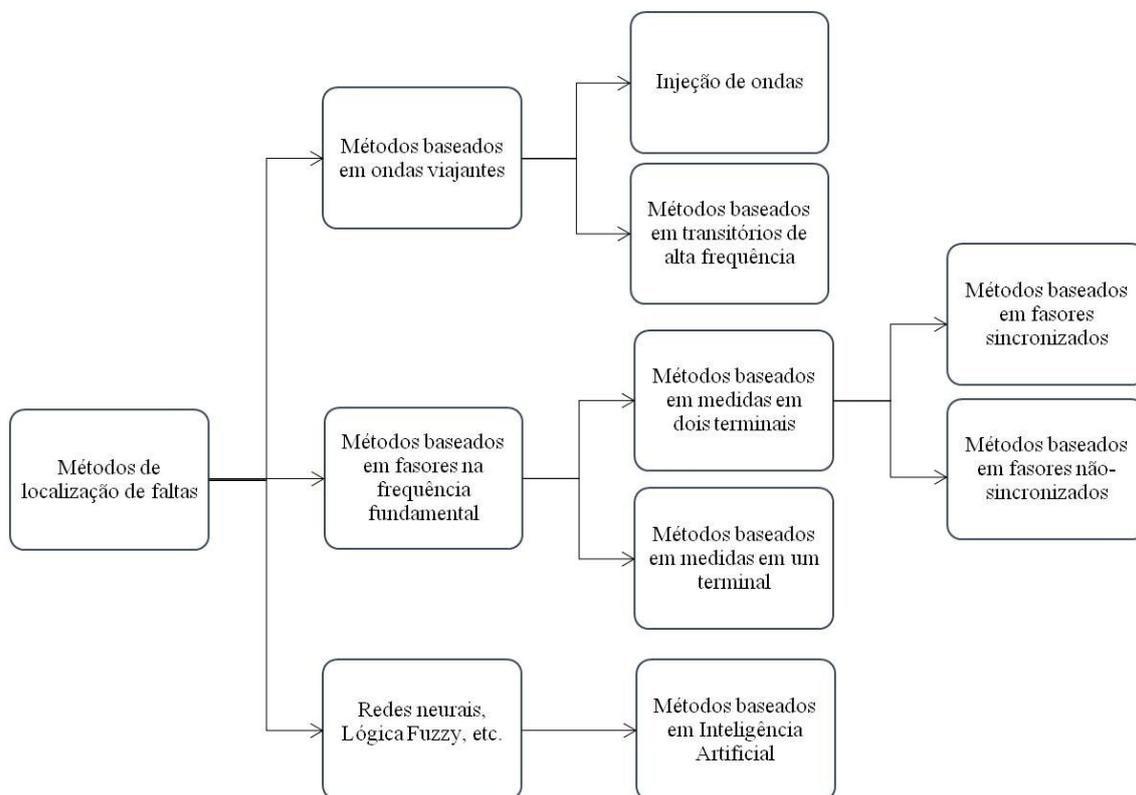


Figura 1.2.1 - Métodos de localização de faltas em sistemas de transmissão

As principais técnicas de LDF baseiam-se no reconhecimento das formas de onda de tensão e corrente obtidas no(s) terminal(ais) da linha protegida. A saber:

**1. Métodos baseados em transitórios de alta frequência:** A ideia principal por trás destes métodos está na determinação do tempo total gasto pela onda viajante para viajar desde o ponto onde a mesma foi injetada até o ponto onde a falta está localizada. Outras abordagens deste método residem no reconhecimento do comportamento de sinais transitórios gerados durante o curto. Tais transitórios consistem em sinais de alta frequência que trafegam à velocidades próximas à velocidade da luz, sofrem reflexão nos extremos da linha protegida e nos pontos de descontinuidade (onde supostamente ocorreu a falta) e se sobrepõem ao conteúdo na frequência fundamental dos sinais de

interesse utilizados nos métodos de LDF. Estes métodos se utilizam das informações importantes contidas nos transitórios de alta frequência, pois as características destes sinais são uma função do tipo e do ponto de ocorrência da falta.

**2. Métodos baseados em fasores de frequência fundamental:** Estes métodos baseiam-se na medição da impedância aparente através de fasores de tensão e corrente em regime permanente obtidos na frequência fundamental. A distância de uma determinada referência até o ponto de ocorrência da falta é calculada a partir da impedância da linha sob falta, podendo ser utilizados para o cálculo desta impedância registros oscilográficos obtidos de um terminal ou, a fim de aumentar a precisão da tarefa de localização da falta, de dois ou mais terminais do trecho protegido (LIMA, 2013) (KAWADY *et al*, 2003). Tais métodos são muito empregados atualmente em sistemas convencionais de proteção, com medição da impedância através de relés de distância.

**3. Métodos baseados em inteligência artificial:** Os trabalhos dissertando sobre Inteligência Artificial (IA) para aplicações em sistemas de potência e, principalmente, para diagnóstico de curto-circuito em sistemas de transmissão, têm contribuído significativamente para enriquecer a literatura disponível no campo de proteção de distância. Isso se deve principalmente ao aumento de softwares de simulação em engenharia que disponibilizam *tool box* para projetos de RNA. Estas ferramentas possuem rotinas pré-definidas para o treinamento e testes que vão definir as arquiteturas mais apropriadas para cada tipo de aplicação, com a grande vantagem de que treinamentos e testes necessários poderem ser feitos utilizando dados *off-line*. Dentre as técnicas mais difundidas a partir destes estudos estão as Redes Neurais Artificiais (RNA), objeto desta dissertação, Algoritmos Genéticos e Lógica Fuzzy.

O esquema de classificação e localização de faltas proposto na presente dissertação utiliza RNA definidas a partir de dados obtidos em ambos os terminais de cada trecho. As técnicas de LDF baseadas em medições em dois ou mais terminais aumentam a quantidade de informações disponíveis para a tarefa de localização, melhorando assim o desempenho do procedimento em relação às abordagens utilizando dados de um terminal (SAHA *et al*, 2010) e (PEREIRA). Como o objetivo é propor um sistema completo

de classificação e localização de faltas que possa ser utilizado em aplicações práticas, é importante destacar a exigência de que os dados obtidos em barramentos localizados a grandes distâncias<sup>1</sup> um do outro sejam obtidos de forma sincronizada e, para isso, se faz necessário que um sistema *GPS - Global Positioning System* esteja disponível.

Para evitar divergências na localização da falta em esquemas de LDF operando em tempo real, baseados em dados *on line*, os registros oscilográficos provenientes de dois ou mais terminais devem ser obtidos em uma mesma referência temporal, garantindo que as informações de fase da oscilografia tenham sido medidas em instantes sincronizados com a mesma referência de tempo para todas as demais medidas do sistema e, assim sendo, sejam transferidas para um único ponto e utilizadas na etapa de processamento digital.

### **1.3. Objetivo**

A presente dissertação tem por objetivo oferecer uma contribuição para os estudos de sistemas digitais de proteção de distância, apresentando um esquema completo de classificação e localização de faltas baseado em inteligência artificial.

A partir da discussão dos efeitos presentes em sistemas de transmissão com compensação série que afetam diretamente o desempenho dos esquemas convencionais de proteção, este trabalho apresenta uma base teórica acerca dos elementos que compõem um sistema típico de proteção de distância, técnicas de aquisição e tratamento de dados, compensação série em linhas de transmissão e redes neurais artificiais (RNA), destacando as vantagens de se utilizar a inteligência artificial em aplicações de SEP.

O desempenho do método baseado em RNA é analisado com base em sinais de corrente e tensão trifásicas medidos em ambos os terminais de cada trecho, após sua passagem pelas etapas de filtragem analógica e digital para extração da amplitude dos fasores à frequência fundamental. Tais sinais irão compor a base de dados de onde serão

---

<sup>1</sup> Tipicamente, a distância entre duas subestações varia de 100 km a 250 km, podendo atingir distâncias superiores a 300 km.

formados os conjuntos de treinamento e teste para definição das arquiteturas das RNA de classificação e localização e foram obtidos a partir de simulações feitas no SEP apresentado no capítulo 4, cuja representação é feita em ambiente MATLAB a partir dos recursos do *Simulink* que disponibiliza rotinas específicas criadas para representação de cada um de seus elementos.

Desta forma, para a avaliação de desempenho da metodologia proposta, o sistema foi submetido a diversas simulações, contemplando as condições de falta que estariam presentes em um sistema real, levando-se em consideração a variação da localização do ponto de aplicação da falta, a resistência de falta, o ângulo de incidência e o tipo de falta.

#### **1.4. Estrutura do Texto**

Com o objetivo de apresentar e analisar todos os aspectos relacionados ao tema escolhido para esta pesquisa, a presente dissertação de mestrado foi organizada em oito capítulos.

O capítulo 1 apresenta uma revisão bibliográfica sobre a proteção de sistemas elétricos, com ênfase em aspectos relacionados à proteção de distância, à localização de faltas em sistemas de transmissão e à aplicações de RNA em sistemas elétricos de potência, destacando alguns trabalhos importantes em cada um destes temas. Em seguida, são expostos os objetivos desta dissertação.

No capítulo 2 é apresentada uma base teórica contemplando os principais fundamentos e conceitos associados aos sistemas de proteção de distância, como relés, transformadores de corrente e de potencial e algumas informações de interesse sobre a problemas enfrentados pela proteção de distância. É feita uma análise completa sobre os aspectos de projeto dos canais de transdução de corrente e tensão, passando pelo estágio de filtragem analógica, teoria de amostragem de dados e algoritmos de filtragem digital.

No capítulo 3 é apresentada a base teórica de redes neurais artificiais, destacando fundamentos sobre treinamento das RNA, características gerais de cada tipo de arquitetura e paradigmas de aprendizagem. São conceitos importantes para o entendimen-

to das capacidades de aprendizagem e de generalização das RNA, características fundamental para aplicações em sistemas de potência.

O capítulo 4 apresenta as características gerais do sistema elétrico analisado com informações sobre a topologia e a modelagem de seus elementos. Aqui é descrito o dimensionamento dos diversos componentes como dos transformadores de corrente (TCs) e de tensão (TPs), dos divisores capacitivos de potencial e é feita a modelagem dos canais de transdução de corrente e tensão ao qual estão inseridos. São apresentados os valores dos reatores da compensação *shunt* e da compensação série com a sua respectiva proteção contra sobretensões. Por fim, é apresentado o esquema completo de classificação e localização com algoritmo baseado em RNA.

No capítulo 5 são discutidos os problemas relacionados às dificuldades encontradas para a proteção de distância convencional frente à presença da compensação série em sistemas de transmissão. Dentre os efeitos estão as componentes aperiódicas (nível DC) e as componentes de frequências subsíncronas presentes nos sinais trifásicos de corrente e tensão após o curto. São apresentados alguns resultados das simulações para análise de desempenho dos canais analógicos de transdução de corrente e tensão.

O capítulo 6 apresenta as premissas adotadas para as simulações e a metodologia utilizada para definição das arquiteturas de RNA de forma que apresentem o menor erro nas tarefas de classificação e localização. Em seguida, os resultados das RNA são discutidos, analisando-se a influência das condições de falta no desempenho das mesmas.

O capítulo 7 consolida as conclusões finais e algumas sugestões para desenvolvimentos futuros no campo da proteção de distância baseada em inteligência computacional em sistemas com compensação série.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas que deram suporte ao desenvolvimento deste trabalho e o apêndice A, com os resultados das RNA na tarefa de localização de faltas.

## 2. PROTEÇÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS

A proteção dos sistemas elétricos é desenvolvida com o objetivo de garantir a continuidade do fornecimento de energia elétrica, de preservar o sistema de danos provenientes de falhas no seu funcionamento e reduzir o risco de acidentes com as pessoas envolvidas na operação e manutenção do mesmo. Portanto, um sistema de proteção visa não somente disponibilizar, à carga, energia elétrica de forma ininterrupta, mas também pode ser interpretado como uma medida de segurança no que diz respeito a perdas financeiras e risco de vida.

Neste capítulo serão apresentados os conceitos envolvendo proteção de distância convencional e informações sobre comportamento e especificação de seus principais componentes como relés, transformadores de corrente e de tensão, estes últimos constituindo os canais de transdução dos sinais que servirão de entrada às RNA. Por fim, serão abordados aspectos de filtragem anti-aliasing e algoritmos de filtragem digital. Este desenvolvimento é feito com o objetivo de auxiliar o entendimento das principais dificuldades encontradas pela proteção de distância associadas à presença das componentes DC e subsíncronas presentes nos sinais trifásicos de corrente e tensão que chegam aos relés eletromecânicos e aos relés digitais, estes últimos, já no formato numérico discretizado.

### 2.1. Transformador de Corrente e Transformador de Potencial

Neste item são discutidas características dos primeiros elementos do sistema de proteção desde o sistema elétrico de potência até os elementos atuadores. Os sistemas elétricos operam em níveis de tensão e corrente elevados sendo necessária, também para fins de segurança, a utilização de transformadores de corrente TC e dos transformadores de potencial TP.

Transformador de corrente: O TC tem por finalidade transmitir a corrente primária aos instrumentos de medição e proteção em níveis inferiores aos praticados nos sistemas elétricos, além de propiciar um isolamento adequado entre o circuito de alta ten-

são e os instrumentos de medição e proteção, sempre reproduzindo no seu secundário uma grandeza (tensão ou corrente) proporcional, em escala reduzida, da grandeza primária do sistema.

Os TC possuem diferenças quanto à sua aplicação nos sistemas dividindo-se em TC de proteção e TC de medição. Um TC de medição deve manter o erro de sua classe de exatidão para valores normais da corrente de carga, considerando que esta pode ser até 10% superior à corrente nominal do TC. Suas classes mais usuais são: 0,3; 0,6 e 1,2%. O TC voltado para proteção deve manter sua exatidão até o seu erro aceitável para correntes de falta de  $20 \times I_{nom}$ . Em síntese, a aplicação voltada para medição requer boa exatidão do TC para instrumentos sob condições normais de tensão e corrente de linha e, em contrapartida, a aplicação voltada à proteção requer bom desempenho do TC para instrumentos em situações de falha no sistema, ou seja, situações onde o valor da corrente pode chegar a muitos múltiplos do seu valor nominal e o nível de tensão se estabelece abaixo dos valores nominais.

Uma das principais características construtivas dos núcleos magnéticos do TC decorre justamente desta diferença onde, para o TC de medição, os núcleos possuem seção menor que o núcleo do TC de proteção, exatamente com o objetivo de saturarem durante o curto e assim limitarem o valor da sobretensão aplicada aos equipamentos de medição a ele conectados. Quando há necessidade de se alimentar os circuitos tanto de medição, como de proteção, na maioria das vezes são utilizados TC separados para cada uma dessas aplicações.

De forma semelhante aos transformadores de força convencionais, o TC possui uma determinada relação entre os números de espiras primárias e secundárias. No entanto, a forma pela qual essa relação é representada difere da terminologia usual. Aplicando a lei de Hopkinson (ROSELLI, 2007) aos enrolamentos primário e secundário, resulta a Equação 2.1.1, que descreve a relação entre as correntes primárias e secundárias.

$$I_p.N_p = I_s.N_s \therefore I_s = I_p \cdot \frac{N_p}{N_s} \Rightarrow I_s = \frac{I_p}{RTC} \quad (2.1.1)$$

sendo  $I_p$  a corrente primária,  $I_s$  a corrente secundária e RTC a relação de transformação do TC.

O enrolamento secundário de um TC deve manter-se sempre em curto-circuito ou conectado a uma baixa impedância. Portanto, a tensão secundária limita-se a poucos volts em condições normais de carga e algumas dezenas ou centenas de volts em condições de máxima corrente de falta. Estes valores de tensão estão dentro de limites razoáveis no que diz respeito aos níveis de isolamento econômico no circuito secundário.

Em condições normais de operação, o TC deve ser capaz de suportar continuamente a máxima corrente primária normal de carga e, sob condições de falta, devem estar aptos a suportar as correntes elevadas de curto-circuito durante os pequenos períodos de tempo em que assim permanecerem. Nos Estados Unidos, onde vigora a ASA (*American Standard Association*), a corrente secundária nominal contínua máxima é de 5A e é em função deste valor que são indicadas as relações de transformação dos TC, tais como 200:5 ou 400:5. No Brasil, onde vigora a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), este valor de corrente nominal secundária contínua máxima utilizada também pode ser de 1A.

Pela norma P-EB-251 da ABNT, as correntes primárias do TC são de: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000 A. Os valores sublinhados correspondem aos valores utilizados pela ASA.

Algumas definições inerentes ao TC se fazem necessárias, a saber:

*Fator de sobrecorrente do TC*: denomina-se fator de sobrecorrente (FS) do TC a relação entre a máxima corrente de curto-circuito suportada pelo primário do TC e a sua corrente primária nominal, para que o erro da classe de exatidão seja mantido. Em aplicações de proteção, os erros admissíveis são de 2,5% e 10%. O fator de sobrecorrente é mostrado na Equação 2.1.2.

$$FS = \frac{I_{p \text{ max de curto circuito}}}{I_{p \text{ nom.}}} \quad (2.1.2)$$

Os valores do fator de sobrecorrente do TC são normalizados de acordo com a norma reguladora do sistema elétrico vigente em cada país. Pela ASA, o valor padronizado para o fator de sobrecorrente é 20 e, pela ABNT, os valores são 5, 10, 15 e 20.

*Classe de exatidão do TC:* de acordo com a ASA, o erro do TC é definido como sendo a máxima tensão que pode aparecer no enrolamento secundário do TC no instante em que é percorrido pela máxima corrente de curto-circuito, respeitando seu fator de sobrecorrente. Pela ASA, podem-se adotar as combinações de classe de exatidão mostradas na Expressão 2.1.1.

$$\left[ \begin{array}{c} 2,5 \\ 10 \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} L \\ H \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} 10 \\ 20 \\ 50 \\ 100 \\ 200 \\ 400 \\ 800 \end{array} \right] \quad (2.1.1)$$

Para exemplificar, considere um TC classe **10L200**. Isto equivale a dizer que trata-se de um TC de baixa reatância (*low reactance*) e que, quando a corrente secundária de curto-circuito for de 100A, poderá ter no máximo 200V para que o erro da classe de exatidão não exceda 10%.

A classe de exatidão segundo a ABNT é a máxima potência aparente, em VA, que se pode conectar ao secundário do TC em regime permanente (5A), de tal modo que, quando ocorrer a máxima corrente de curto-circuito limitada pelo FS, o erro do TC não exceda o da sua classe de exatidão.

Pela ABNT, as possíveis combinações da classe de exatidão são mostradas na Expressão 2.1.2.

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2,5 \\ 10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 \\ 10 \\ 15 \\ 20 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 12,5 \\ 25 \\ 50 \\ 100 \\ 200 \\ 400 \\ 800 \end{bmatrix} \quad (2.1.2)$$

Para exemplificar, considere a nomenclatura TC classe **A2,5F10C400**; a letra A quer dizer que trata-se de um TC de alta reatância, o 2,5 representa o erro admissível da classe de exatidão, o F antecipa que, em seguida será citado o fator de sobrecorrente que, neste caso, vale 10 e o C quer significa que a carga secundária em VA do TC para corrente de 5A equivale, neste caso, a 400VA.

*Fator térmico do TC (FT)*: o fator térmico corresponde ao valor que se deve multiplicar a corrente primária nominal para se obter a máxima corrente primária que se pode suportar em regime permanente, operando-se o TC em condições normais e sem que seja excedido o limite térmico especificado pela sua classe de isolamento. O fator térmico é dado pela Equação 2.1.3.

$$F.T = I \frac{P_{máx}}{I_{p_{nom}}} \quad (2.1.3)$$

*Limite térmico do TC (LT)*: ou Limite de Corrente de Curta Duração Para Efeito Térmico, é a máxima corrente primária simétrica que o TC pode suportar pelo tempo determinado de 1s, com o enrolamento secundário em curto-circuito, sem exceder os limites de temperatura especificados pela classe de isolamento.

Semelhante ao LT, existe o Limite de Corrente de Curta Duração Para Efeito Dinâmico que é o maior valor eficaz da corrente primária assimétrica que o TC pode suportar pelo tempo de 1s e com o secundário em curto-circuito sem que os esforços eletromecânicos e de aquecimento comprometam a integridade mecânica do TC.

- Transformadores de Potencial: O TP é uma unidade monofásica responsável por transmitir o sinal de tensão a instrumentos de medição, proteção e controle. A alta tensão será a tensão do barramento da linha de transmissão ou do barramento ao qual o primário do TP esteja conectado. A tensão de secundário do TP é normalizada em 115V ou  $115/\sqrt{3} V$ .

Nos transformadores de potencial não há necessidade de se levar em consideração uma série de fatores que foram analisados no caso do TC quando do dimensionamento, pois a ligação em derivação com a rede faz com que as correntes do curto-circuito não tenham a mesma influência que elas têm no TC. A precisão de um transformador de potencial deve ser mantida dentro de determinados limites para fins de medição, o que é consideravelmente mais fácil do que no caso do TC, pois a faixa de tensões é muito menor que a de correntes.

No estudo dos TP, uma terminologia muito utilizada é a potência térmica do TP, que corresponde à máxima potência aparente que o TP pode fornecer, em regime permanente, sem que esta exceda seu limite de elevação de temperatura estabelecido pelo seu isolamento. O valor mais comum de Potência Térmica é 3000 VA.

Na operação em tensões iguais ou acima de 138kV, a utilização do TP eletromagnético comum torna-se construtivamente proibitiva devido ao seu isolamento (o seu isolamento permite aplicações em linhas com tensões de até 69kV). Para que o TP pudesse operar em tais condições, seria necessário adequar sua isolação o que o tornaria pesado e de grandes dimensões. Nestas condições, é exigido um dispositivo auxiliar e o Divisor Capacitivo de Potencial (DCP) é o mais utilizado, sendo instalado na subestação próximo ao barramento da linha de transmissão, um para cada fase. Estes equipamentos são constituídos basicamente de dois bancos de capacitores C1 e C2, associados como na Figura 2.1.1. Mais detalhes sobre o DCP incluindo a modelagem utilizada neste trabalho são apresentados no capítulo 4.

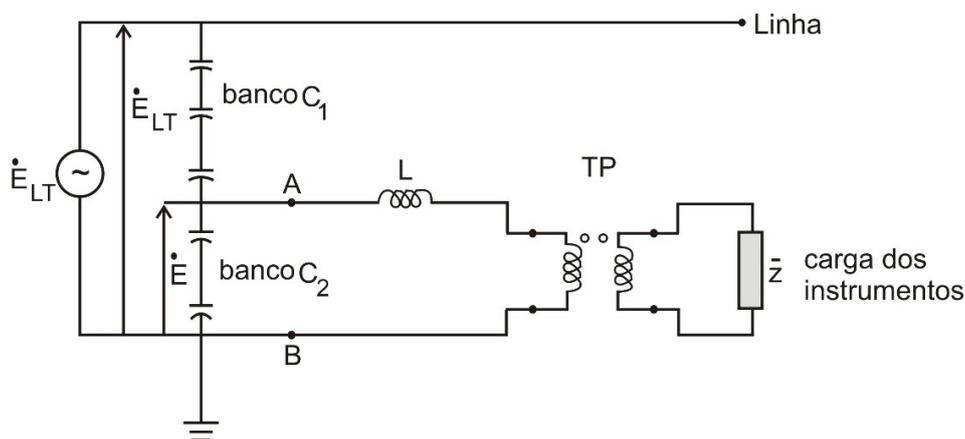


Figura 2.1.1 – Divisor capacitivo de potencial

## 2.2. Relés

O relé corresponde ao elemento fundamental dos sistemas de proteção assumindo funções de detecção, comparação e comando quando de condições indesejáveis ao sistema elétrico dando início, assim, a operações de manobra (acionamento dos disjuntores) e sinalização.

Os diversos tipos de relés podem ser agrupados em algumas categorias, como quanto à grandeza física de atuação (elétrica, mecânica ou térmica), à natureza da grandeza responsável por colocá-lo em funcionamento, ou seja, quanto à natureza da grandeza a que respondem (corrente, tensão, frequência, potência, pressão, etc.), às características construtivas (eletromecânicos, mecânicos, eletrônicos, estáticos, digitais entre outros), à sua funcionalidade (sobrecorrente e subcorrente, direcional de corrente ou potência, tensão ou potência, de distância, diferencial, entre outras), quanto ao posicionamento dos contatos com circuito desenergizado (contato normalmente aberto ou normalmente fechado), quanto à sua aplicação (em máquinas rotativas e estáticas como transformadores, linhas de transmissão, linhas de distribuição aéreas ou subterrâneas, equipamentos em geral), quanto ao tempo de atuação (instantâneo, ou seja, sem retardo proposital e temporizado mecânica, elétrica ou eletronicamente).

Nos sistemas de proteção, os relés atuam em três frentes diferentes. Os relés de atuação primária atuam no sentido de estabelecer, ao redor de cada elemento do sistema

de potência, uma região de proteção separada, com vistas à seletividade. Os relés de atuação secundária são considerados como uma proteção de *backup*, atuando na falha dos relés primários. Só é utilizado, por questões econômicas, para preservar determinados elementos do sistema de potência de situações de curto-circuito. Existem ainda os relés de atuação auxiliar, que possuem função de sinalização, temporização ou atuam como multiplicadores de contatos.

### **2.2.1. Relé de Sobrecorrente**

Os relés comportam-se como sensores que monitoram em tempo integral as condições de operação do sistema elétrico. Quando o sistema é submetido a condições anormais, representadas mais comumente por curtos-circuitos, a corrente proveniente de anormalidade sensibiliza o relé de sobrecorrente e este, por sua vez, entra em operação promovendo a abertura dos disjuntores associados a ele. Com isso, o trecho defeituoso é desligado, permanecendo isolado do restante do sistema.

O relé de sobrecorrente é caracterizado por uma corrente de ajuste (esta corrente de ajuste é denominada “tap do relé”), ou seja, no momento de uma anomalia, quando o parâmetro sensível do relé (no caso a corrente) excede o valor de ajuste do seu sensor, o relé atua instantaneamente ou de forma temporizada, de acordo com a aplicação.

O relé eletromecânico corresponde ao mais usual dos relés e possui como princípio fundamental de funcionamento o movimento mecânico ocasionado basicamente pelo fenômeno de atração eletromagnética. Tais movimentos são responsáveis pelo fechamento e abertura dos seus contatos provocando a atuação do relé.

As duas formas elementares de atuação são baseadas na indução eletromagnética e na atração eletromagnética. Este último assemelha-se a um eletroímã e possui o funcionamento mais simplificado dentre os dois tipos citados acima. O relé de indução eletromagnética (ou relé motorizado, como também é conhecido) representado mais comumente pelo relé tipo medidor de kWh, tem seu princípio de funcionamento baseado no motor de indução, onde o giro de um rotor (oriundo da interação entre o fluxo induzido no rotor e o fluxo aplicado externamente) ocasiona o fechamento de um contato

normalmente aberto do relé que aciona um mecanismo responsável pela abertura do disjuntor associado.

Já o relé de atração eletromagnética, que está apresentado na Figura 2.2.1.1, possui, na sua configuração mais comum, uma parte móvel correspondente a uma alavanca ou braço articulado com um contato metálico em uma das extremidades tal que, quando atraído pela força magnética gerada na parte imóvel do relé, acaba por fechar o circuito C.C. auxiliar produzindo a corrente responsável pela ativação do disjuntor ou dispositivos destinados à sinalização.

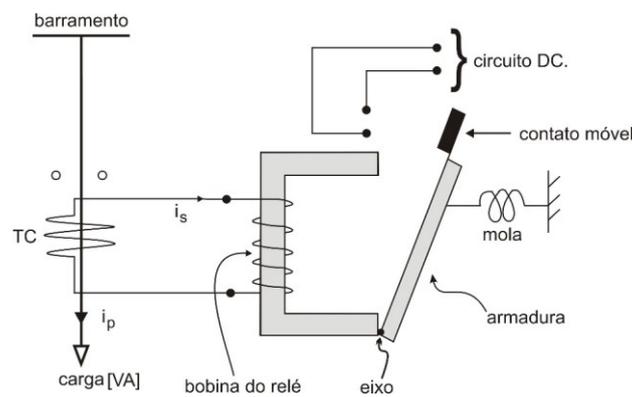


Figura 2.2.1.1 – Relé de alavanca

O relé de atração eletromagnética é posto a operar quando, no momento de uma falha no circuito a ser protegido, a corrente que percorrer o secundário do TC, que é a mesma responsável por alimentar a bobina de magnetização do relé, for superior à menor corrente necessária para gerar um campo magnético suficiente para acionar a alavanca da parte móvel.

Quando o relé encontra-se no limiar de operação, qualquer incremento de corrente percebido pelo secundário do TC (considerando linear o fluxo no interior do núcleo ferromagnético do relé) será suficiente para mover a alavanca e pôr o relé em funcionamento.

Em sistemas de proteção, a fim de garantir uma segura e adequada operação do relé, o tap do relé pode ser ajustado de acordo com a Inequação 2.2.1.1.

$$(1,4 \text{ a } 1,5) \times I_{nom. \text{ de carga}} \leq I_{ajuste \text{ do relé}} \leq \frac{I_{curto \text{ mínimo no final do circuito protegido}}}{1,5} \quad (2.2.1.1)$$

De acordo com a Inequação 2.2.1.1, deve-se deixar uma folga de 40% a 50% na corrente de carga para que o relé absorva, sem operar, as flutuações da carga e também a fim de se absorver os incrementos de carga provenientes de mudanças na configuração natural do sistema (transferência de carga) e futuras expansões.

O tap do relé é escolhido o mais próximo possível do limite inferior da inequação acima para que se tenha garantia de um bom funcionamento. Para tanto, a mínima corrente de curto-circuito, ou seja, aquela que ocorre no final do alimentador onde está posicionada a proteção, é substancialmente maior do que o tap do relé. Isto justifica a presença do fator 1,5 que aparece dividindo o terceiro termo da inequação para que se tenha o mínimo valor da corrente de curto-circuito 50% maior do que o tap do relé. Isto garante uma força magnética agindo na alavanca suficientemente grande tal que sobreponha todos os efeitos adversos ao movimento.

Convencionou-se chamar de Múltiplo (M) do relé o termo utilizado para mensurar quantas vezes a corrente da falta é superior ao tap do relé. O cálculo do múltiplo do relé é mostrado na Equação 2.2.1.2.

$$M = \frac{I_s}{Tap} = \frac{I_p}{RTC \times Tap} \quad (2.2.1.2)$$

A segunda forma de atuação corresponde ao relé de indução. A estrutura apresentada na Figura 2.2.1.2 corresponde ao relé de disco de indução por bobina de sombra.

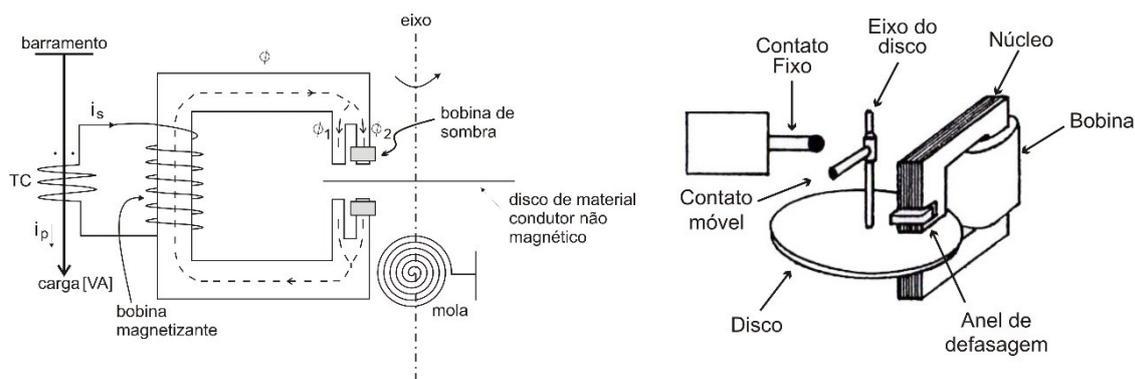


Figura 2.2.1.2 - Relé de disco de indução

O princípio de funcionamento deste relé baseia-se na interação de dois fluxos magnéticos: um primeiro fluxo  $\phi$ , que tem origem na força magnetomotriz gerada pela corrente alternada  $I_s$  que percorre a bobina magnetizante e um segundo fluxo, de oposição à variação do primeiro, originado pela corrente induzida no anel de sombra, de acordo com a Lei de Lenz. Da interação destes dois fluxos resultam  $\phi_1(t)$  e  $\phi_2(t)$ , de acordo com a Figura 2.2.1.2. O fluxo  $\phi_1(t)$  está em fase com o fluxo original  $\phi$ , gerado inicialmente devido à  $I_s$ , e o fluxo  $\phi_2(t)$ , ligeiramente defasado em relação à  $\phi_1(t)$ , percorre o braço do núcleo magnético onde está posicionada a bobina de sombra.

As correntes induzidas por esses campos em um condutor móvel constituído por um disco (como rotor de motor de indução) fazem surgir forças magnéticas associadas e que, por sua vez, proporcionam o conjugado que movimenta o disco móvel. A Figura 2.2.1.3 mostra como estão dispostas sobre o disco as grandezas envolvidas na formação do conjugado magnético. As equações envolvendo as grandezas magnéticas que regem o conjugado magnético responsável pelo movimento do disco são brevemente discutidas.

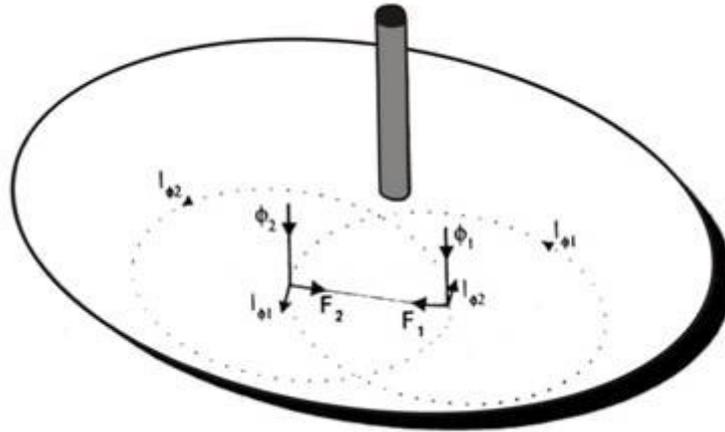


Figura 2.2.1.3 – Correntes induzidas no disco do relé.

Os fluxos que incidem perpendicularmente ao disco possuem comportamento senoidal e, pela Lei de Lenz, induzem tensões que estão em atraso de fase de 90 graus em relação ao fluxo que as originam. As correntes induzidas encontram-se em fase com as respectivas tensões e podem ser expressas genericamente pela Equações 2.2.1.3 e 2.2.1.4.

$$i_1(t) = \frac{e_1(t)}{R} = -\frac{Kn}{R} \frac{d\phi_1(t)}{dt} \quad (2.2.1.3)$$

$$i_2(t) = \frac{e_2(t)}{R} = -\frac{Kn}{R} \frac{d\phi_2(t)}{dt} \quad (2.2.1.4)$$

Sendo,  $\phi_1(t) \approx \Phi_1 \cos(\omega t)$  e  $\phi_2(t) \approx \Phi_2 \cos(\omega t + \theta)$ , R a resistência do disco e K uma constante de proporcionalidade.

Assumindo as direções e os sentidos das grandezas assinaladas na Figura 2.2.1.3, aplicando as devidas substituições com auxílio de algumas relações trigonométricas e considerando que as forças  $F_1$  e  $F_2$  atuam no plano do disco, isto é, são colineares, a força resultante terá a forma  $F_R = F_2 - F_1$  e será proporcional à  $F_R \approx \Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdot \text{sen} \theta$ , sendo  $\theta$  a defasagem entre os fluxos  $\phi_1(t)$  e  $\phi_2(t)$ .

Uma constatação importante seria que, embora as grandezas possuam características senoidais, o torque produzido pela força resultante  $F_R$  é constante, proporcionando, assim, um movimento giratório no disco livre de vibrações.

Pode-se notar que o relé de indução discutido neste item possui como fonte única de energia, a bobina magnetizante excitada pela corrente  $I_s$  do secundário do TC, isto é, o relé possui uma só grandeza de atuação. Sendo assim, este relé não possui característica direcional (o conjugado depende do quadrado de  $I_s$ , pois  $\phi_1(t)$  e  $\phi_2(t)$  foram obtidos desta mesma corrente).

### **2.2.2. Relé Direcional**

Neste item será brevemente apresentado o relé direcional que, quando utilizado em conjunto com o relé de sobrecorrente da seção anterior, confere características radiais a sistemas com configuração em anel.

O relé direcional, ou relé de duas grandezas, como também é conhecido, necessita de duas grandezas de atuação que são a tensão, utilizada como grandeza de polarização e a corrente como grandeza de atuação. Tal relé é utilizado apenas com o objetivo de discriminar a direção da corrente de curto-circuito para, desta forma, auxiliar o funcionamento dos relés que não possuem esta capacidade.

A Figura 2.2.2.1 mostra esquematicamente o relé de sobrecorrente direcional. Observa-se a existência de duas bobinas com conexão em quadratura alimentadas uma pela corrente do sistema e outra pela tensão de polarização. Este tipo de conexão é o mais comum em projetos envolvendo proteção direcional. A corrente da fase a ser protegida entra, através do secundário do TC, pela marcação da bobina de corrente e a tensão de polarização através do secundário do TP.

A característica de direcionalidade é possível devido à comparação espacial dos fasores tensão de polarização e corrente de operação. Na polarização por tensão-corrente, os fasores de tensão e corrente podem estar associados de três formas diferentes, apresentando entre si defasagens de  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ .

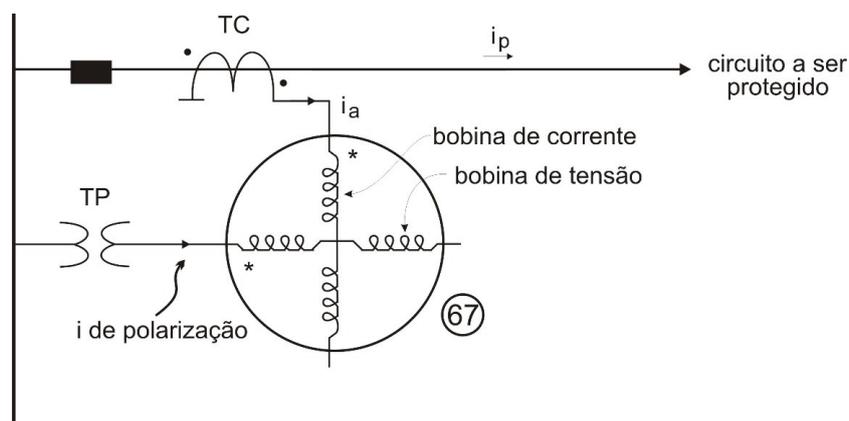


Figura 2.2.2.1 – Diagrama unifilar do relé direcional.

Alguns desenvolvimentos matemáticos e outros conceitos específicos sobre sistemas de proteção convencionais não foram detalhados aqui neste capítulo. Um desenvolvimento mais elaborado sobre transformadores de corrente e os efeitos decorrentes da saturação do seu núcleo, transformadores de potencial, aspectos de seletividade, relés de sobrecorrente instantâneos e temporizados, relés direcionais, diferenciais e outros tipos de relés pode ser encontrado nas referências (KINDERMANN, 1999), (PAITHANKAR, 1998) e (ROSELLI, 2007).

### 2.3. Proteção de Distância

Um sistema de potência está sempre passando por alterações em sua configuração original, seja por incrementos de carga naturais à expansão do SEP e também por manobras (transferência de carga) necessárias para garantir a continuidade do fornecimento de energia elétrica. Isso representa um problema para relés de sobrecorrente que, além de serem relativamente lentos e apresentarem limitações relacionadas à seletividade, têm seu princípio de operação baseado em um ajuste de corrente predefinido para atender determinada configuração do SEP.

A proteção de distância pode ser utilizada para contornar esse problema, pois constitui uma proteção de fácil ajuste e coordenação, já que seu funcionamento é baseado na medição do parâmetro da linha de transmissão desde o ponto de sua instalação até

o ponto da falta, isto é, o relé opera com base na impedância, admitância ou reatância vista pelo relé. Estes parâmetros, que são proporcionais à distância, são comparados com o valor de referência do relé, que delimita uma região no plano R-X. O contorno desta região define a característica de operação do relé e corresponde à impedância (no caso do relé de impedância) da linha protegida. Em situações de falta, caso a impedância vista pelo relé encontre-se no interior desta região, o relé irá operar, enviando o comando para abertura do disjuntor e isolamento do trecho sob falta.

Sob condições normais de operação, a razão entre as amplitudes da tensão e corrente disponíveis nos enrolamentos secundários dos TPs e TCs, respectivamente, representa a impedância de sequência positiva vista pelo relé. Esta impedância deverá ser superior à impedância total da linha e, portanto, o relé não será conduzido a operar. A diferença entre esta impedância medida e a impedância total da linha definida pela característica representa a denominada "impedância de carga".

Os itens subsequentes apresentarão, com auxílio de figuras representando o diagrama R-X, o conceito de proteção de distância e a característica de proteção associada a cada um dos três tipos de proteção de distância.

### **2.3.1. Relé de Impedância**

Este relé possui duas grandezas básicas em sua operação: a tensão, que corresponde à grandeza de restrição à operação e a corrente elétrica como grandeza de operação. Na Figura 2.3.1.1 está representado esquematicamente estrutura eletromagnética referente ao relé de viga balanceada. Observa-se que a tensão produz torque negativo opondo-se à ação de fechamento dos contatos do relé e, em contrapartida, a corrente produz torque positivo agindo, portanto, a favor da ação de fechamento dos contatos do relé.

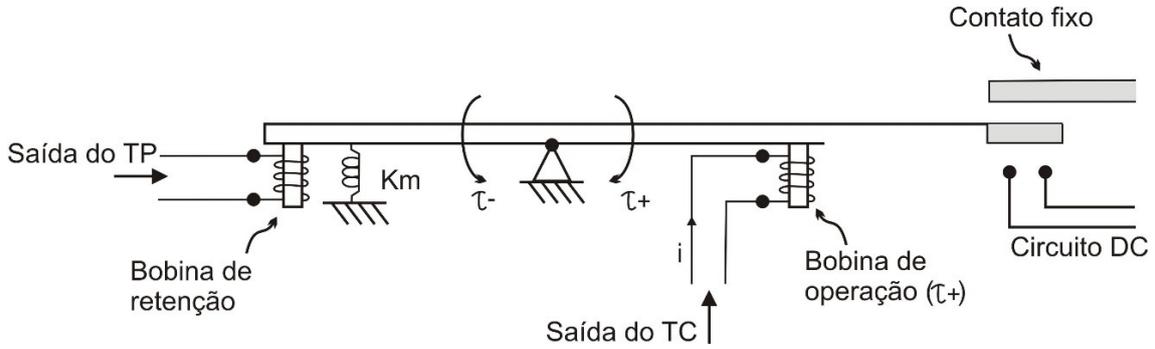


Figura 2.3.1.1 – Princípio de funcionamento do relé de impedância.

Abaixo é demonstrado o raciocínio em que está fundamentada a operação do relé de impedância. O conjugado resultante da ação das forças que agem no braço de alavanca pode ser escrito como  $\tau_{operação} = K_1 I^2 - K_2 V^2 - K_m$  sendo  $K_m$  o conjugado imposto pela mola de restrição. No limiar da operação, ou seja, na situação de equilíbrio onde o conjugado resultante atuando no pivô é nulo, tem-se que  $K_1 I^2 - K_2 V^2 - K_m = 0 \Rightarrow K_2 V^2 = K_1 I^2 - K_m$ . Dividindo ambos os lados da igualdade por  $K_2 I^2$  e, em seguida cancelando os termos comuns ao numerador e ao denominador, resulta:

$$\frac{K_2 V^2}{K_1 I^2} = \frac{K_1 I^2}{K_2 I^2} - \frac{K_m}{K_2 I^2} \Rightarrow Z^2 = \left(\frac{V}{I}\right)^2 = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_m}{K_2 I^2} \quad (2.3.1.1)$$

A Equação 2.3.1.1 representa a impedância vista pelo relé no momento da falta. No momento do curto-circuito, a corrente é elevada e, com isso, esta equação pode ser aproximada para a Equação 2.3.1.2 pois o termo  $\frac{K_m}{K_2 I^2} \cong 0$ .

$$Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} = \text{constante} \quad (2.3.1.2)$$

No plano R-X, a parte real da impedância representa a resistência do loop de falta e a parte imaginária corresponde a reatância vista pelo relé. Sabe-se que o módulo do número complexo que representa a impedância é dado por

$$Z = R + jX = \sqrt{R^2 + X^2} \Rightarrow Z^2 = R^2 + X^2 = K = \text{constante.} \quad (2.3.1.3)$$

Baseado no desenvolvimento realizado até aqui, pode-se definir a característica do limiar de operação do relé de impedância. Através da Equação 2.3.1.3, nota-se que as impedâncias que demarcam os lugares geométricos do limiar de operação do relé formam uma circunferência com centro na origem e raio igual à constante K.

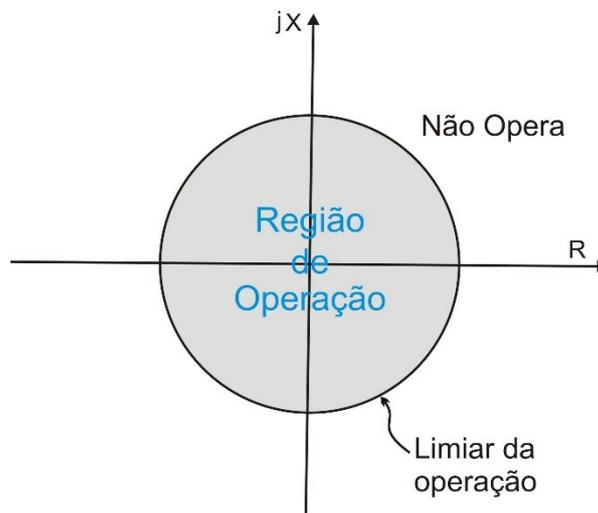


Figura 2.3.1.2 – Limiar de operação do relé de impedância

Para as impedâncias que estão posicionadas sobre a circunferência, o relé encontra-se no limiar de operação. Já para as impedâncias que se encontram no interior da circunferência, o relé opera e, por fim, para impedâncias fora da circunferência o relé não opera.

Desta forma, pode-se notar que o raio da circunferência representa a impedância de ajuste do relé (*tap* do relé), ou seja, o relé opera quando a impedância vista pelo relé

no momento do curto for menor que o raio do círculo do relé e isto ocorre, mecanicamente para o relé convencional analógico, quando o conjugado favorável ao fechamento do contato do relé (conjugado produzido pela corrente de curto-circuito) for superior ao conjugado de restrição. Em outras palavras, sob situações de curto-circuito, a redução do sinal de polarização por tensão (a operação fica menos restrita) acompanhada da elevação da corrente acarreta a redução da impedância do loop de falta, fazendo com que a impedância aparente vista pelo relé excursionasse desde a condição de operação normal até a condição de falta no interior da característica de operação do relé.

Uma desvantagem do relé de impedância é a sua não direcionalidade que pode ser constatada pela simples observação direta do diagrama R-X da Figura 2.3.1.2.

Para melhor explicar a característica não direcional do relé de impedância, considere o sistema da Figura 2.3.1.3, onde é mostrada uma linha de transmissão particionada em dois trechos distintos: um de comprimento  $\overline{AB}$  e outro de comprimento  $\overline{BC}$ . Supondo o relé de impedância ajustado para perceber uma impedância de 80% do trecho  $\overline{BC}$ , a sua região de atuação corresponde a 80% do trecho  $\overline{BC}$ , já que o relé é suposto estar instalado no ponto B. Portanto, com o auxílio do plano R-X da Figura 2.3.1.4, pode-se observar que o relé atuará tanto à jusante quanto à montante do ponto B (80% de  $\overline{BC}$  e 80% do trecho  $\overline{AB}$ , respectivamente, considerando-se os trechos  $\overline{AB}$  e  $\overline{BC}$  do mesmo tamanho). Caso o objetivo seja que o relé de impedância opere somente para impedâncias vistas à frente do ponto B, é necessário que o mesmo seja supervisionado por um relé direcional.

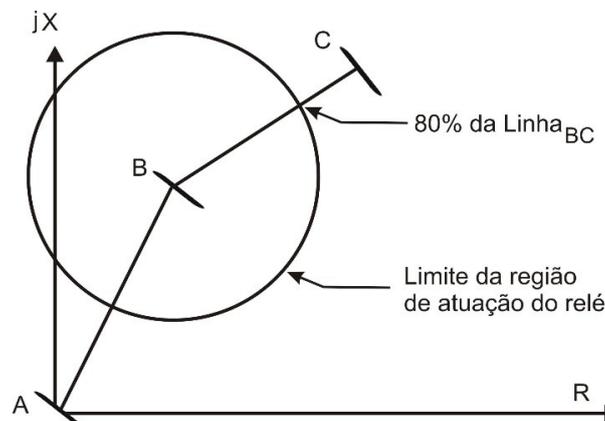


Figura 2.3.1.3 – Região de atuação do relé de impedância

Quando operando juntamente com o relé direcional no SEP, o relé de impedância adquire característica direcional e torna-se capaz de eliminar faltas que ocorram somente à frente do ponto onde está posicionado. Isto permite que o relé de impedância possa ser empregado para proteger um sistema em anel. Tal característica é mostrada na Figura 2.3.1.4.

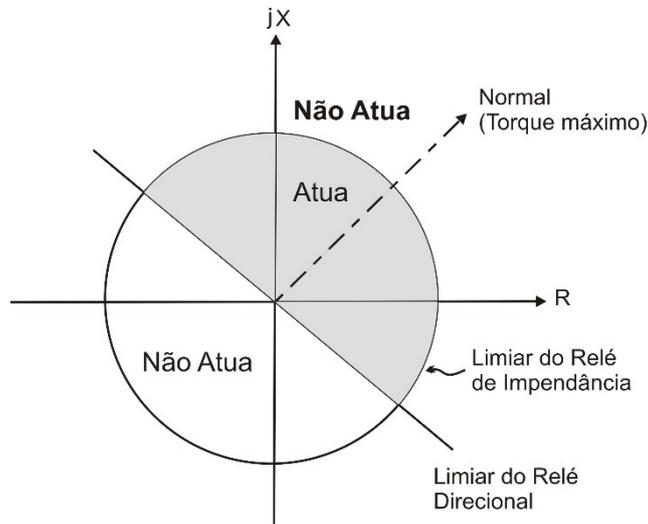


Figura 2.3.1.4 – Diagrama R-X com os relés de impedância e direcional

Outra característica do relé de impedância que deve ser discutida é sua temporização, isto é, a capacidade de agir de forma temporizada em outras zonas de atuação (a zona de 80% do trecho  $\overline{BC}$  discutida no anteriormente refere-se à zona de atuação instantânea do relé de impedância).

Geralmente o relé de impedância é dotado de três zonas de atuação (em alguns casos quatro) correspondendo a três círculos característicos centrados na origem do plano R-X onde as 2ª e a 3ª zonas (zonas secundária e terciária) são temporizadas. Considerando o relé de impedância anterior ajustado para uma impedância equivalente a 80% da linha, o trecho de 80% da linha (1ª zona) à jusante do relé em questão corresponde ao trecho em que o relé atuará de forma instantânea, ou seja, atuará o elemento instantâneo do relé. Já a 2ª zona é ajustada para uma impedância que corresponde a 100% da linha (1ª zona + 20% restantes) mais 50% da linha seguinte. E, por fim, a 3ª zona que é ajustada para abranger os 100% da linha anterior mais 100% da linha seguinte. A 3ª zona

possui um tempo de atuação maior que o da 2ª zona e assim por diante, caso existam outras zonas de atuação temporizada para o relé.

### 2.3.2. Relé de Admitância

Os relés de admitância ou mho possuem princípio de funcionamento um pouco mais complexo que o relé de impedância descrito anteriormente. O desenvolvimento matemático não é apresentado aqui mas pode ser facilmente encontrado na literatura básica sobre proteção. Sua característica de atuação no plano R-X corresponde a uma circunferência que tangencia a origem do sistema de eixos, como mostrado na Figura 2.3.1.1. A partir da fronteira para fora da circunferência (região rachurada), o relé não opera.

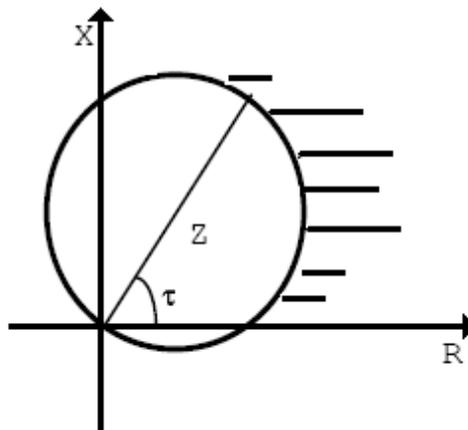


Figura 2.3.2.1 - Diagrama R-X do relé de admitância

Pode-se observar, pela própria característica da circunferência no plano complexo, que o relé de admitância possui característica direcional. Esta é vantagem do relé de admitância com relação ao relé de impedância, que necessita da operação conjunta com um relé direcional. Além disso, a característica do relé mho permite inclinações com a finalidade de promover a correta operação para maiores resistências de falta, já que uma

resistência de falta, dependendo do seu valor, pode levar a impedância do loop de falta para a região rachurada.

Por ser inerentemente direcional, é possível a sua operação em um sistema em anel. No entanto, como a sua característica de operação tangencia a origem do plano R-X, o relé mho pode apresentar dificuldades de operação tanto para faltas internas quanto externas quando da ocorrência do defeito nas proximidades do barramento onde a proteção está localizada. Isto pode levar a uma operação indevida do relé dada a dificuldade que enfrentará na distinção da localização exata da falta. Uma solução para o problema da ocorrência de faltas nas proximidades do barramento onde a proteção está localizada é a polarização cruzada do relé mho que é discutida em detalhes em (LIMA, 2006).

### 2.3.3. Relé de Reatância

Este relé opera com sensibilidade na reatância do sistema e também corresponde a um relé da família dos relés de distância. Possui característica representada no plano R-X por uma reta paralela ao eixo R das resistências, como pode ser visto na Figura 2.3.3.1.

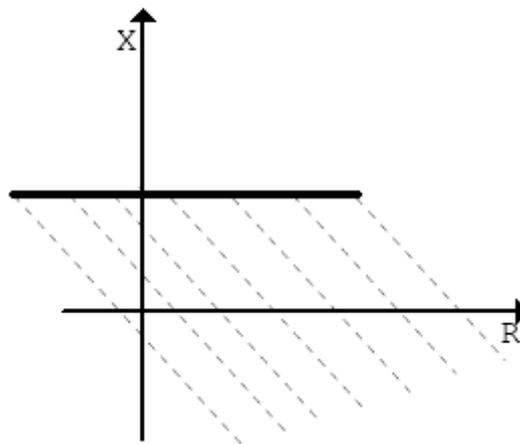


Figura 2.3.3.1 - Diagrama R-X do relé de reatância

A área hachurada, abaixo da reta, corresponde à região de operação do relé de reatância. Acima da reta o relé não opera.

Nota-se que sua característica é aberta (praticamente infinita) fazendo com que o mesmo possa operar para condições normais de carga o que exige, portanto, o auxílio de um dispositivo direcional adicional com característica fechada no plano R-X, por exemplo um relé de admitância, para proporcionar direcionalidade ao relé e também para formar uma zona adicional de atuação (zona temporizada).

Por fim, uma vantagem deste relé é a sua característica de atuação insensível ao efeito das resistências de arco voltaico. Sob este ponto de vista, a sua aplicação em proteção de linhas curtas torna-se especialmente interessante pois, para estas linhas, tal resistência tem, normalmente, grande participação no valor da impedância total da linha.

#### **2.3.4. Efeitos da Resistência de Falta Sobre a Proteção de Distância**

A resistência de falta é a resistência presente entre as fases e a terra ou entre as fases durante a ocorrência de um curto-circuito e deve ser considerada especialmente para linhas de transmissão curtas, onde a impedância longitudinal é relativamente baixa. A resistência de falta é composta tipicamente por outras resistências tais como a resistência de arco voltaico, a resistência de pé-de-torre e outras resistências de contato entre o condutor envolvido e a terra, como galhos de árvore, por exemplo.

Para uma melhor visualização do efeito da resistência de arco, uma aproximação para o cálculo da resistência de arco é dada pela Equação 2.3.4.1, resultado empírico, não linear, que contempla a situação encontrada para o arco elétrico desenvolvido em torno da cadeia de isoladores de linhas de transmissão de alta tensão.

$$R_{arco} = \frac{28708(S + 3vt)}{I^{0,4}} \quad (2.3.4.1)$$

$R_{arco}$ : resistência de arco voltaico [ $\Omega$ ];

$S$ : espaçamento inicial entre os condutores envolvidos [m];

$I$ : corrente de curto [A];

$v$ : velocidade do vento [m/s];

$t$ : tempo de duração do arco (tempo de operação do relé) [s].

Este cálculo é importante principalmente em projetos de proteção envolvendo relés com característica quadrilateral pois a  $R_{arco}$  leva a um incremento da parte resistiva da impedância vista pelo relé e, dependendo do valor, pode resultar em subalcançe da proteção. Os relés de reatância discutidos no item anterior não são influenciados pela presença da resistência do arco elétrico em sistemas radiais.

Em (LIMA, 2006) é apresentada uma discussão detalhada sobre o comportamento das resistências de falta em situações reais. Para estes casos, é razoável considerar que a resistência de pé de torre acaba sendo desprezível para os casos reais com níveis elevados de correntes de falta envolvidos. Excetuando-se a resistência dos objetos que entram em contato com uma ou mais fases da linha e a situação de rompimento de cabos para o solo sem que haja contato com outras fases, a única resistência efetiva que define a resistência de falta é a resistência de arco. Com o objetivo prático de prover proteção para todos os casos possíveis de resistência de falta, é considerado o limite de  $10\Omega$  em cada fase para faltas entre fases e  $20\Omega$  para faltas fase-terra, visto que estas resistências cobrem quase por completo quase todos os casos reais de resistências de falta.

### **2.3.5. Efeitos Decorrentes da Compensação Série**

Como será visto adiante, a compensação série é largamente empregada para otimizar a utilização dos sistemas de transmissão já existentes, possibilitando o aumento da capacidade da LT para transmissão efetiva de energia em regime permanente e melhoria no desempenho dinâmico através do aumento dos níveis de estabilidade. Devido à exposição à sobretensões que excedem os níveis de isolamento do BCS, os capacitores

são providos de proteção contra sobretensões que, durante situações de faltas severas, atuam no sentido de promover um *bypass* dos capacitores. Fora de operação, os capacitores perdem total ou parcialmente sua funcionalidade de reduzir a impedância indutiva da linha de transmissão, oferecendo dificuldade para atuação correta do sistema de proteção de distância.

As referências (BORGES, 2007) e (OLIVEIRA, 2005) apresentam uma base teórica detalhada acerca dos efeitos introduzidos pelos capacitores da compensação série e pelos MOVs. Neste trabalho, este desenvolvimento é apresentado no Capítulo 5.

### **2.3.6. Saturação dos Transformadores de Corrente**

O fenômeno de saturação dos transformadores de corrente (TCs) ocasiona a redução da corrente eficaz no secundário do TC, inserindo, desta forma, um erro no desempenho do canal de transdução de corrente. Este efeito, além de resultar no surgimento de nível DC na corrente secundária do TC, resulta ainda em redução do valor da impedância aparente medida pelo relé de distância e, conseqüentemente, leva o relé ao sobrealcance.

Um estudo detalhado sobre saturação de TCs e uma proposta de correção para este efeito através de RNA é apresentado em (ROSELLI, 2007).

## **2.4. Processamentos dos Dados**

Os sistemas de proteção de distância digitais possuem sua função de proteção específica determinada pelo software que detém o algoritmo de proteção que, por sua vez, processa as amostras digitalizadas dos sinais de corrente e tensão. Neste item serão apresentadas, na mesma ordem em que acontecem, as etapas do processo de obtenção e tratamento destes sinais que são necessárias para possibilitar a utilização de dispositivos microprocessados na proteção de sistemas elétricos de potência.

### 2.4.1. Filtragem Anti-aliasing

O trabalho de condicionamento dos dados que irão servir de *input* às RNA inicia-se ainda nos canais analógicos transdutores de corrente e tensão, através da filtragem analógica. Os registros oscilográficos obtidos a partir dos canais transdutores são portadores de sinais de alta frequência provenientes de transitórios que surgem durante a ocorrência da falta e do próprio processo de transdução analógica e o objetivo desta etapa é filtrar estes sinais indesejáveis que podem interferir na qualidade dos dados.

O erro conhecido como "aliasing" consiste em uma sobreposição de espectros, no qual uma componente de alta frequência superposta ao sinal desejado se manifesta como sendo uma componente de baixa frequência. Para evitar que este erro ocorra durante a fase de processamento digital, é necessária uma medida preventiva chamada filtragem anti-aliasing que, como o próprio nome sugere, tem por finalidade eliminar as altas frequências do espectro. Para isso é utilizado um filtro analógico passa-baixa Butterworth com determinada frequência de corte  $f_c$ . O filtro permite a passagem das componentes do sinal com frequências inferiores à  $f_c$  (banda passante) e praticamente elimina todas as componentes com frequências pertencentes à banda de corte (frequências superiores a  $f_c$ ). O filtro de Butterworth pode ser representado pelo circuito de segunda ordem mostrado na Figura 2.4.1.1. Na Figura 2.4.1.2 são mostradas as formas de onda da tensão original e filtrada.

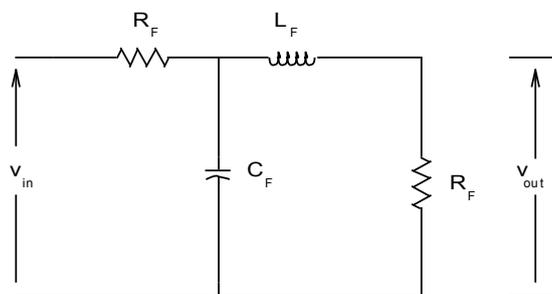


Figura 2.4.1.1 - Circuito do filtro analógico de segunda ordem

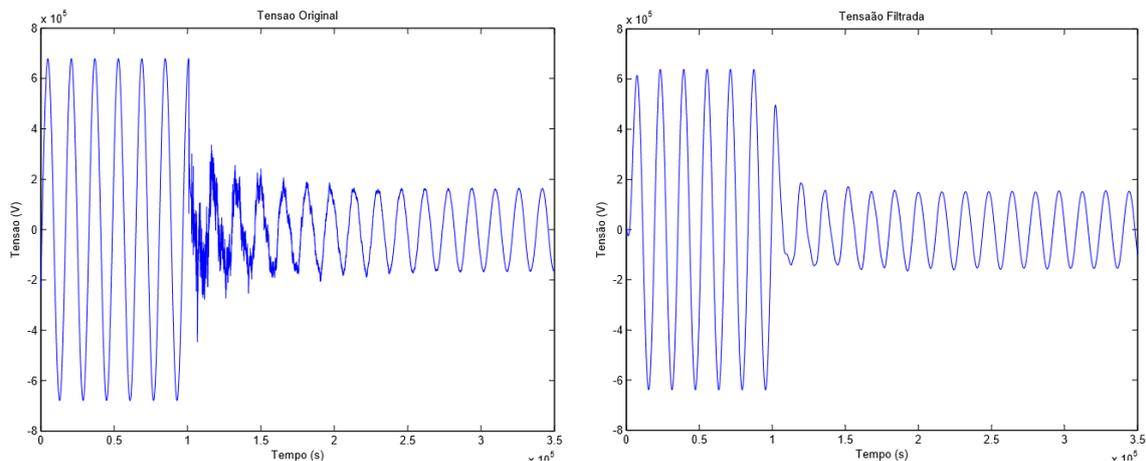


Figura 2.4.1.2 - Formas de onda de tensão antes e após a filtragem analógica

### 2.4.2. Taxa de Amostragem e Efeito Aliasing

Amostrar um sinal é um termo herdado da teoria de processamento de sinais e se refere ao processo no qual se converte um sinal contínuo no tempo em uma sequência numérica, em outras palavras, um sinal discreto no tempo. Este processo de amostragem é feito a uma determinada frequência, denominada frequência de amostragem, que deve ser escolhida em função da maior frequência contida no espectro do sinal contínuo no tempo original.

O Teorema de Nyquist enuncia que a quantidade de amostras capturadas por unidade de tempo de um sinal deve ser feita a uma frequência (ou taxa) de amostragem superior ao dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado. Assim sendo, o sinal original amostrado pode ser reconstituído integralmente sem erro de *aliasing*. De acordo com o critério estabelecido no Teorema de Nyquist, se no processo de conversão digital for adotada uma frequência de amostragem superior ao dobro da maior frequência contida no espectro do sinal amostrado, o sinal poderá ser restaurado integralmente e do erro de aliasing. Desta forma, a frequência de amostragem  $f_A$  dos dados de entrada é dada pela Equação 2.4.2.1.

$$f_A = 1 / T_A > 2f_{MAX} \quad (2.4.2.1)$$

Foi descrito no item anterior que, após a passagem dos sinais analógicos pelo filtro de Butterworth, as componentes do espectro de frequência deste sinal ficam limitadas à frequência de corte  $f_c$ , ou seja, o limite superior da banda passante. Logo, a frequência máxima será a frequência de corte do filtro e será dada pela metade da frequência de amostragem, conforme a Equação 2.4.2.2.

$$f_c = f_A/2 \quad (2.4.2.2)$$

Em (MIRANDA *et al*, 2003) é feito um estudo sobre a influência que o erro de amostragem de um registro oscilográfico acarreta na estimação de grandezas fasoriais de um sinal do SEP. Para uma maior precisão na tarefa de estimação dos fasores, os algoritmos tradicionais mais utilizados, Transformada Discreta de Fourier – TDF e a Transformada Discreta Cosseno – TDC, necessitam que a janela de dados seja escolhida de forma que a quantidade de amostras (NPC) corresponda a uma quantidade inteira de ciclos da frequência fundamental. Caso a escolha não seja feita desta forma, a energia da componente fundamental se distribui pelo espectro, como se houvesse um “vazamento” da energia desse componente, caracterizando o fenômeno conhecido como vazamento espectral, causando uma distorção no valor final.

Neste trabalho, a amostragem dos dados do processo de conversão digital foi feita a uma taxa de 16 pontos por ciclo da frequência fundamental, resultando em uma frequência de amostragem, de acordo com a Equação 2.4.2.1, de  $16 * 60 = 960$  Hz.

$$f_A = NPC \cdot f_0 \quad (2.4.2.1)$$

onde:

- $f_A$ : frequência de amostragem;
- $NPC$ : número de pontos amostrados por ciclo;
- $f_0$ : frequência fundamental.

Com uma taxa de amostragem de 960 Hz, o sinal pode ser reconstituído livre do fenômeno de aliasing se for implementado no processo de eliminação de altas frequências um filtro de Butterworth com uma frequência de Nyquist fixada em  $f_c = 960/2 = 480\text{Hz}$  atenuando as frequências superiores a este valor. Por fim, para fins de aplicações de proteção de distância, quando o objetivo é evitar distorções na frequência de 60 Hz, é suficiente utilizar um filtro com frequência de corte menor que a frequência de Nyquist pois, se um sinal for portador de uma componente exatamente em  $f_c$  Hertz, com amostras espaçadas de exatamente  $T_A = 1/(f_c)$  segundos, não se pode garantir uma total reconstituição do sinal.

### **2.4.3. Estimação dos Fasores na Frequência Fundamental**

As corrente e tensões obtidas após a digitalização dos sinais devem ser estimadas (ou filtradas) para que sejam obtidos os fasores na frequência fundamental representativos destes sinais.

No capítulo 5 será feito um estudo sobre as causas e efeitos da presença da componente DC na corrente de falta, o que conduz ao erro o algoritmo de estimação da localização da falta devido ao deslocamento vertical da corrente de falta. Nesta etapa serão apresentados e comparados dois algoritmos que tradicionalmente são empregados em aplicações em SEP na tarefa de obtenção das componentes real e imaginária utilizadas na estimação da amplitude dos fasores de interesse, a saber, o algoritmo de Fourier clássico e o algoritmo Cosseno, ambos de janela de ciclo completo e definidos para 16 pontos por ciclo da frequência fundamental. Esta apresentação será feita por meio de uma abordagem simples, porém, não menos importante, já que, neste trabalho, o algoritmo de filtragem digital escolhido é utilizado apenas como uma ferramenta matemática para extração da amplitude dos fasores. Um uma abordagem mais detalhada envolvendo outros algoritmos pode ser encontrada em (MIRANDA, 2005) e em trabalhos voltados para a área de processamento de sinais.

### 2.4.3.1. Algoritmo de Fourier

A Transformada Discreta de Fourier (TDF) de um sinal periódico pode ser interpretada como um trem de impulsos (sequência numérica) no domínio da frequência com os valores dos impulsos sendo proporcionais aos coeficientes da série discreta de Fourier da sequência.

As componentes  $V_x$  e  $V_y$  associadas às partes real e imaginária do fasor representativo da componente fundamental da forma de onda contínua no tempo  $v(t)$  podem ser determinadas a partir das Equações 2.4.3.1.1 e 2.4.3.1.2.

$$V_x = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) \cos \omega_0 t dt \quad (2.4.3.1.1)$$

$$V_y = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) \sin \omega_0 t dt \quad (2.4.3.1.2)$$

As Equações 2.4.3.1.3 e 2.4.3.1.4 denotam a forma como podem ser obtidas as componentes real e imaginária na versão discreta do algoritmo de Fourier<sup>2</sup>. A formulação discreta é necessária para aplicação no caso de dados digitalizados, caso deste trabalho, onde as amostras encontram-se regularmente espaçadas no tempo pelo intervalo  $\Delta t = 1/f_A$ .

$$V_x = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \cdot v_n, \quad \text{onde } n=1,2,\dots,N \quad (2.4.3.1.3)$$

---

<sup>2</sup> A Forma geral da equação do filtro de Fourier para estimação fasorial é dada por

$V^k = \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=1}^N v_n \cdot \left[ \cos\left(\frac{2\pi n k}{N}\right) + j \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi n k}{N}\right) \right]$ , onde  $k$  representa a ordem do harmônico considerado ( $k=1, 2, 3, \dots$ ).

$$V_y = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N \text{sen} \left( \frac{2\pi n}{N} \right) \cdot v_n, \quad \text{onde } n=1,2,\dots,N \quad (2.4.3.1.4)$$

onde  $N$  é o número de amostras por ciclo (16, neste caso) e  $v_n$  representa a  $n$ -ésima amostra dentro da janela de observação escolhida para o algoritmo. A Figura 2.4.3.1.1 ilustra as operações associadas ao algoritmo padrão de Fourier para 1 (um) ciclo da fundamental com 16 amostras. Um vetor com 16 pontos da função seno e 16 pontos da função coseno é formada para os ângulos  $0^\circ, 22,5^\circ, 67,5^\circ, 337,5^\circ \dots$  onde  $360^\circ/NPC=22,5^\circ$  corresponde ao espaçamento angular entre duas amostras consecutivas. A cada instante de observação da janela de amostragem dos pontos do sinal a ser filtrado (corrente ou tensão), estas 16 amostras são somadas algebricamente, depois de ponderadas pelos pontos referidos acima das funções coseno e seno já anteriormente armazenadas nas componentes  $V_x$  e  $V_y$ , respectivamente. O instante de aquisição da última amostra é considerado como sendo o instante de referência para os cálculos. Para o próximo instante, uma nova amostra é incorporada ao grupo de 16 pontos.

Estas componente nas direções  $x$  e  $y$  são aplicadas nas Equações 2.4.3.1.5 e 2.4.3.1.6 para estimar a amplitude e a fase, respectivamente, da componente fundamental da forma de onda de tensão  $v(t)$ , por exemplo.

$$V_1 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (2.4.3.1.5)$$

$$\theta_V = \text{atan}(+V_y / V_x) \quad (2.4.3.1.6)$$

A Figura 2.4.3.1.1 ajuda a ilustrar a ideia utilizada no algoritmo de Fourier de 1 ciclo, destacando as 16 amostras capturadas durante o período do sinal e as curvas referentes às funções seno e Cosseno.

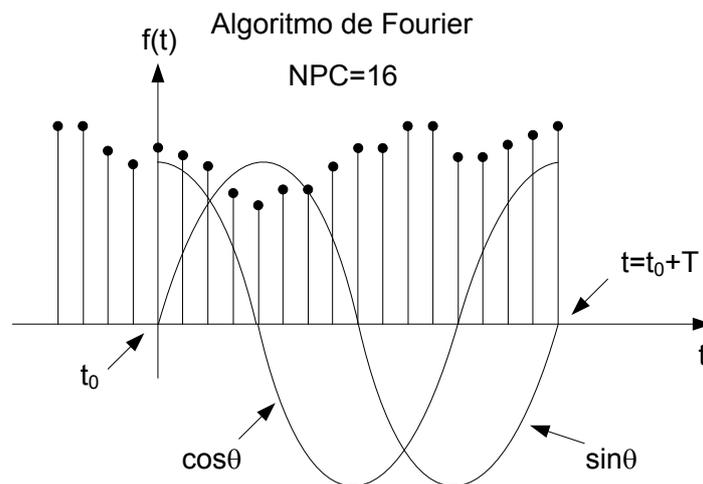


Figura 2.4.3.1.1 - Gráfico ilustrativo do algoritmo de Fourier

Os algoritmos típicos baseados no filtro de Fourier mais utilizados em aplicações de sistemas de potência podem possuir janela retangular de um ciclo - com 16 pontos por ciclo, de dois ciclos e de meio ciclo.

Quando o objetivo do processo de estimação fasorial é alcançar uma boa relação entre os tempos de processamento e de resposta no cálculo dos fasores, o filtro de Fourier de um ciclo é normalmente utilizado. O filtro de Fourier que utiliza a janela de dois (ou mais) ciclos oferece um melhor resultado no cálculo fasorial porém, há um custo computacional associado maior no que se refere ao aumento no tempo de processamento. Portanto, este só é utilizado para aplicações em que é exigida uma maior seletividade mas que toleram um maior tempo processamento. Por fim, quando a busca é por uma resposta rápida, tal como em aplicações de proteção SEP e controle, o filtro de Fourier de meio ciclo é uma boa opção. Este último, entretanto, apresenta relativa suscetibilidade à variação de frequência, deixando de filtrar frequência subsíncronas e o nível DC do sinal, podendo influenciar no resultado nestas condições. Para todos estes casos, pode-se melhorar o desempenho utilizando uma etapa de pré processamento do sinal para minimizar esses efeitos (MIRANDA, 2005).

### 2.4.3.2. Algoritmo Cosseno

O algoritmo Cosseno representa uma variação do algoritmo de Fourier, mais especificamente no que diz respeito às componentes imaginárias  $V_y$ , dado pela Equação 2.4.3.1.2, onde as  $n$ -ésimas amostras  $v_n$  são deslocadas de 4 amostras, sendo substituídas, portanto, por  $v_{n-4}$ . Em outras palavras, utiliza-se uma janela de um ciclo, mais um quarto de ciclo, em vez de uma janela de um ciclo, caracterizando uma janela de amostragem maior que para a TDF. Os termos real e imaginário no algoritmo Cosseno assumem a forma mostrada nas Equações 2.4.3.2.5 e 2.4.3.2.6.

$$V_x = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \cdot v_n, \quad \text{onde } n=1,2,\dots,N \quad (2.4.3.2.5)$$

$$V_y = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N \cos\left(\frac{2\pi (n-4)}{N}\right) \cdot v_{n-4}, \quad \text{onde } n=1,2,\dots,N \quad (2.4.3.2.6)$$

Nota-se que o termo  $V_y$ , que no algoritmo de Fourier tinha o comportamento regido pela função seno, agora aparece modificado, com uma função cosseno atrasado de 4 amostras (ou 1/4 de ciclo). Assim sendo, a Transformada Discreta de Cosseno (TDC) utiliza apenas coeficientes cosseno para desenvolver ambas as componentes, real e imaginária, dos fasores de tensão e corrente.

O algoritmo Cosseno é computacionalmente mais eficiente, apresentando uma resposta relativamente mais rápida que a TDF para estimação fasorial. Além disso, possui um baixo ganho para as frequências subsíncronas, próximas à frequência zero (nível DC), o que caracteriza uma grande vantagem para a aplicação no presente trabalho, onde a presença de frequências menores que a fundamental é uma realidade devido a ressonância entre a capacitância da compensação série e a indutância da LT, como será visto no capítulo 5. Por isso, será o algoritmo adotado para esta dissertação.

O algoritmo Cosseno contempla todas as vantagens do algoritmo de Fourier e ainda podem ser destacadas a sua melhor capacidade de rejeição das componente DC com a função exponencial decrescente existente nas faltas, capacidade de atenuação ou

rejeição das componentes harmônicas múltiplas inteiras da fundamental e também das interarmônicas (SCHWEITZER, 1993).

A Figura 2.4.3.2.1 ilustra a ideia utilizada no algoritmo Cosseno de 1 mais 1/4 de ciclo, destacando as 20 amostras capturadas na janela de amostragem e as curvas referentes às duas funções Cosseno.

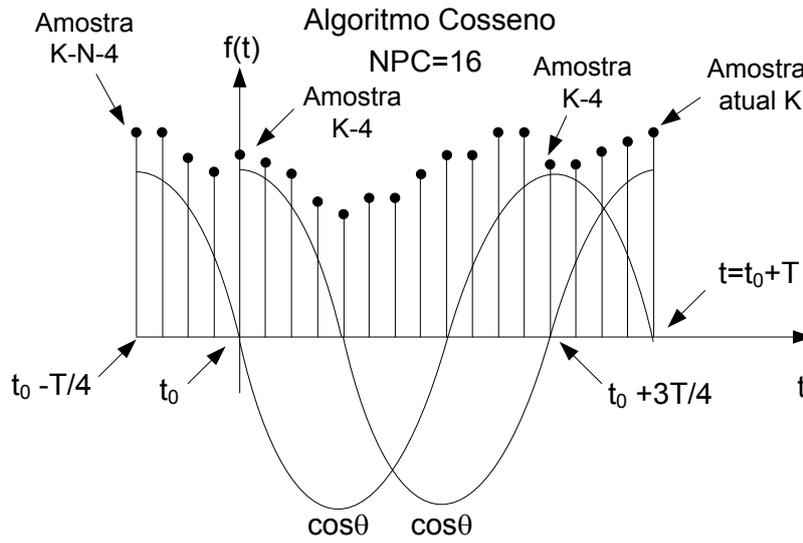


Figura 2.4.3.2.1 - Gráfico ilustrativo do algoritmo de Cosseno

#### 2.4.4. Detecção do Instante de Falta

Para as etapas de classificação e localização da falta, o conhecimento do instante em que a falta ocorreu é de extrema importância, já que é a partir desta informação que se consegue uma separação bem definida das amostras nos períodos pré e pós-falta.

A rotina de detecção de faltas foi implementada com base no conceito de monitor de transitórios onde uma janela de dados móvel que, como já mencionado anteriormente, consiste em uma janela com 16 amostras, percorre o sinal digitalizado com um passo de deslocamento de uma amostra, ou seja, a janela de tamanho fixo de 16 dados, varre todo o sinal deslocando-se no tempo de uma amostra por vez. Os sinais de corrente e tensão apresentam comportamentos conhecidos em situações de falta, onde pode-se

perceber uma variação abrupta nos sinais no instante de aplicação da falta, alterando bruscamente seus valores máximos e ângulos de fase com relação ao período pré-falta.

O princípio do monitor de transitórios baseia-se na comparação entre as amostras de dados estimados e dados originais. Em algum instante durante o deslocamento da janela, ocorrerá, em uma mesma janela, amostras dos períodos pré e pós-falta. Neste instante e nos instantes iniciais da falta, o sinal estimado na frequência fundamental irá se distanciar do sinal original devido à presença de outras frequências presentes no espectro do sinal que ocorrem em função dos transitórios da falta.

Para ilustrar a ideia do monitor de transitórios, considere que  $\underline{y}(t)$  seja um vetor contendo os valores amostrados e filtrados do sinal original de entrada, obtidos após a passagem pelo filtro de Butterworth, e que os valores estimados na frequência fundamental estejam no vetor  $\underline{x}(t)$ .

Os sinais estimados da frequência fundamental através da reconstituição no domínio do tempo dos fasores estimados são comparados com os sinais originais e a diferença entre estes dois vetores em uma determinada amostra  $k$  será o resíduo  $r_k$  naquela amostra, de acordo com a Equação 2.4.4.1.

$$r_k = \underline{x}_k(t) - \underline{y}_k(t) \quad (2.4.4.1)$$

Seja  $M_k$  o valor do monitor de transitórios a cada instante  $k$  dentro de uma dada janela de dados. De acordo com a Equação 2.4.4.2, o monitor de transitórios  $M_k$  registra os resíduos gerados a cada instante  $k$  e soma seus módulos dentro da janela de dados considerada, onde  $r_{k-n}$  é o resíduo calculado na amostra  $k-n$ .

$$M_k = \sum_{n=0}^{NPC-1} |r_{k-n}| \quad (2.4.4.2)$$

O registro de uma falta ocorre quando, em uma janela, o monitor de transitórios

apresentar uma mudança significativa, definida por um ajuste no valor de  $M$ . Para uma maior garantia da detecção da falta, quando o valor do monitor for superior a um limiar empírico durante 3 janelas móveis sequenciais, indica-se a ocorrência de um distúrbio.

A Figura 2.4.4.1 exemplifica o conceito de janela móvel com janelas contendo valores dos períodos pré-falta, pós-falta e de ambos.

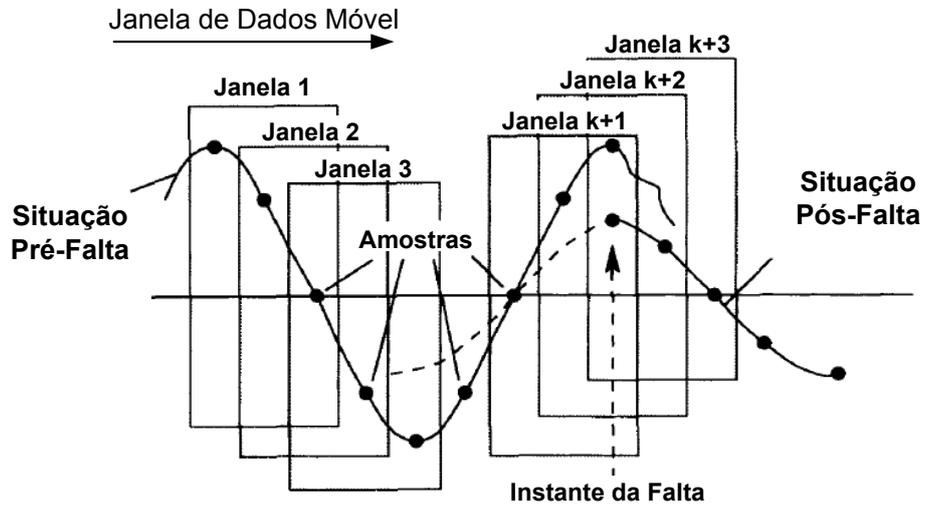


Figura 2.4.4.1 – Janela Móvel de Dados

### 3. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Aliada ao desenvolvimento de novas tecnologias, as Redes Neurais Artificiais (RNA) constituem uma importante ferramenta para soluções avançadas em SEP, tais como em previsões carga, previsões de geração - como radiação solar diária - e em outros setores produtivos, como agropecuária, meteorologia e diagnóstico em medicina.

Desenvolvido na segunda metade do século passado, o conceito de RNA pertence a um campo da ciência da computação denominado Inteligência Artificial (IA) e busca inspiração na própria estrutura nervosa biológica, operando sob o princípio de elementos computacionais simples - os chamados neurônios artificiais - interconectados maciçamente de modo a formar uma rede, simulando o cérebro humano. O princípio básico está na capacidade destas estruturas em simular a habilidade cerebral de aprender a partir de informações capturadas do ambiente de interesse e, com isso, simular a capacidade biológica de solucionar problemas de naturezas linear e não linear.

A RNA é concebida de modo a herdar algumas características inerentes ao cérebro humano, tais como, a adaptabilidade a diversas situações, além de ser capaz de se autoaperfeiçoar. Dentre as características de interesse, podem ser citados a sua robustez e tolerância à faltas, a capacidade em lidar com os ruídos indesejáveis presentes nas informações de entrada, possuir uma característica altamente paralela e apresentar um tamanho reduzido. Especialmente em aplicações em SEP, a RNA apresenta a vantagem de atuar em estruturas que operam com grandes quantidades de energia a partir do processamento de pequenos sinais e com um baixo consumo próprio, já que a RNA pode ser implementada utilizando-se componentes eletrônicos ou então ser simulada por um algoritmo computacional. A definição formal de rede neural artificial pode ser feita de acordo com uma das principais referências bibliográficas disponíveis na atualidade sobre o assunto (HAYKIN, 2001), no texto abaixo:

*“Uma rede neural é um processador maciçamente paralelamente distribuído, constituído de unidades de processamento simples e que têm a propensão natural para armazenar conhecimento experimental e para torná-lo disponível para uso. Ela se assemelha ao cérebro humano em dois aspectos:*

1. O conhecimento é adquirido pela rede através de um processo de aprendizagem e a partir de seu ambiente;
2. Forças de conexão entre neurônios, conhecidas como pesos sinápticos, são utilizadas para armazenar o conhecimento adquirido;”

### 3.1.1. Modelo do Neurônio Artificial

A Figura 3.1.1.1 mostra o que corresponde à unidade básica de processamento da informação em uma rede neural artificial. O modelo do neurônio artificial é inspirado nas características de funcionamento dos neurônios biológicos. Este neurônio é chamado *Neurônio de McCulloch & Pitts* em referência aos pesquisadores responsáveis por propor o modelo matemático no ano de 1943.

Seu princípio funcional inicia-se com a aplicação dos sinais  $X_i$  na camada de entrada, onde  $i > 1$  e  $i < m$ . Cada sinal é ponderado pelos pesos sinápticos  $W_{ki}$  que representam a influência que a entrada  $X_i$  terá na saída do neurônio "k". Na junção somadora é executada a soma ponderada destes sinais, produzindo um sinal  $v_k$  que será aplicado à função de ativação do neurônio. Se o sinal  $v_k$  exceder um limiar determinado, a saída  $v_k$  do neurônio é ativada.

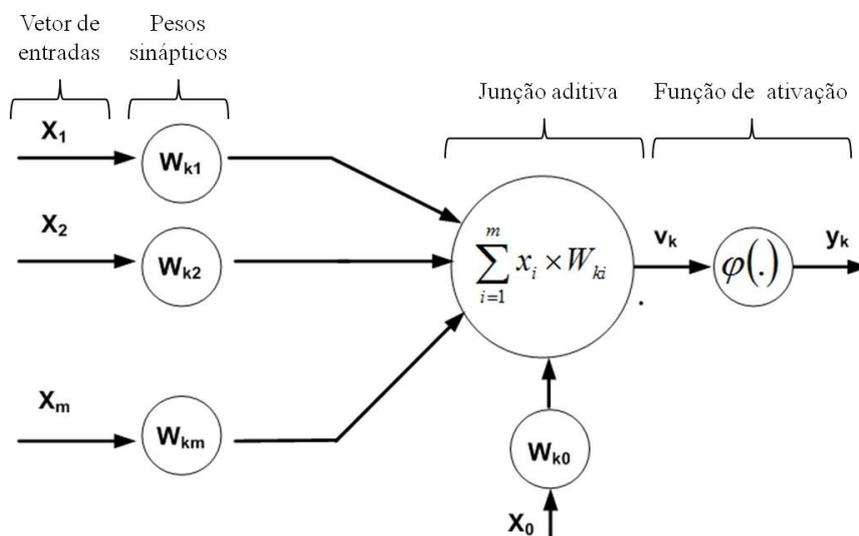


Figura 3.1.1.1 - Neurônio de *McCulloch & Pitts*

Com o sinal de entrada  $X_0=1$ ,  $W_{k0}=b_k$  corresponde a uma entrada fixa e recebe a denominação de *bias*. Sua função é oferecer ao neurônio uma referência externa objetivando elevar ou reduzir o nível de ativação  $v_k$  aplicado à entrada da função de ativação. As Equações 3.1.1.1 e 3.1.1.2 descrevem as expressões matemáticas que regem o funcionamento do neurônio.

$$v_k = \sum_{i=1}^m W_{ki} \cdot x_i \quad (3.1.1.1)$$

$$y_k = \varphi(v_k + b_k) \quad (3.1.1.2)$$

Onde:

$v_k$  : é o resultado da combinação linear feita na junção aditiva do  $k$ -ésimo neurônio; é chamado de campo local induzido;

$W_{ki}$  : é o  $i$ -ésimo peso sináptico associado ao neurônio  $k$ ;

$x_i$  : é o  $i$ -ésimo sinal de entrada do  $k$ -ésimo neurônio;

$b_k$  : é o *bias* do  $k$ -ésimo neurônio;

$\varphi(\cdot)$  : é a função de ativação do  $k$ -ésimo neurônio;

$i$  : é o índice do  $k$ -ésimo neurônio;

$y_k$  : é a saída do neurônio.

### 3.1.2. Tipos de funções de Ativação

A função de ativação define a saída do neurônio em termos do campo local induzido aplicado à sua entrada, restringindo a saída do neurônio ao intervalo  $[0,1]$  ou  $[-1,1]$ . As funções de ativação mais utilizadas nos neurônios de *McCulloch & Pitts* são quatro. A saber:

- Função de limiar: Esta função é semelhante à função singular degrau unitário (também conhecida como degrau de *Heaviside*) e limita a saída em valores entre 0 e 1. É definida de acordo com a Equação 3.1.2.1 e seu gráfico pode ser visto na Figura 3.1.2.1.

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1, & \text{se } v \geq 0 \\ 0, & \text{se } v < 0 \end{cases} \quad (3.1.2.1)$$

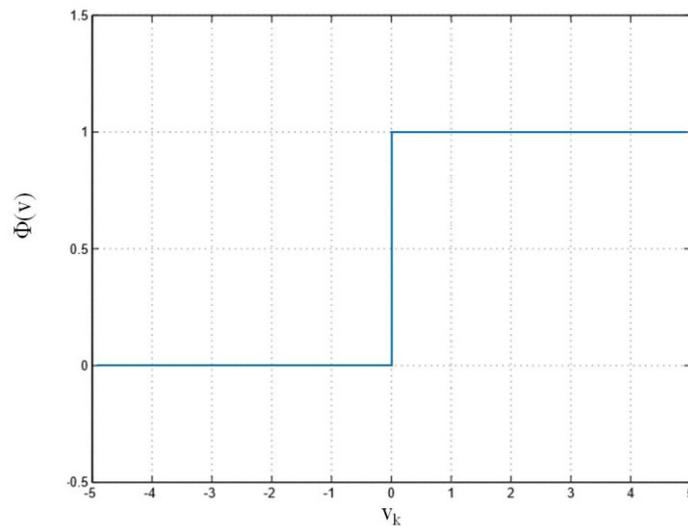


Figura 3.1.2.1 - Função de limiar

- Função linear: A função linear possui a definição de acordo com a Equação 3.1.2.2 e o seu gráfico é mostrado na Figura 3.1.2.2.

$$\varphi(v) = v \quad (3.1.2.2)$$

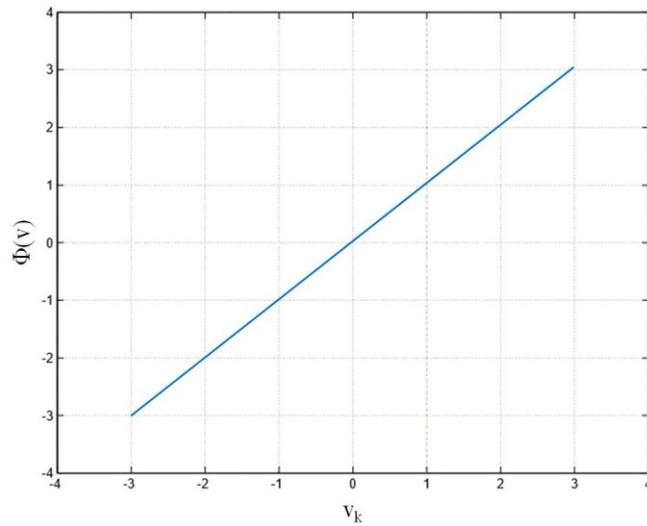


Figura 3.1.2.2 - Função linear

- Função linear por partes: A função linear por partes limita o valor da saída  $y_k$  entre os níveis -1 e 1. Seu comportamento é descrito pela Equação 3.1.2.3 e seu gráfico está representado na Figura 3.1.2.3.

$$\varphi(v) = \begin{cases} 1, & \text{se } v \geq 1 \\ v, & \text{se } -1 < v < 1 \\ 0, & \text{se } v \leq -1 \end{cases} \quad (3.1.2.3)$$

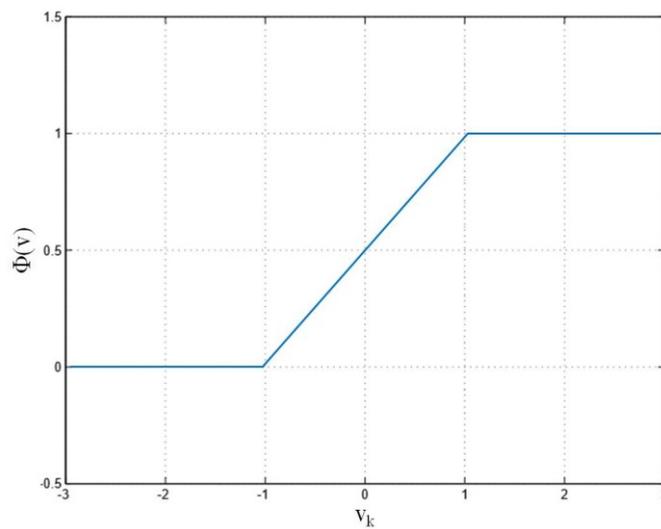


Figura 3.1.2.3 - Função linear por partes

As duas próximas funções pertencem à classe das funções *sigmoidais* e correspondem às funções mais utilizadas em aplicações que necessitam de um comportamento não linear da função de ativação. A sua grande utilidade em RNA deve-se ao fato das mesmas serem deriváveis e estritamente crescentes, oferecendo um bom equilíbrio entre as componentes linear e o não linear.

- Função logística: Sua saída está restrita entre os valores 0 e 1 e o parâmetro "a" corresponde à inclinação da função. Seu comportamento é descrito pela Equação 3.1.2.4 e seu gráfico é mostrado na Figura 3.1.2.4 para 4 diferentes valores de "a".

$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + e^{-av}} \quad (3.1.2.4)$$

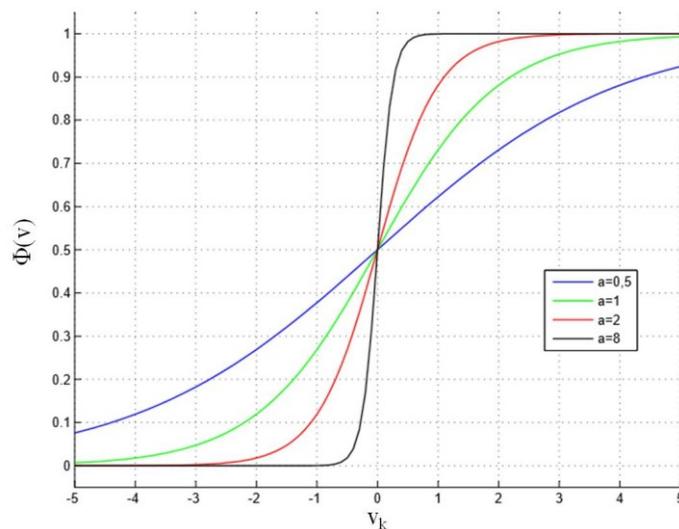


Figura 3.1.2.3 - Função logística

- Função tangente hiperbólica: Esta função consiste em uma variante da função logística, sendo, portanto, a sua correspondente ímpar e assumindo valores entre -1 e 1. É válido destacar que os valores de saída  $y_k$  da função de ativação são usados como um multiplicador na equação de atualização de alguns pesos (algoritmo de treinamento *backpropagation*), como será visto adiante. Por isso, apesar da semelhança entre as funções logística e tangente hiperbólica, esta última é mais utilizada em muitos tipos de

RNA devido ao fato de possuir valores de saída bipolares (ROSELLI, 2007). Seu comportamento é dado pela Equação 3.1.2.5 e seu gráfico é mostrado na Figura 3.1.2.5.

$$\varphi(v) = \tanh(a \times v_k) = \frac{e^{av} - e^{-av}}{e^{av} + e^{-av}} \quad (3.1.2.5)$$

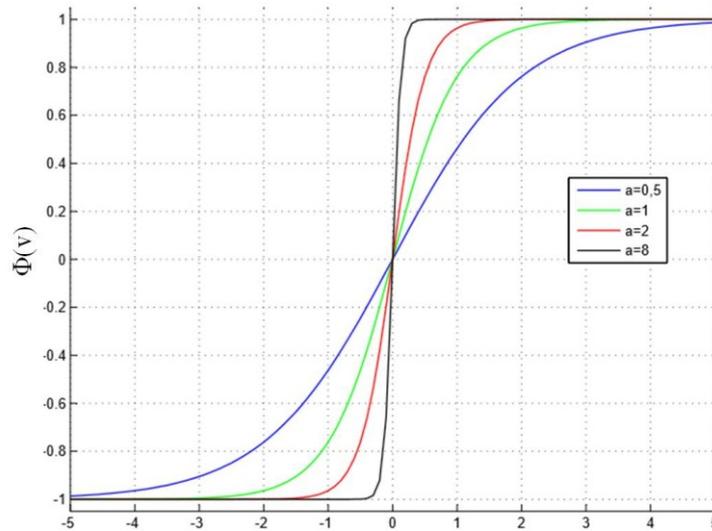


Figura 3.1.2.5 - Função tangente hiperbólica (tanh)

### 3.1.3. Arquitetura das RNA

A topologia de uma RNA é definida por características tais como o número de camadas, o número de neurônios que compõem cada camada e o tipo de conexão entre eles. Estas características estão associadas à aplicação e ao algoritmo de aprendizagem utilizado no processo de treinamento da rede, onde os pesos sinápticos serão ajustados.

Quanto ao número de camadas, a RNA pode ser de camada única ou de múltiplas camadas. Em relação à forma como os neurônios estão interconectados, as redes podem ser acíclicas (ou alimentada adiante ou ainda do inglês *feedforward*), nas quais a camada de nós de fonte fornece os sinais de entrada para a camada de saída e nunca vice-versa, não havendo, portanto, realimentação para a camada de entrada, ou cíclicas, nas quais pode haver laços de realimentação de uma ou mais saídas para a

camada de entrada da RNA. Estas últimas também são chamadas redes recorrentes.

Uma RNA de camada única tem por objetivo classificar corretamente o vetor de estímulos  $X_i$  com  $1 < i < m$  apresentado à sua camada de entrada em duas classes: C1 e C2. A Figura 3.1.3.1 ilustra a forma mais simples do perceptron onde duas regiões são separadas por uma fronteira de decisão (representada neste caso bidimensional por uma reta) definida por  $\sum_{i=1}^m w_i x_i + b = 0$ , onde o bias  $b$  tem o efeito de deslocar a fronteira de decisão em relação à origem.

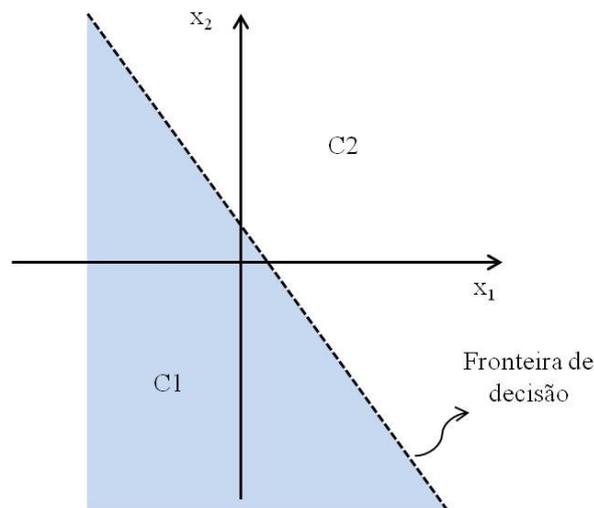


Figura 3.1.3.1 - Ilustração para um problema de classificação de padrões

Um ponto  $(x_1, x_2)$  que se encontre abaixo da linha de fronteira é classificado como pertencente à classe C1 e um ponto  $(x_1, x_2)$  que se encontre acima da linha de fronteira é atribuído à classe C2. Portanto, para que a RNA de camada única funcione corretamente, é necessário que as classes C1 e C2 sejam linearmente separáveis, o que significa dizer que os padrões a serem classificados estejam suficientemente afastados de modo a assegurar que um hiperplano (neste caso, uma reta) seja capaz de prover esta separação. Se as duas classes estiverem tão próximas que um hiperplano não possa ser utilizado como fronteira de decisão, estas classes são ditas não-linearmente separáveis ou linearmente inseparáveis e uma RNA de múltiplas camadas torna-se necessária.

A Figura 3.1.3.2 mostra dois tipos de arquiteturas de RNA *feedforward*. A

camada de entrada é denominada camada de nós de fonte não sendo composta por neurônios e as camadas oculta (ou intermediária) e de saída são formadas pelos neurônios artificiais formando o paralelismo característico das RNA. Redes com uma ou mais camadas ocultas possuem alta capacidade de generalização, podendo extrair estatísticas de ordem elevada dos dados de entrada. Uma RNA de duas camadas é suficiente para separar quaisquer conjuntos de classes não linearmente separáveis e será a arquitetura utilizada neste trabalho.

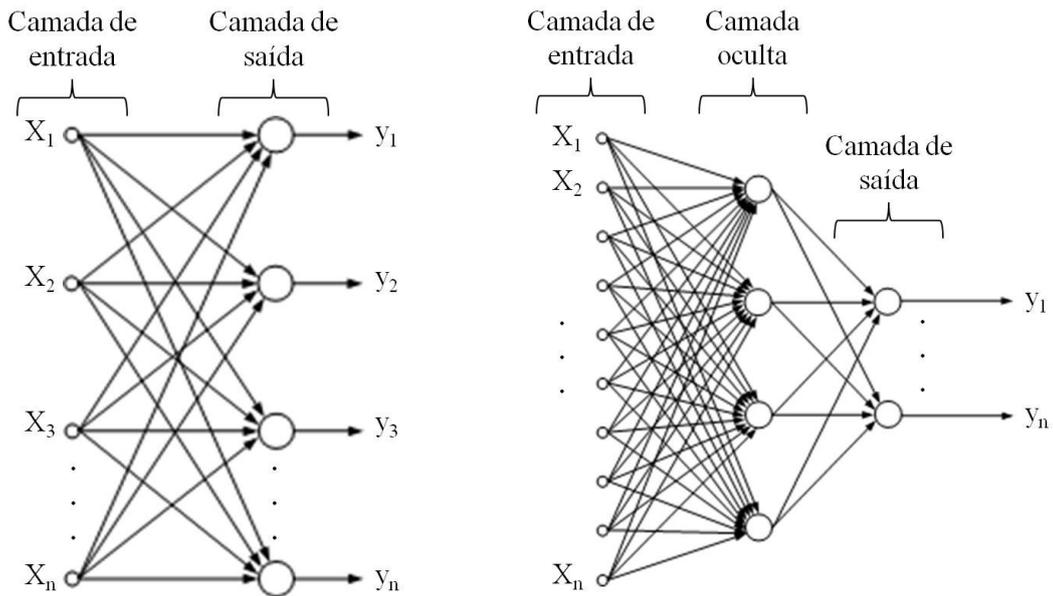


Figura 3.1.3.2 - Redes Feedforward de a) Uma camada e b) Duas camadas

### 3.1.4. Processos de Aprendizagem

A mais importante característica da RNA reside na sua habilidade de efetuar generalizações a partir de informações contidas nos padrões extraídos do ambiente de interesse. Para tanto, a rede deve ser submetida a um processo iterativo de ajustes aplicados aos pesos sinápticos dos neurônios a partir dos dados de entrada que representam o ambiente no qual a rede será utilizada. A este processo na qual a rede "aprende" sobre o seu ambiente dá-se o nome de treinamento.

De uma forma geral, o processo (ou paradigma ou algoritmo) de aprendizagem

está diretamente associado à arquitetura de cada tipo de RNA e diferem basicamente na forma como os ajustes são efetivados. Para perfazer tais ajustes existem regras de treinamento que são mais apropriadas a cada tipo de modelo e estão divididos em duas grandes classes, a saber: treinamento supervisionado (ou com professor) e treinamento não supervisionado (sem um professor).

O treinamento no modo supervisionado baseia-se no conhecimento do comportamento das classes às quais pertence cada um dos padrões entrada/saída. Em outras palavras, um padrão de entrada é apresentado à rede na etapa de treinamento e a resposta obtida (saída real) é associada a uma saída desejada correspondente. A saída real da rede é então comparada com a saída desejada (saída alvo) gerando um sinal de erro que é então utilizado de forma sistemática no ajuste dos parâmetros livres da RNA de forma a minimizá-lo. A forma como é dado este ajuste define o tipo de algoritmo de treinamento.

O treinamento sem professor é útil em aplicações onde a informação a respeito do ambiente não está disponível durante a etapa de treinamento. Neste tipo de treinamento a rede dispensa o conhecimento prévio da classe à qual pertence os dados de entrada e os ajustes nos parâmetros livres é feito levando em consideração apenas os padrões disponíveis. A partir de uma interação contínua com o ambiente de interesse, a rede extrai características deste ambiente a partir da regularidade estatística (similaridade) observada nos padrões de entrada.

### **3.1.5. Os Perceptrons de Múltiplas Camadas e seu Treinamento**

As redes neurais do tipo Perceptron de Múltiplas Camadas (ou do inglês *Multi-Layer Perceptron* - MLP) consistem em redes que apresentam uma camada de entrada - responsável por receber os dados do vetor com os sinais de entrada - uma ou mais camadas ocultas compostas por neurônios com funções de ativação não lineares e uma camada de saída. São RNA utilizadas para a solução de problemas de alta complexidade onde as classes são não linearmente separáveis, já que os perceptrons de múltiplas camadas têm a capacidade aproximar qualquer função não linear, mesmo que descontínua, enquanto que os de camada única têm a limitação de solucionar apenas problemas em que as classes não linearmente separáveis. Em (HAYKIN, 2001) é feita uma abordagem

detalhada acerca de separabilidades linear e não linear.

**Algoritmo de Retropropagação do Erro:** O MLP é tipicamente treinado de forma supervisionada, por meio do algoritmo de retropropagação do erro (do inglês *Error Back-propagation*) também conhecido como regra Delta generalizada, foi desenvolvido em 1986 por Rumelhart, Hinton e Willians, onde os parâmetros livres da rede são ajustados com base na correção do erro. Este algoritmo, como será visto mais adiante, consiste basicamente em uma primeira etapa em que o vetor contendo os padrões de entrada é propagado para frente. Nesta etapa os pesos sinápticos são mantidos fixos. Em um segundo momento, o sinal de erro gerado na saída da rede é então retropropagado de forma a ajustar os pesos sinápticos. Este processo é repetido até que a resposta real esteja suficientemente próxima da resposta desejada de acordo com o objetivo definido pelo projeto.

O erro gerado pela comparação da saída obtida com a saída desejada é dado pela Equação 3.1.5.1.

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad (3.1.5.1)$$

onde:

$j$ : é o índice do neurônio de saída da rede;

$e_j(n)$ : é o sinal de erro na saída do neurônio  $j$ , na iteração  $n$ , gerado após a aplicação do  $n$ -ésimo padrão à entrada;

$d_j(n)$ : é a saída desejada para o neurônio  $j$  na iteração  $n$ ;

$y_j(n)$ : é a saída real calculada pela RNA disponível na saída do neurônio  $j$  na iteração  $n$ .

O algoritmo backpropagation aplicado ao treinamento de um MLP resume-se a um problema de otimização, buscando a minimização da função custo através da técnica do gradiente descendente. A função custo (ou *energia* do erro) considerada é dada pela

Equação 3.1.5.1 e corresponde à soma instantânea dos erros médios quadráticos sobre o conjunto de treinamento. Nesta equação,  $C$  corresponde ao conjunto de todos os neurônios da camada de saída da rede.

$$\xi(n) = \frac{1}{2} \times \sum_{j \in C} e_j^2(n) \quad (3.1.5.1)$$

O resultado será então um vetor de pesos sinápticos que minimiza a função custo de acordo com a Equação 3.1.5.2.

$$w^* = \min(\xi(n)) \quad (3.1.5.2)$$

Onde,

$\xi(n)$ : é a soma dos erros médios quadráticos na iteração  $n$ ;

$w^*$ : é o vetor de pesos sinápticos que minimiza o sinal de erro.

A etapa de propagação para frente para cálculo da função custo pode ser entendida com auxílio das Equações 3.1.1.1 e 3.1.1.2, que descrevem o funcionamento do neurônio artificial até a obtenção da saída  $y_k$ . Após a comparação da saída  $y_k$  com a saída desejada e cálculo da função custo, é feita então a retropropagação (propagação para trás da saída em direção à camada de entrada da rede) para ajuste dos pesos sinápticos. O ajuste pode ser feito a cada iteração  $n$ , caracterizando o que é chamado treinamento sequencial, ou então após a apresentação à entrada da rede de todos os padrões de treinamento. Este último é denominado treinamento por batelada (o por lote).

A correção dos pesos é feita de forma proporcional à derivada parcial da função custo em relação aos pesos a serem ajustados, de objetivando encontrar o vetor de pesos sinápticos de minimizem o erro nos neurônios da camada de saída. A Equação 3.1.5.3 descreve a atualização que deve ser aplicada aos devidos pesos na iteração  $n$  ( $n$ -ésimo padrão de entrada apresentado). Este ajuste é conhecido como *Regra Delta*.

$$\Delta\omega_{ji}(n) = \eta \times \delta_j \times y_i(n) \quad (3.1.5.3)$$

Onde:

$\Delta\omega_{ji}(n)$  : é a correção aplicada ao peso da conexão entre os neurônios  $i$  e  $j$ ;

$\eta$  : é a taxa de aprendizagem;

$\delta_j(n) = -\partial\xi(n)/\partial v_{ji}(n)$  é o gradiente local do neurônio  $j$ ;

O gradiente local do neurônio  $j$  será dado então pela Equação 3.1.5.4.

$$\delta_j(n) = e_j(n) \times \phi'_j(v_j(n)) \quad (3.1.5.4)$$

A taxa de aprendizagem  $\eta$  indica o incremento aplicado à correção  $\Delta\omega_{ji}(n)$  em direção à minimização. Em outras palavras,  $\eta$  é o tamanho do passo de treinamento do algoritmo e, quanto menor for este parâmetro, menores serão as variações dos pesos sinápticos entre duas iterações proporcionando uma descida suave em direção à região de menor erro, porém, tornando o processo de treinamento mais lento. Em contrapartida, se o parâmetro  $\eta$  for feito demasiadamente grande com o intuito de acelerar o processo, isso pode tornar a rede instável.

A dedução completa das equações apresentadas até aqui para o algoritmo de retropropagação é apresentada em (HAYKIN, 2001).

O algoritmo backpropagation convencional, apesar de ser largamente empregado, apresenta alguns problemas como a grande quantidade de iterações necessárias para convergir - o que eleva o custo computacional - e a possibilidade de ficar retido em mínimos locais da superfície de erro. Para contornar estes problemas, alguns métodos de otimização para redução do gradiente são propostos na literatura tais como BP com Gradiente Conjugado Escalonado, BP com Gradiente Conjugado Powell-Beale Restarts, BP com Termo de Momento e Taxa de Aprendizagem Variável, BP com Gradiente

Conjugado Polak-Ribière Update e outros. Tais variações das implementações do BP estão associadas à forma como são aplicados os ajustes dos pesos sinápticos e não serão detalhadas por não ser escopo deste trabalho.

### 3.1.6. Algoritmo Levenberg-Marquardt

O algoritmo backpropagation discutido na seção anterior possui apenas derivadas de primeira ordem e utiliza o gradiente descendente como método de aproximação do mínimo da função erro, enquanto o algoritmo de Levenberg-Marquardt (LM) utiliza informações sobre a derivada de segunda ordem da função custo e uma aproximação do mínimo da função erro utilizando uma abordagem do método de Gauss-Newton. Este algoritmo pode ser interpretado como sendo uma combinação do método iterativo de Gauss-Newton com o gradiente descendente, incorporando a vantagem da velocidade de convergência do método de Gauss-Newton quando a solução está afastada do mínimo desejado da função objetivo.

A atualização dos pesos utilizando o método de Gauss-Newton para a minimização da função custo (Equação 3.1.5.1) será realizada de acordo com a Equação 3.1.6.1.

$$\Delta w_{ji}(n) = -H^{-1} \nabla f(w_{ji}) \quad (3.1.6.1)$$

sendo:

$$\nabla f(w_{ji}) = J^T e_j \quad (3.1.6.2)$$

Onde  $J$  é a matriz Jacobiana cujos elementos são as derivadas primeiras do erro em relação aos pesos sinápticos. O cálculo da matriz Hessiana é feito de acordo com a Equação 3.1.6.3.

$$\nabla^2 f(w_{ji}) = J^T J + S \quad (3.1.6.3)$$

Nesta equação, a parcela  $S$  é dada por:

$$S = \sum_{i=1}^n e_i \nabla^2 e_i \quad (3.1.6.4)$$

e pode ser considerada pequena em comparação ao produto da matriz  $J$ . Desta forma, a matriz Hessiana e a Equação 3.1.6.1 de ajuste dos pesos podem ser aproximadas pelas Equações 3.1.6.5 e 3.1.6.6, respectivamente.

$$\nabla^2 f(w_{ji}) \cong J^T J \quad (3.1.6.5)$$

$$\Delta \omega_{ji}(n) = -(J^T J)^{-1} J^T e_j \quad (3.1.6.6)$$

Por fim, pode-se observar que o algoritmo de LM envolve a operação de inversão de matrizes e, além disso, é necessário armazenar uma matriz de ordem  $n \times m$ , onde  $n$  é o número de elementos do treinamento e  $m$  é o número de pesos, fato que, dependendo da dimensão da RNA, pode tornar o algoritmo computacionalmente inviável (para RNA muito grandes, demandaria um alto custo computacional). No entanto, este algoritmo mostra-se muito eficiente para RNA com algumas centenas de pesos sinápticos. Uma limitação deste método reside no fato da impossibilidade de inversão da matriz Hessiana simplificada da Equação 3.1.6.5 exigindo, portanto, uma modificação na Equação 3.1.6.6. O ajuste nos pesos é realizado então de acordo com a Equação 3.1.6.7 onde  $I$  é uma matriz identidade.

$$\Delta \omega_{ji}(n) = -(J^T J + \mu I)^{-1} J^T e \quad (3.1.6.7)$$

O valor do parâmetro  $\mu$  define qual método de otimização prevalecerá no treinamento. Quando  $\mu$  assume um valor elevado, o método utilizado é o gradiente descendente e, ao diminuir  $\mu$ , a técnica empregada aproxima-se do método Gauss-Newton.

Após alguns treinamentos das RNA de classificação e localização, o algoritmo de Levenberg-Marquardt apresentou melhores resultados em comparação a algoritmos com gradiente descendente. Portanto, o algoritmo utilizado para treinamento das RNA neste trabalho foi o algoritmo de Levenberg-Marquardt.

## 4. O SISTEMA ANALISADO

Este capítulo é dedicado a apresentar as informações sobre a modelagem dos sistemas de transmissão e de proteção de distância utilizados, descrevendo os modelos e parâmetros utilizados para representação da linha de transmissão, da compensação série e dos elementos que compõem os canais de transdução dos sinais trifásicos de tensão e corrente desenvolvidos pelo sistema nos pontos de localização da proteção de distância.

A modelagem das linhas de transmissão é feita através de sua representação por parâmetros distribuídos em componentes de fase, com os parâmetros unitários sendo imputados em seus referenciais de sequências positiva, negativa e zero. Desta forma, uma representação perfeitamente balanceada é assumida para o sistema de transmissão. O sistema de proteção de distância analisado na presente dissertação é baseado em medições em ambos os terminais.

As simulações foram realizadas em ambiente *MATLAB* e a modelagem dos elementos do sistema de transmissão e proteção foi implementada através do “*toolbox Simulink*”, onde há uma biblioteca denominada “*SimPower Systems*” destinada a este tipo de aplicação com os modelos dos elementos do sistema de potência já disponíveis.

Como resultado das simulações, são obtidas correntes e tensões a uma taxa de discretização de 1,04667 ms, sendo digitalizadas e transformadas em arquivos de dados a serem utilizados para detecção do instante de falta, estimação da amplitude dos fasores na frequência fundamental no algoritmo de filtragem digital e que, por fim, servirão como dados de entrada das Redes Neurais.

### 4.1. Topologia do Sistema de Transmissão

O sistema analisado é semelhante ao utilizado na referência (CRUZ, 2005). O sistema é composto de dois circuitos simples de 765 kV, com a geração sendo feita em 18kV, 7370 MVA, relação  $X/R=25$ , sem acoplamento mútuo entre circuitos, compensados por bancos de capacitores série e por reatores em derivação e divididos em três trechos com 300 km de extensão cada um. A saber:

Trecho 1: trecho de transmissão compreendido entre as barras 2 e 3;

Trecho 2: trecho de transmissão compreendido entre as barras 3 e 4;

Trecho 3: trecho de transmissão compreendido entre as barras 4 e 5.

A modelagem do sistema de transmissão é feita através de sua representação por parâmetros distribuídos em componentes de fase, com os parâmetros unitários sendo utilizados em seus referenciais de sequência positiva, negativa e zero. Desta forma, uma representação perfeitamente balanceada é assumida.

A Figura 4.1.1 mostra o sistema de transmissão utilizado nas simulações para diferentes tipos de faltas aplicadas em diversas localizações ao longo dos três trechos, visando obter os sinais de corrente e tensão pré e pós falta.

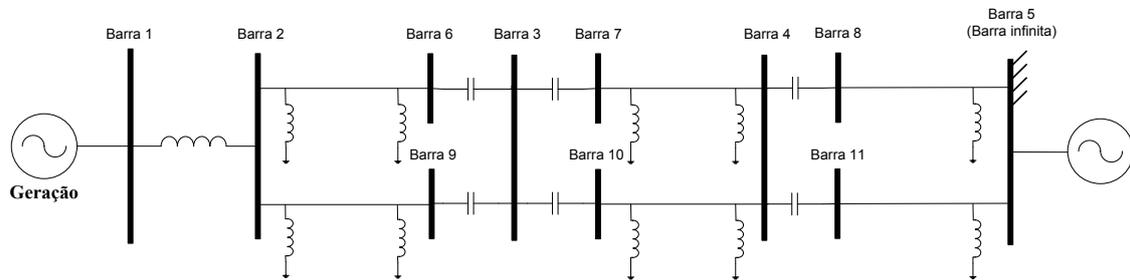


Figura 4.1.1 – Diagrama unifilar do Sistema de Transmissão

Os parâmetros de sequência do sistema de transmissão são apresentados na Tabela 4.1.1. Os valores em porcentagem são calculados nas bases  $S_{BASE} = 100$  MVA e  $V_{BASE} = 765$  kV, onde R e X são a resistência e a reatância indutiva longitudinais e B é a susceptância capacitiva transversal representada pela sua potência reativa nominal. Na Tabela 4.1.2 são apresentados os dados dos reatores em derivação.

Tabela 4.1.1 - Parâmetros de seqüência do sistema de transmissão

Barra:		Circuito	Seq. Positiva		Seq. Zero		B (MVar)	
De:	Para:		R1 (%)	X1 (%)	R0 (%)	X0 (%)	B1	B0
2	5	1	0,21	5,13	2,47	20,69	2507,2	1525,38
		2	0,23	5,21	3,54	17,49	2504,39	1523,67

Tabela 4.1.2 - Retores em derivação

Reatores por barras (MVA)						
2	6	9	7	10	4	5
2 x 330	150	150	330	330	2 x 330	2 x 330

#### 4.2. Transdução do Sinal de Corrente

Os canais analógicos de transdução de corrente possuem como principal elemento o transformador de corrente. O TC possibilita acesso aos sinais de corrente em seu enrolamento secundário em níveis reduzidos, promovendo um isolamento dos equipamentos sensíveis que serão conectados ao secundário em relação à linha de transmissão de alta tensão viabilizando, desta forma, a utilização destes sinais em aplicações de instrumentação de medição, proteção e controle . O modelo do transformador de corrente está representado na Figura 4.2.1.

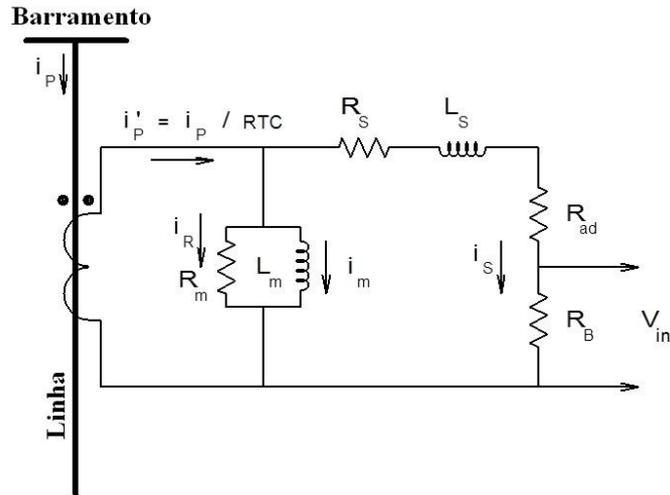


Figura 4.2.1 - Circuito equivalente do transformador de corrente

No circuito equivalente, a corrente  $i_p'$  corresponde à corrente de linha (corrente que percorre o enrolamento primário) referida ao secundário. Este corrente é composta pela corrente de carga do TC  $i_s$  e a sua corrente de excitação  $i_{EXC} = i_R + i_m$ . Em geral, a queda de tensão na impedância do enrolamento primário do TC é desprezada. Isso é razoável se for considerado o reduzido número de espiras que compõe esse enrolamento, ocasionando uma baixa resistência e pouco fluxo de dispersão.

Para determinação da relação de transformação do TC, devem ser considerados os critérios da corrente nominal do alimentador e da corrente máxima de curto-circuito (KINDERMANN, 1999). Considerando que as correntes de curto são inferiores ao limite de 20 vezes (fator de sobrecorrente) a corrente nominal, o critério da corrente nominal prevalece, fato que deve implicar na redução dos efeitos da saturação do transformador de corrente.

De acordo com o critério da corrente nominal, a corrente primária dos transformadores de corrente para regime permanente de operação é calculada em função da máxima potência que circulará nos transformadores a plena carga. Esta corrente pode ser calculada por:

$$I_{nom} = \frac{S_{nom}}{\sqrt{3} V_{nom}} = \frac{4 \times 1650}{\sqrt{3} \times 765} = 4.981 \text{ A}$$

onde:

$I_{nom}$ : corrente nominal de regime permanente que circulará no enrolamento primário dos TC's;

$S_{nom}$ : potência nominal conjunta dos transformadores de 1650 MVA (4 x 1650);

$V_{nom}$ : tensão nominal de fase no secundário dos 4 transformadores de 1650 MVA;

Considerando para a modelagem em questão o valor imediatamente superior da corrente primária, é possível se determinar a relação de transformação do TC como:

$$RTC > \frac{I_p}{I_s} = \frac{4.981}{5}$$

Assim sendo, para a RTC será adotada a relação 5000/5.

O fator de sobrecorrente FS do transformador de corrente foi feito igual a 20 e deve resultar em desempenho satisfatório da proteção nas condições de correntes máximas de curto-circuito logo após o banco de transformadores.

Considerando uma resistência de burden de 8,0  $\Omega$ , teremos uma carga nominal do transformador de corrente dada por:

$$S_{n_{TC}} = (Rb) \times i_s^2 = (8) \times 5^2 = 200 \text{ VA}$$

Um TC de precisão 10%, baixa reatância e potência de carga 200 VA pode ser selecionado. A seguinte especificação final para o transformador de corrente foi definida, a saber:

- resistência de dispersão do secundário:  $0,32 \Omega$ ;
- resistência total do secundário mais carga:  $1,32 \Omega$ ;
- $RTC=5000/5$ ;
- potência nominal: 200 VA;
- precisão: 10%;
- especificação ABNT: *B10F20C200*.

### 4.3. Transdução do Sinal de Tensão

Os transformadores de potencial, assim como os TC para a corrente, destinam-se a reproduzir, em menor escala e com um certo grau de precisão, a tensão primária em seu circuito secundário, promovendo, desta forma, o isolamento dos equipamentos de proteção das altas tensões características do sistema de transmissão.

Pode-se notar que a medida que a tensão nominal aumenta, o número de espiras necessário para se estabelecer a densidade desejada de campo magnético desejado também aumenta. Em contrapartida, a corrente primária nominal diminui. Isto significa construir, para níveis de tensões elevadas, TP com enrolamento primário dotado de um número muito grande de espiras de fio de pequena bitola, capaz de suportar uma corrente primária nominal cada vez menor. Estas restrições relacionadas aos aspectos construtivos do equipamento, além de se traduzir em maiores custos de fabricação, aumenta a probabilidade de romper o enrolamento, exigindo, desta forma, um incremento da capacidade do isolamento para operar em tensões maiores.

Portanto, para sistemas elétricos de alta tensão, a utilização direta de transformadores de potencial é construtivamente inviável devido a impossibilidade de obter relações de transformação do TP (RTP) elevadas. Logo, é usual construir-se TP eletromagnéticos até a classe de tensão de 69 kV. Já para aplicações em sistemas com tensões superiores a 69 kV, são utilizados TP de 23 kV operando em conjunto com um divisor capacitivo de potencial (DCP).

### 4.3.1. Modelagem do Divisor Capacitivo de Potencial

Neste item é feita uma apresentação do circuito representativo do divisor capacitivo de potencial. O DCP consiste de bancos de capacitores associados em série, de modo a atuar como um divisor de tensão, onde a alta tensão do sistema de transmissão é condicionada antes de ser aplicada ao enrolamento primário do TP que é, em geral, 23kV.

O TP então complementa o processo de redução da tensão através de sua relação de transformação (RTP) de modo a disponibilizar a tensão nominal de 115V em seu enrolamento secundário. Assim como para os TC nos canais analógicos de transdução de corrente, o transformador de potencial é seguido por um filtro de Butterworth de segunda ordem, para eliminação das altas frequências presentes no sinal de tensão. A Figura 4.3.1.1 apresenta o modelo do divisor capacitivo e do transformador de potencial.

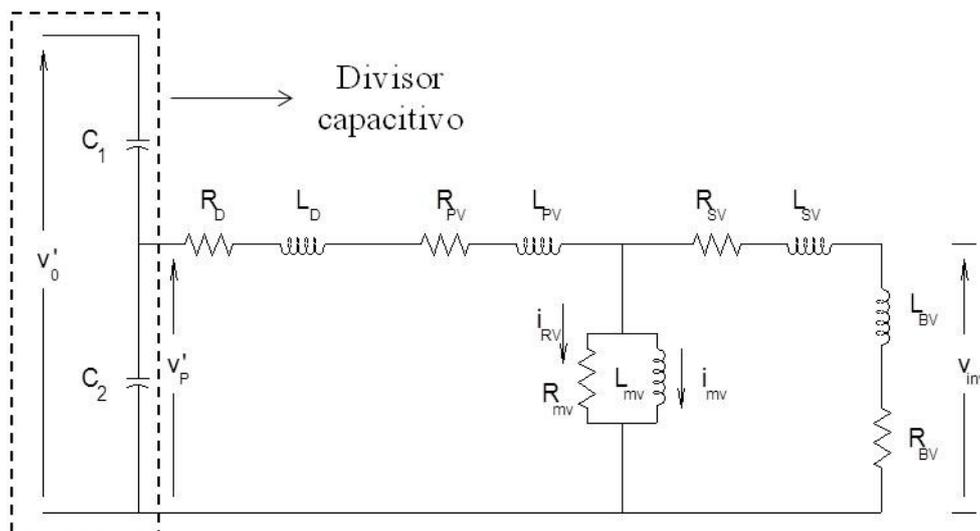


Figura 4.3.1.1 – Modelo do Divisor Capacitivo e do Transformador de Potencial

Analisando o circuito equivalente do DCP, é possível calcular a tensão de saída do divisor de tensão. A tensão  $v'_p$  é dada pela Equação 4.3.1.1.

$$v'_p = v'_0 \cdot (C_1 / (C_1 + C_2)) = 31,075 kV \quad (4.3.1.1)$$

A tensão  $v'_0$  representa a tensão da linha de transmissão e a constante capacitiva  $C_1 / (C_1 + C_2)$  é o fator de redução do primeiro estágio de transdução realizado pelo divisor capacitivo. Para fins de simulação, a impedância do reator do divisor capacitivo pode ser somada à impedância do enrolamento primário do TP, sem prejudicar a definição da tensão  $v'_p$ . Ainda a partir da Figura 4.3.1.1, pode-se escrever as Equações 4.3.1.2 e 4.3.1.3:

$$R'_{SV} = R_{SV} + R_D \quad (4.3.1.2)$$

$$L'_{SV} = L_{SV} + L_D \quad (4.3.1.3)$$

#### 4.3.2. Especificação do Divisor Capacitivo e Transformador de Potencial para o Sistema Analisado.

A relação de transformação completa do DCP utilizada no sistema deste trabalho é determinada a partir do conhecimento das capacitâncias  $C_1$  e  $C_2$  do divisor capacitivo. Para uma tensão primária nominal do DCP igual a 765 kV, sendo  $C_1 = 5,210$  nF e  $C_2 = 123,050$  nF, obtemos então:

$$RTP = \frac{v'_0(nom) \cdot (C_1 / (C_1 + C_2))}{v_{inv}(nom)} = 765000 \cdot (5,21/128,26)/115 = 270,22$$

Sendo  $1/RTP$  o fator de redução determinado pela relação de transformação das espiras do transformador. Com isso, obtém-se a seguinte configuração final para o sistema elétrico analisado:

Divisor de potencial capacitivo:

- capacitância superior:  $C_1 = 5,210 \text{ nF}$  ;
- capacitância inferior:  $C_2 = 123,05 \text{ nF}$  ;
- reator de compensação: indutância:  $54,86 \text{ H}$  , resistência  $541,0 \Omega$  .

Transformador de potencial - parâmetros referidos ao secundário:

- especificação: TP ABNT 400VA, classe de exatidão 1,2%;
- enrolamento primário: resistência:  $9,490 \text{ m}\Omega$  , reatância:  $78,563 \text{ m}\Omega$  ;
- enrolamento secundário: resistência: desprezível, reatância:  $376,99 \text{ m}\Omega$  ;
- resistência de carga  $11,02 \Omega$  , reatância de carga: desprezível.

#### **4.4. Modelagem da Compensação Série**

Neste item são apresentadas as características e premissas adotadas para a compensação série deste trabalho. Um desenvolvimento mais detalhado sobre a presença de compensação série em sistemas de transmissão é oferecido no capítulo 5.

As correntes de falta envolvidas em sistemas de transmissão reais são da ordem de 4 a 5 vezes a corrente nominal da linha e são relativamente maiores quando a compensação está incluída no loop de falta e muito elevadas em pontos do sistema próximos à geração. Desta forma, assim como pode ser observado neste trabalho, a compensação série aplicada a trechos de sistemas de transmissão é normalmente localizada o mais distante possível da geração, sem comprometer seu desempenho no que diz respeito ao aumento dos limites de estabilidade de regimes permanente e transitório.

Na ocorrência de faltas severas, a compensação série tem sua característica mo-

dificada, integral ou parcialmente, em razão da ação da proteção de sobretensão com varistores de óxido de zinco (MOV, do inglês *Metal Oxide Varistor*) e que, em situações de curto-circuito, retiram de serviço a compensação série sempre que a sobretensão em seus terminais ultrapassa o nível de proteção ajustado. Fora de operação, os capacitores anulam sua ação de compensação da impedância indutiva do sistema de transmissão, mas possibilitam que a proteção de distância tenha menores dificuldades para o reconhecimento do posicionamento das faltas que ocorram após a compensação.

A Tabela 4.1.3 apresenta os valores para os capacitores e suas respectivas localizações no sistema de transmissão adotado.

Tabela 4.4.1 - Dados dos capacitores da compensação série

	Circuito 1			Circuito 2		
	Barra 3 (esquerdo)	Barra 3 (direito)	Barra 4 (direito)	Barra 3 (esquerdo)	Barra 3 (direito)	Barra 4 (direito)
X1 (pu)	-0,0073	-0,0078	-0,0092	-0,0073	-0,0078	-0,0092
X1 ( $\Omega$ )	-42,72	-45,65	-53,84	-42,72	-45,65	-53,84
C <sub>S</sub> ( $\mu$ F)	62,09	58,11	49,27	62,09	58,11	49,27

Os capacitores do circuito 1, por exemplo, apresentam graus de compensação de 40%, 50% e 50%, respectivamente.

#### 4.5. Varistor de Óxido de Zinco (MOV)

As faltas em sistemas de transmissão com compensação série podem causar sobretensões nos terminais dos capacitores série devido aos elevados níveis das correntes de curto-circuito, podendo atingir níveis de até cinco vezes o valor da corrente nominal. Os BCS necessitam então de um dispositivo de proteção contra sobretensões já que, conceber um capacitor capaz de suportar elevados níveis de tensão apenas por meio de suas características construtivas seria economicamente inviável. No presente trabalho, a proteção do capacitor série será feita pelo Varistor de Óxido Metálico (MOV). O MOV consiste em uma resistência com característica não linear constituído em grande parte

por óxido de zinco e outras pequenas quantidades de metais óxidos. Sua característica em situações normais de operação é de uma resistência elevada, sendo percorrido apenas por uma corrente de dispersão quando operando com tensão nominal e drenando parte da corrente do capacitor quando a tensão em seus terminais excede a tensão ajustada para o nível de proteção.

O nível de proteção, em Volts, requerido para proteger o capacitor é dado pela Equação 4.5.1.

$$V_{\text{prot}} = Kp \times In \times Xc \times \sqrt{2} \quad (4.5.1)$$

Onde  $X_C$  corresponde à capacitância de sequência positiva da compensação série que está sendo protegida.

Tipicamente, a atuação do MOV é pensada de modo a deixar uma folga de 40% a 50% na corrente de carga. Esta margem é respeitada com o intuito de possibilitar as transferências de carga devido a manobras na configuração original do SEP e também para futuras expansões. Além disso, esta folga é mantida para que as proteções operando no sistema absorvam sem operar, as flutuações rotineiras de carga.

Assim sendo, o nível de proteção  $V_{\text{prot}}$  do MOV foi escolhida considerando o fator  $Kp = 1,5$  de modo que o capacitor possa suportar até 1,5 vezes a corrente nominal de linha ( $In$ ) do sistema, de valor 4,891 kA.

Dada a característica resistiva altamente não linear do MOV, não se pode afirmar que a corrente que o percorre é senoidal. A Figura 4.5.1 mostra a tensão sobre o conjunto capacitor-MOV e as correntes do capacitor, MOV e a corrente total. Pode-se observar que a cada meio ciclo, a corrente total divide-se entre o capacitor e o MOV porém, com o capacitor conduzindo no primeiro quarto de ciclo (até o instante em que a tensão sobre o capacitor supera a tensão de proteção ajustada para o MOV) e no segundo quarto de ciclo, a corrente circula pelo MOV. A corrente total corresponde à soma destas duas parcelas compondo a corrente de saída do conjunto capacitor-MOV. Pode-se notar que esta última corrente apresenta variação senoidal, o que sugere que o MOV

pode ser aproximado por um elemento de resistência linear. A Figura 4.5.2 ilustra este fato, onde as três correntes envolvidas são mostradas no mesmo gráfico.

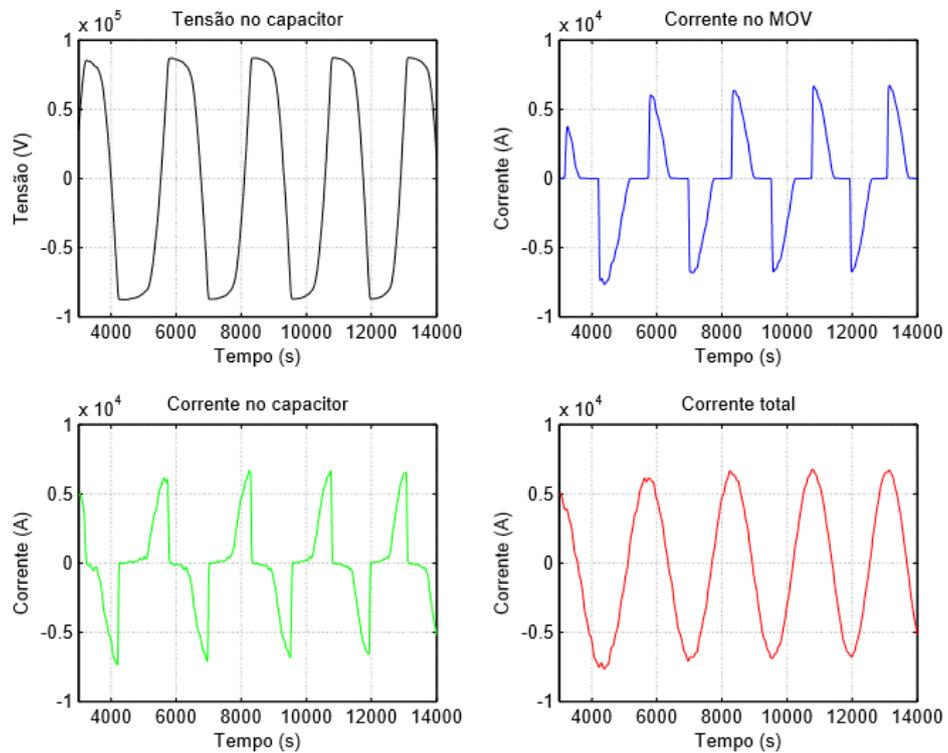


Figura 4.5.1 - Tensão no conjunto capacitor-MOV e correntes com MOV

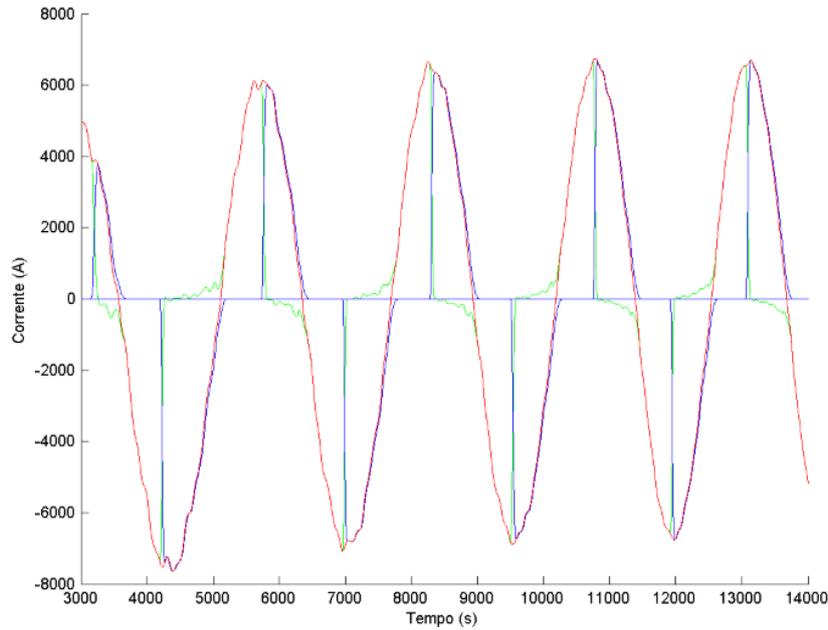


Figura 4.5.2 - Correntes no capacitor, no MOV e corrente total

#### 4.6. Esquema Completo para a Classificação e Localização de Falhas

Neste item será apresentado o hardware padrão para um sistema de proteção digital com as etapas de aquisição e condicionamento dos sinais obtidos a partir das simulações, detecção, classificação e localização das falhas. O esquema é composto de 3 (três) módulos principais:

- **Módulo 1:** Este módulo corresponde à interface entre o sistema de transmissão e o processamento dos dados que irão alimentar o algoritmo de localização de falhas. É responsável pela aquisição dos sinais senoidais de tensões e correntes pré e pós-falta e redução aos níveis apropriados para aplicação em dispositivos microprocessados. Aqui estão presentes os canais analógicos de transdução de corrente e tensão, compostos por transformadores de correntes e de potencial, divisores capacitivos e filtragem anti-aliasing, onde é feita a eliminação das frequências elevadas presentes no sinal;
- **Módulo 2:** A importância deste módulo reside no fato de que os microprocessadores operam apenas com dados digitalizados. Nesta etapa há um bloco de sincro-

nização onde estão contemplados elementos como o *sample and hold*, e o multiplexador. O *sample & hold* é responsável pela conversão e armazenagem do sinal no tempo contínuo para o tempo discreto a uma taxa de aquisição apropriada, dirigida pelos pulsos gerados por um circuito de *clock*. O multiplexador é o elemento que viabiliza a utilização de apenas um conversor analógico/digital. O conversor A/D, por sua vez, faz a conversão dos dados do formato analógico para o digital. Em outras palavras, aqui é feito um condicionamento dos sinais analógicos para posterior processamento digital.

- **Módulo 3:** O último módulo contém os algoritmos computacionais que respondem pelo processamento das informações como detecção da falta, normalização dos dados no intervalo adotado e aplicação da RNA para as tarefas de identificação da fase envolvida e localização da falta.

A Figura 4.6.1 contém o diagrama de blocos destacando cada etapa do processo.

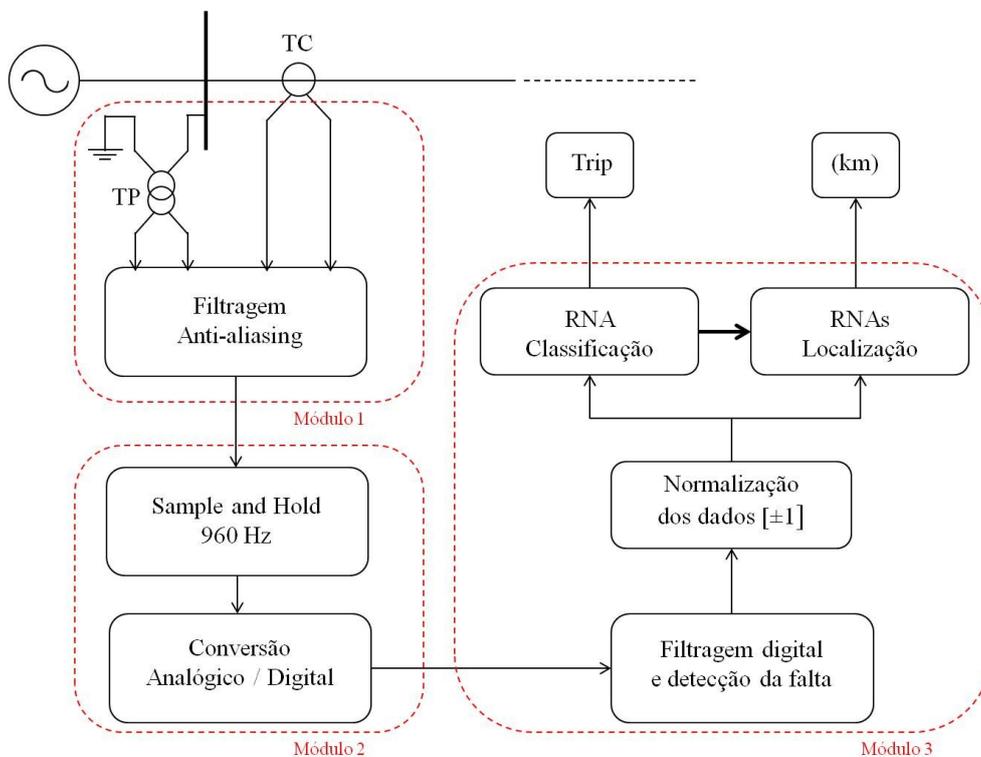


Figura 4.6.1 - Esquema padrão para detecção, classificação e localização de faltas

## **5. EFEITOS DA PRESENÇA DA COMPENSAÇÃO SÉRIE SOBRE A OPERAÇÃO DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO**

Há diversas vantagens em se utilizar a compensação série em sistemas de transmissão, tais como a extensão dos limites de estabilidade, melhoria da divisão de cargas entre os corredores de transmissão em paralelo, redução das perdas na transmissão e a redução das quedas de tensão durante perturbações. Porém, a incorporação de BCS aos SEP pode causar alguns problemas para a operação dos relés de distância. Alguns trabalhos, como em (LIMA, 2006 ) e (OLIVEIRA, 2005), abordam em detalhes os fatores adversos decorrentes da utilização da compensação série no tocante ao desempenho da proteção de distância convencional.

A seguir será feita uma análise destes fatores em situações em que ocorrem o efeito da inversão da corrente e de tensão no loop de falta do ponto de vista dos terminais onde está instalada a proteção de distância e os efeitos causados pela atuação da proteção contra sobretensões nos terminais do BCS.

### **5.1. Medição da Tensão**

O cálculo da impedância vista pela proteção de distância é feito a partir das informações de tensão e corrente obtidas por meio dos canais analógicos de transdução. Desta forma, a localização da medição de potencial em relação à localização do banco de compensação série influencia diretamente no ângulo da impedância vista pelo relé, podendo ser uma impedância predominantemente indutiva ou capacitiva.

A discussão apresentada nos itens 5.1.1 e 5.1.2 a seguir considera apenas os casos em que a compensação está instalada em um dos extremos do trecho que será compensado, como é o caso do presente trabalho.

### 5.1.1. Medição da Tensão Atrás da Compensação Série

Para ilustrar o efeito da localização da medição do potencial no cálculo da impedância, pode-se considerar o trecho do sistema de transmissão mostrado na Figura 5.1.1.1.

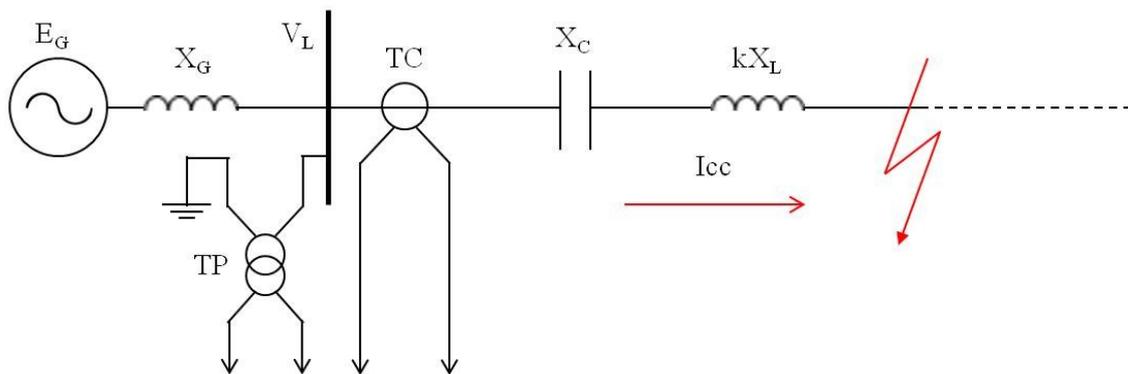


Figura 5.1.1.1 - Medição de potencial atrás da compensação

Seja  $V_L$  a tensão obtida a partir do canal de transdução de tensão,  $X_C$  a reatância capacitiva referente ao BCS e  $kX_L$  a parcela de reatância indutiva da linha de transmissão presente no loop de falta, onde  $k$  corresponde a um fator multiplicativo proporcional à distância entre o barramento onde está instalada a proteção e o ponto de localização da falta.

A impedância total presente no loop de falta será dada pela Equação 5.1.1.1.

$$\bar{Z} = j(X_R + kX_L - X_C) \quad (5.1.1.1)$$

Se a impedância capacitiva  $X_C$  for superior à parcela  $kX_L$  ( $X_C > kX_L$ ) percorrida pela corrente de falta, a impedância resultante vista pela proteção será negativa (predominantemente capacitiva) e, caso contrário, será positiva.

### 5.1.2. Medição da Tensão Após a Compensação Série

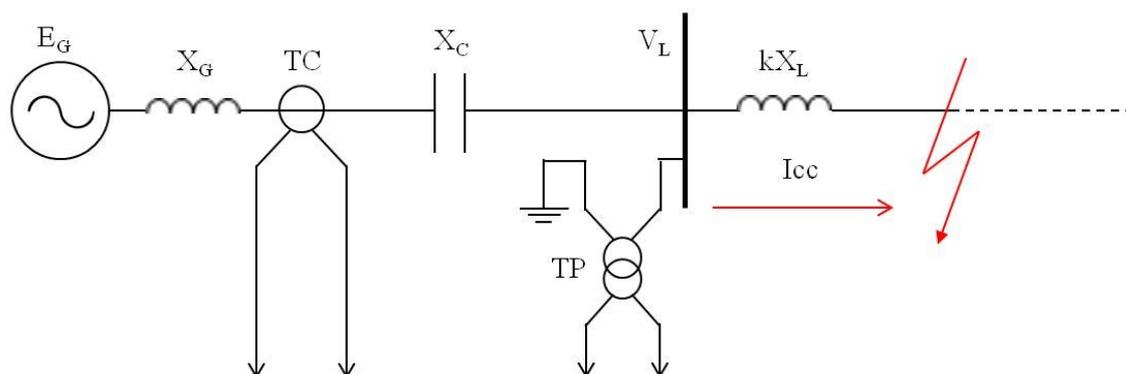


Figura 5.1.2.1 - Medição de potencial após a compensação

Nestas circunstâncias, a impedância vista pelo relé de distância será sempre positiva visto que a reatância capacitiva referente ao BCS nunca estará presente no loop de falta sob o ponto de vista do transformador de potencial.

Neste trabalho, a situação descrita neste segundo cenário não ocorrerá pois a informação de potencial está localizada atrás da compensação série em todos os casos.

### 5.2. Inversão da Tensão

O problema de inversão de tensão pode ocorrer quando a reatância capacitiva total presente no loop de falta supera, em módulo, a reatância indutiva da linha de transmissão. A Figura 5.2.1 representa uma situação de curto-circuito com as tensões e correntes envolvidas para o sistema não compensado. O subíndice "L" representa uma grandeza associada ao terminal local enquanto o subíndice "R" representa a mesma grandeza, porém, referente ao terminal remoto. O elemento denominado "R" presente em ambos os terminais nas Figuras 5.2.1 a 5.3.1 representa o relé instalado naquele local.

Os sistemas de transmissão são predominantemente indutivos, com relações X/R maiores ou iguais a 15 em sua maioria. Com a necessidade de compensação destes sis-

temas de transmissão e com a instalação dos BCS especialmente próximos aos extremos das linhas, em algumas situações, dependendo do ponto em que ocorrer a falta, a impedância vista pelo relé tornar-se-á predominantemente capacitiva, com a reatância capacitiva do BCS superando, em módulo, a capacitância indutiva presente no loop de falta, ocasionando os efeitos que serão discutidos a seguir.

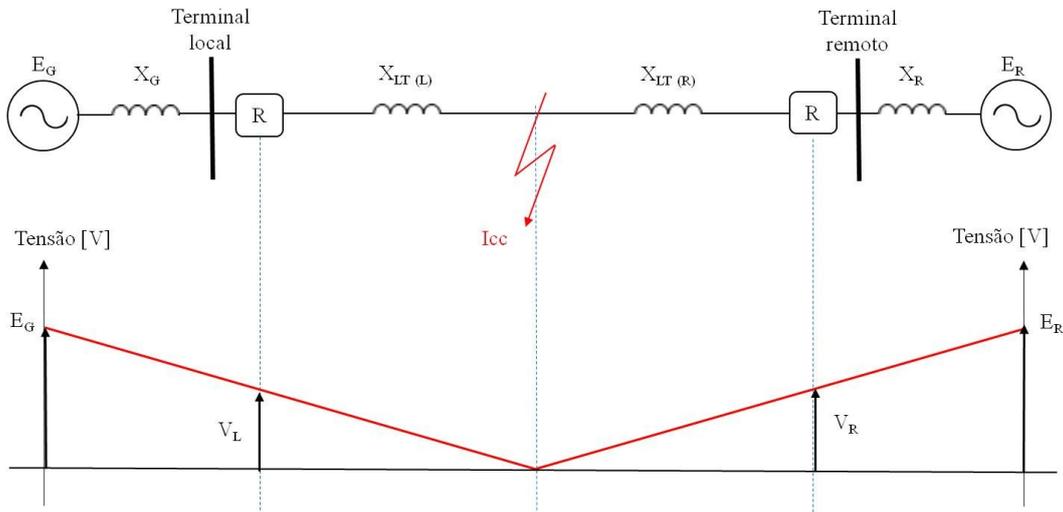


Figura 5.2.1 - Curto-circuito para um LT não compensada

A impedância corrente de curto-circuito para o sistema com compensação série mostrado na Figura 5.2.2 pode ser calculada através da Equação 5.2.1, onde a impedância é dada pela Equação 5.2.1.

$$I_{cc} = \frac{E_R}{Z} = \frac{E_R}{j(X_R + kX_L - X_C)} = -j \frac{E_R}{(X_R + kX_L - X_C)} \quad (5.2.1)$$

O canal de transdução de tensão do relé instalado no terminal remoto medirá uma tensão  $V_R$  que é dada por  $V_R = j(kX_L - X_C) \times I_{cc}$ .

A partir dos resultados anteriores, o sinal de tensão que será utilizado pela proteção no cálculo da impedância será:

$$V_R = j(kX_L - X_C) \times -j \frac{E_R}{(X_R + kX_L - X_C)} = \frac{E_R(kX_L - X_C)}{(X_R + kX_L - X_C)} \quad (5.2.2)$$

Por observação direta da Equação 5.2.2, nota-se que, se  $X_C > kX_L$  e  $X_C < kX_L + X_R$ , o fenômeno da inversão de tensão será observado. As Figuras 5.2.2 e 5.2.3 mostram uma falta sem inversão e com inversão de tensão, respectivamente.

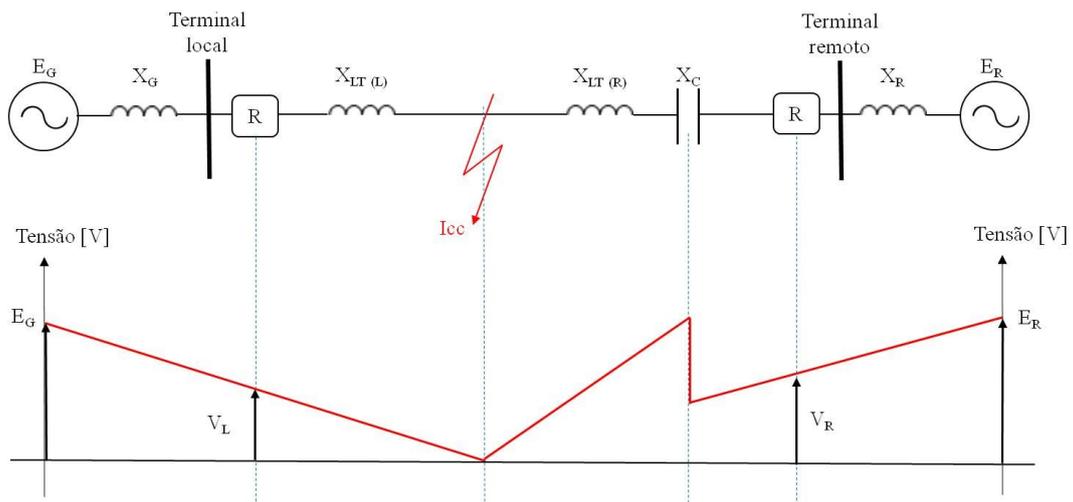


Figura 5.2.2 - Curto-circuito para um LT compensada

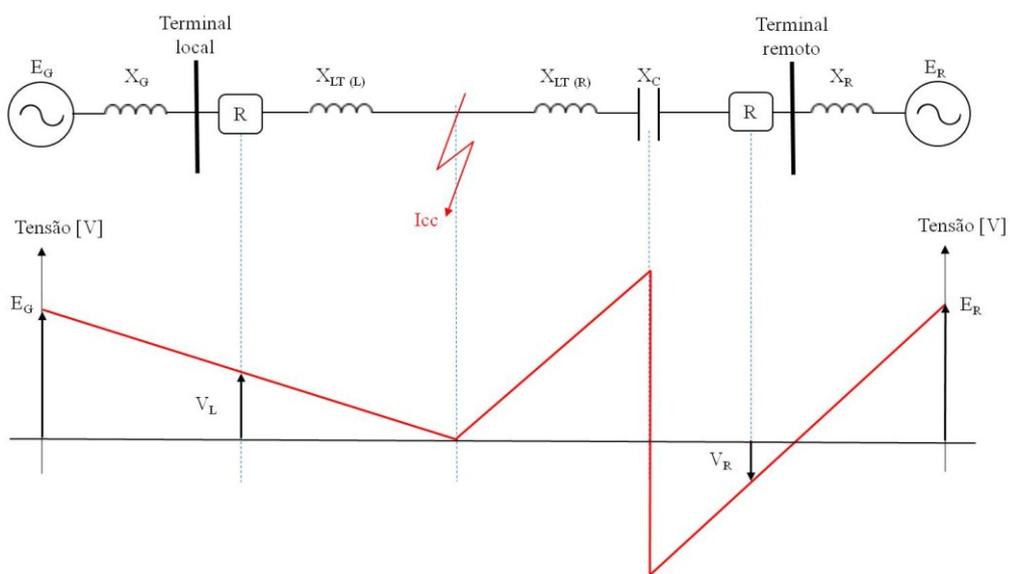


Figura 5.2.3 - Curto-circuito para um LT compensada com inversão de tensão

### 5.3. Inversão da Corrente

Para analisar o problema da inversão de corrente nos loops de falta, a Equação 5.2.1 pode ser utilizada.

Quando ocorrer  $X_C > kX_L + X_R$  no loop de falta, haverá uma inversão de  $180^\circ$  na fase da corrente de curto do lado do terminal remoto e a corrente inverterá seu sentido. A Figura 5.3.1 mostra a presença de uma corrente capacitiva no terminal remoto do sistema de transmissão, fluindo da LT em direção à rede. Isto denota uma oposição de fase entre as correntes dos terminais local e remoto. Isto se caracteriza com um efeito indesejável para a proteção de distância pois, para elementos da proteção baseados na comparação de fase entre grandezas como, por exemplo, as unidades direcionais da proteção, faz parecer que a falta é externa à linha quando, fisicamente, a falta é interna.

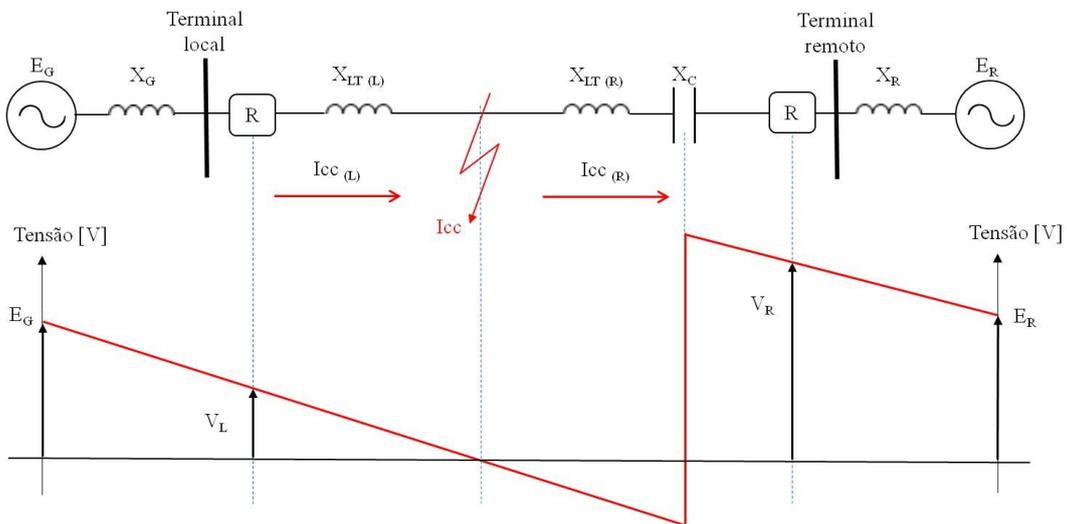


Figura 5.3.1 - Curto-circuito para um LT compensada com inversão de corrente

### 5.4. Proteção do Capacitor Série

A compensação série é de extrema importância para a operação de sistemas de transmissão no que tange ao aumento da capacidade de transferência de potência de

linhas longas sem a necessidade de investimento em construção de novos circuitos. Sua aplicação resulta nos efeitos favoráveis de aumento dos níveis de estabilidade de regime permanente e maior amortecimento das oscilações de potência, mas vem acompanhada pelas denominadas oscilações subsíncronas que devem ter suas amplitudes controladas ou eliminadas.

Outra grande preocupação é que a presença da compensação série traz, ainda, algumas dificuldades para operação normal da proteção de distância convencional, dado que a medição da impedância vista pelos relés de distâncias sofre influência direta da variação da tensão sobre os terminais do BCS.

A tensão sobre os terminais dos BCS dotados de MOV para proteção contra sobretensões não possui um comportamento único para todas as situações de operação do sistema de transmissão. Em outras palavras, para condições nominais de operação, os níveis de tensão sobre os terminais do conjunto MOV + BCS estão próximos ao nominal e a reatância capacitiva do BCS é máxima. No entanto, com a variação da corrente que percorre o capacitor em situações de curto, o MOV atua para controlar a tensão sobre o capacitor e mantê-la em níveis seguros. Sob o ponto de vista da proteção de distância, este controle altera a impedância total vista pelo relé pois para faltas de alta impedância - distantes do BCS e onde as correntes envolvidas são relativamente menores - o MOV não conduz e o BCS opera normalmente. Em contrapartida, para faltas próximas ao ponto de instalação do BCS, as correntes são maiores, obrigando o MOV a entrar em condução, a drenar parte da corrente que percorreria o capacitor e, desta forma, reduzir a tensão sobre o mesmo.

As Figuras 5.4.1 e 5.4.2 ilustram as duas situações descritas acima para um curto-circuito franco FT envolvendo a fase A e aplicado ao trecho 3 à 10% e a 90% em relação ao terminal local. Na primeira, com o curto aplicado longe do compensação, a tensão sobre o capacitor permanece dentro do limite e nenhuma ação do MOV é necessária. Na segunda o curto é aplicado próximo ao capacitor e a corrente de curto elevada faz com que a tensão sobre os terminais exceda o limite determinado, exigindo a atuação do MOV.

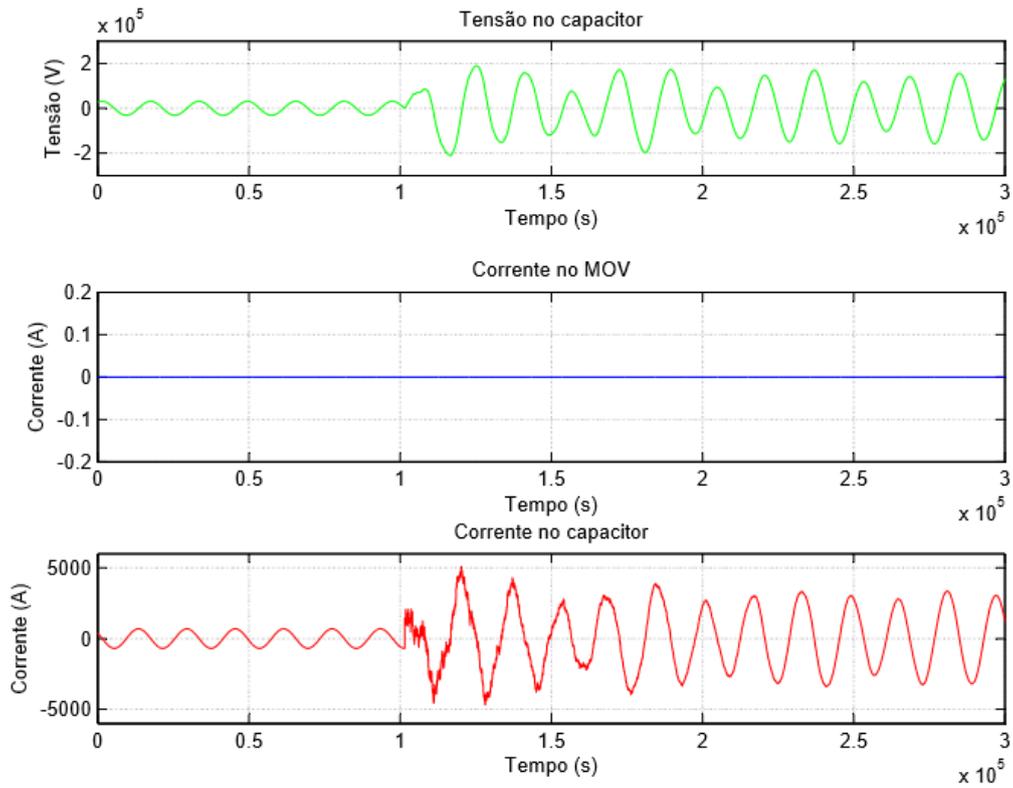


Figura 5.4.1 - Característica de atuação do MOV - Falta FT a 90%

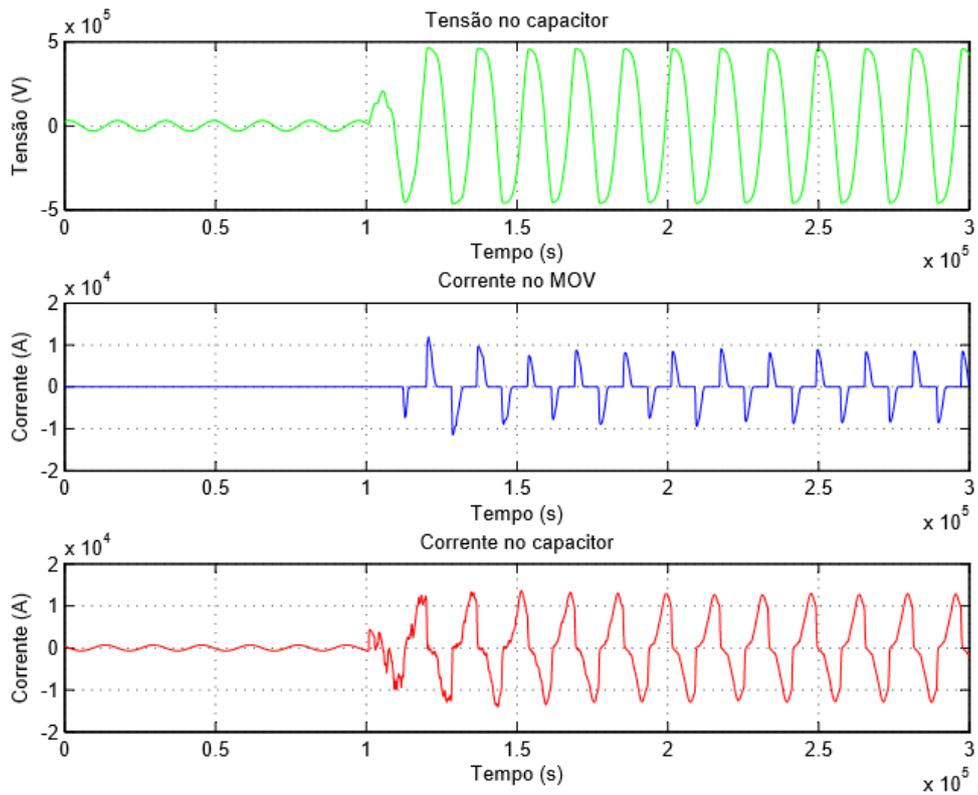


Figura 5.4.2 - Característica de atuação do MOV - Falta FT a 10%

A Figura 5.4.2 ilustra a situação em que o tensão sobre o capacitor excede a tensão de proteção ajustada para o MOV. Nestas circunstâncias, a cada meio ciclo da tensão, o MOV conduz uma parcela da corrente que circularia pelo capacitor. Esta condução dura o intervalo de tempo em que o capacitor estaria exposto à sobretensão em seus terminais. Este cenário altera a reatância total do BCS, alterando o grau de compensação efetivo para o qual a proteção de distância foi especificada.

Em (OLIVEIRA, 2005) foi discutida a influência do MOV na impedância efetiva da linha de transmissão medida pela proteção convencional especialmente nos períodos de condução do MOV. Tal fato criou a necessidade de modelagem destes dispositivos no que diz respeito ao comportamento de sua impedância equivalente sob condições de falta a partir da medição de corrente no ponto de instalação da proteção de distância.

### 5.5. Presença de Oscilações Subsíncronas nos Sinais

Neste capítulo é discutido ainda o conceito de oscilação subsíncrona, que tem origem na interação entre a indutância longitudinal do sistema elétrico e a capacitância inserida pela compensação série. Em seguida, o efeito deste fenômeno sobre o comportamento dos canais de transdução de tensão e corrente é ainda avaliado.

Os sistemas de transmissão constituem circuitos RL predominantemente indutivos, com relação  $X_L/R$  elevadas. O recurso da compensação série, insere, portanto, uma capacitância em série com a indutância da linha, formando um acoplamento LC. Em situações de curto-circuito, ocorre uma condição ressonante entre as reatâncias indutivas da LT e de seus reatores e a reatância capacitiva do capacitor denominada oscilação subsíncrona, gerando uma ou mais frequências subsíncronas cuja componente predominante possui uma frequência  $f_r$  é dada por:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{\omega_0}{2\pi} \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = f_0 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (5.5.1),$$

sendo  $f_0$  a frequência fundamental (ou síncrona) do sistema que, neste caso, é 60Hz. A razão  $X_C/X_L$ , onde  $X_L$  corresponde à reatância indutiva equivalente do sistema na frequência fundamental e  $X_C$  à reatância capacitiva da linha referente à compensação série na frequência fundamental, é comumente referida como grau de compensação série.

Nota-se que a frequência da oscilação  $f_r$  é menor que a frequência fundamental pois o grau de compensação série é normalmente menor que 1. A considerar, portanto, que reatância  $X_L$  pode ser acrescida das reatâncias indutivas de transformadores e geradores conectados em série com a LT. Além de afetar o desempenho dos sistemas de proteção de distância, as oscilações subsíncronas podem conduzir a trocas de energia sustentadas entre o sistema de transmissão e o sistema mecânico, podendo resultar no surgimento de conjugados transitórios de maior amplitude relativa sobre as seções de eixo mecânico de turbogeradores (BORGES, 2007).

## **5.6. Análise de Desempenho dos Canais de Transdução**

O método de classificação e localização de faltas é baseado na apresentação às redes neurais da amplitude do fasor na componente fundamental das tensões e correntes no período pós-falta. Para que os fasores estejam na forma adequada à aplicação na RNA, é necessário que os sinais de corrente e tensão obtidos a partir dos canais de transdução sejam devidamente condicionados, passando pela filtragem de segunda ordem, pelo algoritmo de detecção do instante de falta e pela filtragem digital para extração do módulo do fasor na frequência fundamental.

Para o processo de extração dos fasores, é necessário que os sinais estejam livres de frequências elevadas, o que é alcançado com a filtragem analógica, e que tenham sido amostrados a taxas apropriadas a fim de evitar o fenômeno de aliasing. No entanto, as componentes aperiódicas (níveis DC) e as frequências subsíncronas são relativamente imunes a este tratamento prévio recebido pelos sinais mas, mesmo após a passagem pelos módulos 1 e 2 do hardware padrão, chegam para a etapa de extração fasorial

(módulo 3) afetando, em maior ou menor extensão, o desempenho dos algoritmos de filtragem digital, já que estes apresentam alguma dificuldade diante destes fenômenos.

Sistemas de proteção de distância convencionais são comumente analisados a partir do diagrama no plano R-X, no qual são indicados o círculo característico de operação do relé e a excursão da impedância desde o ponto de operação normal da LT sob carga até o ponto que indica a falta, no interior do círculo. A presença das componentes subsíncronas faz com que a trajetória da impedância medida pelo relé se aproxime do ponto indicativo da falta (ponto de estabilidade da impedância), no interior da característica de falta no plano complexo, descrevendo espirais que são tão maiores quanto forem as amplitudes dessas componentes. A Figura 5.6.1.1 ilustra este fato. Na próxima seção será observado o efeito da frequência subsíncrona no comportamento dos fasores.

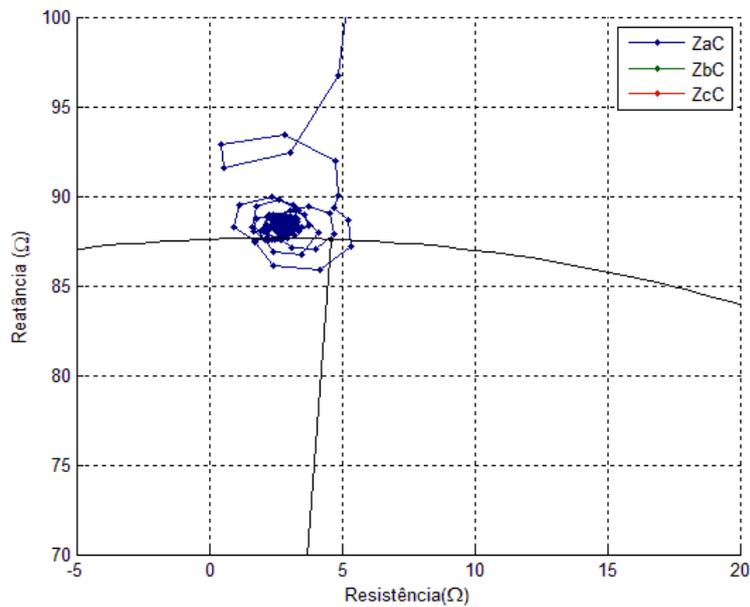


Figura 5.6.1.1 - Trajetória da impedância vista pelo relé da fase A

### 5.6.1. Presença de Oscilações Subsíncronas

A seguir são apresentados alguns exemplos de processamento da oscilografia das correntes e tensões trifásicas nos pontos de localização da proteção - terminais local e remoto - nos instantes pré e pós-falta para curtos-circuitos nos trechos 1, 2 e 3, con-

forme definido na seção 4.1. As faltas foram concentradas em dois pontos, distantes a 10% e a 90% em relação ao terminal local e que foram escolhidos propositalmente por serem interessantes sob o ponto de vista do efeito das frequências subsíncronas, dependendo do ponto de localização da proteção que se deseja analisar, e por estarem próximos aos extremos de cada trecho. O objetivo é analisar o comportamento dos canais de transdução frente às características do sistema de transmissão em estudo, frente à presença ou não de compensação série no loop de falta e frente ao local da aplicação do curto-circuito e ângulo de incidência da falta. Os gráficos mostrados na Figura 5.6.1.1 correspondem a uma situação de curto-circuito franco ( $R_f=0\Omega$ ) fase-terra (FT) envolvendo a fase A, aplicado ao trecho 1, com ângulo de incidência<sup>3</sup> de  $90^\circ$  e localizado a uma distância de 10% em relação ao terminal local. Entre os instantes  $t_f = 0$  s e  $t_f = 0,1051$  s - instante de aplicação da falta - é considerado que o sistema está operando no regime permanente pré-falta e todos os efeitos de interesse ocorrem após o instante  $t_f = 0,1051$  s.

Na Figura 5.6.1.1, a componente subsíncrona manifesta-se com maiores amplitudes principalmente para defeitos em que a compensação série está incluída no loop de falta, situação esta que ocorre para o terminal remoto. Especialmente para os primeiros ciclos após a aplicação da falta, pode-se observar a presença da componente referida alterando consideravelmente os valores de crista da forma de onda de corrente da componente fundamental a 60 Hz. Na Figura 5.6.1.2, que mostra a situação em que o curto é aplicado a 90%, observa-se claramente que as grandezas medidas no terminal remoto, ao contrário do que era observado na situação anterior, estão sofrendo pouca influência da ressonância subsíncrona. Neste caso, com o curto-circuito aplicado a 90%, a reatância indutiva do loop de falta passa a ser apenas 3,3% da reatância indutiva total do trecho 1 e, com isso, de acordo com a Equação 5.5.1, a frequência de ressonância se aproxima de 60Hz. O mesmo comportamento é ilustrado nas Figuras 5.6.1.3 até 5.6.1.6, onde são mostradas as grandezas elétricas medidas nos terminais local e remoto dos trechos 2 e 3.

---

<sup>3</sup> Por observação direta da forma de onda da tensão de fase pré-falta da fase envolvida, pode-se concluir que a tensão passa por um dos zeros no instante  $t_f=0,0509$  e por um dos picos no instante  $t_f=0,1051$  s, o qual foi associado às incidências  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , respectivamente.

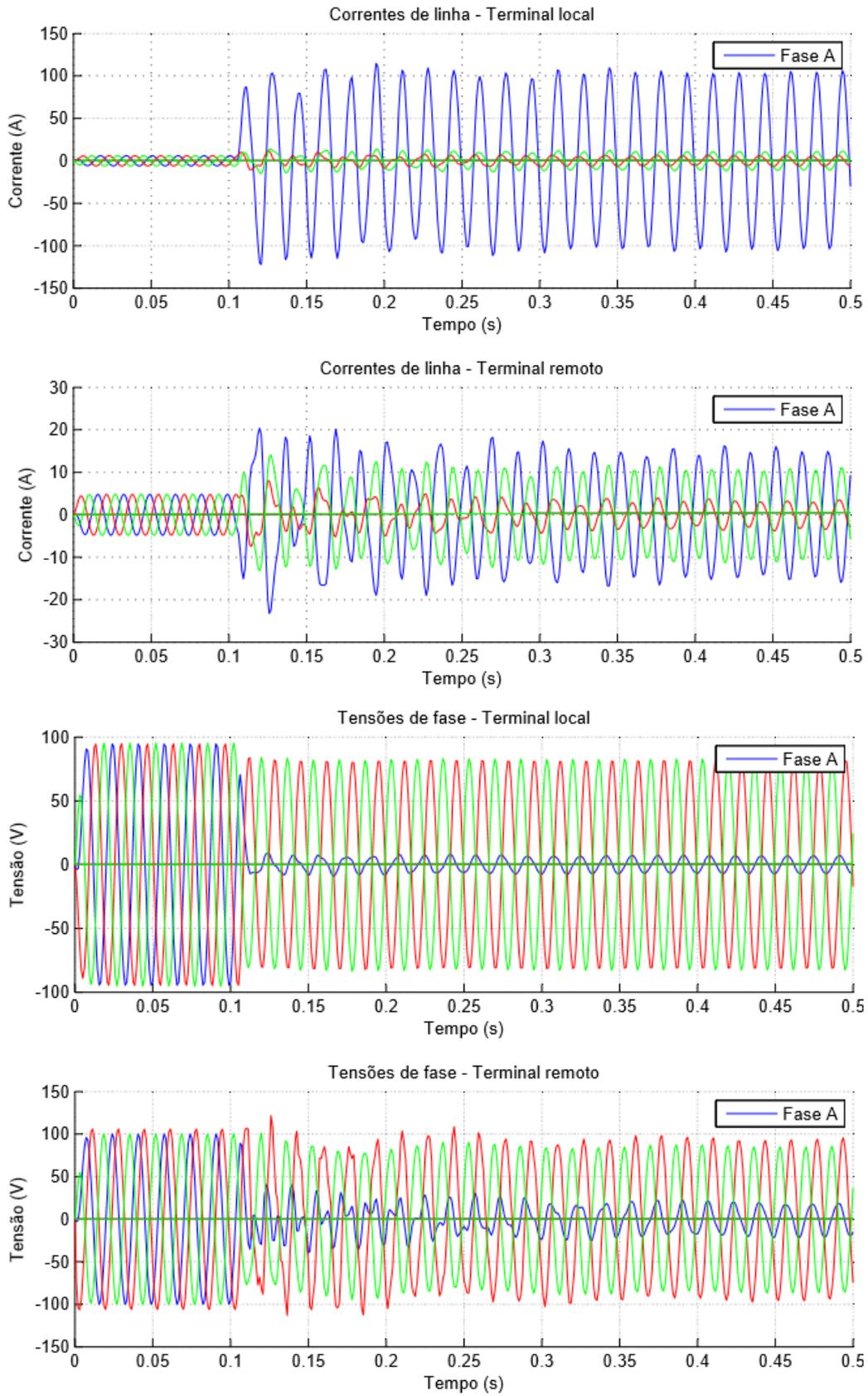


Figura 5.6.1.1 - Formas de onda das correntes e tensões - Trecho 1 a 10%

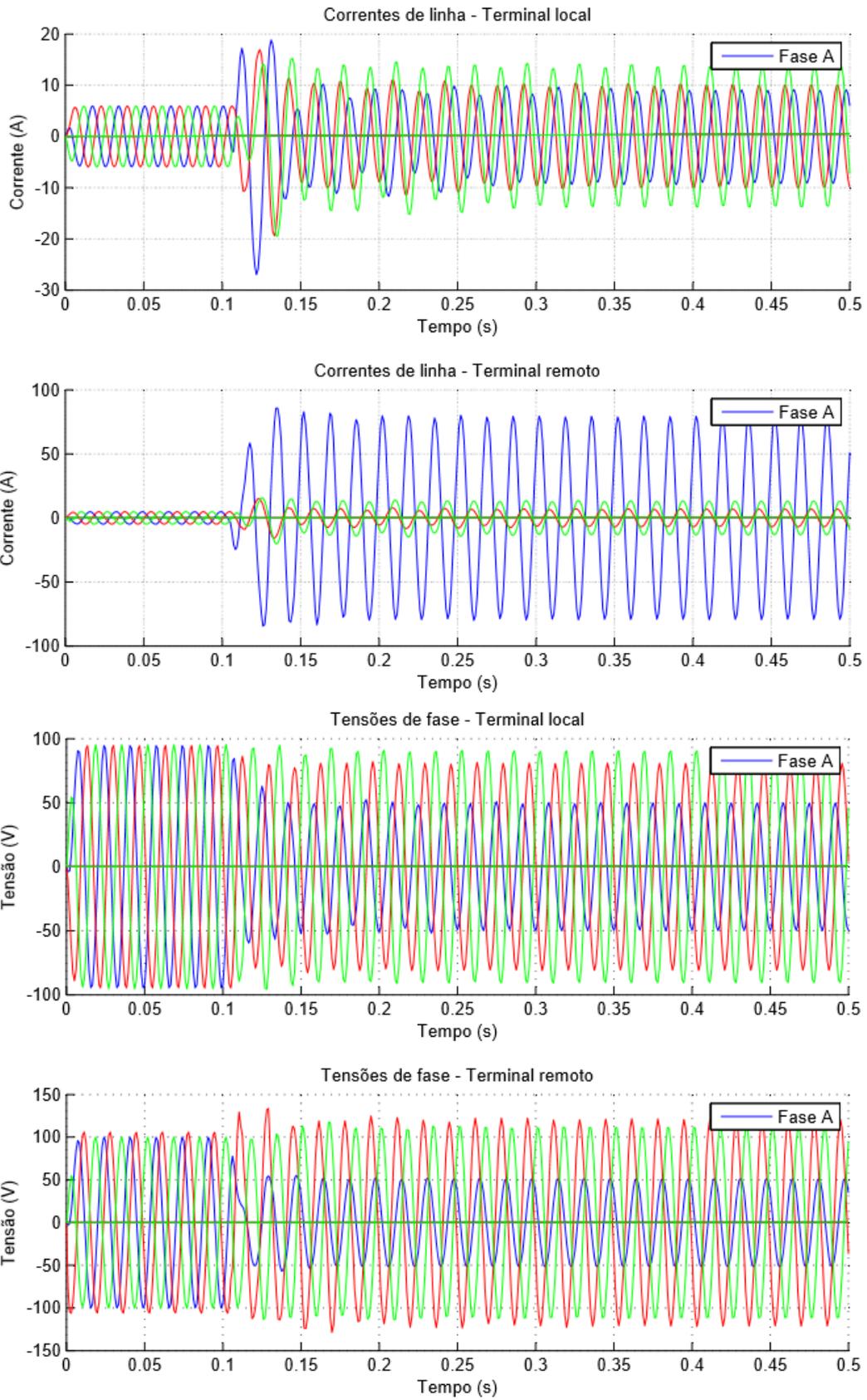


Figura 5.6.1.2 - Formas de onda das correntes e tensões - Trecho 1 a 90%

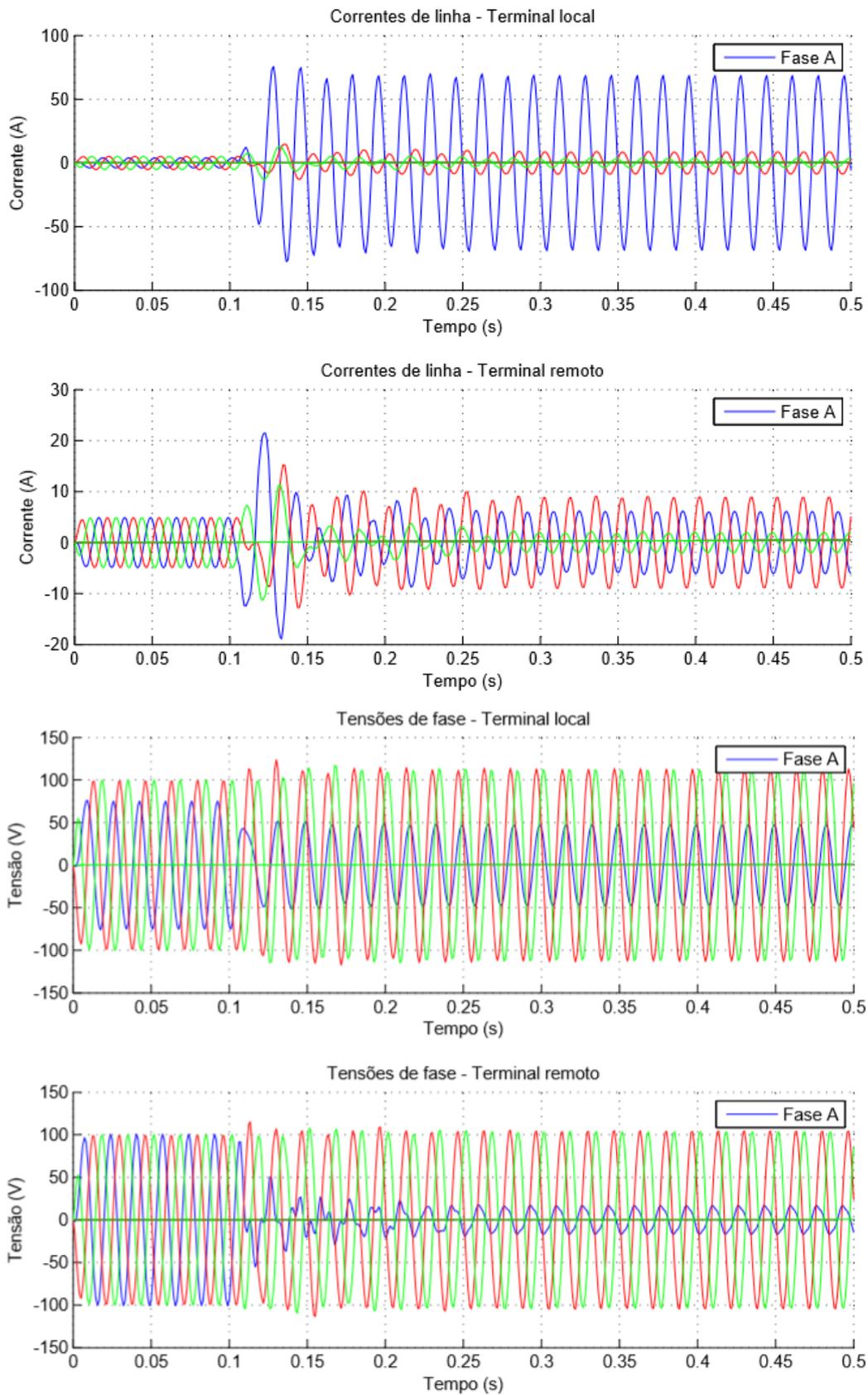


Figura 5.6.1.3 - Formas de onda das correntes e tensões - Trecho 2 a 10%

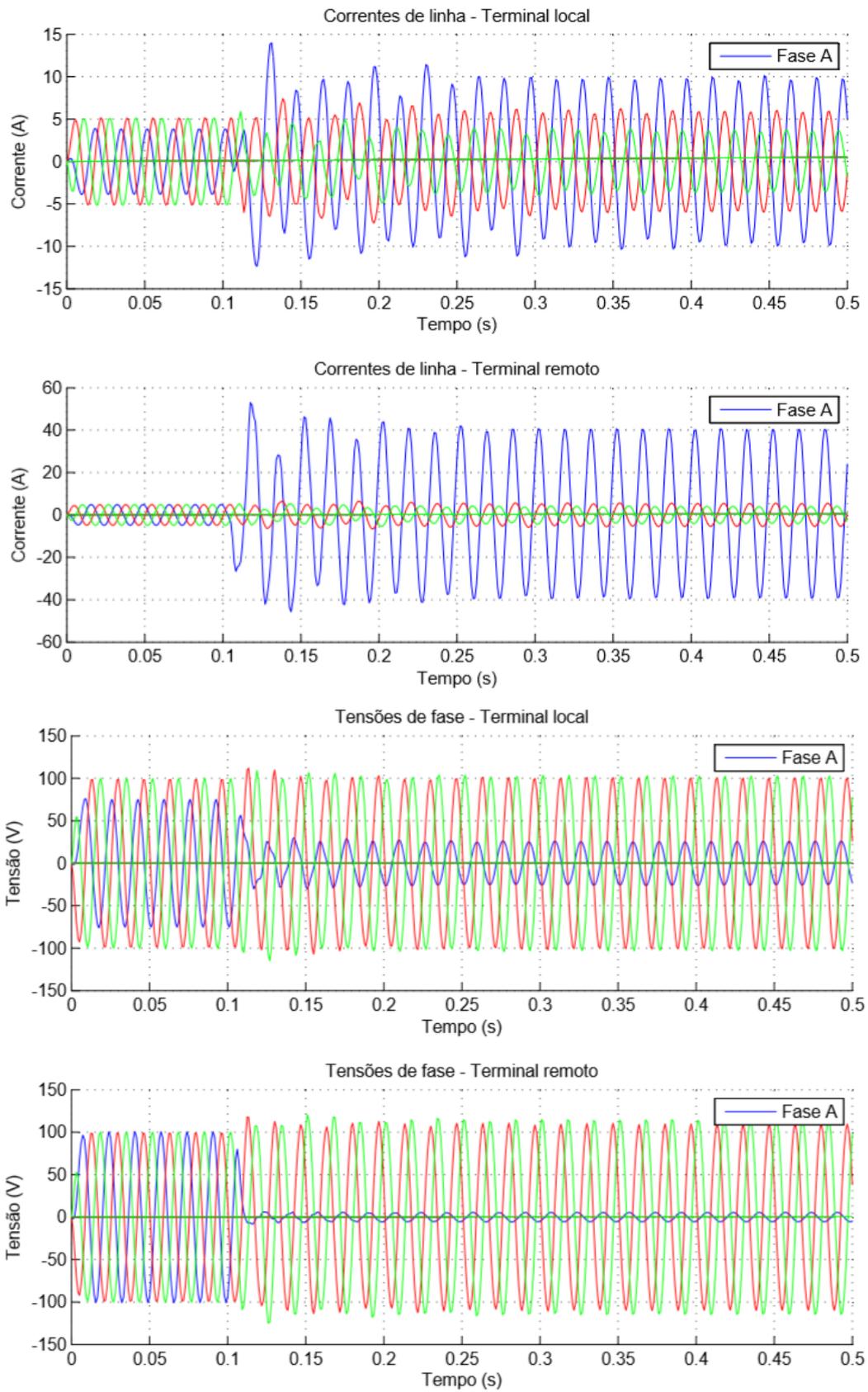


Figura 5.6.1.4 - Formas de onda das correntes e tensões - Trecho 2 a 90%

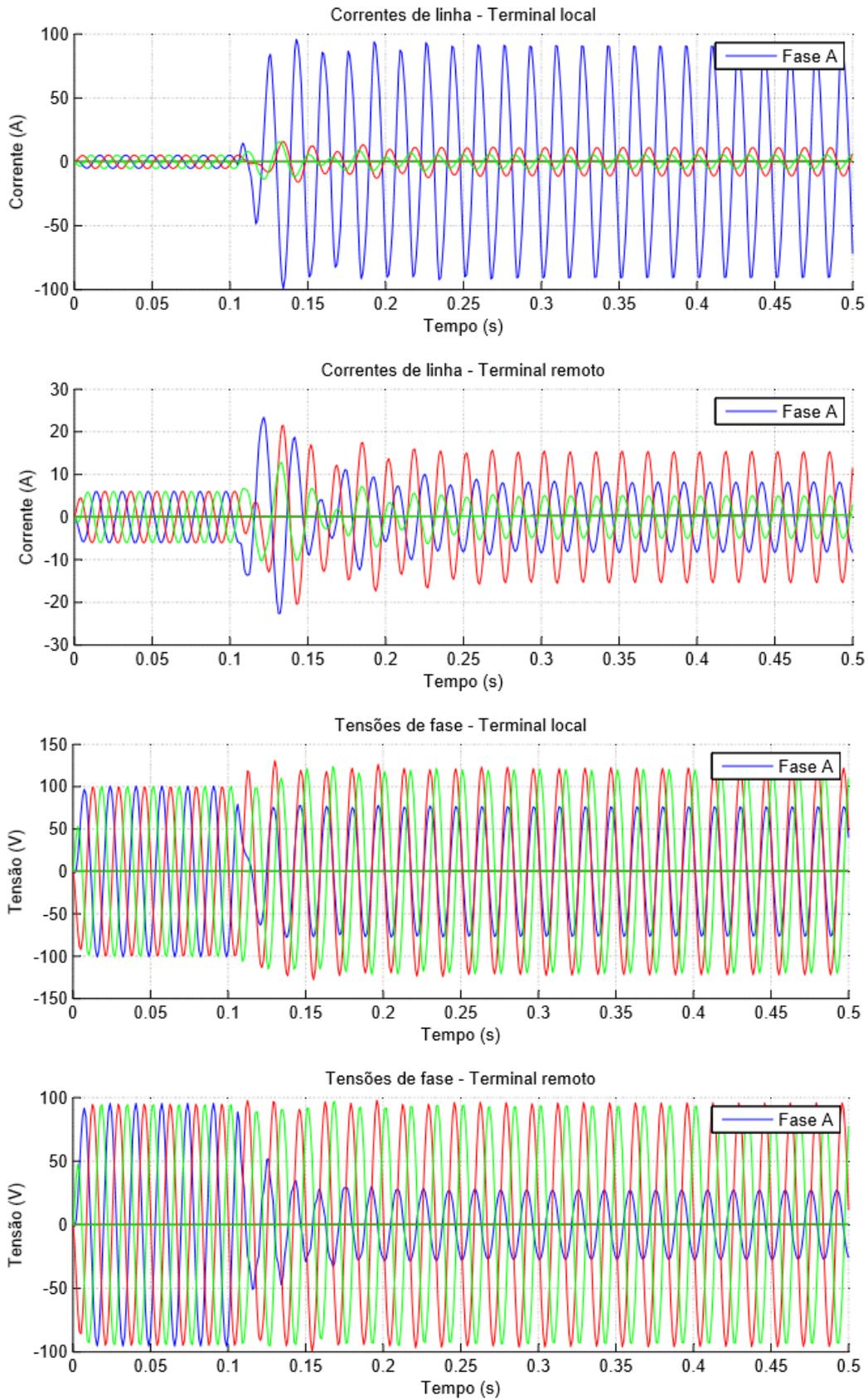


Figura 5.6.1.5 - Formas de onda das correntes e tensões - Trecho 3 a 10%

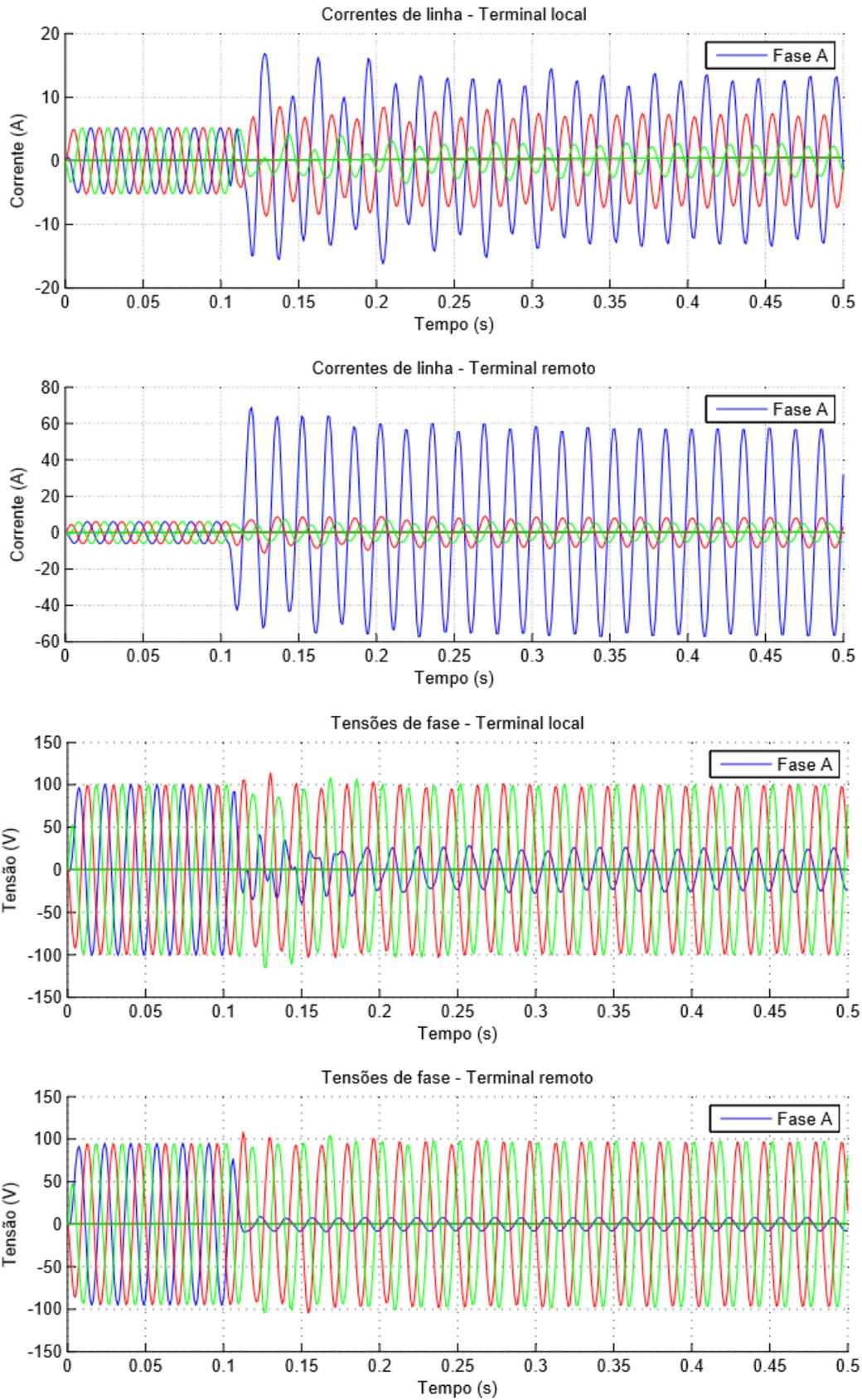


Figura 5.6.1.6 - Formas de onda das correntes e tensões - Trecho 3 a 90%

Conforme mencionado anteriormente, a reatância indutiva da linha de transmissão e a reatância capacitiva introduzida pela compensação formam um circuito ressonante série, gerando uma componente subsíncrona, em geral entre 25 e 30 Hz.

Os gráficos mostrados na Figura 5.6.1.7 indicam a corrente da fase A no terminal local para uma situação de curto-circuito fase-terra com  $R_f=10\Omega$  aplicado ao trecho 3, com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e localizado a uma distância de 290 km em relação ao terminal local e sua correspondente análise de Fourier até a frequência de 250 Hz para o sinal completo, ou seja, contemplando os períodos pré e pós-falta. A frequência de 250 Hz foi fixada como limite superior para melhor visualização das frequências de interesse e porque para frequências acima desta, a magnitude das componentes é desprezível.

Pode-se destacar no gráfico da corrente a alteração nas amplitudes do sinal para os primeiros ciclos após a falta e, no gráfico dos harmônicos, a forte presença das frequências sub-harmônicas com elevada magnitude - em relação à fundamental - devido à presença do capacitor no loop de falta.

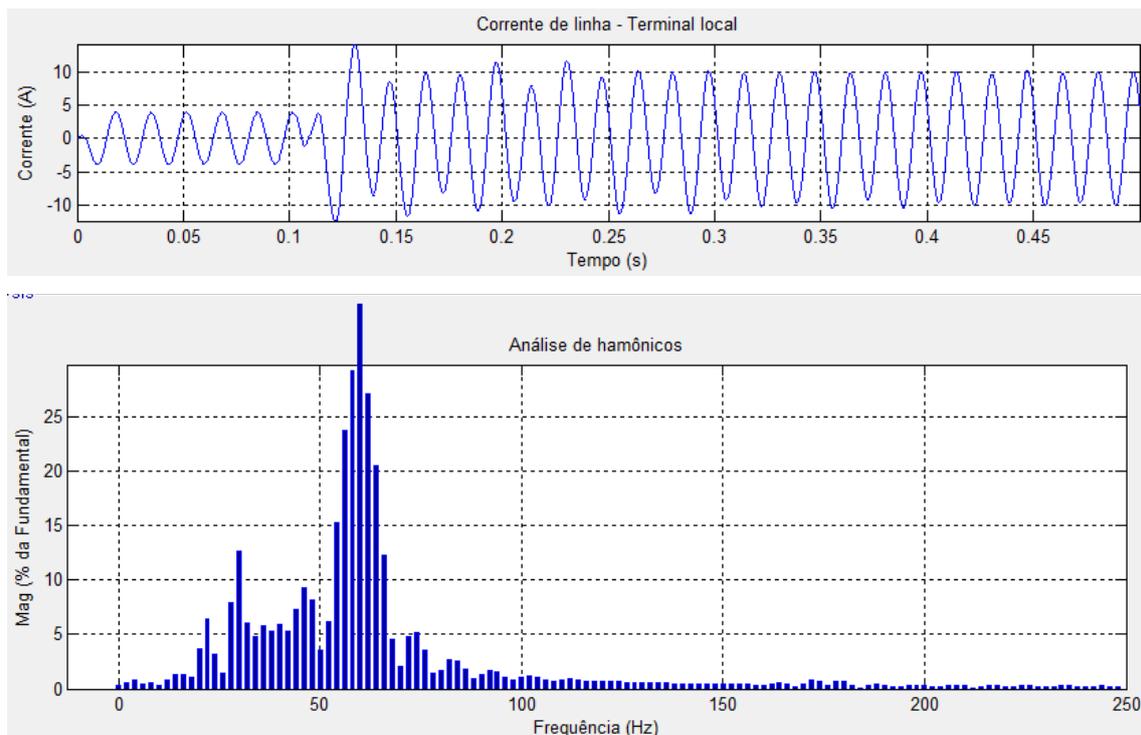


Figura 5.6.1.7 - Componentes harmônicas da corrente - Períodos pré e pós falta

A Figura 5.6.1.8 corresponde à mesma corrente de curto da Figura 5.6.1.7 e sua respectiva análise de Fourier, porém destacando apenas o período pós-falta, para o qual é feita a decomposição harmônica é feita apenas para os ciclos da corrente de curto compreendidos pelo período desde o instante de aplicação da falta ( $t_f=0,1051$  s) até aproximadamente 0,35 s, que contempla os 11 primeiros ciclos após a falta. Após o instante  $t=0,35$  s a corrente de curto atinge praticamente o regime permanente e as oscilações subsíncronas não são mais percebidas.

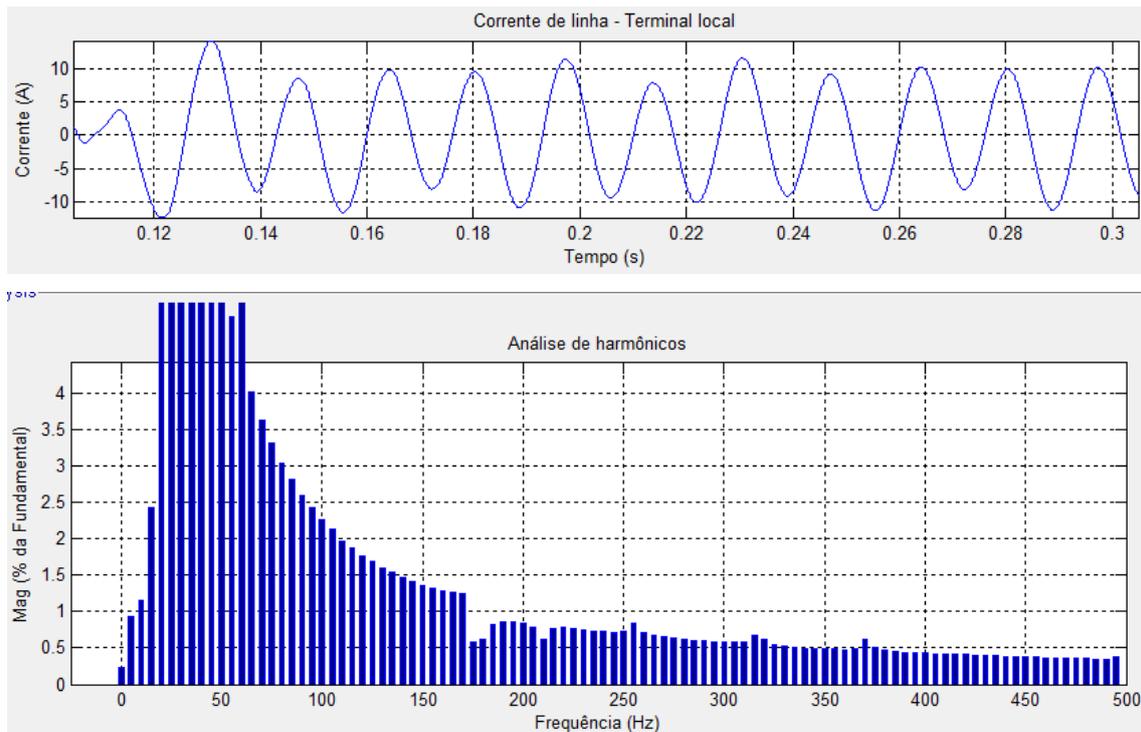


Figura 5.6.1.8 - Componentes harmônicas da corrente - Período pós-falta

Neste caso, as componentes de frequência de 20, 30 e 40 Hz alcançam amplitudes de 8,70%, 22,12% e 10,29% da componente fundamental, respectivamente. As demais componentes de frequência inferior a 60Hz tem suas amplitudes entre 0,94% e 8,64%.

As Figuras 5.6.1.9 e 5.6.1.10 mostram as tensões no mesmo terminal e sob as mesmas condições de curto circuito do caso anterior. As tensões sofrem a influência da presença de componentes sub-harmônicas com amplitudes que variam entre 10,81% e

16,89%, em relação à magnitude da fundamental, para as componentes de 10, 20, 30 e 40 Hz.

Para a tensão, pode-se notar que há também componentes com frequência maior que 60 Hz com destaque, por exemplo, para as componentes de 170 e 180 Hz com amplitudes atingindo picos de 10,81% e 9,73% respectivamente.

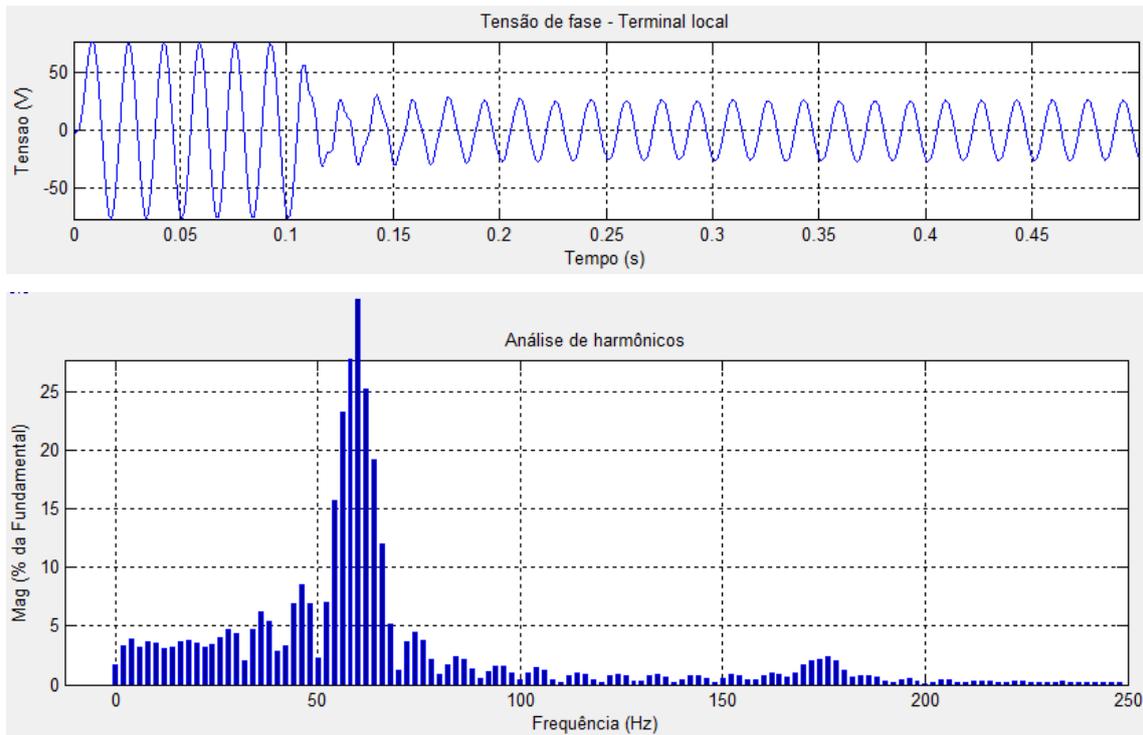


Figura 5.6.1.9 - Componentes harmônicas da tensão - Período pré e pós-falta

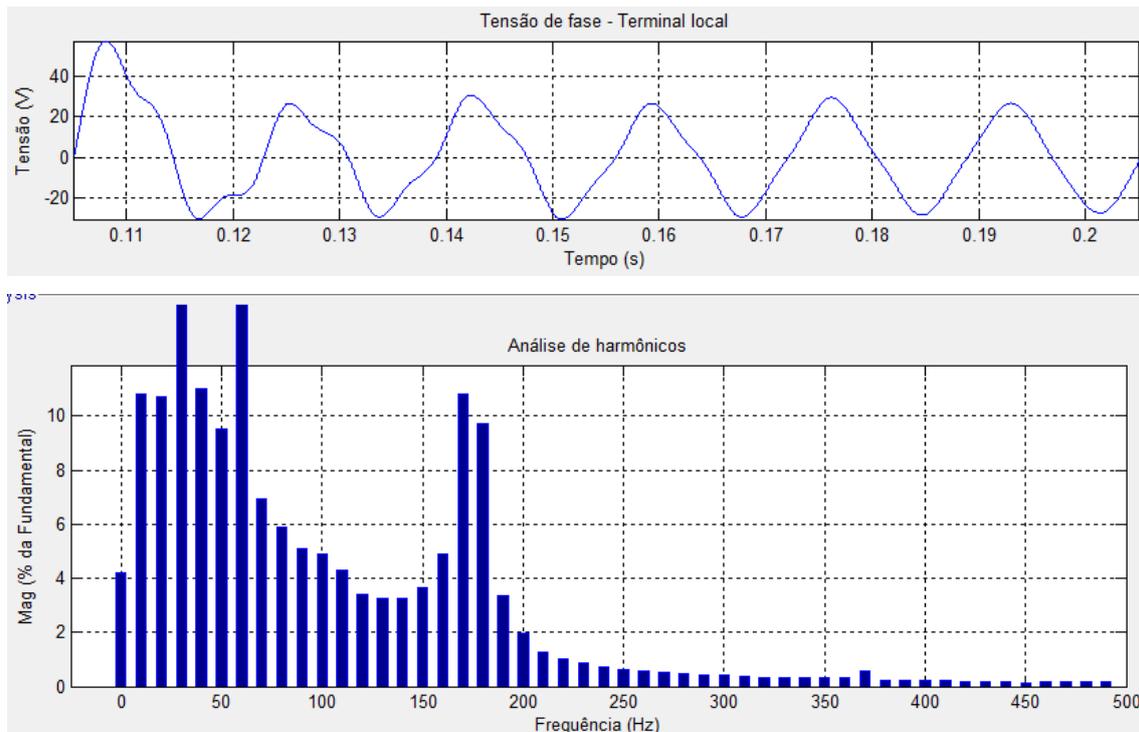


Figura 5.6.1.10 - Componentes harmônicas da tensão - Período pós-falta

A Figura 5.6.1.11 permite estabelecer uma comparação entre os fasores estimados para o sistema real e para o mesmo sistema não compensado. Pode-se observar que a presença de frequências subsíncronas se traduz em uma maior dificuldade na estimação dos fasores de corrente e tensão do que para linhas não compensadas, de forma que pode ser observada a presença de oscilações nos primeiros ciclos após a incidência do curto. Para minimizar os efeitos destas oscilações no desempenho das RNA, os valores são capturados 3 ciclos após o instante de detecção da falta. Uma forma de contornar este problema é aumentar a janela de dados do filtro digital pois, com o aumento da janela, o filtro torna-se mais seletivo, mitigando os efeitos da presença de componentes subsíncronas (MOURA, *et al*).

A Figura 5.6.1.11 mostra uma comparação entre as amplitudes dos fasores estimados com e sem o efeito das frequências subsíncronas. Na primeira coluna estão dispostos os fasores do sistema real enquanto que a segunda coluna mostra os mesmos fasores para o sistema não compensado. A primeira, segunda e terceira linhas correspondem aos trechos 1, 2 e 3, respectivamente.

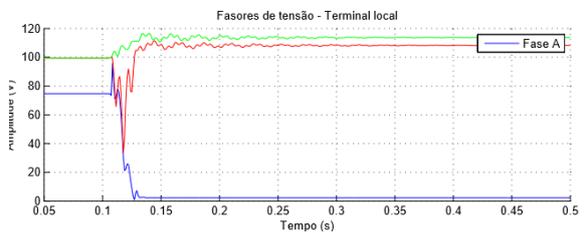
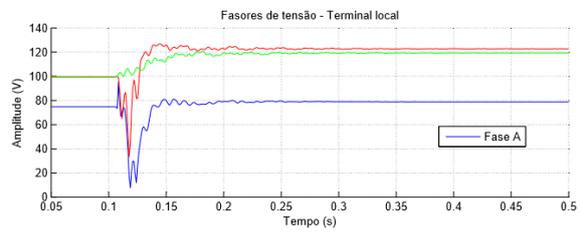
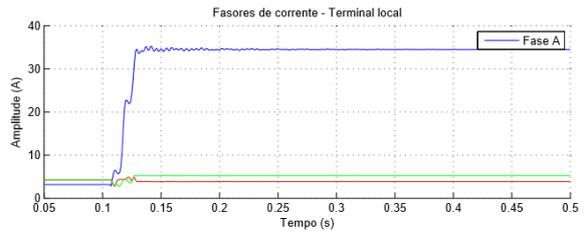
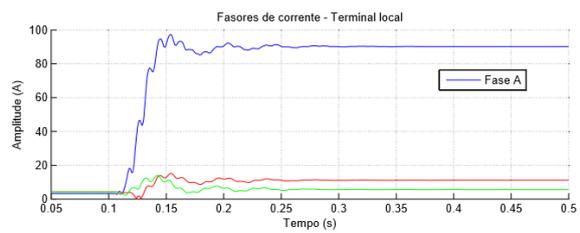
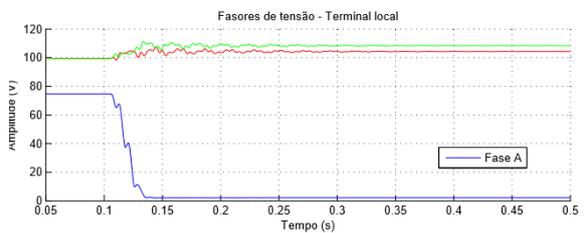
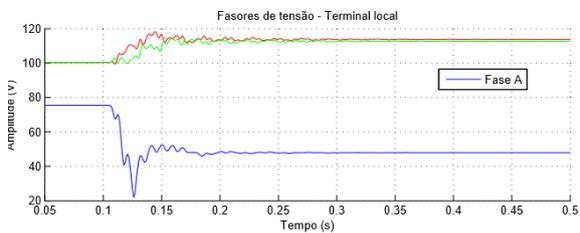
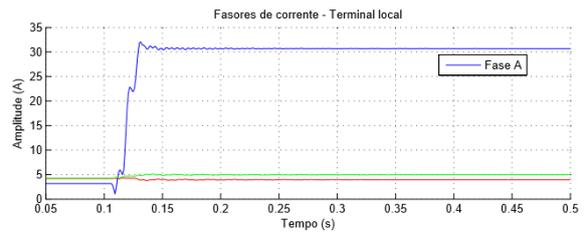
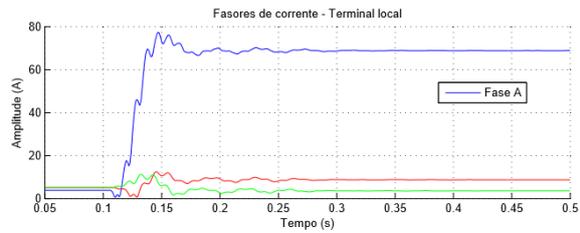
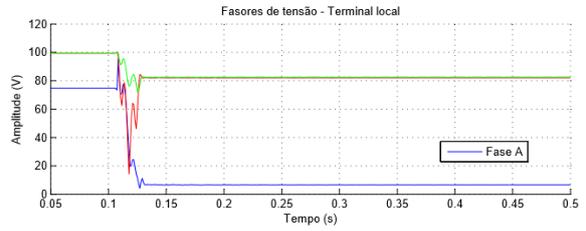
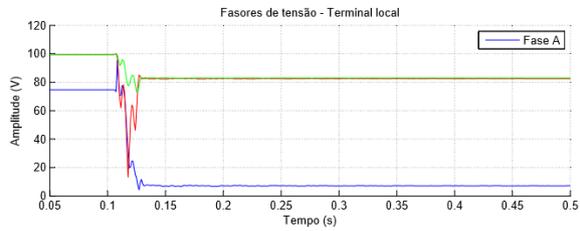
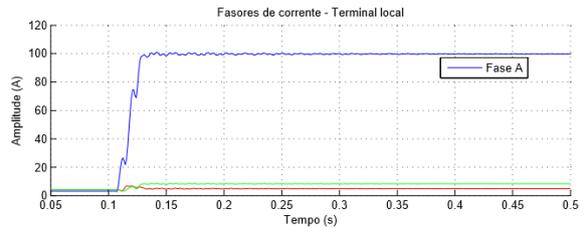
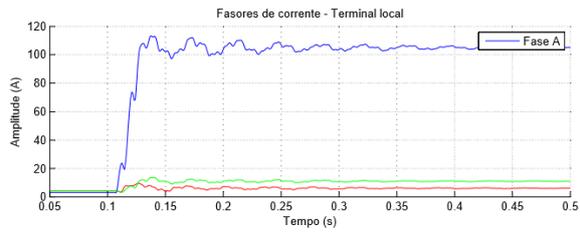


Figura 5.6.1.11 - Fasores estimados para o sistema com e sem compensação série

### 5.6.2. Presença de Componentes DC

Para demonstrar o que ocorre com as correntes em um sistema de transmissão predominantemente indutivo no seguimento à ocorrência de um curto-circuito no instante em que a tensão passa por  $t=0$ , podemos considerar o comportamento do circuito RL série simples mostrado na Figura 5.6.2.1.

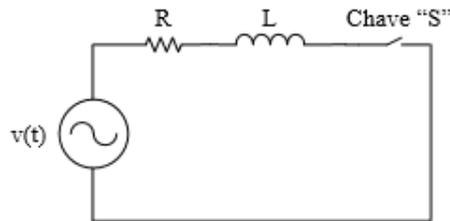


Figura 5.6.2.1 - Circuito RL série

Seja  $v(t) = V_{\max} \text{sen}(\omega t + \varphi)$  a tensão aplicada ao circuito. A solução do circuito pode ser obtida aplicando a Lei das Tensões de Kirchhoff ao mesmo após o fechamento da chave "S", o que resulta na equação de primeira ordem representada pela Equação 5.6.2.1.

$$V_{\max} \text{sen}(\omega t + \varphi) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (5.6.2.1)$$

Resolvendo a Equação 5.6.2.1 para  $i(t)$ , a solução completa pode ser escrita como segue.

$$i(t) = \frac{V_{\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \text{sen} \left[ \omega t + \varphi - \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R} \right) \right] + e^{-(R/L)t} \left\{ \frac{-V_{\max}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \text{sen} \left[ \varphi - \tan^{-1} \left( \frac{\omega L}{R} \right) \right] \right\}$$

$$(5.6.2.2)$$

A primeira parcela Equação 5.6.2.2 varia senoidalmente com o tempo - assim com a função de excitação do circuito - e corresponde ao termo que rege o comportamento de regime permanente da corrente  $i(t)$  após a falta. A segunda parcela que contém o termo exponencial é função das condições de contorno e corresponde à componente DC. Observa-se que nesta parcela o argumento da senóide não contém o termo  $\omega t$ , ou seja, esta parcela é aperiódica e decresce exponencialmente com o tempo a uma constante de tempo  $L/R$ .

Para analisar o aparecimento da componente DC, é necessário avaliar o argumento da função seno no instante  $t=0$  (instante de fechamento da chave "S"). Seja  $\theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$  o ângulo da impedância do circuito. Quando  $\varphi - \theta = 0$  ou  $\varphi - \theta = \pi$  não haverá aparecimento da componente DC, porém, quando  $\varphi - \theta = \pm\pi/2$ , a componente DC se manifestará da forma mais acentuada. Em (LIMA, 2006) é oferecida uma explicação detalhada para o surgimento de componentes aperiódicas para sistemas de transmissão, com relação X/R elevada.

Da Figura 5.6.2.2 até a Figura 5.6.2.4 são mostrados os gráficos das correntes e tensões correspondentes a uma situação de curto-circuito franco, aplicado aos Trechos 1, 2 e 3, localizado a uma distância de 10 % em relação ao terminal local e com ângulo de incidência de  $0^\circ$ . Neste caso, a aplicação do curto ocorre no instante  $t_f = 0,0509s$  e, assim como na situação anterior, com o ângulo de incidência  $90^\circ$ , antes do instante de aplicação assume-se que o sistema opera em regime permanente pré-falta, de forma que a análise dos efeitos de interesse diz respeito a período de tempo que começa neste instante.

No sinal de corrente associado ao terminal local observa-se a componente DC, com o devido decaimento após cerca de 8 ciclos. Este mesmo nível DC unidirecional não é observado no sinal associado ao terminal remoto, já que a capacitância série daquele lado está presente no loop de falta - juntamente com as demais capacitâncias referentes aos trechos 2 e 3 - elimina esta componente na composição da corrente de curto circulando daquele lado do sistema.

Se o tempo de atuação do relé fosse maior que a constante de tempo de decaimento da componente DC, esta componente não acarretaria problemas para operação da proteção de distância, desaparecendo antes do início da operação do relé. No entanto,

para relés com tempos de atuação reduzidos, a presença desta componente é indesejável pois faria com que a proteção de distância "percebesse" a falta além do ponto real de sua ocorrência (PAITANKAR, 1998). Um sinal de corrente composto de uma parcela periódica com um nível DC resultaria em um valor eficaz maior do que sem a componente DC. A Equação 5.6.2.3 ajuda a ilustrar este efeito.

$$I_{eficaz} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (5.6.2.3)$$

Onde  $I_n$  corresponde ao valor eficaz da  $n$ -ésima componente harmônica do sinal e  $I_{eficaz}$  ao valor eficaz resultante. Sendo assim, supondo a parcela periódica do sinal de corrente apenas com a presença adicional da componente fundamental, o valor eficaz resultante seria calculado de acordo com a Equação 5.6.2.4, o que produziria um valor eficaz lido pelo relé maior do que seria sem a presença do nível DC, caracterizando, desta forma, o sobrealcançe.

$$I_{eficaz} = \sqrt{I_{dc}^2 + I_1^2} \quad (5.6.2.4)$$

Observa-se que a componente DC aparece de forma acentuada apenas para curtos-circuitos aplicados ao trecho 1. Nos trechos 2 e 3 a influência desta componente não é observada devido ao fato destes trechos estarem compreendidos entre dois blocos de compensação série que, como mencionado anteriormente, atuam como filtros para estas componentes.

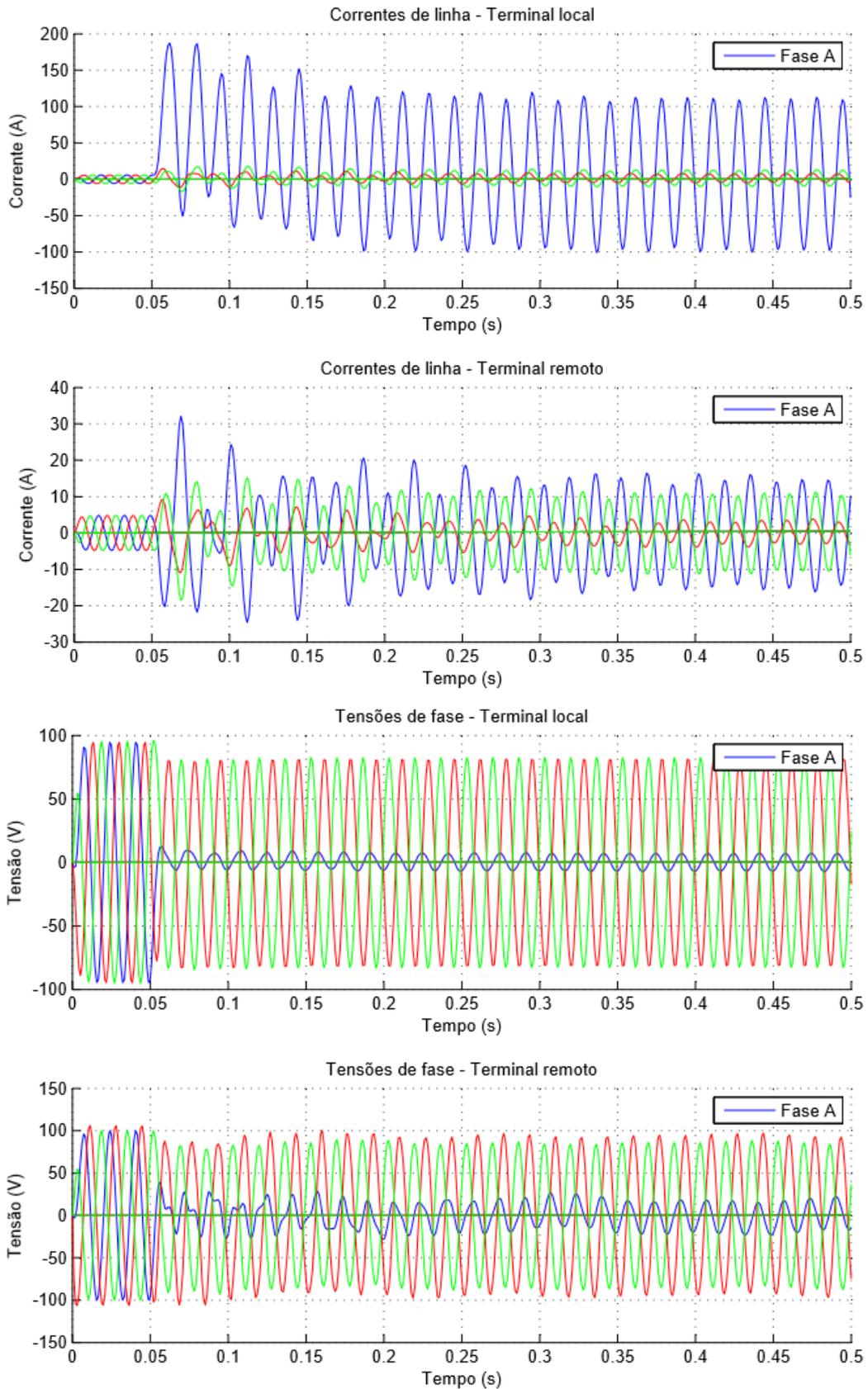


Figura 5.6.2.2 - Formas de onda das correntes e tensões - Trecho 1 a 10%

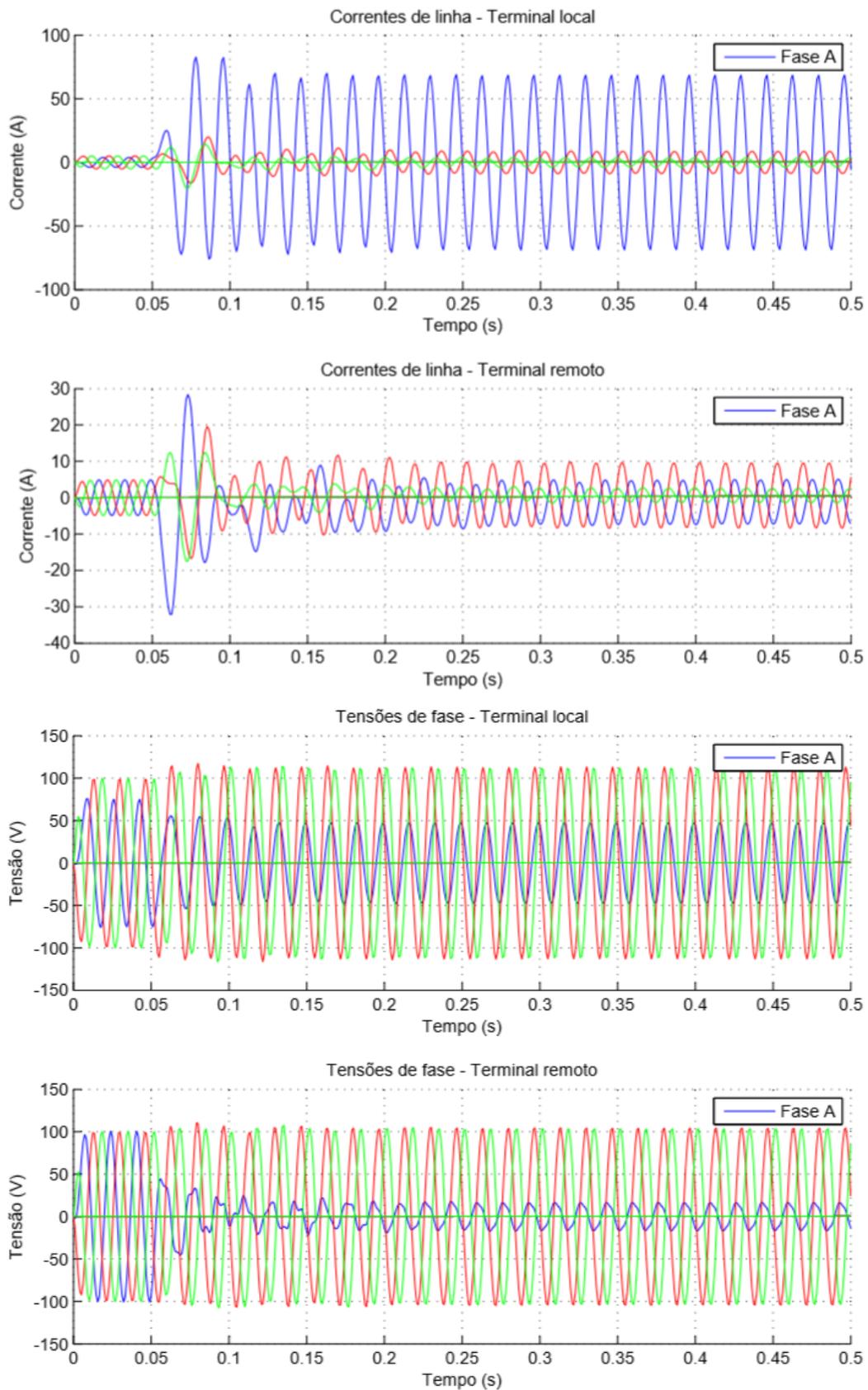


Figura 5.6.2.3 - Formas de onda das correntes e tensões - Trecho 2 a 10%

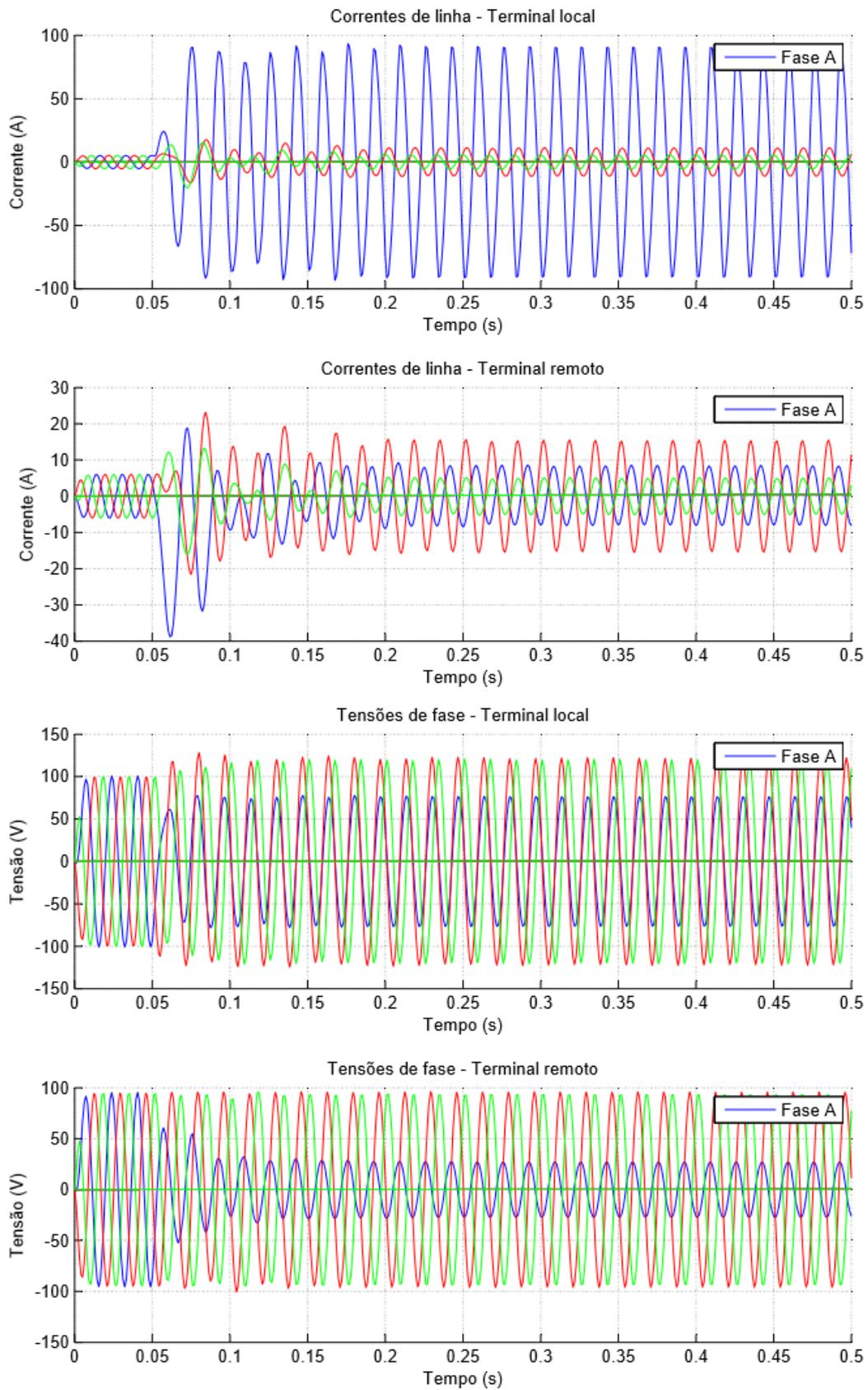


Figura 5.6.2.4 - Formas de onda das correntes e tensões - Trecho 3 a 10%

Aqui será ilustrado o efeito da componente DC na estimação dos fasores na frequência fundamental. Para isso, será utilizado o mesmo curto-circuito porém, apenas no trecho 1, no qual o efeito da presença destas componentes é mais pronunciado, como já discutido anteriormente.

A Figura 5.6.2.5 representa a amplitude dos fasores para as correntes e tensões no terminal local para um curto-circuito aplicado com ângulo de incidência  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Comparando os dois gráficos, percebe-se que o ângulos de incidência tem influência na estimação dos fasores de corrente, denotando que o filtro apresenta uma dificuldade em filtrar estas componentes. O mesmo efeito não é percebido nas tensões, que sofrem pouca ou nenhuma influência da presença da componente DC.

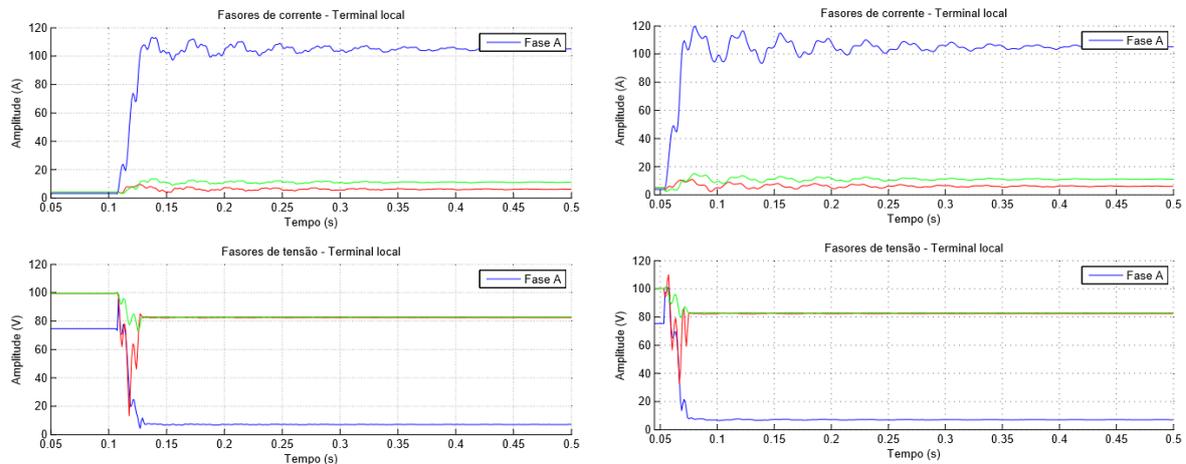


Figura 5.6.2.5 - Formas de onda das correntes e tensões - Trecho 1 a  $90^\circ$  e a  $0^\circ$

As Figuras 5.6.2.5 e 5.6.1.11 revelam a influência da componente DC exponencial presente na corrente de falta e, em especial, das oscilações subsíncronas na convergência dos fasores para valor de regime permanente pós-falta. As oscilações permanecem durante os primeiros ciclos após o curto-circuito, enquanto a janela de dados do filtro faz a varredura dos valores que contêm as componentes indesejadas (SANTOS, 2006).

## 6. SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações realizadas no sistema de transmissão abaixo referido para obtenção das informações de tensão e corrente que serão utilizados no processo de treinamento e definição da arquitetura das RNA's. Este trabalho se propõe a analisar o desempenho das redes neurais nas tarefas de classificação e localização de faltas em sistemas de transmissão sob os efeitos da compensação série o que não inclui a abordagem de aspectos relacionados à direcionalidade e à seletividade. Portanto, admitir-se-á que a primeira zona compreende 100% do trecho em questão e que nenhum aspecto de proteção de retaguarda será abordado.

O sistema de transmissão analisado é composto por três trechos com características diferentes relativamente à proximidade da geração e à posição da compensação série. Os três trechos serão analisados separadamente no que diz respeito ao desempenho das RNA em cada um deles. Conforme descrito no capítulo 4, as simulações para obtenção dos dados de tensão e correntes foram feitas no ambiente *Simulink*. Após a obtenção dos dados, as etapas de extração dos fasores na frequência fundamental e detecção do instante de falta foram feitas a partir de um algoritmo em linguagem *Matlab* e a definição da arquitetura das RNA foi feita a partir do *toolbox* disponível no próprio ambiente *Matlab*.

### 6.1. Variações das Condições de Curto-Circuito

Para a tarefa de classificação do tipo de falta, optou-se pela utilização de uma única rede neural. Após a identificação das fases envolvidas no curto, foram realizados alguns testes e, para a tarefa de localização da falta, foi constatado que o melhor resultado é obtido quando utiliza-se RNA dedicadas, ou seja, foram utilizadas quatro redes neurais, uma RNA para cada tipo de falta.

Para obtenção de um número satisfatório de condições de falta que permitisse analisar a eficiência do algoritmo proposto, foram simulados quatro tipos de faltas (fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e trifásico), cada um sendo aplicado considerando uma

variação de 5% em 5% do comprimento, desde 0% até 100% do trecho de linha a partir do terminal local, totalizando 21 localizações. Para cada localização, foram testados cinco diferentes valores de resistências de falta e dois ângulos de incidência. Em relação ao ângulo de incidência (do inglês *inception angle*, como referido em grande parte da literatura), os mesmos foram escolhidos de forma que as correntes de falta se manifestassem ou sem a influência da componente DC ou com esta componente apresentando sua máxima amplitude, observando adequadamente o instante de aplicação da falta em função das situações extremas de tensões pré-falta.

Tabela 6.1.1 - Parâmetros gerados para definição da arquitetura das RNA

Considerações da simulação	Valores ajustados	
	Conjunto I	Conjunto II
Tipo de falta	AT, BT, CT, AB, BC, AC, ABT, BCT, ACT, ABC	AT, BT, CT, AB, BC, AC, ABT, BCT, ACT, ABC
Localização da falta (%)	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100% (em relação ao terminal local).	5, 15, 25, 35, 45, 50, 55, 65, 75, 85 e 95% (em relação ao terminal local).
Ângulo de incidência da falta (°)	0° e 90°	0° e 90°
Resistência de falta ( $\Omega$ )	0, 10 e 20	5 e 15

Os conjuntos de dados utilizados para treinamento, validação e teste foram gerados combinando os diversos tipos de falta detalhados na Tabela 6.1.1 e totalizaram 1100 tipos de falta para cada trecho, ou seja, 3300 simulações para o sistema de transmissão.

Conjunto I: 10 tipos de falta x 11 localizações x 2 ângulos de incidência x 3 resistências de falta = 660 faltas

Conjunto II: 10 tipos de falta x 11 localizações x 2 ângulos de incidência x 2 resistências de falta = 440 faltas

### 6.1.1. Pré-Processamento e Normalização dos Dados

Os conjuntos de dados de treinamento, validação e teste corresponderam a 60%, 20% e 20% do conjunto total de dados, respectivamente, e foram estruturados de maneira aleatória porém com vetores uniformemente distribuídos, de forma que os três conjuntos contemplam representantes (vetores) de todos os cenários de faltas. Sendo assim, após a definição da melhor arquitetura e treinamento da mesma, a expectativa foi que a RNA fosse capaz de fornecer as saídas desejadas para qualquer entrada não pertencente ao conjunto de treinamento. Assim, para verificação da capacidade de generalização da rede, foi utilizado um conjunto de teste com dados diferentes daqueles que foram apresentados à rede na fase de treinamento. A Equação 6.1.1 mostra a forma como os dados de entrada foram estruturados.

$$P = \begin{bmatrix} |I_{aL}|_k & \dots & |I_{aL}|_K \\ |I_{bL}|_k & \dots & |I_{bL}|_K \\ |I_{cL}|_k & \dots & |I_{cL}|_K \\ |I_{aR}|_k & \dots & |I_{aR}|_K \\ |I_{bR}|_k & \dots & |I_{bR}|_K \\ |I_{cR}|_k & \dots & |I_{cR}|_K \\ |V_{aL}|_k & \dots & |V_{aL}|_K \\ |V_{bL}|_k & \dots & |V_{bL}|_K \\ |V_{cL}|_k & \dots & |V_{cL}|_K \\ |V_{aR}|_k & \dots & |V_{aR}|_K \\ |V_{bR}|_k & \dots & |V_{bR}|_K \\ |V_{cR}|_k & \dots & |V_{cR}|_K \end{bmatrix} \quad (6.1.1)$$

sendo:

- $P$  Matriz de entrada que será apresentada às Redes Neurais;
- $I_a, I_b$  e  $I_c$  Módulo do fasor fundamental das correntes nas fases  $A, B$  e  $C$ ;
- $V_a, V_b$  e  $V_c$  Módulo do fasor fundamental das tensões nas fases  $A, B$  e  $C$ ;
- $k$  Índice da simulação ( $k=1, \dots, K$ );

$K$	Número total de simulações ( $K=1100$ );
<i>índice L</i>	Referente ao terminal local;
<i>índice R</i>	Referente ao terminal remoto;

O projeto da RNA deve passar por uma etapa inicial de uniformização dos dados de entrada que tem por finalidade adaptar os dados de entrada da RNA à faixa dinâmica das funções de ativação dos neurônios de ambas as camadas e evitar que os processos de classificação e localização sofram desvios devido à sobreposição de uma dimensão em relação à outra. A este processo dá-se o nome de normalização dos dados e foi aplicado às correntes e tensões segundo a Equação 6.1.2.

$$\underline{p}_n = \frac{p - \mu}{2\sigma} \quad (6.1.2)$$

onde,

$\underline{p}_n$  : vetor normalizado do vetor dos dados de entrada;

$\underline{p}$  : vetor dos dados de entrada;

$\mu$  : média dos valores;

$\sigma$  : desvio padrão.

O critério escolhido é conhecido como *Z-score*. Através dele os dados são normalizados em torno da média e do desvio padrão e tem por característica manter a maioria dos valores bem distribuídos no intervalo de normalização  $[-1,1]$ .

## 6.2. Arquitetura da RNA de Classificação

Após a confirmação da ocorrência de falta, a etapa seguinte é o reconhecimento das fases envolvidas no curto-circuito. Para a definição da arquitetura para a RNA de classificação, foram considerados 4 neurônios na camada de saída representando, cada neurônio, o envolvimento de uma das três fases e a terra. A notação adotada é a de que, para a fase envolvida na falta, a saída relativa àquela fase deve assumir o nível “1” e, em contrapartida, para as fases preservadas, a saída correspondente deve estar no nível “-1”. Pelo fato de os valores de saída para os neurônios estarem compreendidos no intervalo [-1,1], os dados de entrada da RNA de classificação foram normalizados para assumir valores neste mesmo intervalo.

A Tabela 6.2.1 traz as possíveis combinações de saídas desejadas para cada cenário de falta.

Tabela 6.2.1 - Combinações para as saídas da RNA de classificação

Tipo de falta	Saída desejada			
	Fase A	Fase B	Fase C	Terra
AT	1	-1	-1	1
BT	-1	1	-1	1
CT	-1	-1	1	1
AB	1	1	-1	-1
BC	-1	1	1	-1
AC	1	-1	1	-1
ABT	1	1	-1	1
BCT	-1	1	1	1
ACT	1	-1	1	1
ABC	1	1	1	-1

A seguir são discutidos alguns critérios de ajuda no processo de decisão da melhor arquitetura para a RNA de classificação. Para a obtenção da topologia da rede, várias arquiteturas foram testadas variando o número de neurônios na camada intermediária a partir de 5 neurônios, de modo a encontrar uma arquitetura que minimizasse os erros no conjunto de validação. Desta forma, o algoritmo de aprendizagem de Levenberg-Marquardt foi utilizado para treinamento da RNA de classificação.

Um problema que pode ocorrer durante o processo de treinamento da RNA é o *overfitting* (ou *overtraining*), que se dá quando o erro RMSE do conjunto de treinamento decresce indefinidamente de modo que, em um dado momento do processo, a rede neural perde sua capacidade de generalização. Para mitigar as consequências do *overtraining*, foi utilizado o recurso da validação cruzada, que encerra o processo de treinamento no ponto em que o erro do conjunto de validação começa a aumentar, mesmo que o erro do conjunto de treinamento continue diminuindo. Este recurso é conhecido também como método da parada antecipada.

Durante a busca da topologia ideal, foram feitas diversas simulações com os conjuntos de treinamento e validação e também com o conjunto de testes para que se pudesse tirar conclusões sobre a capacidade de generalização da RNA treinada. Num primeiro momento, o desempenho da RNA foi avaliado considerando o erro médio do conjunto de testes (ME do inglês *mean error*, encontrado em grande parte da literatura disponível). A evolução do erro médio em função do número de neurônios na camada intermediária pode ser visto no gráfico mostrado na Figura 6.2.1.

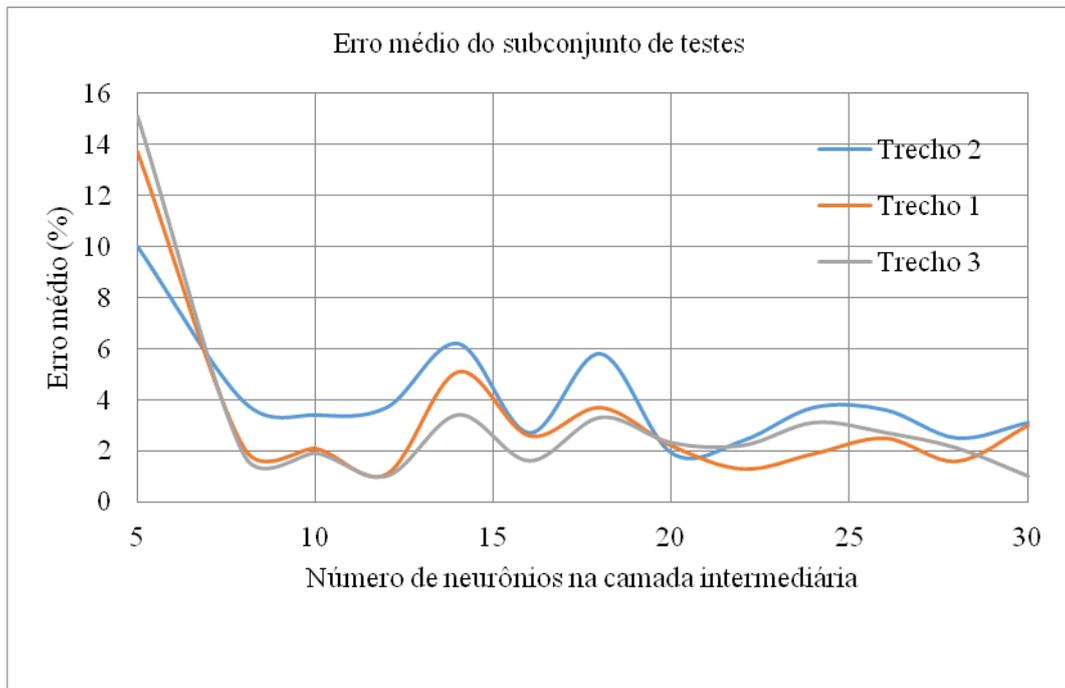


Figura 6.2.1 - Erro ME versus o número de neurônios na camada intermediária

A Figura 6.2.2 mostra um exemplo de resposta da RNA para uma amostra referente a um curto-circuito envolvendo a fase B e o terra, com ângulo de incidência de  $0^\circ$  e resistência de falta de  $10\Omega$  aplicado ao trecho 1 e que não foi utilizada nos conjuntos de treinamento e validação. Para este caso, a resposta desejada, de acordo com a Tabela 6.2.1 seria -1, 1, -1 e 1 para as fases A, B, C e o terra, respectivamente, o que resulta em um erro médio de 1,9%.

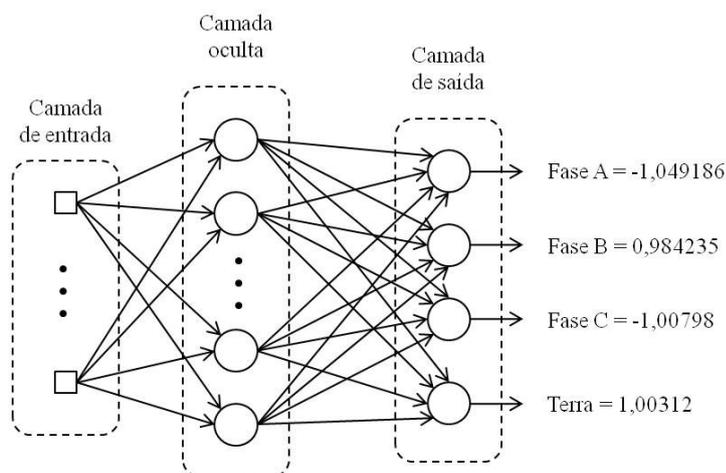


Figura 6.2.2 - Saída estimada para um curto-circuito FT na fase B.

O processo de localização da falta, que será discutido em detalhes na próxima seção, foi concebido baseado no resultado do processo de classificação. Em outras palavras, o esquema de localização recebe o resultado da(s) fase(s) envolvida na falta para determinar qual RNA atuará na localização da falta. Desta forma, é de extrema importância que o tenha uma informação precisa de quais fases estão sob falta e quais se mantiveram preservadas. A etapa de classificação deve oferecer, portanto, uma resposta em tempo real, para abertura e isolamento instantâneo da(s) fase(s) envolvida(s), ao contrário da tarefa de localização, que consiste em uma etapa pós-evento, dispondo de um intervalo de tempo de resposta para informar a localização do ponto de falta que pode chegar a até alguns minutos após a classificação da falta.

Portanto, foi proposta uma RNA com função de ativação tangente hiperbólica na camada intermediária e função linear com saturação na camada de saída combinada com uma lógica de aproximação após a camada de saída da RNA. Isso possibilita a obtenção de valores da resposta maiores que zero sendo elevados (aproximados) para o nível "1" e resultados menores que zero aproximados para o nível "-1", o que garantiria erro médio zero para todas as saídas e seria uma solução possível de implementação.

Tabela 6.2.3 - Lógica para ME zero na saída do processo de classificação

	Função de ativação na camada de saída		Saída aproximada
	Linear	Linear com saturação	
Fase A	-1,049186	-1	-1
Fase B	0,984235	0,984235	1
Fase C	-1,00798	-1	-1
Terra	1,003202	1	1

A Tabela 6.2.3 ilustra esta ideia. Para confirmação da topologia com melhor desempenho, optou-se por avaliar também o desempenho das RNA a partir da raiz do erro médio quadrático (RMSE do termo inglês *root mean square error*) que é capaz de penalizar erros maiores (RAYBOLT, 2011). O erro RMSE corresponde à função custo que será minimizada no processo de treinamento e é dado pela Equação 6.2.1

Os erros utilizados para treinamento e definição da topologia da RNA de classificação foram obtidos considerando a média de 5 treinamentos seguidos para cada topologia e sua evolução pode ser vista nas Figuras 6.2.3 até 6.2.5.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N |S_{Dj} - S_{Oj}|^2}{N}} \quad (6.2.1)$$

onde:

$S_{Dj}$  e  $S_{Oj}$  : representam as saídas desejadas e saídas estimadas RNA, respectivamente;

$N$  : representa o número de amostras utilizadas no processo de treinamento.

Os gráficos das Figuras 6.2.3 até 6.2.5 mostram a evolução do erro médio quadrático em função do número de neurônios na camada escondida para os conjuntos de treinamento e validação no trechos 1, 2 e 3.

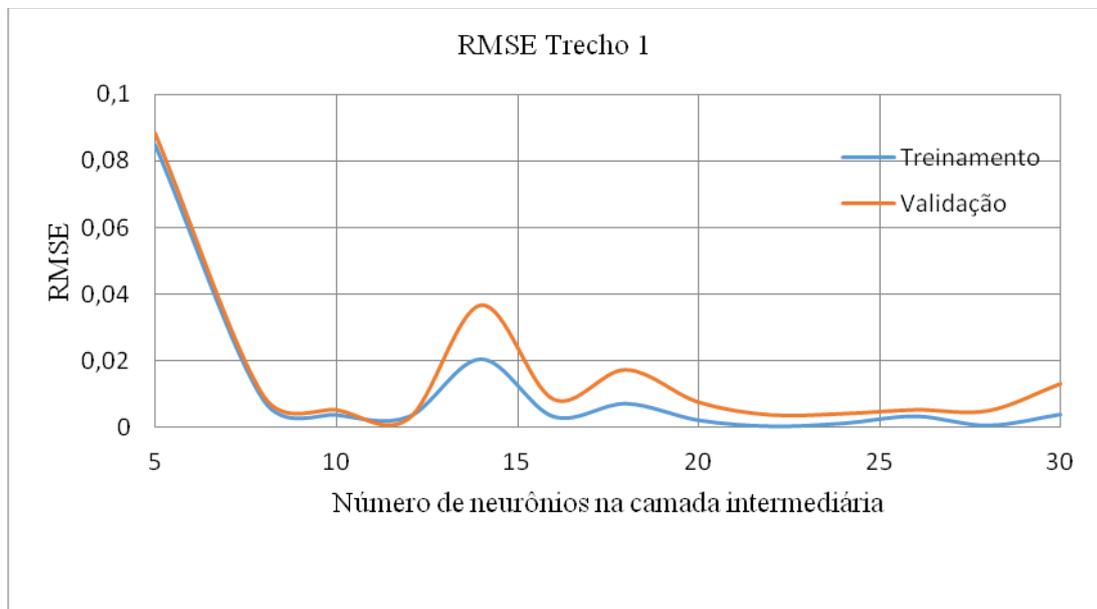


Figura 6.2.3 - Erro RMSE versus o número de neurônios na camada oculta Trecho 1

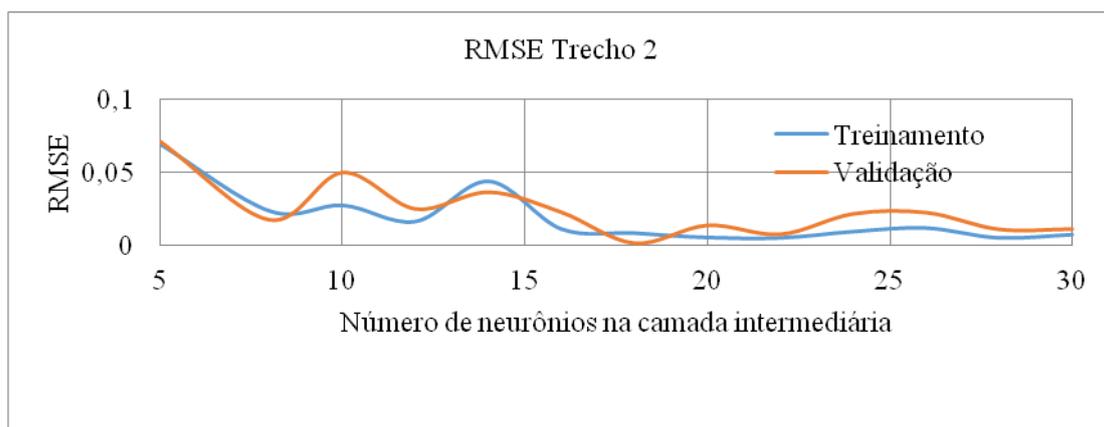


Figura 6.2.4 - RMSE versus o número de neurônios na camada oculta - Trecho 2

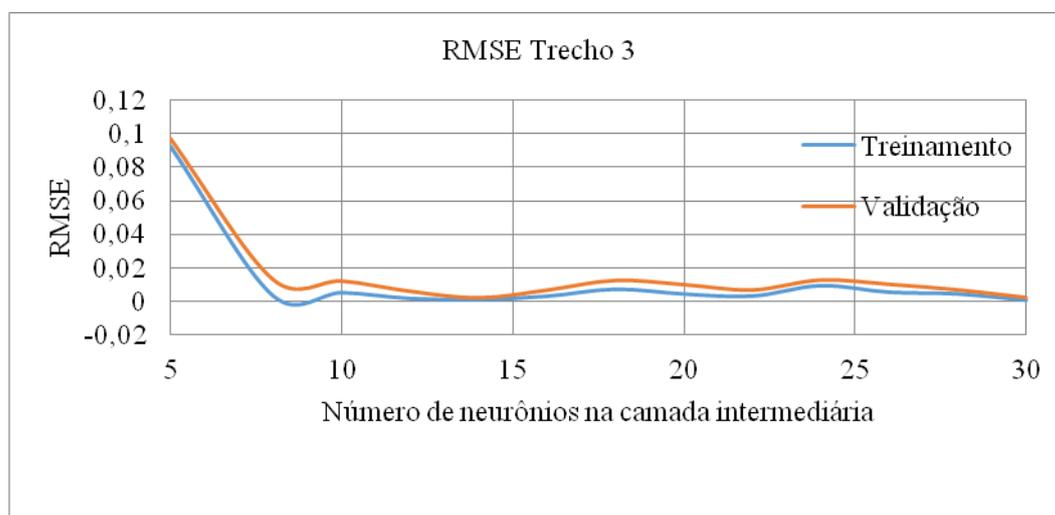


Figura 6.2.5 - RMSE versus o número de neurônios na camada oculta - Trecho 3

Após o treinamento das RNA concluiu-se que os trechos 1 e 3 atingem o menor RMSE com 12 neurônios na camada intermediária e o trecho 2 com 19. A arquitetura das RNA é apresentada na Figura 6.2.6 com as funções de ativação tangente hiperbólica e linear com saturação nas camadas intermediária e de saída, respectivamente. A Tabela 6.2.4 apresenta a matriz de confusão com as saídas estimadas pela rede no conjunto de testes. A matriz de confusão de uma hipótese mostra o número de classificações corretas versus as classificações previstas para cada uma das classes sob um conjunto de exemplos, onde, na diagonal principal, está localizado o número de acertos para cada classe e os elementos fora da diagonal representam os erros na classificação.

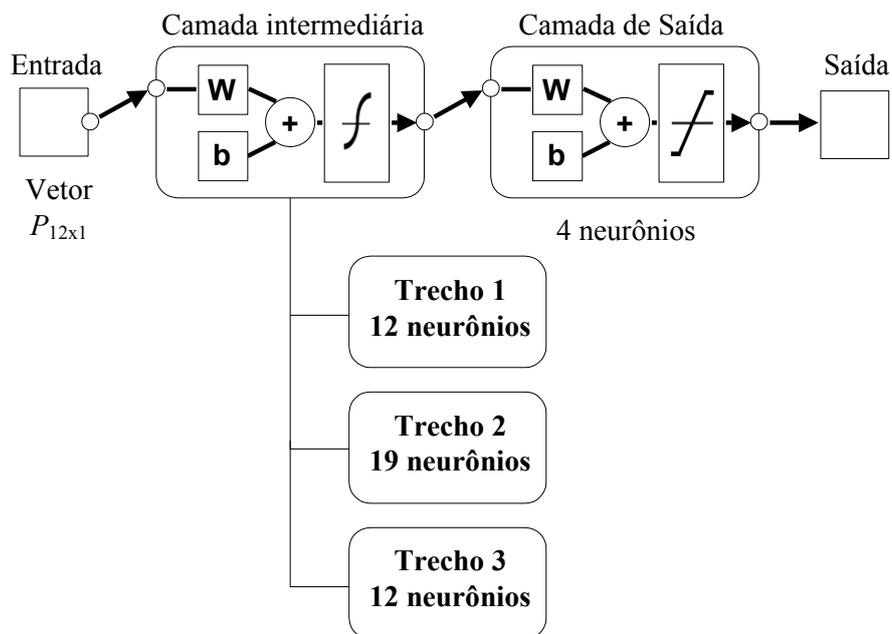


Figura 6.2.6 - Arquitetura das RNA de classificação para os trechos 1, 2 e 3

Tabela 6.2.4 - Matriz de confusão para as RNA de classificação

Classe	AT	BT	CT	AB	BC	CA	ABT	BCT	CAT	ABC
AT	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
BT	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
CT	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
AB	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
BC	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
CA	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%
ABT	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
BCT	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%
CAT	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%
ABC	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%

### 6.3. Arquitetura das RNA de Localização

#### 6.3.1. Trecho 1

Aplicações de RNA à solução de problemas em SEP requerem que alguns cuidados sejam tomados na fase de projeto, como, por exemplo, a decomposição de tarefas de complexidade elevada em subtarefas de menor complexidade, de modo a demandar menor esforço computacional e melhorar o resultado da técnica escolhida. Assim sendo, após as etapas de detecção e classificação da falta, uma RNA dedicada para cada tipo de falta será utilizada para a tarefa de localização da distância da falta.

Assim como para as RNA de classificação, para as RNA de localização os dados de entrada foram normalizados no intervalo  $[-1,1]$ , porém, os dados da saída foram normalizados em  $[0,1]$  em função da distância entre o terminal local e o ponto de ocorrência da falta, onde os valores 0 e 1 correspondem a um curto a 0% e a 100%, respectivamente, ambos em relação ao terminal local.

Para definição da melhor topologia da RNA foi utilizado o erro médio (ME, do inglês *mean error*) em função do comprimento total da linha, de acordo com as Equações 6.3.1.1 e 6.3.1.2. O menor ME do conjunto de testes obtido após 5 (cinco) treinamentos consecutivos foi utilizado como critério para definição da melhor topologia da RNA.

$$e(\%) = \left| \frac{\text{local real (km)} - \text{local estimado (km)}}{\text{comprimento da linha}} \times 100 \right| \quad (6.3.1.1)$$

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i \quad (6.3.1.2)$$

A convergência do treinamento foi alcançada com base no critério de parada antecipada via validação cruzada (*cross validation*) ou pelo limite máximo de 1000 épocas. Dizer que o treinamento convergiu de acordo com o critério da validação cruzada significa que o treinamento foi interrompido no ponto em que a curva de evolução do RMSE do conjunto de validação começa a subir, indicando que, se o treinamento não for interrompido, ocorrerá o fenômeno do sobre-treinamento. A Figura 6.3.1.1 mostra um exemplo da evolução da trajetória de convergência de uma das topologias escolhidas.

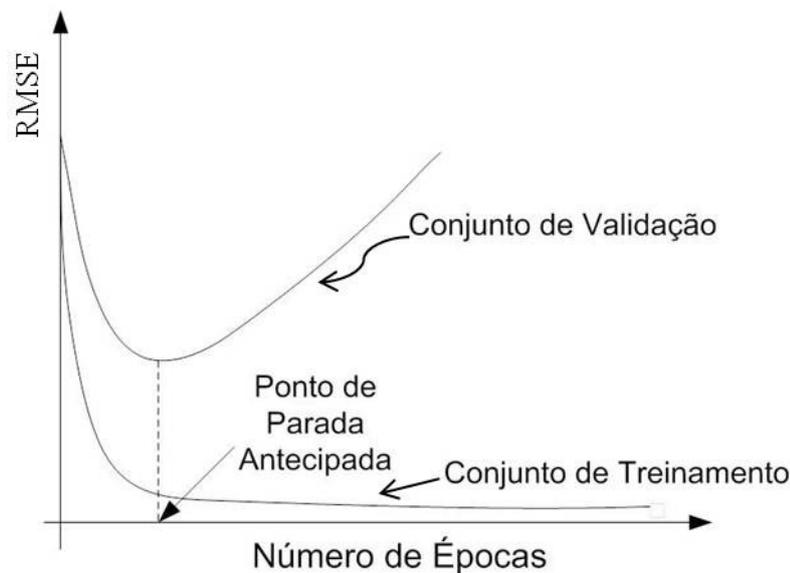


Figura 6.3.1.1 - RMSE versus o número de épocas

Assim como para as RNA de classificação, o RMSE foi obtido na fase de treinamento considerando a média de 5 treinamentos seguidos para cada topologia. O primeiro trecho do sistema de transmissão, Trecho 1, corresponde ao trecho mais próximo da geração estando o capacitor instalado próximo ao terminal remoto e a evolução dos erros ME para cada tipo de falta no trecho 1 pode ser vista nas Figuras 6.3.1.2 até 6.3.1.5.

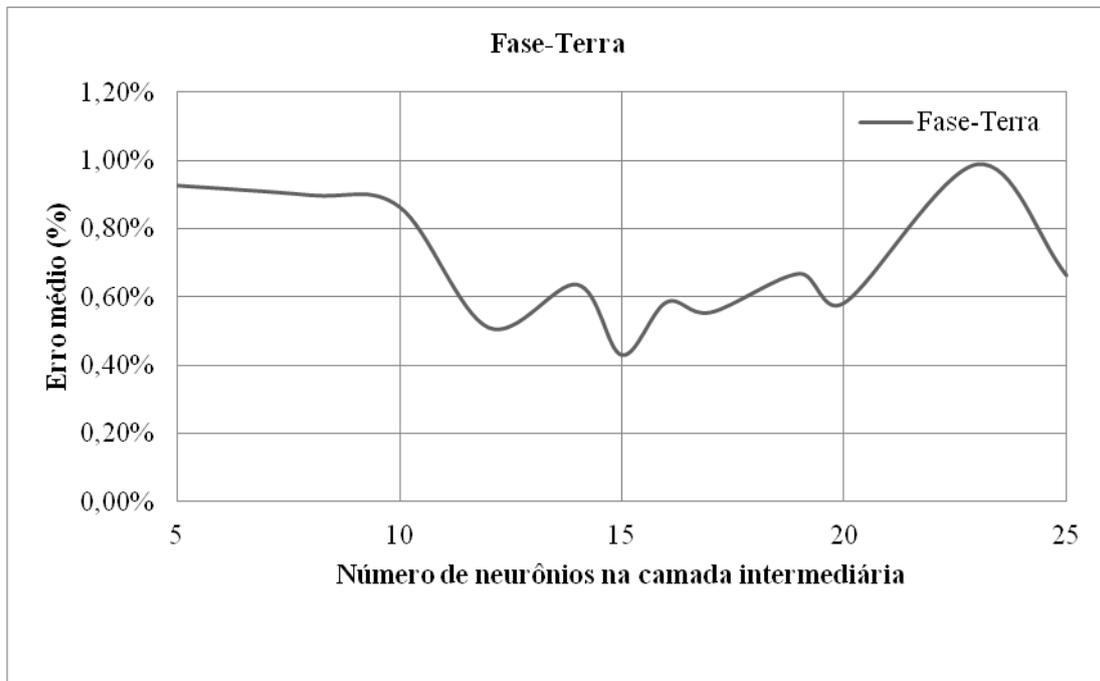


Figura 6.3.1.2 - ME versus o número de neurônios na camada oculta - FT Trecho 1

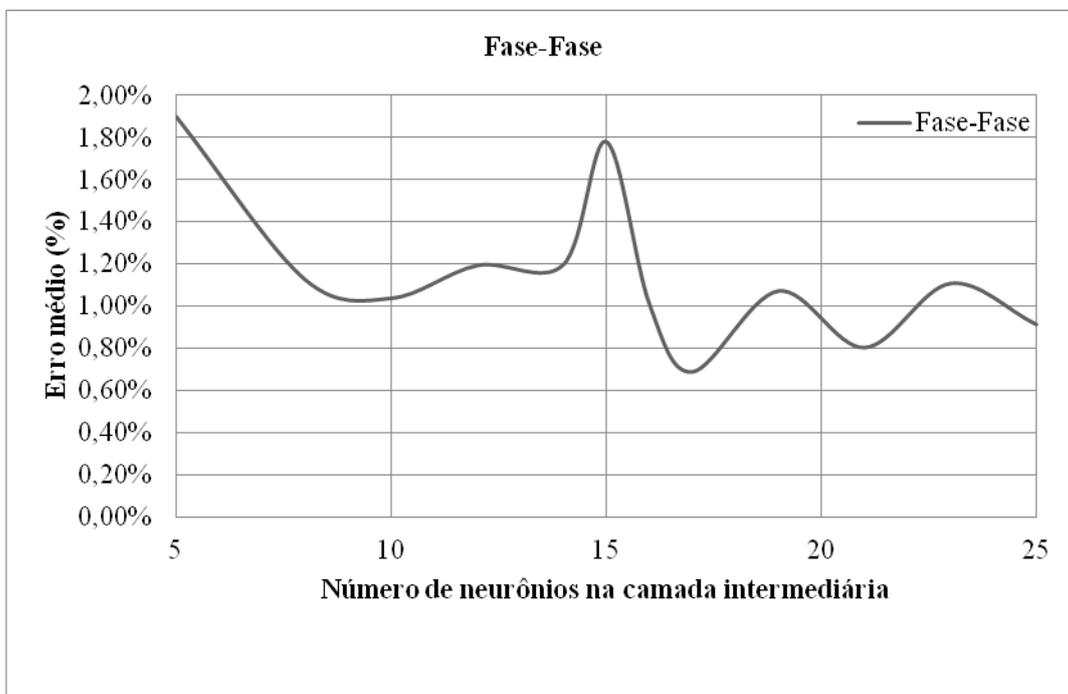


Figura 6.3.1.3 - ME versus o número de neurônios na camada oculta - FF Trecho 1

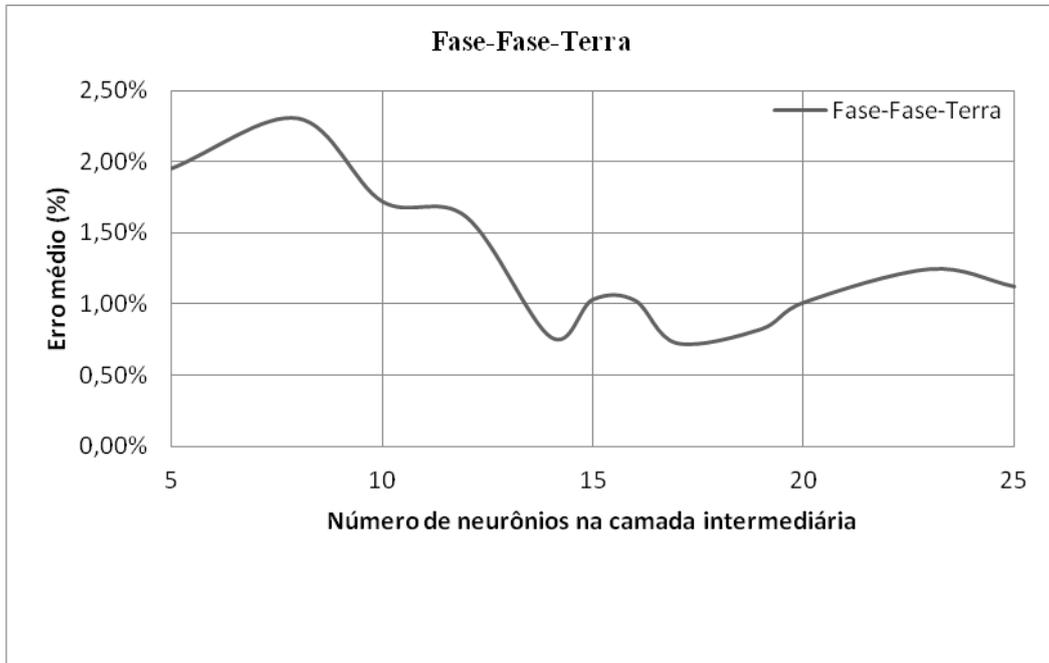


Figura 6.3.1.4 - ME versus o número de neurônios na camada oculta - FFT Trecho 1

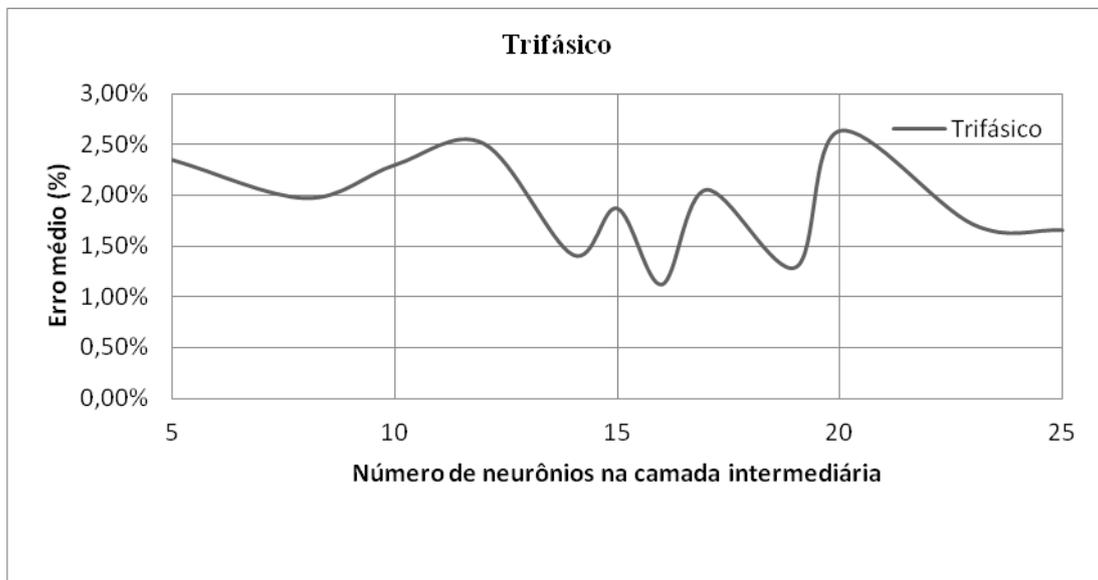


Figura 6.3.1.5 - ME versus o número de neurônios na camada oculta - 3F Trecho 1

Tabela 6.3.1.1 – Características das RNA de localização - Trecho 1

<b>Característica</b>	<b>RNA FT</b>	<b>RNA FF</b>	<b>RNA FFT</b>	<b>RNA 3F</b>
Tipo de falta	Fase-terra	Fase-fase	Fase-fase-terra	Trifásica
Número de Neurônios da camada de entrada	12	12	12	12
Número de Neurônios na camada intermediária	15	17	17	16
Número de Neurônios na camada de saída	1	1	1	1
Função de ativação da camada intermediária	Tangente hiperbólica	Tangente hiperbólica	Tangente hiperbólica	Tangente hiperbólica
Função de ativação da camada de saída	Linear	Linear	Linear	Linear

A Tabela 6.3.1.1 consolida os resultados obtidos após a conclusão da etapa de testes no trecho 1. Nesta tabela estão mostrados os números de neurônios da camada intermediária para cada tipo de falta.

### **6.3.2. Trecho 2**

O mesmo processo de obtenção das melhores topologias de RNA para o trecho 1 será seguido para o trecho 2 e a evolução dos erros para cada tipo de falta no trecho 2 pode ser vista nas Figuras 6.3.2.1 até 6.3.2.4.

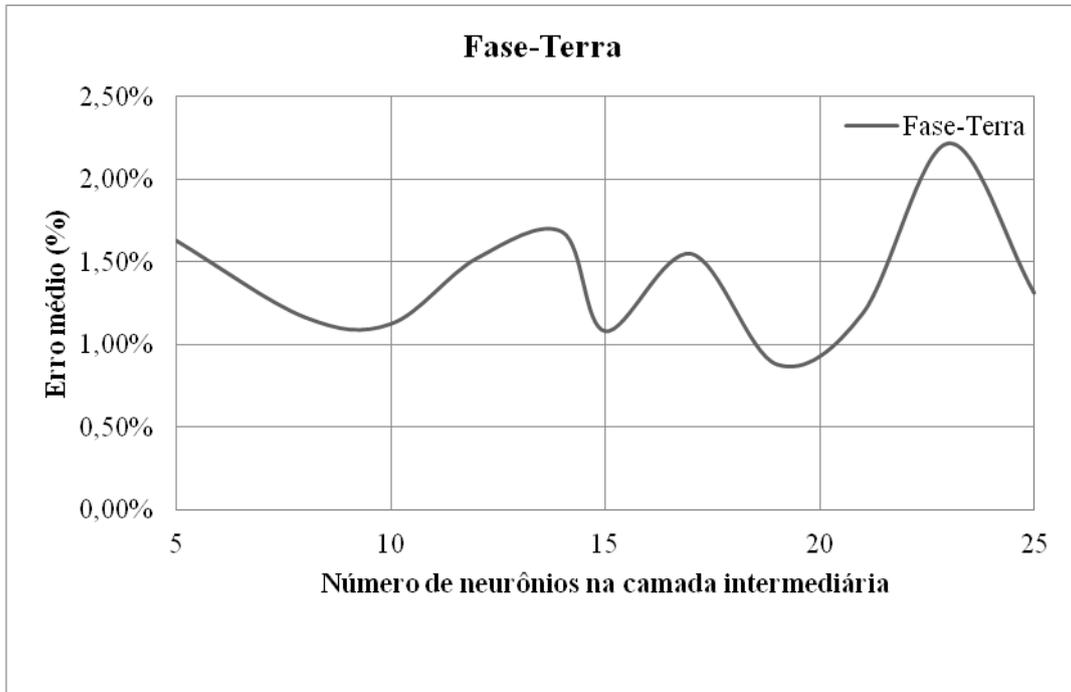


Figura 6.3.2.1 - ME versus o número de neurônios na camada oculta - FT Trecho 2

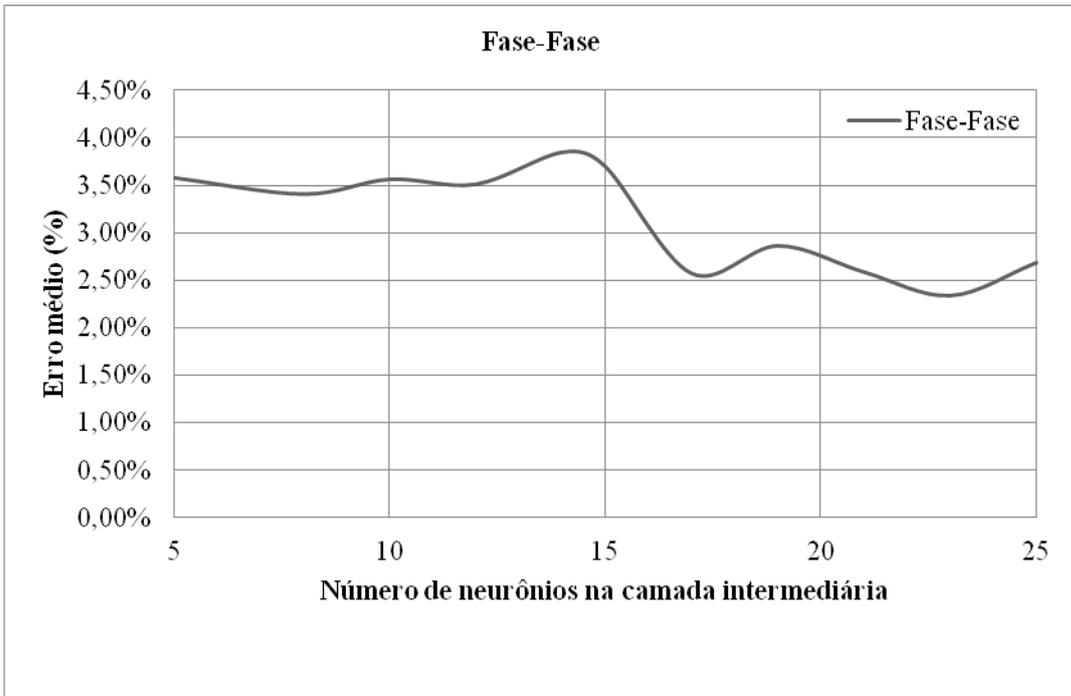


Figura 6.3.2.2 - ME versus o número de neurônios na camada oculta - FF Trecho 2

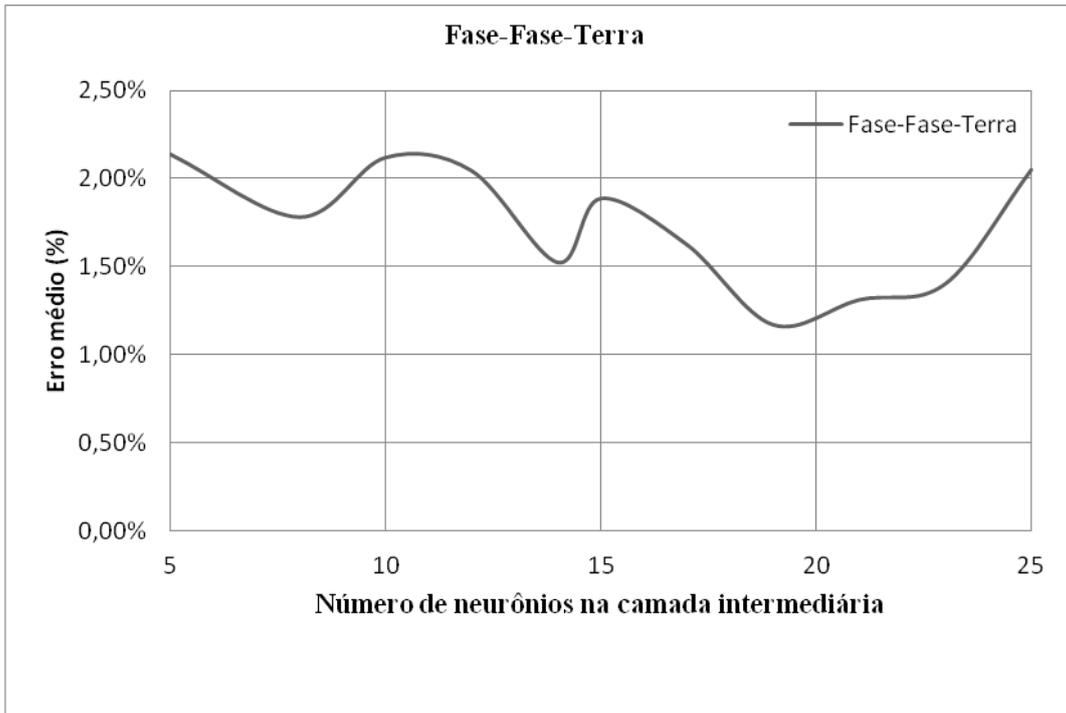


Figura 6.3.2.3 - ME versus o número de neurônios na camada oculta - FFT Trecho 2

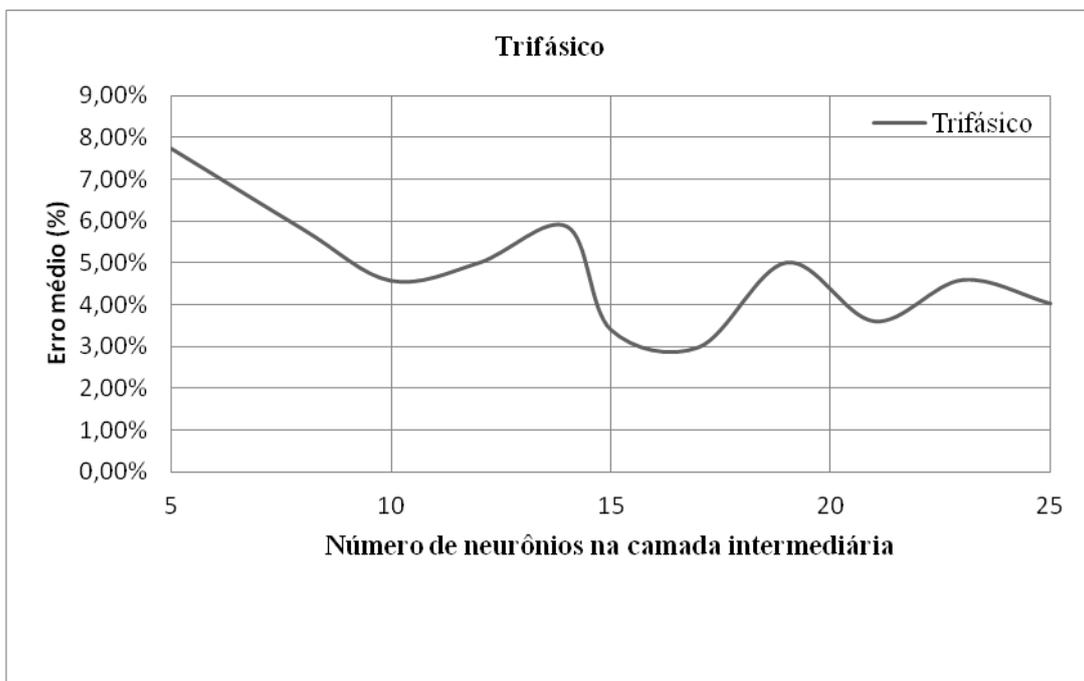


Figura 6.3.2.4 - ME versus o número de neurônios na camada oculta - 3F Trecho 2

Tabela 6.3.2.1 – Características das RNA de localização - Trecho 2

<b>Característica</b>	<b>RNA FT</b>	<b>RNA FF</b>	<b>RNA FFT</b>	<b>RNA 3F</b>
Tipo de falta	Fase-terra	Fase-fase	Fase-fase-terra	Trifásica
Número de Neurônios da camada de entrada	12	12	12	12
Número de Neurônios na camada intermediária	19	23	19	17
Número de Neurônios na camada de saída	1	1	1	1
Função de ativação da camada intermediária	Tangente hiperbólica	Tangente hiperbólica	Tangente hiperbólica	Tangente hiperbólica
Função de ativação da camada de saída	Linear	Linear	Linear	Linear

A Tabela 6.3.1.1 consolida os resultados obtidos após a conclusão da etapa de testes no trecho 2. Nesta tabela estão mostrados os números de neurônios da camada intermediária para cada tipo de falta.

### **6.3.3. Trecho 3**

As Figuras 6.3.3.1 até 6.3.3.4 mostram o processo de evolução dos erros para cada tipo de falta utilizados na obtenção das melhores topologias de RNA para o trecho 3.

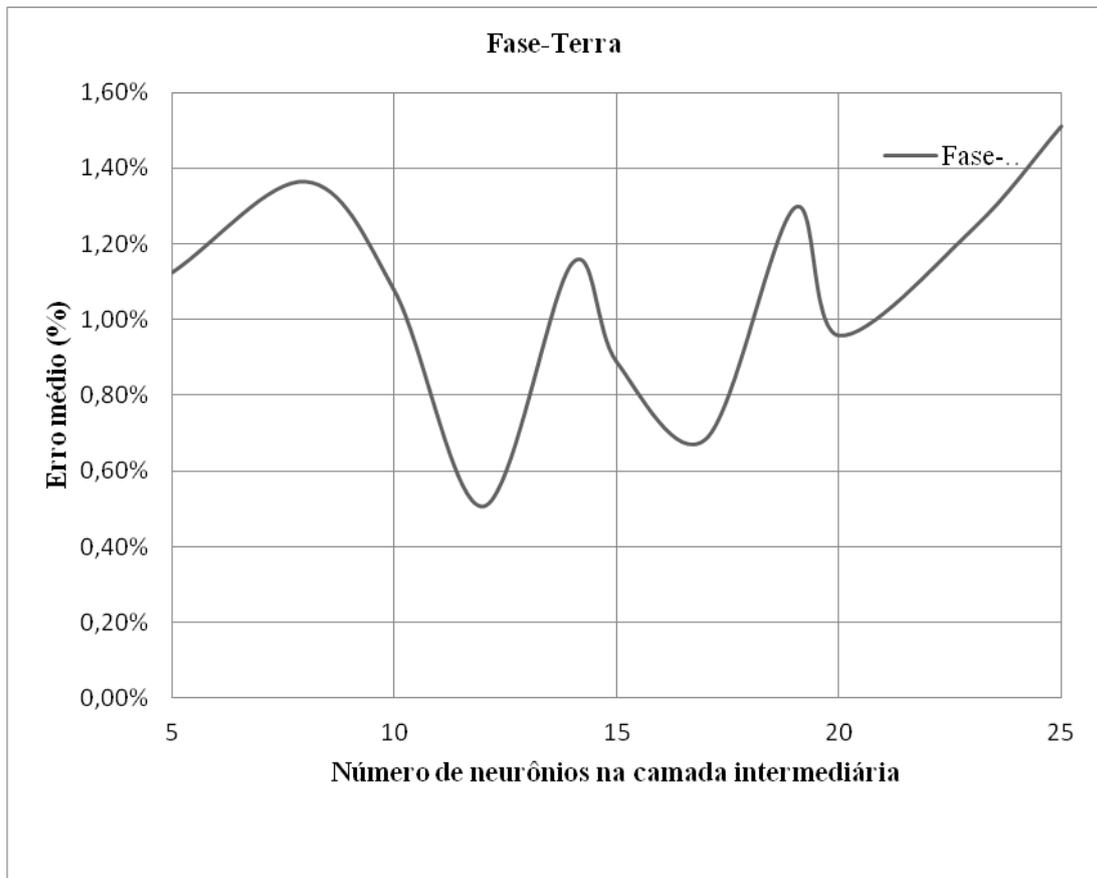


Figura 6.3.3.1 - ME versus o número de neurônios na camada oculta - FT Trecho 3

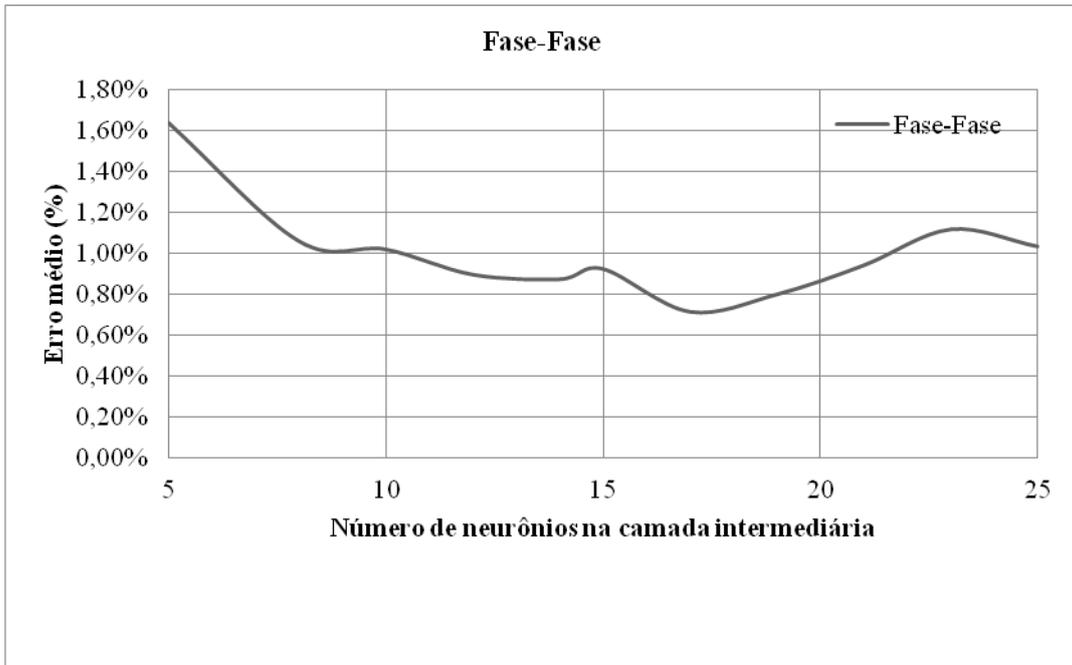


Figura 6.3.3.2 - ME versus o número de neurônios na camada oculta - FF Trecho 3

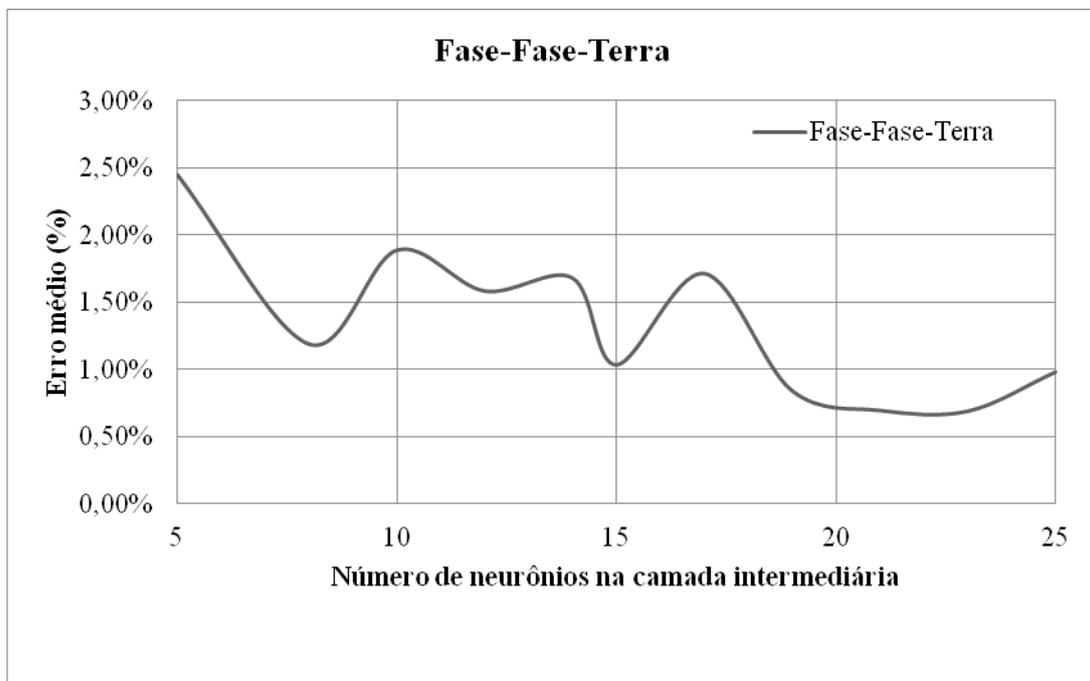


Figura 6.3.3.3 - ME versus o número de neurônios na camada oculta - FFT Trecho 3

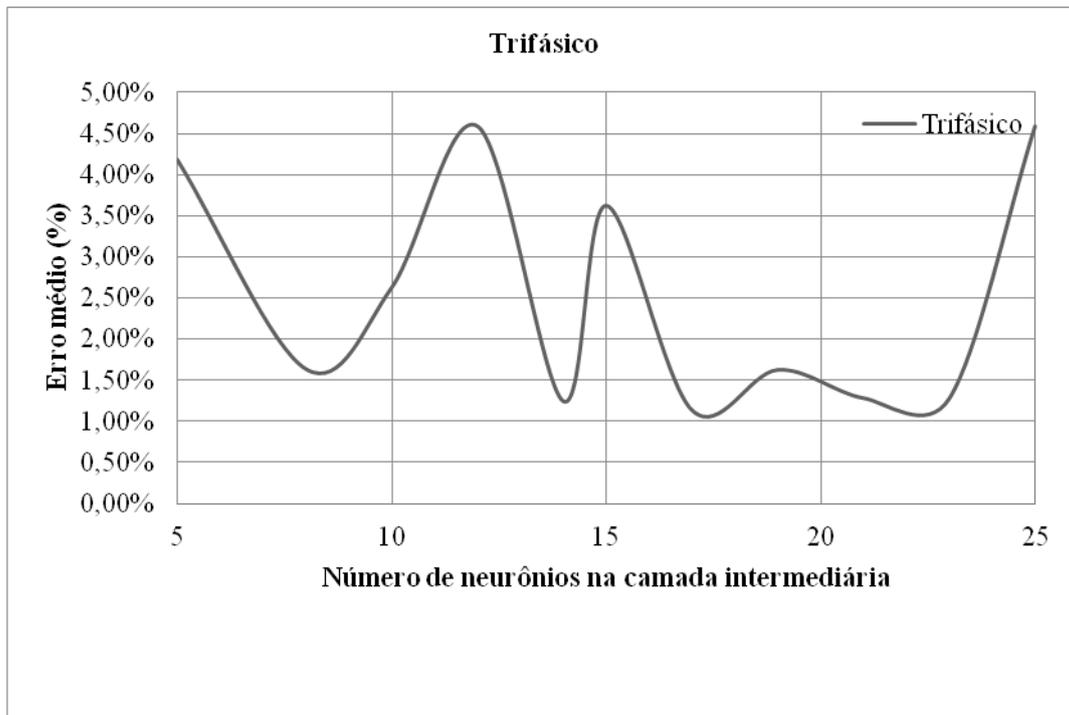


Figura 6.3.3.4 - ME versus o número de neurônios na camada oculta - 3F Trecho 3

Tabela 6.3.3.1 – Características das RNA de localização - Trecho 3

<b>Característica</b>	<b>RNA FT</b>	<b>RNA FF</b>	<b>RNA FFT</b>	<b>RNA 3F</b>
Tipo de falta	Fase-terra	Fase-fase	Fase-fase-terra	Trifásica
Número de Neurônios da camada de entrada	12	12	12	12
Número de Neurônios na camada intermediária	12	17	23	17
Número de Neurônios na camada de saída	1	1	1	1
Função de ativação da camada intermediária	Tangente hiperbólica	Tangente hiperbólica	Tangente hiperbólica	Tangente hiperbólica
Função de ativação da camada de saída	Linear	Linear	Linear	Linear

A Tabela 6.3.3.1 consolida os resultados obtidos após a conclusão da etapa de testes no trecho 3. Nesta tabela estão mostrados os números de neurônios da camada intermediária para cada tipo de falta.

A Figura 6.3.3.5 apresenta as características das RNA para cada trecho e para cada tipo de falta.

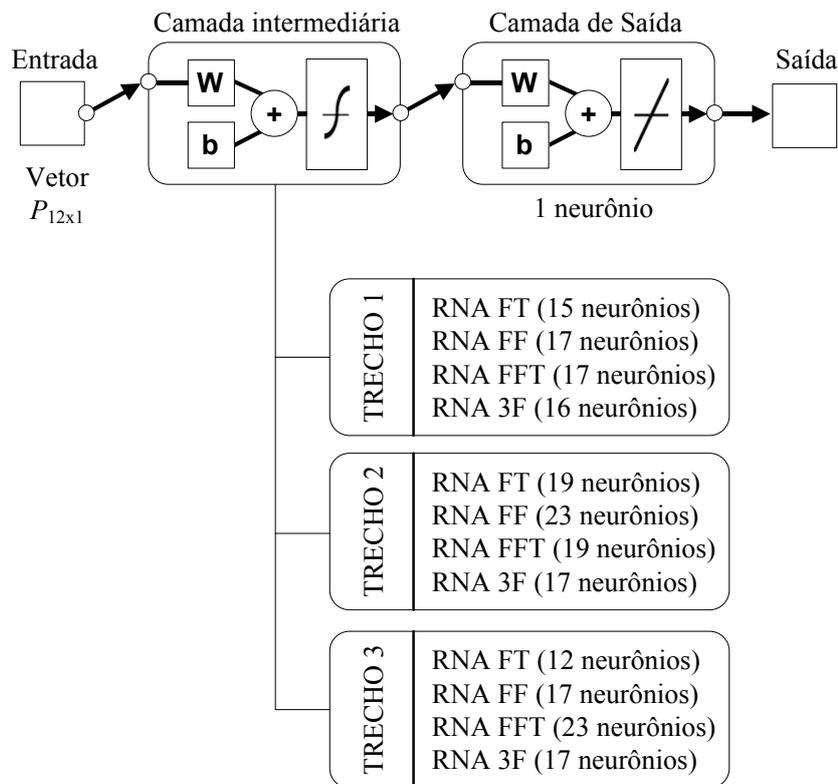


Figura 6.3.3.5 - Arquitetura das RNA de localização para os trechos 1, 2 e 3

#### 6.3.4. Resultados das Simulações

Neste item serão comentados os resultados referentes às simulações das topologias de redes de localização treinadas nos itens anteriores considerando apenas o conjunto de testes. A Tabela 6.3.4.1 mostra o número de neurônios na camada oculta e o menor erro ME obtido para cada tipo de rede dividido por trechos.

Tabela 6.3.4.1 – Resultados das RNA de localização

		<i>RNA FT</i>	<i>RNA FF</i>	<i>RNA FFT</i>	<i>RNA 3F</i>
<b>Trecho 1</b>	<b>Erro ME</b>	0,43%	0,69%	0,73%	1,12%
	<b>Topologia</b>	12-15-1	12-17-1	12-17-1	12-16-1
<b>Trecho 2</b>	<b>Erro ME</b>	0,88%	1,78%	1,17%	2,01%
	<b>Topologia</b>	12-19-1	12-23-1	12-19-1	12-17-1
<b>Trecho 3</b>	<b>Erro ME</b>	0,51%	0,72%	0,69%	1,14%
	<b>Topologia</b>	12-12-1	12-17-1	12-23-1	12-17-1

A partir dos resultados, pode-se concluir que o esquema de classificação e localização proposto pode ser considerado satisfatório para aplicações envolvendo algumas características reais dos sistemas de transmissão como compensação série, variação da localização, tipo e resistência da falta e ângulo de incidência.

A ideia de agrupar as simulações e seus respectivos resultados por trechos foi baseada na expectativa de que o algoritmo apresentasse resultados diferentes para cada trecho em função das diferentes características de cada um deles. De certa forma, isso se refletiu nos resultados do trecho 2, já que este está compreendido entre dois blocos de compensação, característica esta que o destaca dos trechos 1 e 3. A influência desta característica foi discutida no capítulo 5, onde se observou as oscilações na amplitude dos fasores de corrente e tensão para os ciclos iniciais após a falta. Isso justifica um maior erro percentual em relação aos outros trechos, mesmo tendo as RNA do trecho 2 um maior número de neurônios na camada intermediária.

O menor resultado do conjunto de testes foi 0,43% para a RNA localizadora do curto FT do trecho 1 enquanto que o maior ME apresentado foi para de 2,01% para o trecho 2, alcançado pela RNA destinada a localizar as faltas trifásicas.

Com a finalidade de avaliar a influência de cada condição de falta no desempenho do esquema de localização, foi utilizado um conceito estatístico muito prático denominado Coeficiente de Correlação de Pearson, que é muito útil quando o objetivo é analisar diretamente a correlação entre dois conjuntos de dados.

### 6.3.5. Coeficiente de Correlação Linear de Pearson

O coeficiente de correlação linear de Pearson, representado pela letra " $\rho$ ", é utilizado para quantificar a intensidade e a direção da associação linear entre duas variáveis quantitativas.

O coeficiente de correlação de Pearson assume valores de -1 até 1, onde -1, 0 e 1 são índices críticos. O sinal indica a direção da correlação, sendo uma correlação perfeitamente positiva se  $\rho=1$  e perfeitamente negativa se  $\rho=-1$ . Em contrapartida, uma correlação nula ( $\rho=0$ ) indica a total desconexão (correlação linear zero) entre as variáveis consideradas. Em aplicações práticas, os valores extremos -1, 0 e 1 dificilmente são observados. e, portanto, é útil definir limites para o coeficiente  $\rho$  a fim de auxiliar na interpretação dos níveis de correlação entre variáveis.

Alguns autores apontam para uma correlação fraca entre duas variáveis se  $0,10 < \rho < 0,30$ , uma correlação moderada para  $0,40 < \rho < 0,60$  e uma correlação é dita forte se  $0,70 < \rho < 1$ . Em outras palavras, quanto mais próximo da unidade estiver o coeficiente (entende-se mais próximo de 1 ou de -1), maior é o grau de dependência linear entre estas variáveis e, quanto mais próxima de zero, menor é a força da relação entre elas. É importante destacar que o conceito de correlação não pode ser confundido com relações de causalidade entre eventos, ou seja, o coeficiente de Pearson apenas indica que há uma semelhança entre as distribuições das variáveis envolvidas e não que existe uma função que descreve o comportamento de uma sobre a outra. O coeficiente de correlação linear de Pearson é dado pela Equação 6.3.5.1.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{\text{var}(x) \text{var}(y)}} \quad (6.3.5-1)$$

onde,

$x_1, x_2, \dots, x_n$  : valores observados da variável  $x$ ;

$y_1, y_2, \dots, y_n$  : valores observados da variável  $y$ ;

$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  : média aritmética da variável  $x$ ;

$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$  : média aritmética da variável  $y$ ;

$\text{cov}(x, y)$  : covariância entre as variáveis  $x$  e  $y$ ;

$\text{var}(x)$  e  $\text{var}(y)$  : variâncias das variáveis  $x$  e  $y$ , respectivamente.

O objetivo de explorar este conceito de correlação linear descrito acima é avaliar o grau de influência de cada variável do curto-circuito na capacidade de generalização de cada RNA através do comportamento do erro médio. A Tabela 6.3.5.1 consolida os valores do coeficiente de correlação de Pearson correlacionando as variáveis erro médio-ângulo de incidência, erro médio-resistência e erro médio-distância, sempre duas a duas.

Como pode ser notado, a maior parte dos coeficientes apontam para uma correlação fraca entre as variáveis da falta e o erro de localização, exceto por alguns coeficientes restritos ao intervalo entre 0,3 e 0,53, que apontam para uma correlação de fraca a moderada. Ainda assim, considerando os diversos fatores levados em consideração durante a fase de simulações, pode-se atestar o bom desempenho do esquema de classificação e localização proposto, indicando um resultado satisfatório do mesmo.

Tabela 6.3.5.1 - Resultados das correlações entre as variáveis e ME

Trecho 1			Fator de correlação de Pearson ( $\rho$ )		
	Tipo de falta	Erro médio (%)	Ângulo de incidência [°]	Resistência [ $\Omega$ ]	Distância [km]
	FT	0,43%	0,02	-0,18	-0,04
	FF	0,69%	0,07	-0,37	-0,01
	FFT	0,73%	-0,05	-0,10	-0,11
	3F	1,12%	-0,10	-0,39	-0,19

Trecho 2			Fator de correlação de Pearson ( $\rho$ )		
	Tipo de falta	Erro (%)	Ângulo de incidência [°]	Resistência [ $\Omega$ ]	Distância [km]
	FT	0,88%	-0,09	-0,12	-0,07
	FF	1,78%	-0,13	-0,20	0,19
	FFT	1,17%	0,09	-0,15	0,11
	3F	2,01%	0,31	-0,14	-0,04

Trecho 3			Fator de correlação de Pearson ( $\rho$ )		
	Tipo de falta	Erro (%)	Ângulo de incidência [°]	Resistência [ $\Omega$ ]	Distância [km]
	FT	0,51%	-0,01	-0,21	-0,08
	FF	0,72%	-0,12	0,00	0,15
	FFT	0,69%	-0,30	-0,07	0,37
	3F	1,14%	0,53	-0,02	0,15

## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação abordou o emprego das RNA como uma técnica alternativa para classificação e localização de faltas em sistemas de transmissão com compensação série. O resultados obtidos mostram que o desempenho global do esquema proposto foi satisfatório, denotando um elevado grau de robustez, principalmente no que diz respeito à sua imunidade à variação dos diversos parâmetros de curto-circuito tais como ângulo de incidência, resistência, tipo e localização da falta.

Além de analisar os resultados de uma técnica de classificação e localização de faltas frente às condições reais enfrentadas pelos SEP, este trabalho de pesquisa ofereceu uma análise teórica de alguns dos principais fenômenos presentes nos sistemas de transmissão e descritos na literatura disponível sobre o assunto.

As RNA atuando como classificadores de padrões podem ser utilizadas para dar suporte ao desenvolvimento de novos sistemas de proteção de distância digitais explorando sua capacidade de rejeição aos ruídos presentes nos fasores na frequência fundamental decorrente da dificuldade dos filtros digitais de eliminar os efeitos das oscilações subsíncronas. Esta conclusão baseia-se no fato de que os erros alcançados não comprometem a confiabilidade da técnica de classificação e localização proposta, atestando que, embora um trabalho de pesquisa sempre pode se estender na direção de melhorar os resultados, esta escolha possui aplicabilidade real.

Alguns trabalhos se dedicaram a analisar o desempenho de diversos algoritmos de filtragem digital para extração da componente fundamental dos fasores de corrente e tensão diante dos fatores que influenciam a proteção de distância convencional, tais como algoritmos de Walsh, Fourier, e Cosseno, inclusive variando o tamanho da janelas de dados. Todos estes algoritmos apresentaram dificuldades na tarefa extração das tensões e correntes na componente fundamental quando da presença acentuada da componente subsíncrona para curtos-circuitos aplicados após a compensação série capacitiva. O Algoritmo Cosseno foi escolhido para esta dissertação com base nestes resultados e mostrou ter um desempenho satisfatório para esta tarefa, especialmente na situação de presença de amplitudes maiores da componente unidirecional das correntes de curto-

circuito. Esta escolha pode ser considerada em aplicações reais já que o filtro Cosseno apresenta um bom compromisso entre o resultado da tarefa de estimação fasorial e tempo de processamento.

Os resultados da Tabela 6.3.5.1 mostram que o coeficiente de correlação linear de Pearson é uma boa ferramenta para análise da influência que um conjunto de dados exerce sobre outro e traduz a pouca ou nenhuma influência que as condições de falta escolhidas para este trabalho tem sobre o método de localização de faltas proposto. Porém, apenas uma avaliação deste coeficiente não é suficiente para atestar que estas (para qualquer intervalo) e outras variáveis de curto-circuito não influenciariam no mesmo método de localização de faltas.

Por fim, os resultados do método baseado em RNA proposto demonstram que o desempenho das arquiteturas escolhidas foi altamente satisfatório para o objetivo a que se propôs, confirmando que as RNA apresentam-se como uma alternativa atrativa e confiável no campo de desenvolvimento de proteção digital em sistemas de transmissão compensados, podendo ser estendido a outras aplicações em SEP.

Objetivando aplicações em sistemas reais, é importante enfatizar que as RNA podem apresentar limitações, principalmente devido à necessidade de retreinamento da arquitetura sempre que o sistema para o qual foram projetadas passar por alterações em suas características originais como, alterações em sua topologia e/ou quando ocorrerem mudanças eventuais significativas no carregamento do mesmo. Entretanto, a tarefa de readaptação (retreinamento) da RNA pode ser realizada a partir de dados off-line e de forma planejada antes da efetivação das alterações previstas. Outro aspecto a ser considerado é que haveria a mesma necessidade de reajuste dos relés convencionais, em caso de sistemas de proteção que utilizam tais relés.

Diversas outras conclusões são apresentadas nos capítulos 5 e 6, simultaneamente às discussões das simulações realizadas. Para evitar um texto prolixo, tais conclusões não serão aqui repetidas.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se avaliar o esquema de classificação e localização de faltas para o algoritmo Cosseno considerando outros tamanhos da janela de dados, analisando o impacto do aumento da janela no tempo e na qualidade da resposta. Além disso a mesma técnica pode ser desenvolvida com base em outros al-

goritmos de filtragem digital tais como o filtro de Mínimos Quadrados, filtro Seno, filtro de Kalman e outros.

Outra alternativa de desenvolvimento é a aplicação das RNA em técnicas de proteção de distância adaptativas, estendendo esta metodologia para sistemas de transmissão com FACTS e/ou considerando outras variáveis de falta como, por exemplo, nível de carregamento da linha, saturação de transformadores de corrente e influência da resistividade do solo.

Por fim, abordagens futuras poderiam incluir no esquema de proteção a abordagem de aspectos de seletividade e variação do fluxo de carga.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASHIER, Eisa; ORNER, M. Tayeb; ALRHIRN, AI Aziz. "Transmission Line Faults Detection, Classification and Location using Artificial Neural Network". In: 2012 International.
- BORGES, S. R. L. Efeito da Operação de Varistores de Óxido de Zinco sobre o Desempenho da Proteção de Distância de Linhas Compensadas, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Setembro / 2007.
- CRUZ, W. A. S, Efeito Estabilizante de Elo de Corrente Contínua na Operação de Sistema em Corrente Alternada, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Abril / 2005.
- GOMES, Cristiane Ruiz; GOMES, Herminio Simões; VIEIRA JR, Petrônio. "Utilização de Redes Neurais Artificiais para Localização de Falhas em Linhas de Transmissão de Energia.
- HAQUE, M. Tarafdar; KASHTIBAN, A. M. "Application of neural networks in power systems; a review". Trans. Eng. Comput. Technol, v. 6, 2000.
- HAYKIN, Simon. Redes Neurais - Princípios e Prática, Bookman, 2001.
- KAWADY, T.; STENZEL, J. A Practical Fault Location Approach For Double Circuit Lines Using Single End Data, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 18, p.: 1166-1173, 2003.
- KINDERMANN, G, Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, 1a Ed. Edelbra, Florianópolis, 1999.
- LIMA, D.A.C., Localização de Faltas em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica Baseada na Impedância Aparente: Algoritmo Utilizando Dados de Um Terminal . Tese de mestrado, UFRGS, Março de 2013.
- LIMA, M. M. M. Alguns Fatores Afetando o Desempenho de Relés de Distância, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Setembro / 2006.
- MIRANDA, A. L. L., Projetos de Filtros Digitais para Análise de Sinais do Sistema Elétrico. Tese de mestrado, COPPE / UFRJ, Fevereiro de 2005.
- MIRANDA, A. L. L., RODRIGUES, M. A. M., DA SILVA, E. A. B. et al., "Cálculo de fasores com taxas não múltiplas da frequência fundamental". VII Seminário Técnico de Proteção e Controle (VII STPC), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 22-27 junho 2003.

- MOURA, Dêdison S.; MOREIRA, Fernando A.; SILVA, Kleber M. "Avaliação do Impacto da Compensação Série na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão Usando Estimativa de Fasores".
- OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V.; AGGARWAL, R. K. "A complete scheme for fault detection, classification and location in transmission lines using neural networks". In: Developments in Power System Protection, 2001, Seventh International Conference on (IEE). IET, 2001. p. 335-338.
- OLIVEIRA, J. J. Proteção de Distância em Linhas de Transmissão com Compensação Série, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Julho / 2005.
- OPPENHEIM, A. V., SCHAFER, R. W., Discrete-Time Signal Processing. Prentice-Hall, 1987.
- PAITHANKAR, Y.G., Transmission Network Protection – Theory and Practice, Marcel Dekker, Inc. , p.: 38-42, 1998.
- PAITHANKAR, Y.G.; S.R. BHIDE, S.R. Fundamentals of Power System Protection, PHI Learning, 2004.
- PEREIRA, C. et al. Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando Dados de Dois Terminais.
- RAYBOLT, A. C. S. Localização de Faltas em Circuitos Duplos Utilizando Redes Neurais Artificiais, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Junho / 2011.
- ROSELLI, M. A, Correção da Saturação de Transformadores de Corrente via Redes Neurais Artificiais e seus Efeitos na Proteção de Distância, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Junho / 2007.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. Fault Location on Power Networks, ser. Power Systems. London: Ed. Springer, 2010.
- SANTOS, L.F. Avaliação de Algoritmos Numéricos de Proteção para Linhas com Compensação Série, Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Novembro / 2006.
- SANTOS, V.A. Proteção de Distância Aplicada a Linhas de Transmissão em Circuito Duplo, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Setembro/ 2007.
- SCHWEITZER, E.O., HOU, D., Filtering for protective relays, 47th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, GA, USA, 1993.

- SOLAT, Alireza; DEIHIMI, Ali. "A novel scheme for distance protection of series compensated transmission lines with TCSC using artificial neural networks". In: Electrical Engineering (ICEE), 2012 20th Iranian Conference on. IEEE, 2012. p. 517-522.
- SOUZA, T. M. Localização Automática de Faltas em Linhas de Transmissão de Circuito Duplo, Dissertação de Mestrado, UFMG / 2007.
- TAVARES, C. A. A. Ressonância Subsíncrona e Outras Formas de Instabilidade Eletromecânica, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Abril / 2005.
- TUMA, Rogério WA; SOARES DE SOUZA, J. R. M. Um novo método para a proteção de linhas de transmissão com compensação série. XII Encontro Regional Iberoamericano do CIGRE, Foz do Iguaçu, 2007.

## APÊNDICE A

A seguir são apresentados os resultados obtidos pelas RNA de localização frente aos diversos tipos de curtos simulados conforme definido na seção 6.1.

### 1. TRECHO 1

FASE-TERRA					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
AT	0	0,001	60	59,55	0,15%
AT	0	0,001	240	239,36	0,21%
BT	0	0,001	30	29,66	0,11%
BT	0	0,001	270	268,47	0,51%
CT	0	0,001	90	87,89	0,70%
CT	0	0,001	210	220,30	3,43%
AT	90	0,001	0	2,12	0,71%
AT	90	0,001	300	300,81	0,27%
BT	90	0,001	120	120,57	0,19%
BT	90	0,001	180	178,41	0,53%
CT	90	0,001	30	31,76	0,59%
CT	90	0,001	270	267,42	0,86%
AT	0	10	30	27,78	0,74%
AT	0	10	150	149,68	0,11%
BT	0	10	150	148,90	0,37%
BT	0	10	300	300,21	0,07%
CT	0	10	180	179,59	0,14%
CT	0	10	270	270,37	0,12%
AT	90	10	30	27,66	0,78%
AT	90	10	150	147,96	0,68%
BT	90	10	0	4,73	1,58%
BT	90	10	240	241,78	0,59%
CT	90	10	90	91,40	0,47%
CT	90	10	180	178,76	0,41%
AT	0	20	210	210,01	0,00%
AT	0	20	300	298,92	0,36%
BT	0	20	0	-0,76	0,25%
BT	0	20	90	89,19	0,27%
CT	0	20	90	90,51	0,17%
CT	0	20	180	178,97	0,34%

FASE-TERRA					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
AT	90	20	30	30,27	0,09%
AT	90	20	150	147,31	0,90%
BT	90	20	120	120,36	0,12%
BT	90	20	240	240,60	0,20%
CT	90	20	60	62,79	0,93%
CT	90	20	270	270,18	0,06%
AT	0	15	75	75,17	0,06%
AT	0	15	195	194,05	0,32%
BT	0	15	45	44,29	0,24%
BT	0	15	150	149,00	0,33%
CT	0	15	135	135,96	0,32%
CT	0	15	225	228,37	1,12%
AT	90	15	105	104,77	0,08%
AT	90	15	165	162,62	0,79%
BT	90	15	15	15,31	0,10%
BT	90	15	225	227,57	0,86%
CT	90	15	45	46,95	0,65%
CT	90	15	195	195,15	0,05%
AT	0	5	15	13,36	0,55%
AT	0	5	105	106,17	0,39%
BT	0	5	15	14,32	0,23%
BT	0	5	255	252,97	0,68%
CT	0	5	105	103,75	0,42%
CT	0	5	150	152,33	0,78%
AT	90	5	45	43,55	0,48%
AT	90	5	75	75,48	0,16%
BT	90	5	195	194,52	0,16%
BT	90	5	255	254,37	0,21%
CT	90	5	150	150,01	0,00%
CT	90	5	255	254,63	0,12%
CT	0	0,001	60	59,16	0,28%
AT	0	10	180	179,48	0,17%
AT	0	15	165	163,80	0,40%
AT	90	15	255	255,10	0,03%
CT	90	15	255	253,82	0,39%
AT	0	5	195	195,11	0,04%
<b>Erro médio [%]</b>					<b>0,43%</b>

FASE-FASE					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
AB	0	0,001	0	0,72	0,24%
AB	0	0,001	210	209,90	0,03%
AC	0	0,001	90	90,61	0,20%
AC	0	0,001	180	178,80	0,40%
BC	0	0,001	0	10,93	3,64%
BC	0	0,001	150	151,48	0,49%
AB	90	0,001	150	163,31	4,44%
AB	90	0,001	240	225,35	4,88%
AC	90	0,001	60	63,01	1,00%
AC	90	0,001	270	267,01	1,00%
BC	90	0,001	30	32,00	0,67%
BC	90	0,001	90	90,09	0,03%
AB	0	10	120	112,48	2,51%
AB	0	10	210	208,92	0,36%
AC	0	10	30	29,30	0,23%
AC	0	10	180	180,68	0,23%
BC	0	10	0	1,47	0,49%
BC	0	10	300	299,78	0,07%
AB	90	10	120	118,99	0,34%
AB	90	10	270	269,14	0,29%
AC	90	10	0	0,47	0,16%
AC	90	10	270	267,94	0,69%
BC	90	10	210	209,95	0,02%
BC	90	10	300	299,53	0,16%
AB	0	20	60	61,04	0,35%
AB	0	20	150	151,56	0,52%
AC	0	20	150	150,21	0,07%
AC	0	20	180	180,65	0,22%
BC	0	20	180	181,84	0,61%
BC	0	20	240	239,36	0,21%
AB	90	20	30	29,32	0,23%
AB	90	20	240	241,56	0,52%
AC	90	20	90	90,15	0,05%
AC	90	20	180	179,24	0,25%
BC	90	20	30	30,64	0,21%
BC	90	20	150	152,68	0,89%
AB	0	15	15	16,27	0,42%
AB	0	15	150	150,76	0,25%
AC	0	15	135	137,12	0,71%
AC	0	15	225	225,50	0,17%

FASE-FASE					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
BC	0	15	15	15,50	0,17%
BC	0	15	165	165,38	0,13%
AB	90	15	75	74,89	0,04%
AB	90	15	195	199,32	1,44%
AC	90	15	135	136,21	0,40%
AC	90	15	285	285,26	0,09%
BC	90	15	45	46,39	0,46%
BC	90	15	135	136,89	0,63%
AB	0	5	15	14,48	0,17%
AB	0	5	195	191,88	1,04%
AC	0	5	135	136,54	0,51%
AC	0	5	285	286,28	0,43%
BC	0	5	135	135,93	0,31%
BC	0	5	195	196,72	0,57%
AB	90	5	45	44,48	0,17%
AB	90	5	105	106,03	0,34%
AC	90	5	105	99,74	1,75%
AC	90	5	285	285,06	0,02%
BC	90	5	105	103,12	0,63%
BC	90	5	135	138,13	1,04%
AB	0	0,001	150	161,76	3,92%
BC	9	10	180	178,54	0,49%
AC	9	20	240	240,65	0,22%
AB	0	5	255	253,80	0,40%
AB	0	5	150	153,39	1,13%
AC	0	0,001	270	268,39	0,54%
<b>Erro médio [%]</b>					<b>0,69%</b>

FASE-FASE-TERRA					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
ABT	0	0,001	240	230,97	3,01%
ABT	0	0,001	90	90,59	0,20%
ACT	0	0,001	150	149,81	0,06%
ACT	0	0,001	240	241,34	0,45%
BCT	0	0,001	60	55,57	1,48%
BCT	0	0,001	300	299,86	0,05%
ABT	90	0,001	30	34,14	1,38%
ABT	90	0,001	120	115,71	1,43%
ACT	90	0,001	210	211,44	0,48%
ACT	90	0,001	300	300,50	0,17%
BCT	90	0,001	150	152,82	0,94%
BCT	90	0,001	210	211,77	0,59%
ABT	0	10	0	-0,04	0,01%
ABT	0	10	210	210,95	0,32%
ACT	0	10	90	88,70	0,43%
ACT	0	10	120	124,45	1,48%
BCT	0	10	180	177,88	0,71%
BCT	0	10	240	238,57	0,48%
ABT	90	10	120	114,21	1,93%
ABT	90	10	180	178,34	0,55%
ACT	90	10	30	31,19	0,40%
ACT	90	10	270	270,17	0,06%
BCT	90	10	240	238,85	0,38%
BCT	90	10	300	300,83	0,28%
ABT	0	20	0	-0,96	0,32%
ABT	0	20	60	59,40	0,20%
ACT	0	20	90	89,43	0,19%
ACT	0	20	210	208,02	0,66%
BCT	0	20	120	124,07	1,36%
BCT	0	20	210	212,35	0,78%
ABT	90	20	60	62,73	0,91%
ABT	90	20	150	151,48	0,49%
ACT	90	20	30	30,10	0,03%
ACT	90	20	240	241,49	0,50%
BCT	90	20	30	32,15	0,72%
BCT	90	20	180	177,23	0,92%
ABT	0	15	15	14,42	0,19%
ABT	0	15	225	228,13	1,04%
ACT	0	15	105	105,40	0,13%
ACT	0	15	285	285,45	0,15%

FASE-FASE-TERRA					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
BCT	0	15	75	72,04	0,99%
BCT	0	15	165	165,95	0,32%
ABT	90	15	15	14,69	0,10%
ABT	90	15	150	152,63	0,88%
ACT	90	15	165	168,46	1,15%
ACT	90	15	195	192,05	0,98%
BCT	90	15	75	75,96	0,32%
BCT	90	15	150	150,56	0,19%
ABT	0	5	15	7,33	2,56%
ABT	0	5	195	192,87	0,71%
ACT	0	5	135	136,50	0,50%
ACT	0	5	225	224,10	0,30%
BCT	0	5	75	73,20	0,60%
BCT	0	5	195	194,57	0,14%
ABT	90	5	15	8,06	2,31%
ABT	90	5	135	136,24	0,41%
ACT	90	5	45	44,22	0,26%
ACT	90	5	195	193,72	0,43%
BCT	90	5	150	152,41	0,80%
BCT	90	5	255	254,39	0,20%
ACT	0	0,001	90	86,55	1,15%
ABT	90	20	210	214,21	1,40%
ABT	0	15	135	125,13	3,29%
BCT	90	15	45	46,51	0,50%
ABT	0	10	270	274,62	1,54%
ACT	0	10	180	180,02	0,01%
<b>Erro médio [%]</b>					<b>0,73%</b>

TRIFÁSICO					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [ $\Omega$ ]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
ABC	0	0,001	60	53,56	2,15%
ABC	0	0,001	180	186,90	2,30%
ABC	90	0,001	30	41,83	3,94%
ABC	90	0,001	150	151,49	0,50%
ABC	0	10	90	88,77	0,41%
ABC	0	10	180	170,91	3,03%
ABC	90	10	0	-1,44	0,48%
ABC	90	10	270	274,87	1,62%
ABC	0	20	30	33,47	1,16%
ABC	0	20	90	92,13	0,71%
ABC	90	20	120	119,84	0,05%
ABC	90	20	210	206,31	1,23%
ABC	0	15	15	11,02	1,33%
ABC	0	15	135	137,47	0,82%
ABC	90	15	105	103,99	0,34%
ABC	90	15	165	164,14	0,29%
ABC	0	5	135	135,66	0,22%
ABC	0	5	255	255,38	0,13%
ABC	90	5	15	21,00	2,00%
ABC	90	5	105	101,91	1,03%
ABC	90	10	150	150,44	0,15%
ABC	90	5	255	257,11	0,70%
<b>Erro médio [%]</b>					<b>1,12%</b>

## 2. TRECHO 2

FASE-TERRA					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
AT	0	0,001	30	28,82	0,39%
AT	0	0,001	150	144,79	1,74%
BT	0	0,001	120	126,44	2,15%
BT	0	0,001	240	246,49	2,16%
CT	0	0,001	60	58,82	0,39%
CT	0	0,001	180	176,56	1,15%
AT	90	0,001	120	124,12	1,37%
AT	90	0,001	180	181,11	0,37%
BT	90	0,001	210	208,40	0,53%
BT	90	0,001	240	234,44	1,85%
CT	90	0,001	60	59,89	0,04%
CT	90	0,001	270	269,79	0,07%
AT	0	10	30	27,93	0,69%
AT	0	10	180	177,97	0,68%
BT	0	10	120	116,29	1,24%
BT	0	10	210	208,25	0,58%
CT	0	10	30	29,61	0,13%
CT	0	10	270	267,25	0,92%
AT	90	10	150	150,46	0,15%
AT	90	10	180	181,37	0,46%
BT	90	10	270	272,55	0,85%
BT	90	10	240	242,63	0,88%
CT	90	10	90	90,95	0,32%
CT	90	10	210	211,06	0,35%
AT	0	20	210	205,19	1,60%
AT	0	20	270	267,68	0,77%
BT	0	20	180	183,40	1,13%
BT	0	20	240	241,33	0,44%
CT	0	20	30	30,82	0,27%
CT	0	20	240	241,62	0,54%
AT	90	20	0	0,26	0,09%
AT	90	20	90	94,65	1,55%
BT	90	20	120	124,78	1,59%
BT	90	20	180	185,21	1,74%
CT	90	20	210	212,89	0,96%
CT	90	20	240	241,38	0,46%

FASE-TERRA					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
AT	0	15	45	43,80	0,40%
AT	0	15	135	133,27	0,58%
BT	0	15	105	105,08	0,03%
BT	0	15	195	195,67	0,22%
CT	0	15	75	75,21	0,07%
CT	0	15	255	253,95	0,35%
AT	90	15	15	13,56	0,48%
AT	90	15	75	81,02	2,01%
BT	90	15	105	108,87	1,29%
BT	90	15	255	258,64	1,21%
CT	90	15	135	133,79	0,40%
CT	90	15	225	226,94	0,65%
AT	0	5	15	10,43	1,52%
AT	0	5	255	256,02	0,34%
BT	0	5	75	75,76	0,25%
BT	0	5	105	101,77	1,08%
CT	0	5	105	109,32	1,44%
CT	0	5	165	161,48	1,17%
AT	90	5	165	166,69	0,56%
AT	90	5	255	255,21	0,07%
BT	90	5	45	41,47	1,18%
BT	90	5	225	225,18	0,06%
CT	90	5	135	129,87	1,71%
CT	90	5	165	164,86	0,05%
BT	0	0,001	90	104,99	5,00%
CT	0	10	120	123,95	1,32%
AT	90	20	120	124,64	1,55%
BT	90	15	45	39,20	1,93%
AT	90	5	285	282,81	0,73%
CT	90	5	105	105,21	0,07%
<b>Erro médio [%]</b>					<b>0,88%</b>

FASE-FASE					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
AB	0	0,001	30	25,01	1,66%
AB	0	0,001	120	131,77	3,92%
AC	0	0,001	180	175,87	1,38%
AC	0	0,001	150	146,52	1,16%
BC	0	0,001	120	125,02	1,67%
BC	0	0,001	210	212,65	0,88%
AB	90	0,001	30	44,04	4,68%
AB	90	0,001	150	148,95	0,35%
AC	90	0,001	30	30,91	0,30%
AC	90	0,001	300	296,95	1,02%
BC	90	0,001	0	0,16	0,05%
BC	90	0,001	270	274,04	1,35%
AB	0	10	60	62,97	0,99%
AB	0	10	150	154,55	1,52%
AC	0	10	180	183,48	1,16%
AC	0	10	240	244,52	1,51%
BC	0	10	120	123,40	1,13%
BC	0	10	210	218,01	2,67%
AB	90	10	180	193,42	4,47%
AB	90	10	210	199,84	3,39%
AC	90	10	30	28,41	0,53%
AC	90	10	210	206,42	1,19%
BC	90	10	60	55,59	1,47%
BC	90	10	300	302,10	0,70%
AB	0	20	0	0,81	0,27%
AB	0	20	60	48,10	3,97%
AC	0	20	90	91,87	0,62%
AC	0	20	150	146,08	1,31%
BC	0	20	180	180,01	0,00%
BC	0	20	240	237,36	0,88%
AB	90	20	90	96,14	2,05%
AB	90	20	150	156,83	2,28%
AC	90	20	30	29,78	0,07%
AC	90	20	240	236,83	1,06%
BC	90	20	150	153,64	1,21%
BC	90	20	270	276,53	2,18%
AB	0	15	45	40,06	1,65%
AB	0	15	285	288,45	1,15%
AC	0	15	15	14,90	0,03%

FASE-FASE					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
AC	0	15	75	74,34	0,22%
BC	0	15	105	111,00	2,00%
BC	0	15	150	148,49	0,50%
AB	90	15	195	195,06	0,02%
AB	90	15	135	141,53	2,18%
AC	90	15	45	43,40	0,53%
AC	90	15	195	194,21	0,26%
BC	90	15	135	140,32	1,77%
BC	90	15	195	187,32	2,56%
AB	0	5	165	173,91	2,97%
AB	0	5	135	147,06	4,02%
AC	0	5	135	123,21	3,93%
AC	0	5	285	301,75	5,58%
BC	0	5	105	115,18	3,39%
BC	0	5	150	136,41	4,53%
AB	90	5	195	195,09	0,03%
AB	90	5	45	51,46	2,15%
AC	90	5	135	135,23	0,08%
AC	90	5	255	252,62	0,79%
BC	90	5	15	14,63	0,12%
BC	90	5	165	177,23	4,08%
BC	90	0,001	240	225,64	4,79%
AB	0	20	300	312,30	4,10%
AB	90	15	45	38,30	2,23%
AC	90	15	165	168,40	1,13%
BC	0	5	135	127,96	2,35%
AC	90	5	165	173,86	2,95%
<b>Erro médio [%]</b>					<b>1,78%</b>

FASE-FASE-TERRA					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
ABT	0	0,001	30	28,78	0,41%
ABT	0	0,001	120	119,80	0,07%
ACT	0	0,001	120	102,01	6,00%
ACT	0	0,001	240	242,57	0,86%
BCT	0	0,001	90	90,13	0,04%
BCT	0	0,001	240	228,93	3,69%
ABT	90	0,001	240	236,46	1,18%
ABT	90	0,001	300	305,06	1,69%
ACT	90	0,001	60	62,53	0,84%
ACT	90	0,001	150	148,76	0,41%
BCT	90	0,001	30	34,66	1,55%
BCT	90	0,001	180	176,88	1,04%
ABT	0	10	60	60,27	0,09%
ABT	0	10	120	117,32	0,89%
ACT	0	10	90	85,13	1,62%
ACT	0	10	240	243,43	1,14%
BCT	0	10	240	237,94	0,69%
BCT	0	10	300	300,76	0,25%
ABT	90	10	90	91,49	0,50%
ABT	90	10	240	237,97	0,68%
ACT	90	10	120	133,37	4,46%
ACT	90	10	150	151,12	0,37%
BCT	90	10	210	207,98	0,67%
BCT	90	10	270	272,96	0,99%
ABT	0	20	30	31,43	0,48%
ABT	0	20	60	59,21	0,26%
ACT	0	20	150	156,13	2,04%
ACT	0	20	270	267,25	0,92%
BCT	0	20	210	208,19	0,60%
BCT	0	20	240	238,88	0,37%
ABT	90	20	60	59,80	0,07%
ABT	90	20	270	272,23	0,74%
ACT	90	20	0	1,40	0,47%
ACT	90	20	30	30,48	0,16%
BCT	90	20	210	204,66	1,78%
BCT	90	20	270	277,90	2,63%
ABT	0	15	45	45,51	0,17%
ABT	0	15	105	104,79	0,07%
ACT	0	15	105	105,54	0,18%

FASE-FASE-TERRA					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
ACT	0	15	225	225,54	0,18%
BCT	0	15	15	10,72	1,43%
BCT	0	15	165	163,32	0,56%
ABT	90	15	255	255,59	0,20%
ABT	90	15	285	291,11	2,04%
ACT	90	15	105	121,62	5,54%
ACT	90	15	165	170,31	1,77%
BCT	90	15	75	72,48	0,84%
BCT	90	15	255	258,06	1,02%
ABT	0	5	75	76,73	0,58%
ABT	0	5	225	224,26	0,25%
ACT	0	5	15	13,43	0,52%
ACT	0	5	195	195,12	0,04%
BCT	0	5	45	46,24	0,41%
BCT	0	5	255	246,12	2,96%
ABT	90	5	195	192,39	0,87%
ABT	90	5	285	291,63	2,21%
ACT	90	5	150	149,80	0,07%
ACT	90	5	165	167,81	0,94%
BCT	90	5	75	73,98	0,34%
BCT	90	5	225	226,30	0,43%
ACT	0	0,001	150	138,04	3,99%
BCT	0	0	30	28,96	0,35%
BCT	90	15	105	107,43	0,81%
ACT	0	5	75	67,29	2,57%
ACT	90	5	105	115,98	3,66%
ABT	90	10	210	205,87	1,38%
<b>Erro médio [%]</b>					<b>1,17%</b>

TRIFÁSICO					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
ABC	0	0,001	60	48,70	3,77%
ABC	0	0,001	180	171,73	2,76%
ABC	90	0,001	30	32,82	0,94%
ABC	90	0,001	120	112,61	2,46%
ABC	0	10	90	84,29	1,90%
ABC	0	10	210	212,46	0,82%
ABC	90	10	120	132,67	4,22%
ABC	90	10	270	273,52	1,17%
ABC	0	20	30	27,46	0,85%
ABC	0	20	240	238,75	0,42%
ABC	90	20	90	90,01	0,00%
ABC	90	20	150	169,81	6,60%
ABC	0	15	105	104,13	0,29%
ABC	0	15	165	169,60	1,53%
ABC	90	15	135	142,13	2,38%
ABC	90	15	225	223,59	0,47%
ABC	0	5	105	102,23	0,92%
ABC	0	5	285	281,87	1,04%
ABC	90	5	45	47,48	0,83%
ABC	90	5	105	98,89	2,04%
ABC	90	10	150	138,61	3,80%
ABC	90	5	165	149,81	5,06%
<b>Erro médio [%]</b>					<b>2,01%</b>

## 3. TRECHO 3

FASE-TERRA					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
AT	0	0,001	90	99,62	3,21%
AT	0	0,001	240	239,77	0,08%
BT	0	0,001	0	-0,36	0,12%
BT	0	0,001	90	88,10	0,63%
CT	0	0,001	120	117,94	0,69%
CT	0	0,001	270	268,35	0,55%
AT	90	0,001	60	59,36	0,21%
AT	90	0,001	150	145,81	1,40%
BT	90	0,001	30	33,48	1,16%
BT	90	0,001	240	238,32	0,56%
CT	90	0,001	120	119,87	0,04%
CT	90	0,001	210	210,70	0,23%
AT	0	10	210	212,72	0,91%
AT	0	10	270	270,16	0,05%
BT	0	10	60	58,63	0,46%
BT	0	10	240	240,50	0,17%
CT	0	10	90	90,68	0,23%
CT	0	10	300	300,02	0,01%
AT	90	10	30	28,06	0,65%
AT	90	10	180	182,95	0,98%
BT	90	10	30	29,84	0,05%
BT	90	10	120	117,99	0,67%
CT	90	10	60	59,79	0,07%
CT	90	10	210	209,87	0,04%
AT	0	20	180	175,41	1,53%
AT	0	20	210	208,59	0,47%
BT	0	20	0	-0,28	0,09%
BT	0	20	180	178,98	0,34%
CT	0	20	90	90,27	0,09%
CT	0	20	270	271,14	0,38%
AT	90	20	150	150,53	0,18%
AT	90	20	300	296,71	1,10%
BT	90	20	60	60,22	0,07%
BT	90	20	240	240,07	0,02%
CT	90	20	120	121,21	0,40%
CT	90	20	180	179,29	0,24%

FASE-TERRA					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
AT	0	15	45	46,70	0,57%
AT	0	15	165	164,59	0,14%
BT	0	15	105	107,52	0,84%
BT	0	15	225	225,86	0,29%
CT	0	15	15	15,22	0,07%
CT	0	15	255	254,89	0,04%
AT	90	15	75	73,43	0,52%
AT	90	15	165	167,58	0,86%
BT	90	15	135	132,22	0,93%
BT	90	15	285	285,61	0,20%
CT	90	15	45	46,56	0,52%
CT	90	15	105	104,93	0,02%
AT	0	5	105	110,36	1,79%
AT	0	5	195	195,83	0,28%
BT	0	5	45	44,47	0,18%
BT	0	5	150	151,35	0,45%
CT	0	5	165	164,85	0,05%
CT	0	5	285	283,14	0,62%
AT	90	5	15	15,69	0,23%
AT	90	5	150	151,17	0,39%
BT	90	5	135	128,98	2,01%
BT	90	5	225	224,38	0,21%
CT	90	5	105	105,81	0,27%
CT	90	5	285	283,11	0,63%
AT	0	0,001	180	177,52	0,83%
CT	0	10	240	239,42	0,19%
AT	90	20	30	32,21	0,74%
CT	90	15	225	224,50	0,17%
BT	0	5	135	133,36	0,55%
AT	90	5	45	47,38	0,79%
<b>Erro médio [%]</b>					<b>0,51%</b>

FASE-FASE					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
AB	0	0,001	210	215,44	1,81%
AB	0	0,001	270	271,84	0,61%
AC	0	0,001	30	29,18	0,27%
AC	0	0,001	210	209,55	0,15%
BC	0	0,001	90	90,66	0,22%
BC	0	0,001	150	146,35	1,22%
AB	90	0,001	0	0,60	0,20%
AB	90	0,001	270	271,51	0,50%
AC	90	0,001	30	29,05	0,32%
AC	90	0,001	180	179,50	0,17%
BC	90	0,001	60	62,88	0,96%
BC	90	0,001	210	213,05	1,02%
AB	0	10	60	58,50	0,50%
AB	0	10	240	233,50	2,17%
AC	0	10	150	150,31	0,10%
AC	0	10	180	180,96	0,32%
BC	0	10	120	122,95	0,98%
BC	0	10	300	292,91	2,36%
AB	90	10	30	30,70	0,23%
AB	90	10	90	88,55	0,48%
AC	90	10	60	60,26	0,09%
AC	90	10	210	210,98	0,33%
BC	90	10	150	149,27	0,24%
BC	90	10	240	238,16	0,61%
AB	0	20	0	-1,72	0,57%
AB	0	20	180	182,29	0,76%
AC	0	20	120	122,26	0,75%
AC	0	20	300	302,24	0,75%
BC	0	20	60	62,16	0,72%
BC	0	20	270	269,55	0,15%
AB	90	20	240	238,80	0,40%
AB	90	20	270	273,45	1,15%
AC	90	20	30	31,61	0,54%
AC	90	20	240	237,71	0,76%
BC	90	20	0	6,59	2,20%
BC	90	20	120	118,71	0,43%
AB	0	15	75	70,98	1,34%
AB	0	15	135	133,07	0,64%
AC	0	15	105	106,12	0,37%

FASE-FASE					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
AC	0	15	285	282,32	0,89%
BC	0	15	135	135,93	0,31%
BC	0	15	150	148,84	0,39%
AB	90	15	150	146,06	1,31%
AB	90	15	255	255,31	0,10%
AC	90	15	75	73,12	0,63%
AC	90	15	285	281,58	1,14%
BC	90	15	45	45,61	0,20%
BC	90	15	135	135,92	0,31%
AB	0	5	105	111,84	2,28%
AB	0	5	135	134,78	0,07%
AC	0	5	75	72,48	0,84%
AC	0	5	195	197,20	0,73%
BC	0	5	165	161,30	1,23%
BC	0	5	255	256,41	0,47%
AB	90	5	15	16,59	0,53%
AB	90	5	150	146,12	1,29%
AC	90	5	150	148,58	0,47%
AC	90	5	225	221,23	1,26%
BC	90	5	105	102,97	0,68%
BC	90	5	255	254,85	0,05%
AB	90	0,001	180	185,04	1,68%
AC	90	10	150	149,65	0,12%
BC	90	20	150	147,05	0,98%
BC	0	5	195	193,19	0,60%
AC	0	5	255	257,22	0,74%
BC	0	0,001	30	28,15	0,62%
<b>Erro médio [%]</b>					<b>0,72%</b>

FASE-FASE-TERRA					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
ABT	0	0,001	120	116,82	1,06%
ABT	0	0,001	240	230,70	3,10%
ACT	0	0,001	60	59,95	0,02%
ACT	0	0,001	90	90,50	0,17%
BCT	0	0,001	90	89,81	0,06%
BCT	0	0,001	210	207,33	0,89%
ABT	90	0,001	60	60,80	0,27%
ABT	90	0,001	240	237,12	0,96%
ACT	90	0,001	120	120,92	0,31%
ACT	90	0,001	270	270,79	0,26%
BCT	90	0,001	210	209,60	0,13%
BCT	90	0,001	300	301,76	0,59%
ABT	0	10	0	0,43	0,14%
ABT	0	10	60	60,76	0,25%
ACT	0	10	180	177,75	0,75%
ACT	0	10	270	269,01	0,33%
BCT	0	10	60	60,20	0,07%
BCT	0	10	150	151,39	0,46%
ABT	90	10	120	123,11	1,04%
ABT	90	10	210	207,57	0,81%
ACT	90	10	90	90,29	0,10%
ACT	90	10	180	178,86	0,38%
BCT	90	10	60	60,58	0,19%
BCT	90	10	300	300,98	0,33%
ABT	0	20	210	205,32	1,56%
ABT	0	20	270	267,50	0,83%
ACT	0	20	30	32,30	0,77%
ACT	0	20	120	119,38	0,21%
BCT	0	20	60	60,38	0,13%
BCT	0	20	240	241,18	0,39%
ABT	90	20	150	146,99	1,00%
ABT	90	20	180	183,20	1,07%
ACT	90	20	0	1,24	0,41%
ACT	90	20	150	147,95	0,68%
BCT	90	20	90	91,09	0,36%
BCT	90	20	240	239,78	0,07%
ABT	0	15	105	105,14	0,05%
ABT	0	15	225	218,33	2,22%
ACT	0	15	45	44,46	0,18%

FASE-FASE-TERRA					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
ACT	0	15	195	189,95	1,68%
BCT	0	15	165	168,89	1,30%
BCT	0	15	285	285,56	0,19%
ABT	90	15	45	45,16	0,05%
ABT	90	15	165	166,92	0,64%
ACT	90	15	150	147,94	0,69%
ACT	90	15	255	257,01	0,67%
BCT	90	15	75	74,71	0,10%
BCT	90	15	165	168,41	1,14%
ABT	0	5	225	216,76	2,75%
ABT	0	5	285	290,18	1,73%
ACT	0	5	135	137,09	0,70%
ACT	0	5	195	189,56	1,81%
BCT	0	5	135	135,39	0,13%
BCT	0	5	165	167,28	0,76%
ABT	90	5	15	14,74	0,09%
ABT	90	5	45	43,97	0,34%
ACT	90	5	75	75,49	0,16%
ACT	90	5	285	284,41	0,20%
BCT	90	5	150	148,21	0,60%
BCT	90	5	255	255,05	0,02%
BCT	90	0,001	150	147,53	0,82%
ABT	0	20	150	144,80	1,73%
BCT	0	15	150	151,30	0,43%
ABT	90	15	135	136,51	0,50%
BCT	90	5	45	47,53	0,84%
ABT	0	0,001	210	200,99	3,00%
<b>Erro médio [%]</b>					<b>0,69%</b>

TRIFÁSICO					
Tipo	Ângulo de incidência [°]	Resistência [Ω]	Distância real [km]	Distância estimada [km]	Erro [%]
ABC	0	0,001	60	62,04	0,68%
ABC	0	0,001	240	242,26	0,75%
ABC	90	0,001	90	96,81	2,27%
ABC	90	0,001	210	199,51	3,50%
ABC	0	10	120	117,74	0,75%
ABC	0	10	210	210,85	0,28%
ABC	90	10	150	157,18	2,39%
ABC	90	10	270	269,42	0,19%
ABC	0	20	90	87,61	0,80%
ABC	0	20	300	296,76	1,08%
ABC	90	20	0	4,40	1,47%
ABC	90	20	240	231,93	2,69%
ABC	0	15	15	13,24	0,59%
ABC	0	15	255	252,91	0,70%
ABC	90	15	105	105,11	0,04%
ABC	90	15	135	140,94	1,98%
ABC	0	5	15	14,87	0,04%
ABC	0	5	225	224,08	0,31%
ABC	90	5	105	106,09	0,36%
ABC	90	5	195	188,66	2,11%
ABC	90	0,001	30	27,81	0,73%
ABC	90	20	30	25,99	1,34%
<b>Erro médio [%]</b>					<b>1,14%</b>