



**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA PROTEÇÃO
DIFERENCIAL DE BAIXA IMPEDÂNCIA DE
BARRAMENTOS NO SOFTWARE ATP**

Priscila de Lima Vianna

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA PROTEÇÃO
DIFERENCIAL DE BAIXA IMPEDÂNCIA DE
BARRAMENTOS NO SOFTWARE ATP**

PRISCILA DE LIMA VIANNA

ORIENTADOR: KLEBER MELO E SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGEE.DM - 546/13

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO – 2013

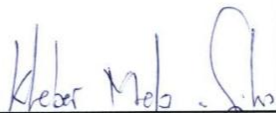
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE
BAIXA IMPEDÂNCIA DE BARRAMENTOS NO SOFTWARE ATP.**

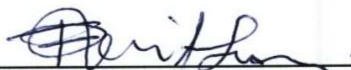
PRISCILA DE LIMA VIANNA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



KLEBER MELO E SILVA, Dr., ENE/UNB
(ORIENTADOR)



FRANSICO DAMASCENO FREITAS, Dr., ENE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)



JACQUELINE GISELE ROLIM, Dr., UFSC
(EXAMINADORA EXTERNA)

Brasília, 10 de dezembro de 2013.

FICHA CATALOGRÁFICA

VIANNA, PRISCILA DE LIMA

Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Baixa Impedância de Barramentos no Software ATP [Distrito Federal] 2013.

xv, 71p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado, 2013)

Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

1.Barramentos

2.Proteção Diferencial de Baixa Impedância

3.MODELS

4.ATP

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VIANNA, P. L. (2013). Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Baixa Impedância de Barramentos no Software ATP. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM-546/13, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 71p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Priscila de Lima Vianna.

TÍTULO: Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Baixa Impedância de Barramentos no Software ATP.

GRAU: Mestre

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Priscila de Lima Vianna
Universidade de Brasília –UnB
Campus Darcy Ribeiro
Faculdade de Tecnologia – FT
Departamento de Engenharia Elétrica
Brasília – DF
CEP: 70910-900

Dedico este trabalho às pessoas que mais amo em minha vida:
meus pais Elaine e Francisco, e minha irmã Taísa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, criador do Universo e causa primária de todas as coisas, por ser um Pai soberanamente justo e bom, e por seu amor infinito.

Aos meus pais, pela educação que deles recebi, pelo carinho e dedicação com os quais me criaram, e pelo amor incondicional que sempre me deram. Por todo o suporte financeiro, por sempre me incentivarem a seguir meus sonhos, e por me apoiarem a sair de casa e mudar de cidade para fazer minha graduação na UnB, mesmo que a saudade lhes apertasse o coração.

À minha irmã Taísa, pela sua amizade, seu carinho de irmã, sua compreensão e incentivo em todos os momentos.

Aos meus avós, pelos seus ensinamentos, carinho e apoio.

Ao professor Kleber, pela orientação durante este trabalho, por todo o seu apoio e pela sua amizade. Além de todos os ensinamentos que dele recebi, na área de proteção, desde que me tornei sua aluna nos trabalhos de pesquisa, em meu 6º semestre de graduação.

Aos amigos e colegas do LAPSE (Laboratório de Proteção de Sistemas Elétricos), pelo companheirismo durante esse período de Mestrado, e pela amizade e apoio.

Ao CNPq pelo apoio financeiro da bolsa de Mestrado.

RESUMO

Os barramentos das subestações são os responsáveis pela interligação de vários elementos de um sistema elétrico de potência, de modo que faltas nesses componentes ocasionam um grande número de desligamentos. Nesse contexto, uma avaliação detalhada da sua proteção torna-se eminente, a fim de garantir que faltas sejam extintas rápida e apropriadamente, preservando-se a integridade dos seus componentes e mitigando-se a ocorrência de *blackouts* de grandes proporções. Nesse sentido, esta dissertação de mestrado apresenta a modelagem e a simulação da proteção diferencial de baixa impedância de barramentos no software ATP. Para tanto, foi realizada uma simulação em malha fechada dos modelos dos elementos do sistema elétrico de potência residentes no software ATP (*Alternative Transients Program*), com os modelos dos componentes do sistema de proteção desenvolvidos no ambiente MODELS. Escolheu-se como estudo de caso um barramento com configuração de barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves, que pode apresentar uma grande variedade de arranjos. Os resultados obtidos indicam as vantagens da utilização desse tipo de modelagem na avaliação do desempenho dos sistemas de proteção de barramentos, por meio da qual é possível verificar o comportamento do sistema de potência frente à operação da sua proteção, bem como o da proteção frente às mais diversas situações de operação que pode ser submetida.

PALAVRAS-CHAVE: Proteção diferencial de baixa impedância, barramento duplo com disjuntor simples a cinco chaves, modelagem de relés, ATP, MODELS.

ABSTRACT

The busbars are responsible for the interconnection of various elements of an electric power system, so that faults in these components cause the shutdown of several loads. In this context, a thorough study of their protection is of paramount importance, in order to ensure that faults are extinguished quickly and appropriately, preserving the integrity of its components and mitigating the occurrence of widespread *blackouts*. Therefore, this master thesis presents the modeling and simulation of the low impedance busbar differential protection principle in ATP software. In order to do so, a closed-loop simulation between the resident models of the electric power system elements in ATP and the models of protection system components developed in MODELS was realized. It was chosen as a case of study a system with double-bus single-breaker busbar topology, which can assume a wide variety of operating configurations. The obtained results reveal the advantages of using this type of modeling to thereby one can evaluate the performance of busbar protection systems, through which it is possible to evaluate the behavior of the power system against the operation of its protection, as well as the protection performance for the different power systems operational conditions.

INDEX TERMS: low impedance differential protection, double-bus single-breaker, relays modeling, ATP, MODELS.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	3
ESTADO DA ARTE DA MODELAGEM DE RELÉS EM SOFTWARES DO TIPO EMTD	5
2.1. USO DA ROTINA TACS	5
2.2. USO DA ROTINA MODELS DO ATP	7
2.3. USO DO SOFTWARE PSCAD/EMTDC	9
FUNDAMENTAÇÃO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BAIXA IMPEDÂNCIA DE BARRAMENTOS	11
3.1. PROTEÇÃO DIFERENCIAL NUMÉRICA DE BAIXA IMPEDÂNCIA	12
3.2. ALGORITMO DE DETECÇÃO DE FALTAS EXTERNAS	15
3.3. PROTEÇÃO DE BARRAMENTO DUPLO COM DISJUNTOR SIMPLES A CINCO CHAVES	16
3.2.1. <i>Configuração Normal de Operação</i>	18
3.2.2. <i>Transferência da Proteção</i>	20
3.2.3. <i>Falha de Disjuntor</i>	23
IMPLEMENTAÇÕES COMPUTACIONAIS	26
4.1. O SOFTWARE ATP E SUA INTERFACE MODELS	26
4.2. TCS DE POTÊNCIA	27
4.3. MODELAGEM DO SISTEMA DE PROTEÇÃO NA MODELS	28
4.3.1. <i>Módulo de Condicionamento de Sinais</i>	29
4.3.2. <i>Módulo de Aquisição de Dados</i>	31
4.3.3. <i>Módulo de Estimacão de Fasores</i>	33
4.3.4. <i>Variáveis da Proteção de Barra</i>	34
4.3.5. <i>Análise Diferencial</i>	36
4.3.6. <i>Lógica de Trip</i>	39
4.4. DISJUNTOR	40
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	42
5.1. O SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO	42
5.2. CURTOS-CIRCUITOS COM O SISTEMA NA SUA CONFIGURAÇÃO NORMAL	43
5.2.1. <i>Curto-Circuito Trifásico na Barra A – Caso 1</i>	44
5.2.2. <i>Curto-Circuito no DJAMR – Caso 2</i>	45
5.2.3. <i>Curto-Circuito Externo sem Saturação do TC – Caso 3</i>	48
5.2.4. <i>Curto-circuito Externo com Saturação do TC – Caso 4</i>	49
5.3. CURTOS-CIRCUITOS NA LT04 COM SUA PROTEÇÃO TRANSFERIDA	53
5.3.1. <i>Curto-circuito na LT04 – Caso 5</i>	54
5.4. CURTOS-CIRCUITOS COM PARALELISMO DE BARRAS	57
5.4.1. <i>Curto-Circuito na Barra A – Caso 6</i>	58
5.4.2. <i>Curto-Circuito na LT01 – Caso 7</i>	60
CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
A LINGUAGEM MODELS	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Plano operacional do relé diferencial percentual com sua curva característica.....	13
Figura 3.2 – Zona de proteção de uma barra simples.....	14
Figura 3.3 – <i>Locus</i> no plano operacional para uma falta externa com saturação do TC.....	15
Figura 3.4 – Plano operacional com curva característica de inclinação adaptativa.....	16
Figura 3.5 – Diagrama lógico de detecção de faltas externas.....	16
Figura 3.6 – Componentes constituintes do vão do DJAMR.....	17
Figura 3.7 – Componentes constituintes de um vão conectado a um barramento com configuração de barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves.....	17
Figura 3.8 – Sistema com configuração de barramento duplo com disjuntor simples a cinco chaves..	18
Figura 3.9 – Configuração normal de operação do sistema e das zonas de proteção das barras.....	19
Figura 3.10 – Sistema com a proteção do DJ01 transferida para o DJAMR.	22
Figura 4.1 – Sistema elétrico simulado.	27
Figura 4.2 – Circuito equivalente do TC de potência.	27
Figura 4.3 – Diagrama de blocos do sistema de proteção diferencial de barras no ATP.	28
Figura 4.4 – Estrutura do Módulo de Condicionamento de Sinais.	29
Figura 4.5 – Magnitude da resposta em frequência do filtro Butterworth passa-baixas utilizado.....	30
Figura 4.6 – Estrutura do Módulo de Aquisição de Dados	31
Figura 5.1 – Sistema operando em sua configuração normal.....	43
Figura 5.2 – Estado das variáveis lógicas do relé para o Caso 1.....	44
Figura 5.3 – Planos operacionais das zonas para o Caso 1: (a) ZA, (b) ZB e (c) ZAB.....	45
Figura 5.4 – Correntes nos DJs do sistema para o Caso 1: (a) DJ01, (b) DJ02, (c) DJ03, (d) DJ04, (e) DJ05, (f) DJ06, (g) DJAMR.....	46
Figura 5.5 - Estado das variáveis lógicas do relé para o Caso 2.....	46
Figura 5.6 – Planos operacionais das zonas para o Caso 2: (a) ZA, (b) ZB e (c) ZAB.....	47
Figura 5.7 – Correntes nos DJs do sistema para o Caso 2: (a) DJ01, (b) DJ02, (c) DJ03, (d) DJ04, (e) DJ05, (f) DJ06, (g) DJAMR.....	48

Figura 5.8 - Estado das variáveis lógicas do relé para o Caso 3.....	49
Figura 5.9 – Planos operacionais das zonas para o Caso 3: (a) ZA, (b) ZB e (c) ZAB.....	50
Figura 5.10 – Correntes nos DJs do sistema para o Caso 3: (a) DJ01, (b) DJ02, (c) DJ03, (d) DJ04, (e) DJ05, (f) DJ06, (g) DJAMR.....	51
Figura 5.11 – Estado das variáveis lógicas do relé para o Caso 4.....	51
Figura 5.12 – Planos operacionais das zonas para o Caso 4: (a) ZA, (b) ZB e (c) ZAB.....	52
Figura 5.13 – Correntes nos DJs do sistema para o Caso 4: (a) DJ01, (b) DJ02, (c) DJ03, (d) DJ04, (e) DJ05, (f) DJ06, (g) DJAMR.....	54
Figura 5.14 – Arranjo do sistema operando com a proteção da LT04 transferida para o DJAMR.....	55
Figura 5.15 – Estado das variáveis lógicas do relé para o Caso 5.....	56
Figura 5.16 – Planos operacionais das zonas para o Caso 5: (a) ZA, (b) ZB e (c) ZAB.....	56
Figura 5.17 – Correntes nos DJs do sistema para o Caso 5: (a) DJ01, (b) DJ02, (c) DJ03, (d) DJ04, (e) DJ05, (f) DJ06, (g) DJAMR.....	57
Figura 5.18 – Sistema operando com paralelismo das barras.....	58
Figura 5.19 – Estado das variáveis lógicas do relé para o Caso 6.....	59
Figura 5.20 – Planos operacionais das zonas para o Caso 6: (a) ZA, (b) ZB e (c) ZAB.....	59
Figura 5.21 – Correntes nos DJs do sistema para o Caso 6: (a) DJ01, (b) DJ02, (c) DJ03, (d) DJ04, (e) DJ05, (f) DJ06, (g) DJAMR.....	60
Figura 5.22 – Estado das variáveis lógicas do relé para o Caso 7.....	61
Figura 5.23 – Planos operacionais das zonas para o Caso 7: (a) ZA, (b) ZB e (c) ZAB.....	61
Figura 5.24 – Correntes nos DJs do sistema para o Caso 7: (a) DJ01, (b) DJ02, (c) DJ03, (d) DJ04, (e) DJ05, (f) DJ06, (g) DJAMR.....	62
Figura A. 1 – Diagrama Funcional de programas do tipo EMTP.....	69
Figura A. 2 – Diagrama Funcional de programas do tipo EMTP utilizando a MODELS.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Distribuição típica dos tipos de curtos-circuitos em barramentos (ANDERSON, 1999).....	2
Tabela 3.1 – Lógica de identificação da zona à qual cada vão pertence.....	19
Tabela 3.2 – Lógica de <i>trip</i> dos DJs.....	20
Tabela 3.3 – Lógica de identificação da zona à qual cada vão pertence, considerando a situação de paralelismo de barras durante as manobras de transferência de vãos entre as barras.....	22
Tabela 3.4 – Lógica de <i>trip</i> dos DJs, considerando a zona de supervisão ZAB.....	22
Tabela 3.5 – Lógica completa de <i>trip</i> dos DJs.....	24
Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados na implementação do módulo <i>AnaliseDiferencial</i>	39
Tabela 5.1 – Parâmetros das LTs do sistema simulado.....	42
Tabela 5.2 – Parâmetros dos ATs do sistema simulado.....	42
Tabela 5.3 – Parâmetros dos equivalentes de Thévenin do sistema simulado.....	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 – Trecho de código do modelo <code>Tcauxiliar</code>	29
Quadro 4.2 – Trecho de código do modelo <code>FiltroAnalogico</code>	30
Quadro 4.3 – Trecho de código do modelo <code>Grampeador</code> para a fase A.....	31
Quadro 4.4 – Trecho de código do modelo <code>ConversorA/D</code> para a fase A.....	33
Quadro 4.5 – Trecho de código do modelo <code>Buffer</code>	33
Quadro 4.6 – Trecho de código no qual é realizada a estimação do fasor corrente na fase A.....	34
Quadro 4.7 – Trecho do código que determina o estado lógico das variáveis PB, ZABFT e ZBBFT.....	35
Quadro 4.8 – Trecho de código do módulo <code>VariaveisProtecaoBarra</code> , no qual são determinados os estados lógicos dos <i>flags</i> de habilitação de corrente na zona ZA.....	35
Quadro 4.9 – Trecho de código que implementa o cálculo de I_{op} e I_{res} do elemento 87B da fase A da zona ZA.....	37
Quadro 4.10 – Trecho de código que implementa o cálculo das taxas de variação de I_{op} e I_{res} dos elementos 87B da zona ZA.....	37
Quadro 4.11 – Trecho de código que implementa a lógica de detecção de faltas externas aplicada à zona ZA.....	38
Quadro 4.12 – Algoritmo Trecho de código que implementa a lógica de <i>trip</i> da zona ZA.....	38
Quadro 4.13 – Trecho de código que implementa a lógica de <i>trip</i> para o DJ do vão 01.....	39
Quadro 4.14 – Trecho de código que implementa o comando de abertura dos DJs.....	40
Quadro A. 1 – Estrutura básica da linguagem da MODELS.....	70

GLOSSÁRIO

A/D	Analógico – digital.
AEP	<i>American Electric Power Company.</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute.</i>
ATP	<i>Alternative Transient Program.</i>
ATPDraw	Interface gráfica do ATP.
BFAMR	<i>Flag</i> que indica falha no disjuntor de amarre.
BFL01	<i>Flag</i> que indica falha no disjuntor da LT01.
BFL02	<i>Flag</i> que indica falha no disjuntor da LT02.
BFL03	<i>Flag</i> que indica falha no disjuntor da LT03.
BFL04	<i>Flag</i> que indica falha no disjuntor da LT04.
BFAT1	<i>Flag</i> que indica falha no disjuntor do AT01.
BFAT2	<i>Flag</i> que indica falha no disjuntor do AT02.
CVT	<i>Capacitor Voltage Transformers.</i>
DJ	Disjuntor.
DJ01	Disjuntor da LT01.
DJ02	Disjuntor do T01.
DJ03	Disjuntor da LT02.
DJ04	Disjuntor da LT03.
DJ05	Disjuntor do T02.
DJ06	Disjuntor da LT04.
DJAMR	Disjuntor de amarre.
EMTDC	<i>Eletromagnetic Transients Program for DC.</i>
EMTP	<i>Eletromagnetic Transients Program.</i>
FACTS	<i>Flexible AC Transmission Systems.</i>
FTE01	Fonte de tensão do equivalente de Thévenin na extremidade da LT01.
FTE02	Fonte de tensão do equivalente de Thévenin na extremidade do T01.
FTE03	Fonte de tensão do equivalente de Thévenin na extremidade da LT02.
FTE04	Fonte de tensão do equivalente de Thévenin na extremidade da LT03.
FTE05	Fonte de tensão do equivalente de Thévenin na extremidade do T02.
FTE06	Fonte de tensão do equivalente de Thévenin na extremidade da LT04.
GE	<i>General Electric.</i>
HVAC	<i>High Voltage Alternate Current.</i>
HVDC	<i>High Voltage Direct Current Transmission.</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
LT	Linha de transmissão.

LT01	Linha de transmissão 01.
LT02	Linha de transmissão 02.
LT03	Linha de transmissão 03.
LT04	Linha de transmissão 04.
NA	Normalmente aberto.
NF	Normalmente fechado.
PB	Variável lógica que indica paralelismo de barras.
PSCAD	<i>Power Systems Computer Aided Design</i>
RTDS	<i>Real Time Digital Simulator</i>
SC	Chave seccionadora
SC1AMR	Chave seccionadora conectora de barra A do amarre.
SC1L01	Chave seccionadora seletora de barra A da LT01.
SC1L02	Chave seccionadora seletora de barra A da LT02.
SC1L03	Chave seccionadora seletora de barra A da LT03.
SC1L04	Chave seccionadora seletora de barra A da LT04.
SC1T1	Chave seccionadora seletora de barra A do T01.
SC1T2	Chave seccionadora seletora de barra A do T02.
SC2AMR	Chave seccionadora seletora conectora de barra B do amarre.
SC2L01	Chave seccionadora seletora de barra B da LT01.
SC2L02	Chave seccionadora seletora de barra B da LT02.
SC2L03	Chave seccionadora seletora de barra B da LT03.
SC2L04	Chave seccionadora seletora de barra B da LT04.
SC2T1	Chave seccionadora seletora de barra B do T01.
SC2T2	Chave seccionadora seletora de barra B do T02.
SCBPL01	Chave seccionadora de <i>bypass</i> da LT01.
SCBPL02	Chave seccionadora de <i>bypass</i> da LT02.
SCBPL03	Chave seccionadora de <i>bypass</i> da LT03.
SCBPL04	Chave seccionadora de <i>bypass</i> da LT04.
SCBPT1	Chave seccionadora de <i>bypass</i> do T01.
SCBPT2	Chave seccionadora de <i>bypass</i> do T02.
SIN	Sistema Interligado Nacional.
AT01	Autotransformador 01.
AT02	Autotransformador 02.
TACS	<i>Transient Analysis of Control Systems.</i>
TC	Transformador de corrente.
TC01	Transformador de corrente da LT01.
TC02	Transformador de corrente do T01.
TC03	Transformador de corrente da LT02.

TC04	Transformador de corrente da LT03.
TC05	Transformador de corrente do T02.
TC06	Transformador de corrente da LT04.
TCAMRA	Transformador de corrente do amarre do lado da barra A.
TCAMRB	Transformador de corrente do amarre do lado da barra B.
TNA	<i>Transient Network Analyzer</i>
ZA	Zona de proteção da barra A.
ZAB	Zona de proteção de supervisão (que engloba as barras A e B simultaneamente).
ZABFT	<i>Flag</i> que indica falha de disjuntor na zona A.
ZB	Zona de proteção da barra B.
ZBBFT	<i>Flag</i> que indica falha de disjuntor na zona B.

INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Notadamente, o consumo de energia elétrica é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e social de qualquer país. Ele reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto a capacidade da população para adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados (ANEEL, 2008). Em realidade, o crescimento de um país fica sujeito à capacidade de aumento do fornecimento de energia elétrica. Daí a necessidade da contínua expansão das instalações dos sistemas elétricos de potência, assim como o aumento da sua capacidade de geração. Em contrapartida, aumenta-se a sua complexidade operacional, exigindo o uso de modernos sistemas de proteção, a fim de que faltas sejam extintas rápida e apropriadamente, salvaguardando os equipamentos do sistema e evitando os *blackouts* de grandes proporções.

Dentre as faltas que podem ocorrer em um sistema elétrico de potência, destacam-se aquelas que ocorrem nos barramentos das subestações. Embora as faltas nesses componentes sejam raras, correspondendo de 6% a 7% do total de faltas em um sistema de potência segundo Anderson (1999), seus efeitos são bastante danosos ao sistema, não raro podendo levá-lo à instabilidade. Por isso, a segurança dos esquemas de proteção de barras é de suma importância (IEEE PSRC, 2009).

Na Tabela 1.1 apresenta-se uma distribuição típica dos diferentes tipos de faltas que podem ocorrer em barramentos (ANDERSON, 1999). Conforme se pode observar, a maioria delas é monofásica, tendo como causas mais comuns os diferentes tipos de falha de isolamento. Contudo, o número de faltas ocasionadas por erro humano também corresponde a uma grande parcela das causas de defeitos em barramentos.

No que concerne à proteção de barramentos, dois tipos de técnicas são largamente empregadas, a saber: proteção diferencial de alta e de baixa impedância. A aplicação de cada uma delas vai depender do tamanho, complexidade, e nível de tensão do barramento. A proteção diferencial de alta impedância tem sido empregada, tradicionalmente, em subestações de alta e extra-alta tensão com barras com topologia fixa. Isso evita manobras de chaveamento dos circuitos secundários dos transformadores de corrente (TCs), que podem ocasionar o surgimento de tensões muito elevadas

Tabela 1.1 – Distribuição típica dos tipos de curtos-circuitos em barramentos (ANDERSON, 1999).

Causa do Defeito	Tipo e Número de Defeitos					Número Total de Defeitos	Porcentagem Total de Defeitos
	1F	2F – T	3F – T	3F	Desconhecido		
<i>Flashover</i>	20	6	1	–	–	27	21,0 %
Falha de Disjuntor	16	2	2	–	–	20	15,5 %
Falha de Isolamento na Seccionadora	19	2	–	–	1	22	17,0 %
Outras Falhas de Isolação	4	1	1	3	–	9	7,0 %
Defeito no TC	3	–	–	–	–	3	2,3 %
Erro de Manobra	8	1	5	1	–	15	11,6 %
Esquecimento do Aterramento Temporário	6	1	8	–	–	15	11,6 %
Contato Acidental	5	–	2	–	–	7	5,4 %
Desmoronamento ou Queda da Estrutura	4	1	–	1	–	6	4,7 %
Desconhecida	2	1	–	1	1	5	3,9 %
Total por Tipo de Falta	87	15	19	6	2	129	–
Porcentagem por Tipo de Falta	67,4 %	11,6 %	14,7 %	4,7 %	1,6 %	–	100 %

nos terminais dos seus enrolamentos secundários, danificando-o. Por outro lado, a proteção diferencial de baixa impedância tem sido utilizada, tradicionalmente, em subestações de alta e extra-alta tensão que possuem configuração de barramento com topologia variável (IEEE PSRC, 2009). Todavia, com o advento dos relés numéricos microprocessados, a proteção diferencial de baixa impedância tem sido utilizada nos novos empreendimentos, mesmo em subestações com barramentos de topologia fixa. Isso por que esse tipo de proteção oferece vantagens em relação à diferencial de alta impedância, como a de possibilitar a instalação distribuída, que facilita sobremaneira a incorporação de outros vãos aos barramentos.

De acordo com os procedimentos de rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o tempo total de eliminação de faltas não deve ser superior a 100 ms, para barramentos de tensões nominais iguais ou superiores a 345 kV, e a 150 ms, para níveis de tensão nominal inferior a 345 kV (ONS, 2011). A imposição desses limites está relacionada à manutenção da integridade dos equipamentos do Sistema Interligado Nacional (SIN), bem como à estabilidade de sua operação.

Diante do exposto, fica evidente a necessidade de avaliar de forma apropriada o desempenho da proteção diferencial aplicada aos barramentos de subestações do sistema elétrico de potência, a fim de garantir que ela irá atuar de forma correta nas mais diversas situações de operação. Para tanto, os softwares do tipo EMTP (*Eletromagnetic Transients Programs*) vêm se mostrando uma alternativa viável para a modelagem e simulação de relés de proteção (CIGRÉ, 2006). Esses softwares são aqueles cujas implementações baseiam-se na proposta feita por Dommel para o EMTP, e usam resolução de elementos a parâmetros concentrados utilizando integração trapezoidal e os elementos a parâmetros distribuídos pelo método das características (ZANETA JÚNIOR, 2003; ARAÚJO & NEVES, 2006).

Este tipo de software utiliza modelos mais elaborados para a representação dos componentes do sistema elétrico, além de permitir a simulação em malha fechada (do inglês *closed-loop simulation*), por meio da qual é possível avaliar o comportamento do sistema de potência frente à operação da sua proteção e vice-versa. Entretanto, até então, não há registro de trabalhos na literatura que apresentem a modelagem e simulação da proteção diferencial de barramentos em softwares do tipo EMTP, o que motivou o desenvolvimento da presente dissertação de mestrado.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo da presente dissertação de mestrado é avaliar a proteção diferencial de baixa impedância de barramentos, a partir de simulações de transitórios eletromagnéticos utilizando-se programas do tipo EMTP. Como objetivos específicos têm-se:

- Modelar e simular no software ATP (*Alternative Transients Program*) a proteção diferencial de baixa impedância aplicada, como estudo de caso, a um barramento com configuração de barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves.
- Avaliar o desempenho da proteção diferencial de baixa impedância de barramentos para diferentes situações de operação às quais o sistema elétrico está sujeito.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

No capítulo 2, apresenta-se uma revisão do estado da arte do uso de softwares do tipo EMTP para a modelagem de relés em simulações de sistemas de proteção.

No capítulo 3, é apresentada a fundamentação teórica da proteção de barramento, sendo abordados conceitos essenciais sobre a configuração de barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves e seu esquema de proteção diferencial.

No capítulo 4, é discutida a forma de implementação dos modelos do relé diferencial no ATP, descrevendo-se os módulos constitutivos do relé, dos disjuntores e dos TCs.

No capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados obtidos com as simulações realizadas, testando-se diferentes situações de falta e verificando-se o comportamento do sistema de potência, assim como o desempenho da proteção de barras implementada.

No capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões do presente trabalho, bem como são apresentadas propostas de continuação da pesquisa em trabalhos futuros.

ESTADO DA ARTE DA MODELAGEM DE RELÉS EM SOFTWARES DO TIPO EMTP

A prática de modelar relés teve início com os fabricantes, que construíam protótipos dos relés, que às vezes consistiam apenas dos seus mecanismos de operação essenciais. Os modelos eram testados, e após a avaliação de seu desempenho, as modificações necessárias eram feitas no projeto.

Essa prática continuou mesmo com o advento dos relés numéricos microprocessados. Gradualmente, a prática de construir protótipos foi substituída pelo uso de programas de computadores que modelam as diferentes funções e lógicas dos relés. Atualmente, os fabricantes utilizam os softwares de modelagem na primeira fase do processo de desenvolvimento de um novo relé, antes da concepção de seu protótipo. Paralelamente, as concessionárias de energia elétrica começaram a desenvolver e incluir modelos de relés em seus estudos de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos (CIGRÉ, 2006).

O uso de modelos de relés também pode ajudar efetivamente no ensino de estudantes e engenheiros. Com eles, os princípios fundamentais de sistemas de proteção podem ser demonstrados, mediante a verificação do seu desempenho quando da ocorrência dos mais diversos fenômenos transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos aos quais os sistemas elétricos de potência podem ser submetidos.

A seguir, são apresentados alguns dos principais trabalhos encontrados no estado da arte da modelagem de relés em softwares tipo EMTP.

2.1. USO DA ROTINA TACS

O propósito original da rotina TACS dos softwares tipo EMTP é a simulação de sistemas de excitação de máquinas síncronas e do comando de chaveamento de conversores usados em HVDC (*High Voltage DC Transmission*). No entanto, sua utilização pode ser mais ampla, podendo representar, por exemplo, sistemas de controle utilizando as funções de transferência de seus componentes (MIGUEL, 2011).

Na TACS, pode-se simular um sistema de proteção, como se fosse um sistema de controle, visto que dispõe-se de: medição de sinais, tratamento dos sinais medidos, comparação com valores de referência e, finalmente, uma atuação. Durante a simulação, a solução do circuito elétrico e dos componentes da TACS é processada separadamente (MIGUEL, 2011).

Algumas das grandezas do circuito elétrico podem ser incorporadas nos modelos desenvolvidos na TACS, como tensões de fontes ou nós, correntes de fontes ou ramos, estado de chaves e variáveis internas de máquinas síncronas. Da mesma forma, algumas variáveis de componentes da TACS que podem ser incorporadas no circuito elétrico modelado no EMTP, como: variáveis de saída, tensões e corrente oriundas de fontes modeladas na TACS, comandos para abrir ou fechar chaves, etc. Dessa forma, o circuito elétrico e os componentes TACS funcionam como sistemas separados, simulando o sistema elétrico de potência e o sistema de proteção respectivamente; mas trabalham em conjunto, trocando informações de variáveis, de forma semelhante ao sistema real.

Muito embora, atualmente, a modelagem de sistemas de proteção utilizando a TACS esteja obsoleta, haja vista as facilidades introduzidas pela linguagem MODELS, as primeiras pesquisas em modelagens de relés foram feitas utilizando a TACS. Isso ocorreu por volta do início da década de 1980, quando o uso do EMTP para a simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência passou a ganhar mais popularidade, começando a substituir o uso dos TNAs (*Transient Network Analysers*), que eram uma ferramenta tradicional da época para esta finalidade.

Antigamente, a TACS resolvia funções de controle cíclicas ineficientemente, com um passo de cálculo maior do que o de integração do EMTP. Ou seja, as grandezas do sistema de potência poderiam ser incorporadas na TACS no mesmo intervalo de integração, mas as variáveis dos componentes da TACS só eram incorporadas na simulação do sistema de potência no intervalo de integração seguinte. Por outro lado, controles digitais ainda utilizavam circuitos analógicos para algumas funções de alta velocidade.

Como a TACS era muito adequada para simular controles analógicos e necessária para modelar funções de alta velocidade, em 1992 foram feitos esforços para superar seus pontos fracos, desenvolvendo-se a interface com o FORTRAN para simular o controle digital, a fim de aumentar a capacidade total do EMTP. Bui *et al.* (1992) investigou uma maneira de possibilitar a comunicação dos controles digital e analógico através de uma interface TACS-FORTRAN no EMTP. Assim, os controles híbridos analógico-digitais poderiam ser modelados satisfatoriamente no EMTP, com a vantagem de que os modelos desenvolvidos e testados poderiam ser trocados entre usuários.

Arvind *et al.* (1992) modelaram um relé diferencial de proteção de transformadores do modelo BDD15B, da GE (*General Electric*). Este relé, escolhido pela AEP (*American Electric Power Company*) para teste, é eletromecânico e protege transformadores de dois enrolamentos. A principal característica do modelo desenvolvido é que os ajustes podem ser definidos pelo usuário, permitindo uma grande variedade de simulações. A validação do modelo do relé foi feita utilizando-se dados de entrada de testes de relés feitos no simulador de sistemas de potência da AEP. Os resultados das respostas obtidas com o modelo foram concordantes com as dos relés reais que foram testados.

Wilson & Nordstrom (1993) e Glinkowski & Estergalyos (1996) também modelaram relés utilizando a TACS do EMTP. Wilson & Nordstrom (1993) modelaram um relé de distância, a fim de testar seu desempenho em regime transitório na proteção de uma linha de transmissão de 115 kV e 150 milhas de comprimento, que foi simulada no EMTP. O comportamento do modelo do relé foi comparado com o de um relé real, em testes feitos em laboratório, e ambos produziram resultados muito similares em todos os testes. Já Glinkowski & Estergalyos (1996) modelaram um relé eletromecânico de sobrecorrente, de modo que suas características mecânicas, magnéticas e elétricas foram representadas mediante modelos matemáticos simples.

2.2. USO DA ROTINA MODELS DO ATP

A MODELS é uma linguagem de programação residente no software ATP, por meio da qual novos componentes podem ser criados, além dos componentes previamente definidos, através da descrição da estrutura do modelo e das funções dos seus elementos. Ela tem ganhado popularidade nas últimas décadas em trabalhos da modelagem de fenômenos de transitórios eletromagnéticos. Seu ambiente permite a modelagem de componentes específicos do sistema elétrico de potência, como os seus dispositivos de proteção.

A MODELS provê o monitoramento e controle dos modelos de sistemas de potência no ATP. As tensões nos nós, correntes nos ramos e estados das chaves do sistema no ATP são sinais e variáveis que podem ser enviadas para a MODELS, que pode fornecer sinais de saída a serem enviados para o ATP, provocando alterações no seu estado de operação mediante operação de suas chaves ou mudança nos valores de suas impedâncias e fontes. Assim, o estado do modelo do sistema elétrico no ATP pode ser dinamicamente modificado em resposta às saídas da MODELS. Esse processo é chamado de simulação em malha fechada, por meio do qual é possível a simulação da interação entre o sistema de potência e seus sistemas de medição, proteção e controle.

A MODELS é às vezes chamada de nova TACS. Sendo que a primeira já possui algumas importantes ferramentas de controle que precisavam ser adicionadas à segunda, como: repetição,

seleção de caminho condicional e funções definidas pelo usuário. Mesmo possuindo essas importantes ferramentas para a programação, a MODELS, no entanto, possui uma desvantagem em que a atribuição de memória é limitada nas suas dimensões para matrizes de dados (KIM *et al.*, 2000).

Kim *et al.* (2000) utilizaram a MODELS na modelagem da proteção de distância de linhas de transmissão. A simulação em malha fechada foi feita com fins didáticos, para facilitar o entendimento dos conceitos básicos de relé de distância a estudantes e novos engenheiros. Este trabalho foi publicado no ano de 2000, e os autores citam a importância da modelagem de relés e sistemas para aumentar a eficiência e aperfeiçoar o desenvolvimento dos algoritmos de relés, assim como para avaliação em simulações de malha fechada dos algoritmos que já existem.

A proteção de distância também foi implementada com o uso da MODELS por Heo *et al.* (2003) e Silva *et al.* (2007). No primeiro trabalho, os autores desenvolvem um modelo de relé de distância e avaliam o seu desempenho perante um sistema teste constituído de linhas de transmissão de circuito duplo. Já Silva *et al.* (2007) abordam um estudo de caso da proteção de distância de uma linha de 230 kV de três terminais, no qual foram comparados os desempenhos dos diferentes esquemas de teleproteção comumente utilizados.

Conceição (2012) empregou a MODELS para desenvolver modelos dos dispositivos utilizados na proteção de sobrecorrente de alimentadores de distribuição. Foram modelados religadores, chaves seccionadoras automáticas, chaves fusíveis, além dos próprios relés numéricos. Foi escolhido como estudo de caso um alimentador radial de 63 barras, cujos parâmetros foram obtidos a partir de alimentadores reais. Foram avaliados diversos tipos de curtos-circuitos, por meio dos quais foi possível verificar a eficácia da estratégia de coordenação dos dispositivos de proteção adotada. Os resultados obtidos indicam a viabilidade desse tipo de modelagem para estudos de proteção de sistemas de distribuição.

Tavares & Silva (2012) modelaram a proteção diferencial numérica de transformadores de potência com o uso da MODELS e do ATP/ATPDraw. O esquema também foi utilizado para realizar uma análise de uma grande variedade de tipos de curtos-circuitos em transformadores, de modo a evidenciar os limites de sensibilidade dos ajustes adotados nas funções de proteção implementadas, a saber: diferencial de fase, diferencial de sequência negativa e proteção de falta à terra restrita. Os resultados evidenciam as vantagens dessa abordagem, que une conhecimentos das áreas de estudos elétricos e proteção.

Molas & Silva (2012) utilizaram a MODELS na modelagem da proteção diferencial de linhas de transmissão. Aspectos particulares desse tipo de aplicação também foram considerados, como o

atraso do canal de comunicação. Os resultados obtidos estão de acordo com os apresentados por relés de proteção diferencial de linhas comerciais, evidenciando as vantagens desse tipo de proteção, mesmo para o caso de linhas longas.

Outra grande vantagem da MODELS são os chamados *compiled foreign models*, que são interfaces utilizadas para a integração de modelos ou funções desenvolvidas em outras linguagens de programação, a exemplo de C, C++ e Fortran. Assim, é possível superar algumas limitações da MODELS, como o número de variáveis e de linhas de programação, além da impossibilidade de utilização de matrizes para armazenamento das variáveis.

Chaudhary *et al.* (1994) adicionaram alguns elementos críticos de um sistema de proteção ao EMTP, utilizando para isso um código extenso (mais de 100 mil linhas de código) e complexo na linguagem Fortran. Entre os elementos adicionados estão os modelos de TCs e transformadores de potencial capacitivo (TPCs), cujos parâmetros podem ser definidos pelo usuário. Além disso, modelos de relés específicos para a proteção de linhas de transmissão (modelos CEY51A e SLY12C) e proteção diferencial de transformadores (D202 e BDD15B) foram desenvolvidos, validados e implementados no EMTP.

Luo & Kezunovic (2006) modelaram um sistema de potência no ATP, mediante o uso do mecanismo “*compiled foreign model*” da linguagem MODELS para modelar o relé digital na linguagem C++. Suas funções incluem as proteções de distância e de sobrecorrente instantânea nas unidades de fase e de terra, além da função de religamento automático.

Espinoza (2011a) utilizou o ATP e a linguagem de programação ANSI C, sobre a plataforma GNU/Linux, para implementar um relé numérico de distância utilizando modelos externos. Foi analisado o desempenho do relé com o uso de sinais de tensões e correntes de eventos reais do Sistema Elétrico Interligado da Colômbia. Dando continuidade ao seu trabalho, Espinoza *et al.* (2011) fizeram a análise do desempenho dos algoritmos dos relés com oscilografias de eventos reais, mostrando como gerar arquivos no formato COMTRADE após a simulação, que podem ser utilizados para calibrar relés reais utilizando caixas de teste de relés. O principal objetivo do trabalho é desenvolver uma ferramenta que permita a análise de diversos casos de faltas e realizar estudos de coordenação, assim como permitir a análise do desempenho de um relé em face de um evento real.

2.3. USO DO SOFTWARE PSCAD/EMTDC

O PSCAD/EMTDC é um software comercial de cálculo de transitórios eletromagnético baseado no EMTP, que foi originalmente desenvolvido para simulações de sistemas HVDC, mas que

hoje também incorpora bibliotecas de dispositivos FACTS, dentre outros. Assim como o ATP, ele também possui uma interface, denominada *componentes*, para a integração de novos componentes, a exemplo de modelos de relés de proteção.

Sztykiel *et al.* (2010) desenvolveram um modelo do sistema de proteção diferencial de linhas de transmissão no PSCAD/EMTDC. Os autores desenvolveram a modelagem do relé com base nas lógicas do relé comercial Siemens SIPROTEC 4 7SD522/610, apropriado para proteger cabos de transmissão subterrâneos HVAC (*High Voltage Alternate Current*). Este modelo foi testado com sinais de correntes reais, e os resultados foram exatamente de acordo com o esperado.

Mclaren *et al.* (1996) e (1997) desenvolveu o modelo de um relé de distância numérico, escrito em C++ e adicionado ao PSCAD/EMTDC. Colocado em uma barra de um sistema de 230 kV para proteger uma linha de transmissão, o modelo do relé foi testado e sua performance comparada à do relé real quando alimentado com as mesmas formas de onda em simulador em tempo real de sistemas de potência. Os resultados obtidos foram muito satisfatórios, não havendo grandes diferenças nas trajetórias do relé modelado e do relé real no plano RX. Esse nível de precisão obtido mostra a eficiência do uso de modelos no teste de desempenho de relés.

Perez (2006) propôs um novo método para modelar relés numéricos. Neste método ele utiliza o PLSA, que é um programa baseado em Visual C++, desenvolvido para obter do usuário as especificações do relé a ser modelado e para processar essa informação e gerar o código Fortran que representa o seu bloco funcional. Após ser gerado, esse código é incorporado ao PSCAD/EMTDC utilizando um recurso chamado "*component*", que facilita a criação de modelos definidos pelo usuário no programa.

FUNDAMENTAÇÃO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BAIXA IMPEDÂNCIA DE BARRAMENTOS

A principal finalidade do sistema de proteção é proteger o sistema elétrico contra possíveis faltas, permanentes ou temporárias (ANDERSON, 1999). Ele é projetado para monitorar o sistema de potência continuamente, a fim de assegurar a máxima continuidade de suprimento de energia com mínimos danos aos equipamentos, à vida e à propriedade (PAITHANKAR & BHIDE, 2003).

O componente fundamental de um sistema de proteção é o relé, que atua como o elemento sensorial na identificação de anormalidades na operação do sistema. Além disso, os relés promovem o disparo de alarmes e sinalizações para alertar os operadores do sistema, a fim de que a manutenção corretiva seja feita o mais rápido possível. Também promovem a abertura de disjuntores de modo a isolar o defeito, mantendo o restante do sistema em operação normal (KINDERMANN, 2005).

Para realizar todas as suas funções devidamente, um sistema de proteção deve satisfazer alguns requisitos fundamentais, a saber (SILVA, 2009):

- **Confiabilidade:** É a habilidade de atuar corretamente quando necessário.
- **Segurança:** É a habilidade de evitar operação desnecessária. A garantia de não atuação da proteção em condições normais.
- **Sensibilidade:** Consiste na capacidade do sistema em detectar as faltas para as quais ele foi projetado.
- **Seletividade:** É a habilidade de isolar do circuito somente o local da falta, com um mínimo de desconexões, para prover a máxima continuidade de serviço.
- **Coordenação:** Consiste da determinação dos ajustes apropriados do sistema de proteção, a fim de se obter seletividade em sua operação.
- **Velocidade:** A atuação da proteção deve ser rápida, a fim de reduzir o tempo de duração da falta e os danos que ela causa ao sistema protegido.
- **Simplicidade:** É a característica que considera a utilização mínima de equipamentos e circuitos na execução da proteção, e a torna mais econômica e prática.

Um bom sistema de proteção deve reduzir a extensão do defeito nos equipamentos, reduzindo também o custo da manutenção corretiva e o tempo de indisponibilidade dos equipamentos afetados.

3.1. PROTEÇÃO DIFERENCIAL NUMÉRICA DE BAIXA IMPEDÂNCIA

De um modo geral, a proteção de barras deve satisfazer os seguintes requisitos (ABB, 1999):

- Deve ter atuação rápida;
- Deve ser capaz de detectar faltas internas;
- Deve ser absolutamente estável para faltas externas, que possam levar à saturação do núcleo magnético do TC do vão defeituoso;
- Deve ser capaz de detectar e isolar somente o trecho do sistema afetado pela falta;
- Deve ser segura contra operações indevidas devido às falhas de contatos auxiliares, erros humanos, faltas nos circuitos secundários, etc.

De acordo com os procedimentos de rede do ONS, cada barramento pertencente ao SIN deve ter ao menos um conjunto de proteção unitária segmentada por fases, que pode ser baseada no princípio diferencial de baixa ou de alta impedância, ou na comparação direcional de fases (ONS, 2011). Contudo, há instalações mais antigas nas quais não são utilizadas proteções unitárias para as barras. Nesses casos, a proteção é feita com as unidades gradativas das proteções de linhas adjacentes (ABB, 1999). Consequentemente, faltas no barramento só serão extintas após o tempo de coordenação de segunda zona, o que pode não ser tolerável a depender da importância da subestação para o SIN.

Dentre as proteções unitárias comumente utilizadas em barramentos, aquela mais empregada é a proteção diferencial de baixa impedância, sobretudo com o advento dos relés numéricos microprocessados. De fato, os relés diferenciais numéricos de baixa impedância proporcionam vantagens frente aos demais tipos de proteção unitária, como o uso de zonas lógicas adaptativas e a possibilidade de instalação distribuída da proteção, mediante o uso de *bay units*, o que facilita sobremaneira a inclusão de novos vãos ao barramento (ALSTOM GRID, 2011).

A proteção diferencial numérica de baixa impedância (função 87B, de acordo com a norma IEEE/ANSI) recebe essa denominação pelo fato da impedância imposta pelo relé no secundário do TC ser pequena, de modo a minimizar a saturação do seu núcleo magnético. Ela, na verdade, implementa o princípio da proteção diferencial percentual, utilizado desde os relés eletromecânicos, que se baseia na comparação de uma corrente de operação I_{op} e uma corrente de restrição I_{res} (ZIEGLER, 2012). No caso de relés numéricos, a corrente de operação I_{op} é normalmente definida por:

$$I_{op} = \left| \sum_{k=1}^N \bar{I}_k \right| \quad (3.1)$$

Na qual \bar{I}_k é a corrente do k -ésimo componente conectado à barra, e N é o número de componentes conectados a ela. Por outro lado, a corrente de restrição I_{res} pode ser definida de diferentes formas (FERRER & SCHWEITZER, 2010):

$$I_{res} = \sum_{k=1}^N |\bar{I}_k| \quad (3.2)$$

$$I_{res} = \frac{1}{N} \left(\sum_{k=1}^N |\bar{I}_k| \right) \quad (3.3)$$

$$I_{res} = \sqrt[N]{\prod_{k=1}^N |\bar{I}_k|} \quad (3.4)$$

$$I_{res} = \max(|\bar{I}_1|, |\bar{I}_2|, \dots, |\bar{I}_n|) \quad (3.5)$$

Sendo que no caso da função 87B as Equações (3.2) e (3.3) são as mais empregadas.

O relé deve operar quando as seguintes condições forem satisfeitas.

$$I_{op} > KI_{res} \text{ e } I_{op} > I_{min} \quad (3.6)$$

Sendo K a inclinação da curva que define a característica de operação do relé, conforme ilustrado na Figura 3.1, e I_{min} a corrente mínima de operação, também denominada de corrente de *pick-up* em alusão aos relés eletromecânicos.

A corrente mínima I_{min} deve ser ajustada para evitar comandos de *trip* indevidos durante a operação normal do sistema de potência, ocasionados pela corrente de carga, erros de medição dos TCs, transitórios de chaveamento e correntes solicitadas por equipamentos como para-raios, transformadores auxiliares e transformadores de potencial, que apesar de estarem inseridos na zona de proteção, não têm suas correntes incluídas no cálculo de I_{op} e I_{res} . A inclinação K , por sua vez, está relacionada com a sensibilidade do relé para curtos-circuitos internos (BEHRENDT, 2010).

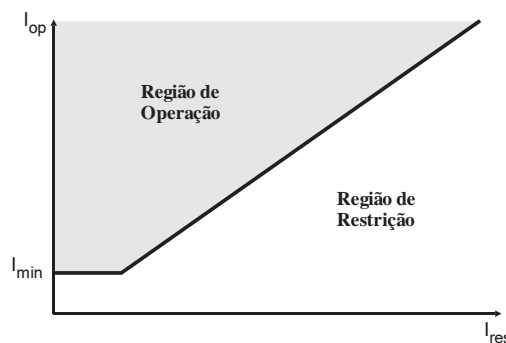


Figura 3.1 – Plano operacional do relé diferencial percentual com sua curva característica.

A fim de melhor entender o princípio de funcionamento da proteção diferencial de baixa impedância, recorre-se ao sistema simplificado ilustrado na Figura 3.2, que representa a conexão de três linhas de transmissão e dois transformadores a um barramento simples. Os TCs devem ser posicionados de modo a delimitar o elemento protegido na chamada zona de proteção da barra. Não raro esses TCs usados no esquema têm relações de transformação diferentes, exigindo a normalização das correntes por uma mesma corrente de base, antes do cálculo de I_{op} e I_{res} . Uma alternativa comumente utilizada é normalizar as correntes secundárias refletidas ao primário de cada TC pela corrente primária nominal do TC com máxima relação de transformação, ou seja (FERRER & SCHWEITZER, 2010):

$$TAP_k = \frac{RTC_{máx} \cdot I_{2n,máx}}{RTC_k} \quad (3.7)$$

Sendo TAP_k o valor de normalização das correntes secundárias do k -ésimo TC e RTC_k a sua relação de transformação; $RTC_{máx}$ e $I_{2n,máx}$ a relação de transformação e a corrente nominal secundária do TC com a máxima relação de transformação.

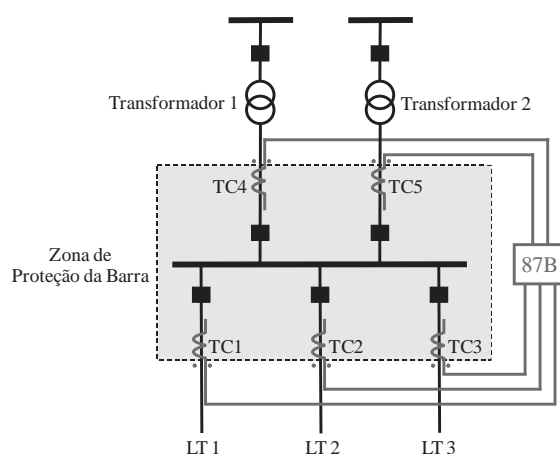


Figura 3.2 – Zona de proteção de uma barra simples.

Em condições normais de operação, idealmente, a corrente de operação I_{op} é igual à zero, ao passo que a de restrição I_{res} é maior que zero, mantendo o relé operando na sua região de restrição. Por outro lado, quando de faltas internas à zona de proteção, tanto I_{op} como I_{res} são maiores que zero, satisfazendo as Equações (3.6), de modo que a falta interna é detectada e um comando de *trip* é enviado para os disjuntores (DJs) de todos os vãos conectados à barra, a fim de isolá-la do restante do sistema.

No caso de faltas externas, as contribuições de todos os vãos conectados à barra têm a direcionalidade entrando na barra, exceto a do vão defeituoso, que tem a direcionalidade contrária. Mesmo assim, no caso de não haver saturação do TC do vão defeituoso, I_{op} é aproximadamente igual

à zero, enquanto que I_{res} é maior que zero, mantendo o relé operando na sua região de restrição. Entretanto, no caso de faltas externas, mas muito próximos à barra, a corrente que flui pelo TC do vão defeituoso pode ser muito elevada, a depender da potência de curto-circuito da barra, podendo levar os seus núcleos magnéticos à saturação. Conseqüentemente, uma corrente de operação I_{op} espúria surge devido às distorções nas correntes secundárias do TC, podendo provocar o disparo indevido de um comando *trip* para os DJs de todos os vãos conectados à barra.

Na Figura 3.3 ilustra-se o *locus* no plano operacional, referente à operação do relé para uma falta externa com saturação do TC do vão defeituoso. Observa-se que antes da saturação do TC, há um aumento da corrente I_{res} , enquanto que a corrente I_{op} mantém-se praticamente inalterada.



Figura 3.3 – Locus no plano operacional para uma falta externa com saturação do TC.

3.2. ALGORITMO DE DETECÇÃO DE FALTAS EXTERNAS

A fim de evitar essa situação, alguns algoritmos têm sido publicados na literatura para distinguir faltas internas de externas, a partir da análise da taxa de variação das correntes I_{op} e I_{res} nos primeiros instantes após o defeito, antes da saturação do núcleo magnético dos TCs. Para faltas internas a taxa de variação de ambas as correntes é elevada, ao passo que para faltas externas apenas a taxa de variação de I_{res} é significativa. Assim, no caso de faltas externas, passa-se a operar em um modo mais seguro, tipicamente, com uma maior inclinação K da característica de operação do relé, conforme ilustrado na Figura 3.4 (FERRER & SCHWEITZER, 2011). A ideia é deixar o relé menos sensível quando uma falta externa é detectada, através do aumento da inclinação K de sua característica, deixando sua região de restrição maior e a região de operação menor. Com isso, diminui-se a chance de ocorrência de atuações indevidas em casos de saturação do TC, nas quais o relé entraria indevidamente em sua região de operação.

No presente trabalho, escolheu-se implementar um algoritmo adaptativo de ajuste da inclinação K da característica de operação que é semelhante ao apresentado por Ferrer & Schweitzer

(2011). O diagrama de blocos ilustrado na Figura 3.5 apresenta a lógica de operação do algoritmo implementado. As taxas de variação das correntes I_{op} e I_{res} são calculadas e monitoradas continuamente pelo relé. Basicamente, se durante um intervalo de tempo de 2,0833 ms (2 amostras na taxa de 16 amostras por ciclo) a taxa de variação $\frac{dI_{res}}{dt}$ for superior a um limiar k_{min} , enquanto que a taxa de variação $\frac{dI_{op}}{dt}$ for inferior a esse limiar, uma falta externa é declarada. Então, o relé passa a operar no modo de faltas externas durante 150 ms, no qual a inclinação da característica de operação passa a ser K_2 , deixando-o menos sensível e evitando atuações indevidas em casos de saturação de TCs. Do contrário, a falta é tida como interna e o relé permanece no seu modo normal de operação, no qual a inclinação K_1 da característica de operação é utilizada. Em ambos os casos, o relé mantém a avaliação das condições de *trip* descritas na Equação (3.6), mas com a inclinação K referente ao modo de operação que esteja ativo.

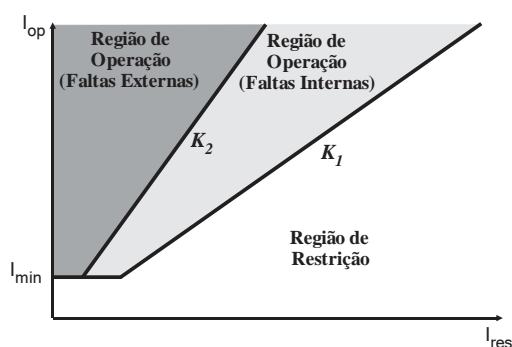


Figura 3.4 – Plano operacional com característica de inclinação adaptativa.

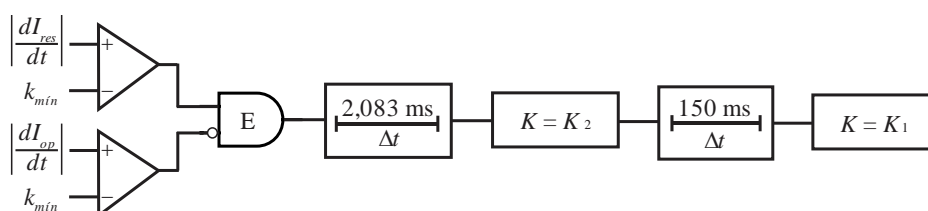


Figura 3.5 – Diagrama lógico de detecção de faltas externas.

3.3. PROTEÇÃO DE BARRAMENTO DUPLO COM DISJUNTOR SIMPLES A CINCO CHAVES

Dentre os diferentes tipos de barramentos utilizados em subestações de energia, neste trabalho foi escolhido como estudo de caso o barramento duplo com disjuntor simples a cinco chaves. Esta configuração é composta de duas barras, aqui denominadas de A e B, que funcionam, tipicamente, interligadas através de um disjuntor de amarre (DJAMR) e suas chaves seccionadoras (SCs) conectoras de barras, conforme ilustrado na Figura 3.6. Cada vão é conectado ao barramento, conforme ilustrado na Figura 3.7, por meio de um DJ e cinco chaves SC, denominadas de: seletora de

barra A, seletora de barra B, de chegada de vão, de saída de vão e de *bypass*. Os TCs ilustrados nas Figuras 3.6 e 3.7 são os utilizados nas zonas de proteção das barras.

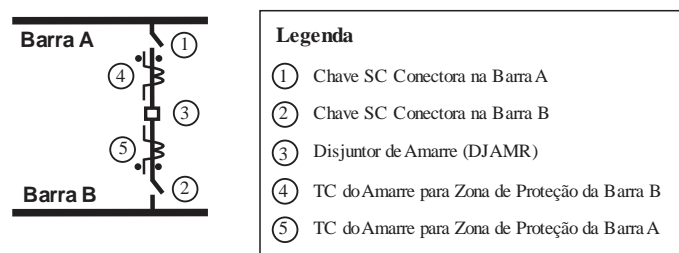


Figura 3.6 – Componentes constituintes do vão do DJAMR.

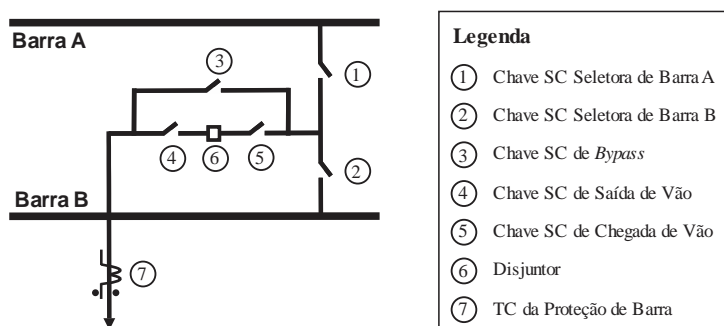


Figura 3.7 – Componentes constituintes de um vão conectado a um barramento com configuração de barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves.

A fim de apresentar a lógica de proteção utilizada para barramentos com configuração de barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves, considera-se um sistema simplificado constituído de duas linhas de transmissão (LTs) e um autotransformador (AT), conforme ilustrado na Figura 3.8. As linhas de transmissão e o autotransformador podem ser conectados à barra A ou à barra B, bastando manter fechada apenas a seccionadora seletora de barra correspondente. Normalmente as barras operam energizadas e interligadas via o DJAMR e suas chaves SCs conectoras de barras. Contudo, esta configuração de barramento possui alta flexibilidade de manobras, permitindo, por exemplo, a manutenção do DJ de qualquer vão sem a desenergização de nenhum trecho do sistema. Neste caso, ambas as barras podem ser utilizadas como barra de transferência, sendo que o *trip* da proteção do vão cujo DJ está em manutenção é transferido para o DJAMR. Contudo, devido a essa grande flexibilidade de manobras, a lógica da proteção desse tipo de barramento é mais complexa. Isso se deve ao fato de que como o sistema pode assumir diferentes arranjos, a zona de proteção de cada barra deve assumir um carácter adaptativo (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2009).

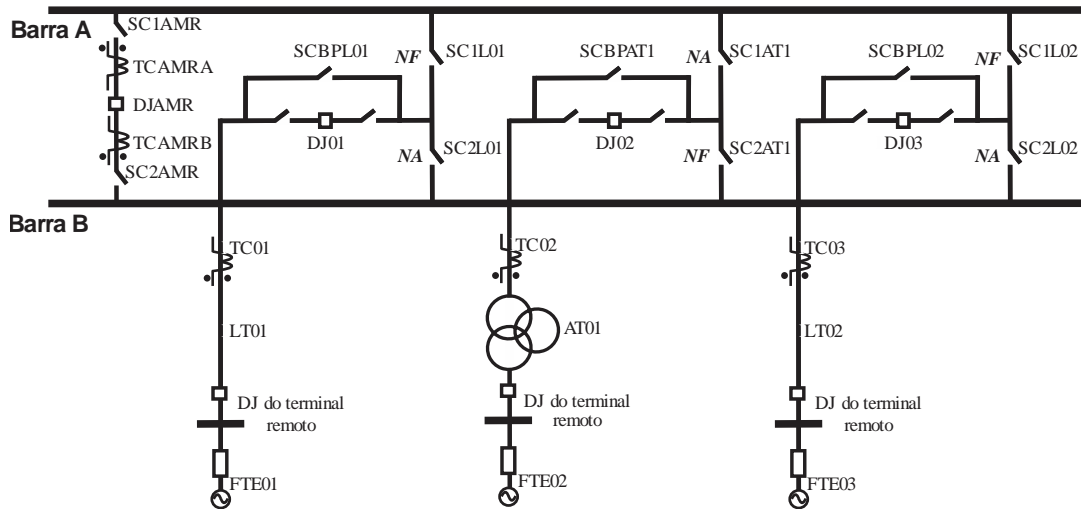


Figura 3.8 – Sistema com configuração de barramento duplo com disjuntor simples a cinco chaves.

Essa alta maleabilidade e complexidade foram o principal motivo da escolha desta configuração de barramento para ser abordada neste trabalho, pois estas são as características de um barramento típico que deve ser protegido por um esquema de proteção diferencial de baixa impedância, tema deste trabalho de dissertação.

Diversas lógicas de proteção podem ser empregadas para a configuração de barramento duplo com disjuntor simples a cinco chaves (GUZMÁN *et al.*, 2004). Sendo que a lógica utilizada neste trabalho é baseada na proposta pelo IEEE Power System Relaying Committee (2009). Para tanto, redefinem-se as correntes I_{op} e I_{res} como:

$$I_{op}^Z = \left| \sum_{k=1}^N f_k^Z \cdot \bar{I}_k \right| \quad (3.8)$$

$$I_{res}^Z = \sum_{k=1}^N |f_k^Z \cdot \bar{I}_k| \quad (3.9)$$

Sendo I_{op}^Z e I_{res}^Z as correntes de operação e restrição da zona Z; \bar{I}_k a corrente do k -ésimo vão; f_k^Z o *flag* de habilitação da corrente do k -ésimo vão na zona Z. Conforme será discutido a seguir, o estado lógico desses *flags*, assim como as lógicas da proteção do sistema elétrico da Figura 3.8, vão depender de diferentes fatores como o estado das chaves SCs seletoras de barra e DJs.

3.2.1. Configuração Normal de Operação

A partir da análise dos estados das chaves SCs seletoras de barra e das polaridades dos TCs indicados na Figura 3.8, define-se a configuração normal de operação do sistema conforme ilustrado na Figura 3.9, na qual também são ilustradas as zonas de proteção das barras A e B, aqui denominadas convenientemente de zonas ZA e ZB, respectivamente.

Quando o sistema está em sua configuração normal, ambas as barras operam energizadas, mediante a sua interligação via o DJAMR e suas seccionadoras conectoras de barra. Os vãos são distribuídos de modo a permanecerem conectados a apenas uma das barras, de modo que haja distribuição de fluxo de potência entre elas. Observa-se que as LTs 01 e 02 são normalmente conectadas à barra A, pois suas chaves SCs seletoras de barra A tem estado normalmente fechado (NF). Por outro lado, o AT01 opera geralmente conectado à barra B, pois o estado da sua chave SC seletora de barra B é NF. Assim, os limites da zona ZA são os TCs 01, 03 e AMRA, enquanto que os da zona ZB são os TCs 02 e AMRB, como ilustrado na Figura 3.9. Percebe-se que há uma interseção entre essas zonas devido à sobreposição do DJAMR pelos TCs AMRA e AMRB, de modo que uma falta entre eles é vista por ambas as zonas, promovendo a abertura de todos os DJs dos vãos conectados ao barramento.

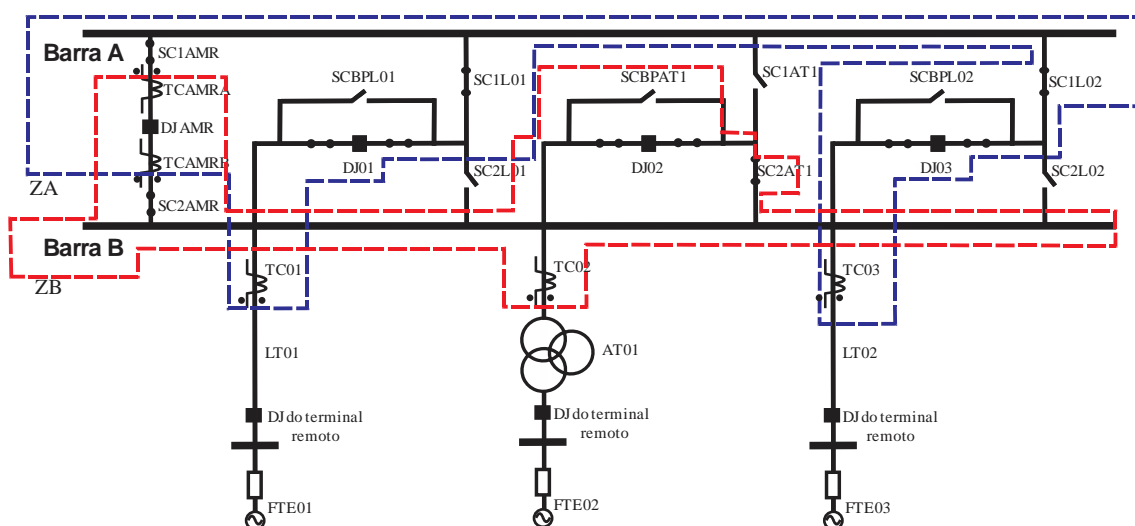


Figura 3.9 – Configuração normal de operação do sistema e das zonas de proteção das barras.

Tabela 3.1 - Lógica de identificação da zona à qual cada vão pertence.

Vão	TC correspondente	f_k^A	f_k^B
LT01	TC01	SC1L01	SC2L01
AT01	TC02	SC1T1	SC2T1
LT02	TC03	SC1L02	SC2L02
DJAMR	TCAMRA	0	1
	TCAMRB	1	0

O primeiro passo para estabelecer a lógica da proteção é definir quais vãos pertencem à zona ZA e quais pertencem à zona ZB. Isso é feito a partir da definição dos *flags* de conexão

f_k^A e f_k^B , conforme apresentado na Tabela 3.1. Para tal, considera-se que a chave SC possui estado lógico igual a 1 (um) se todos os seus polos estiverem fechados, ao passo que seu estado lógico será 0 (zero) se todos os seus polos estiverem abertos. Assim, para verificar em qual das barras um determinado vão está conectado, avalia-se o estado dos seus *flags* correspondentes, que, por sua vez, devem reproduzir o estado de suas chaves SCs seletoras de barra.

Os vãos conectados à barra A pertencem à zona ZA, enquanto que os conectados à barra B pertencem a ZB. Quanto ao DJAMR, o TCAMRA sempre pertencerá a ZB, e o TCAMRB sempre pertencerá a ZA. Assim, as correntes usadas no cálculo do elemento 87B para verificar se há defeito em cada zona de proteção são aquelas medidas pelo TC de amarre (AMR) e pelos TCs dos vãos pertencentes a cada zona. Consequentemente, em caso de falta em alguma das barras, a proteção deve mandar um comando de abertura para o DJAMR e para todos os DJs dos vãos conectados à barra com defeito. Dessa forma, se houver o desligamento de uma das barras, a outra continua sendo alimentada, mantendo suas cargas atendidas. Com isso, a lógica de *trip* dos DJs é definida na Tabela 3.2, na qual **E** e **OU** correspondem aos operadores booleanos **AND** e **OR**, respectivamente. Nessa tabela, ZA e ZB são variáveis lógicas que possuem estado lógico 1 (um) em caso de falta dentro da zona de proteção, e 0 (zero) caso contrário.

Tabela 3.2 – Lógica de *trip* dos DJs.

DJ	Expressão Lógica
DJ01	(ZA E SC1L01) OU (ZB E SC2L01)
DJ02	(ZA E SC1T1) OU (ZB E SC2T1)
DJ03	(ZA E SC1L02) OU (ZB E SC2L02)
DJAMR	ZA OU ZB

Quando uma falta ocorre na barra A, por exemplo, as condições da Equação (3.6) são satisfeitas, ativando a variável ZA. Assim, para isolar o defeito, o DJAMR e os DJs das LTs 01 e 02 devem ser abertos. Analisando-se a Tabela 3.2, observa-se que é exatamente o que ocorre. O *trip* do DJAMR tem valor lógico 1 (um) devido à variável ZA, o *trip* de DJ01 devido à expressão lógica (ZA E SC1L01) e o do DJ03 devido à expressão lógica (ZA E SC1L02).

3.2.2. Transferência da Proteção

Em caso de necessidade de manutenção do DJ de algum vão, este deve ser isolado através da abertura das chaves SCs de chegada e saída de vão. Mas, antes disso, para que o componente continue

sendo alimentado, fecha-se sua seccionadora de *bypass*. Neste caso, deve-se deixar apenas o vão cujo DJ está em manutenção conectado a uma das barras, que funcionará como barra de transferência, e remanejar todos os outros vãos para a outra barra, que opera como barra principal. Além disso, é necessário transferir a proteção do DJ em manutenção para o DJAMR. Assim, um falta no vão cujo DJ está em manutenção ou na barra de transferência deve ser extinta mediante a abertura do DJAMR e do DJ no terminal remoto do vão, cuja lógica de *trip* não é aqui analisada.

Dadas essas possibilidades de mudança no sistema, é preciso incluí-las na lógica de *trip* dos DJs. Para isso utiliza-se a variável lógica auxiliar PB, que indica se há paralelismo entre as barras A e B, ou seja, se algum dos componentes está sendo remanejado e momentaneamente possui as duas chaves seletoras de barra fechadas. O estado de PB é definido pela seguinte expressão lógica:

$$PB = (SC1L01 \text{ E } SC2L01) \text{ OU } (SC1T1 \text{ E } SC2T1) \text{ OU } (SC1L02 \text{ E } SC2L02) \quad (3.10)$$

Durante a situação de paralelismo de barras, as zonas ZA e ZB são alteradas, pelo fato de não se ter medição de corrente no ramo formado pela série das chaves SCs seletoras de barra A e B do vão que está sendo manobrado. Consequentemente, a depender da distribuição do fluxo de potência no barramento, pode-se provocar uma atuação indevida das zonas de proteção. Para contornar essa situação, diferentes estratégias podem ser usadas. Neste trabalho optou-se por expandir ambas as zonas ZA e ZB para cobrir as duas barras, de modo que elas passam a ser iguais durante o paralelismo de barras. Além disso, no caso de atraso na mudança de estados ou de falha dos contatos lógicos das chaves SCs seletoras de barra, os *flags* de conexão de barra podem assumir um estado lógico errado, também provocando uma atuação indevida das zonas de proteção. Para evitar isso, tipicamente utiliza-se a supervisão do *trip* das zonas ZA e ZB. Neste trabalho optou-se por implementar uma zona diferencial de supervisão, do inglês *check-zone*, que engloba as duas barras simultaneamente, de modo a ser convenientemente denominada de zona ZAB (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2009).

Dessa forma, a lógica de identificação de qual zona de proteção cada vão pertence passa a verificar não somente o estado das chaves SCs seletoras de barra, mas também da variável PB, como mostrado na Tabela 3.3. Nessa tabela, \overline{PB} representa a negação do estado lógico da variável PB, obtida pelo operador booleano **NOT**. Com isso, a lógica de *trip* dos DJs também é alterada, passando a levar em consideração a zona de supervisão ZAB, como mostra a Tabela 3.4.

Tabela 3.3 – Lógica de identificação da zona à qual cada vão pertence, considerando a situação de paralelismo de barras durante as manobras de transferência de vãos entre as barras.

Vão	TC correspondente	f_k^A	f_k^B	f_k^{AB}
LT01	TC01	SC1L01 OU PB	SC2L01 OU PB	1
T01	TC02	SC1T1 OU PB	SC2T1 OU PB	1
LT02	TC03	SC1L02 OU PB	SC2L02 OU PB	1
DJAMR	TCAMRA	0	\overline{PB}	0
	TCAMRB	\overline{PB}	0	0

Tabela 3.4 – Lógica de *trip* dos DJs, considerando a zona de supervisão ZAB.

DJ	Expressão Lógica
DJ01	$[(ZA \text{ E } SC1L01) \text{ OU } (ZB \text{ E } SC2L01)] \text{ E } ZAB$
DJ02	$[(ZA \text{ E } SC1T1) \text{ OU } (ZB \text{ E } SC2T1)] \text{ E } ZAB$
DJ03	$[(ZA \text{ E } SC1L02) \text{ OU } (ZB \text{ E } SC2L02)] \text{ E } ZAB$
DJAMR	$(ZA \text{ OU } ZB) \text{ E } ZAB$

Para verificar o correto funcionamento desta lógica de proteção, verifica-se o seu funcionamento em um caso de manutenção do DJ01 como exemplo. Para isso, a LT02 é manobrada para a barra B, deixando apenas a LT01 conectada na barra A, que, nesse caso, funciona como barra de transferência. Em seguida o DJ01 é isolado através da abertura das seccionadoras de chegada e saída vão e a SCBPL01 é fechada para que a LT01 continue sendo alimentada. O sistema ficará com a configuração mostrada na Figura 3.10.

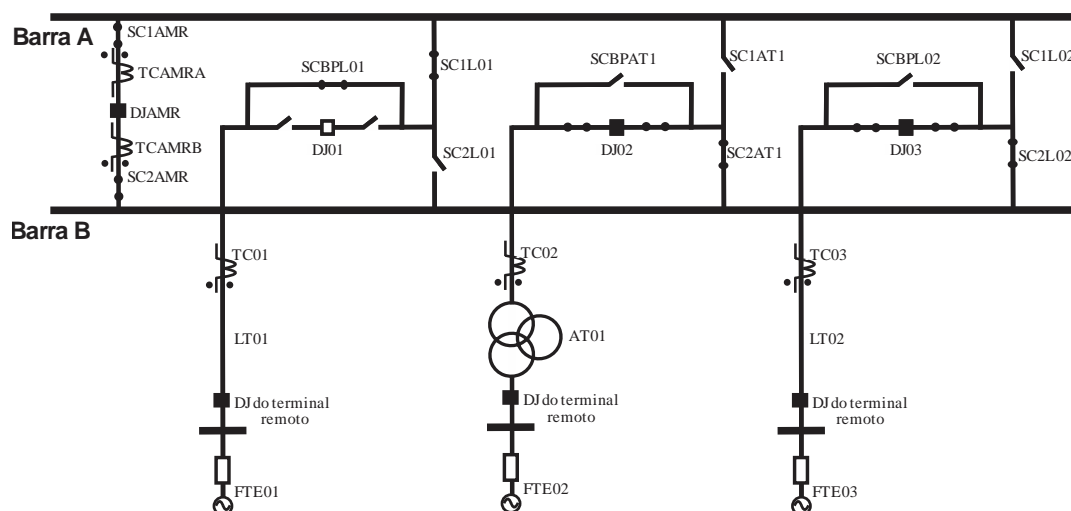


Figura 3.10 – Sistema com a proteção do DJ01 transferida para o DJAMR.

Analisando-se a Tabela 3.3, verifica-se que nessa situação apenas a LT01 pertence a zona ZA, enquanto que o AT01 e o a LT02 pertencem à zona ZB. Além disso, nesta configuração, o *trip* da proteção da LT01 fica transferido do DJ01 para o DJAMR.

No caso de uma falta na barra A (ou seja, $ZB = 0$ e $ZA = ZAB = 1$), observa-se da análise da Tabela 3.4 que apenas o DJAMR receberia um sinal de *trip*, já que o DJ01 está fora de serviço. Contudo, a falta ainda não seria extinta, uma vez que a LT01 continuaria conectada à barra A pela chave SC de *bypass* SCBPL01. Assim, faz-se necessário o envio de um sinal de transferência de disparo direto (TDD) para o terminal remoto, a fim de isolar a barra A, mantendo a barra B em operação normal de modo a conectar o AT01 e a LT02. Por outro lado, no caso de uma falta na LT01, a proteção unitária da LT, não analisada neste trabalho, enviaria comandos de *trip* para o DJ remoto da LT e para o DJAMR, a fim de desconectar a LT defeituosa do restante do sistema. Portanto, em ambos os casos o sistema de proteção atuaria da forma esperada.

3.2.3. Falha de Disjuntor

Existem situações, no sistema elétrico real, em que os equipamentos não funcionam da maneira que deveriam. Um exemplo é a falha de disjuntor, que ocorre quando um sinal de *trip* é enviado ao DJ e este permanece com os seus contatos eletricamente fechados, podendo estar mecanicamente fechados ou abertos.

Essa falha causa diversos transtornos, pois impede a isolamento das faltas ocorridas no sistema. Por isso, é necessário que haja uma proteção de falha do disjuntor, que contemple a possibilidade de sua ocorrência. Neste trabalho, considerou-se que esta proteção foi associada à proteção de barras. Sendo assim, caso haja falha na abertura de algum dos DJs, tanto para faltas na barra quanto no vão correspondente, a zona de proteção de barra à qual este DJ pertence deve providenciar a abertura de todos os seus outros DJs, a fim de extinguir o defeito. Contudo, a extinção do defeito só ocorrerá se o DJ remoto do vão sob defeito também abrir. Para tanto, faz-se uso do esquema de transferência de disparo direto (TDD) (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2009).

Para incorporar a lógica de falha de DJ no esquema da proteção, duas variáveis lógicas foram criadas, nomeadas ZABFT e ZBBFT, que indicam se o DJ que falhou pertence a ZA ou a ZB, respectivamente:

$$ZABFT = BFAMR \text{ OU } (SC1L01 \text{ E } BFL01) \text{ OU } (SC1T1 \text{ E } BFAT1) \text{ OU } (SC1L02 \text{ E } BFL02) \text{ OU } [PB \text{ E } (BFL01 \text{ E } SC2L01) \text{ OU } (BFAT1 \text{ E } SC2T1) \text{ OU } (BFL02 \text{ E } SC2L02)] \quad (3.6)$$

$$\text{ZBBFT} = \text{BFAMR} \text{ OU } (\text{SC2L01} \text{ E } \text{BFL01}) \text{ OU } (\text{SC2T1} \text{ E } \text{BFAT1}) \text{ OU } (\text{SC2L02} \text{ E } \text{BFL02}) \text{ OU } [\text{PB} \text{ E } (\text{BFL01} \text{ E } \text{SC1L01}) \text{ OU } (\text{BFT1} \text{ E } \text{SC1AT1}) \text{ OU } (\text{BFL02} \text{ E } \text{SC1L02})] \quad (3.7)$$

A variável lógica BFAMR indica falha no DJAMR, ao passo que as variáveis BFL01 e BFL02 indicam falha nos DJs das LTs 01 e 02, respectivamente, e BFAT1 indica falha no AT01. Essas variáveis são sinais enviados pelas proteções de linha e pela proteção de transformador.

Percebe-se que em caso de paralelismo de barras ($\text{PB} = 1$) as duas variáveis, ZABFT e ZBBFT são ativadas, pois qualquer DJ estará conectado às duas barras, direta ou indiretamente, e, conseqüentemente, pertencerá às zonas ZA e ZB simultaneamente.

A fim de contemplar a proteção de falha de DJ a lógica de *trip* dos DJs é modificada, ficando como mostrado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Lógica completa de *trip* dos DJs.

DJ	Expressão Lógica
DJ01	$\{[(\text{ZA} \text{ E } \text{SC1L01}) \text{ OU } (\text{ZB} \text{ E } \text{SC2L01})] \text{ E } \text{ZAB}\} \text{ OU } (\text{ZABFT} \text{ E } \text{SC1L01}) \text{ OU } (\text{ZBBFT} \text{ E } \text{SC2L01})$
DJ02	$\{[(\text{ZA} \text{ E } \text{SC1T1}) \text{ OU } (\text{ZB} \text{ E } \text{SC2T1})] \text{ E } \text{ZAB}\} \text{ OU } (\text{ZABFT} \text{ E } \text{SC1T1}) \text{ OU } (\text{ZBBFT} \text{ E } \text{SC2T1})$
DJ03	$\{[(\text{ZA} \text{ E } \text{SC1L02}) \text{ OU } (\text{ZB} \text{ E } \text{SC2L02})] \text{ E } \text{ZAB}\} \text{ OU } (\text{ZABFT} \text{ E } \text{SC1L02}) \text{ OU } (\text{ZBBFT} \text{ E } \text{SC2L02})$
DJAMR	$[(\text{ZA} \text{ OU } \text{ZB}) \text{ E } \text{ZAB}] \text{ OU } \text{ZABFT} \text{ OU } \text{ZBBFT}$

Para verificar o desempenho da proteção que utiliza esse esquema, considera-se a sua atuação em duas situações diferentes. Primeiramente considera-se o sistema com a configuração da Figura 3.9. Caso ocorra uma falta na LT02 e o DJ02 falhe em sua abertura, obtém-se $\text{BFL02} = \text{ZABFT} = 1$ e $\text{ZBBFT} = 0$. Neste caso, os *trips* do DJ01 e do DJAMR serão ativados, a fim de isolar o defeito na LT02, considerando que o seu DJ no terminal remoto também seja aberto.

A segunda situação a ser considerada é com o sistema operando na configuração da Figura 3.10. Considerando-se uma falha no DJAMR para um curto na LT01, que está transferida para a barra A, todos os DJs receberão o comando de *trip*, desconectando todos os componentes do sistema. Esta é a atuação correta da proteção, visto que o defeito na LT01 só pode ser isolado dessa forma, pois o DJAMR mantendo-se fechado provoca uma espécie de paralelismo entre as barras.

Assim, estabelece-se que o esquema de proteção aplicado e analisado neste trabalho é o que utiliza as lógicas de identificação da zona à qual cada vão pertence apresentadas na Tabela 3.3 e as

lógicas de *trip* apresentadas na Tabela 3.5. Ressalta-se ainda que, para que seu bom funcionamento seja garantido, é necessário que os sinais que indicam os estados das chaves SCs e o DJ com falha sejam confiáveis.

IMPLEMENTAÇÕES COMPUTACIONAIS

4.1. O SOFTWARE ATP E SUA INTERFACE MODELS

Como já apresentado no Capítulo 2, a modelagem de relés possui várias utilidades, além de ser muito importante nos estudos que visam o aprimoramento dos sistemas de proteção. Especialmente nos dias de hoje, em que os relés eletromecânicos vêm sendo substituídos pelos numéricos microprocessados, cujos algoritmos devem ser constantemente estudados e aperfeiçoados. Nesse contexto, a análise dos transitórios eletromagnéticos merece grande enfoque dentro do estudo da proteção dos sistemas elétricos.

Consistindo em fenômenos que provocam variações súbitas de tensão ou corrente no sistema, os transitórios eletromagnéticos podem ter diferentes causas, entre elas: descargas atmosféricas, curtos-circuitos ou variações repentinas na topologia do sistema, que envolvam manobra de chaves e disjuntores ou variação de carga. Assim, faz-se necessário entender as causas dos transitórios eletromagnéticos, de modo a dimensionar sistemas de proteção capazes de proteger o sistema elétrico adequadamente. Para este estudo, tipicamente, são utilizados os software do tipo EMTP.

O ATP é um dos softwares do tipo EMTP, que permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a discretização trapezoidal na representação de elementos a parâmetros concentrados e o método das características na representação de elementos a parâmetros distribuídos (ZANETA JÚNIOR, 2003; ARAÚJO & NEVES, 2006). Trata-se de um programa digital, que possui diversos modelos dos componentes de sistemas de potência. E é o software tipo EMTP mais difundido, por ter licença gratuita.

Neste trabalho o ATP é utilizado para modelar o sistema elétrico mostrado na Figura 4.1, que possui configuração de barramento duplo com disjuntor simples a cinco chaves, cuja filosofia de proteção é aquela apresentada no Capítulo 3. Para modelar o relé diferencial percentual de baixa impedância 87B, que é um componente não existente previamente no ATP, foi utilizada a linguagem MODELS, por ser residente no ATP. Sua estrutura básica é apresentada no Apêndice A.

Neste capítulo apresentam-se detalhes da modelagem e simulação da proteção diferencial de baixa impedância realizada no presente trabalho de dissertação.

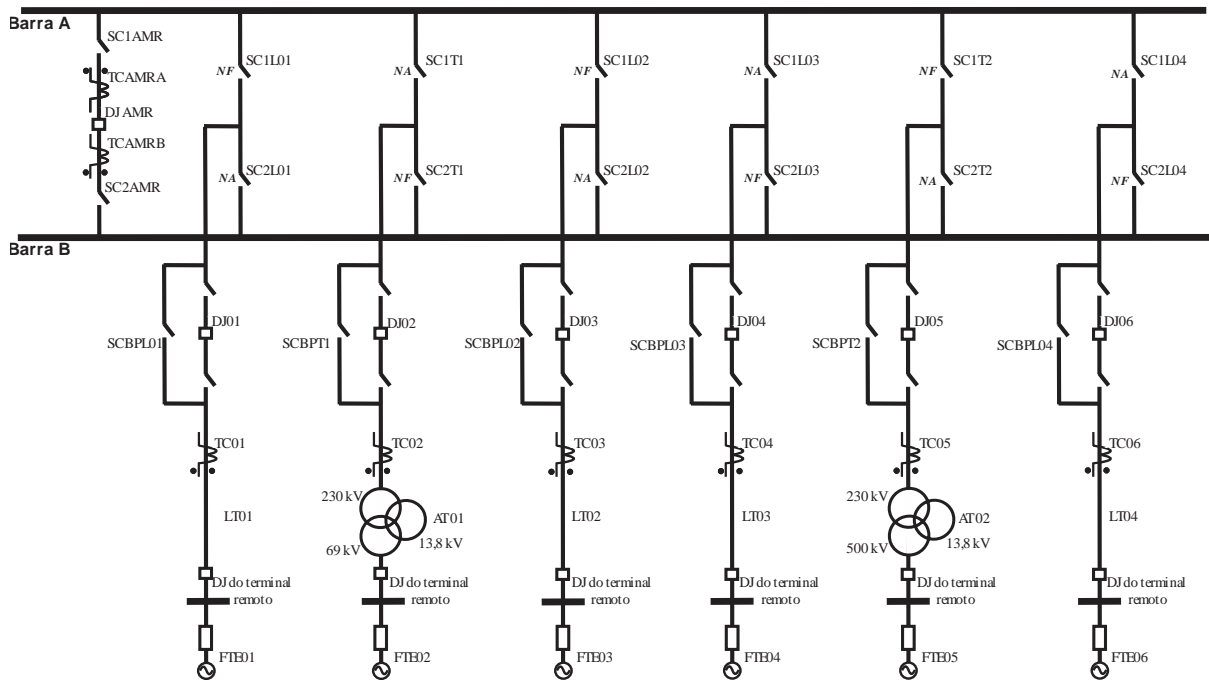


Figura 4.1 – Sistema elétrico simulado.

4.2. TCs DE POTÊNCIA

Os TCs de potência tem a função de reduzir, proporcionalmente, as correntes no sistema para níveis compatíveis com os dos instrumentos de medição, proteção e controle empregados no sistema elétrico. Neste trabalho de dissertação, foram utilizados TCs do tipo C400 com relação de transformação máxima 1200-5 A. Sua modelagem foi feita diretamente no software ATP, de acordo com o modelo proposto pelo IEEE Power System Relaying Committee (2009), cujo circuito equivalente é mostrado na Figura 4.2. O seu ramo de magnetização foi representado utilizando-se o elemento 98 do ATP, que modela uma indutância pseudo não-linear, que não considera a representação da característica de histerese do núcleo (LEUVEN EMTP CENTER, 1987).

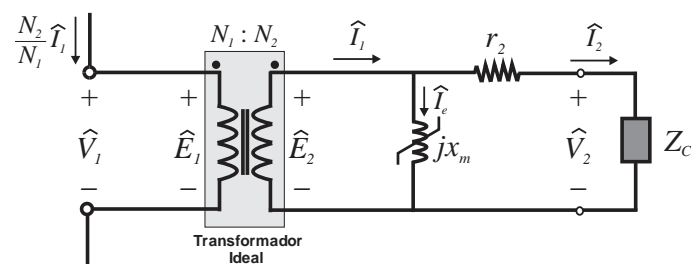


Figura 4.2 – Circuito equivalente do TC de potência.

A resistência r_2 do enrolamento secundário foi tomada como $0,75 \Omega$, enquanto que a impedância de carga do TC foi considerada como sendo $2,0 \Omega$, correspondendo à soma da resistência dos cabos mais a de entrada do relé numérico.

4.3. MODELAGEM DO SISTEMA DE PROTEÇÃO NA MODELS

Com o intuito de avaliar o desempenho da lógica de proteção diferencial apresentada no Capítulo 3, o sistema de potência ilustrado na Figura 4.1 foi simulado no ATP. O relé 87B, que realiza a função da proteção diferencial de seu barramento, foi modelado na MODELS na forma de módulos, conforme ilustrado na Figura 4.3.

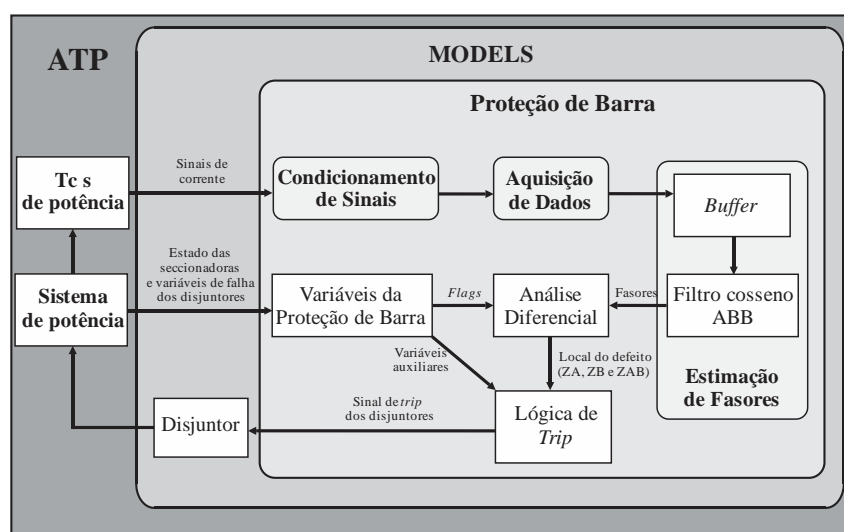


Figura 4.3 – Diagrama de blocos do sistema de proteção diferencial de barras no ATP.

No código, o módulo chamado `ProtecaoBarra` define o relé, que é composto por vários outros módulos. Os TCs de potência, definidos no ATP, tem em seus primários as correntes em cada fase dos vãos conectados ao barramento, de modo que as correntes em seus secundários são enviadas para o modelo do relé na MODELS. Ao receber dos TCs de potência as três correntes de fase, o módulo `ProtecaoBarra` chama todos os outros módulos constituintes do relé, mostrados na Figura 4.3. De fato, o módulo `ProtecaoBarra` implementa a função 87B segmentada por fase, de modo que ele passa cada sinal de corrente por todos os módulos, fazendo o tratamento dos sinais e digitalizando-os, para serem utilizados na lógica de proteção. Além disso, o relé recebe o estado das chaves SCs seletoras de barra e das SCs de *bypass* de cada vão conectado ao barramento. Por fim, devolve ao sistema de potência os comandos de abertura dos DJs.

4.3.1. Módulo de Condicionamento de Sinais

O módulo `CondicionamentoSinais` é o único módulo do relé que trabalha com os sinais em sua forma contínua, aqui emulada pelos sinais discretos calculados a cada passo de cálculo do ATP, escolhido como 1 μ s. Sua função é adequar os sinais para o processo de conversão analógica/digital (A/D). Ele é composto por três submódulos: `TCauxiliar`, `FiltroAnalogico` e `Grampeador`, conforme ilustrado na Figura 4.4. A função de cada um desses submódulos é descrita a seguir.

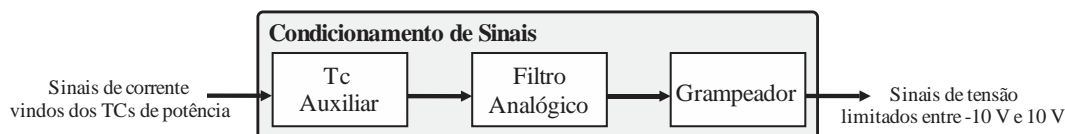


Figura 4.4 – Estrutura do Módulo de Condicionamento de Sinais.

4.3.1.1. TC Auxiliar

Assim que chegam ao relé, os sinais de corrente de cada fase vindos dos secundários dos TCs de potência passam pelo TC auxiliar. Este possui a finalidade de fornecer em seu secundário sinais de tensão proporcionais às correntes que chegam em seu primário, mas com escala reduzida, que variam entre ± 10 V, que é uma faixa dinâmica tipicamente utilizada em conversores A/D. No código, sua função foi implementada simplesmente como mostrado no Quadro 4.1, de modo que não foi representada a característica não-linear do seu núcleo magnético.

Quadro 4.1 – Trecho de código do modelo `TCauxiliar`.

```
sigOUT1:=sigIN1*K  
sigOUT2:=sigIN2*K  
sigOUT3:=sigIN3*K
```

No Quadro 4.1, `sigOUT` e `sigIN` são as correntes de saída e entrada do TC auxiliar, respectivamente, e `K` é uma variável de normalização calculada como: $K = (V_{max} * R_T) / A_{max}$, com `Vmax` sendo o limite da tensão de saída do TC auxiliar, escolhida como 10 V, `RT` a relação de transformação do TC de potência, e `Amax` a corrente de curto-circuito máxima do sistema de potência, considerada como sendo de 40 kA.

4.3.1.2. Filtro Analógico

Este submódulo possui a função de filtrar as componentes de alta frequência existentes nos sinais, a fim de evitar o efeito de sobreposição de espectros, do inglês *aliasing effect*, quando do processo de amostragem dos sinais. Ele consiste de um filtro passa-baixa de 3ª ordem do tipo Butterworth, com frequência de corte em 180 Hz. A magnitude de sua resposta em frequência é

mostrada na Figura 4.5. Na MODELS, a implementação desse processo de filtragem foi feito utilizando-se a sua função residente LAPLACE, que aplica uma função de transferência no domínio s a um sinal de entrada. O trecho de código referente à implementação do submódulo `FiltroAnalogico` é apresentado no Quadro 4.2.

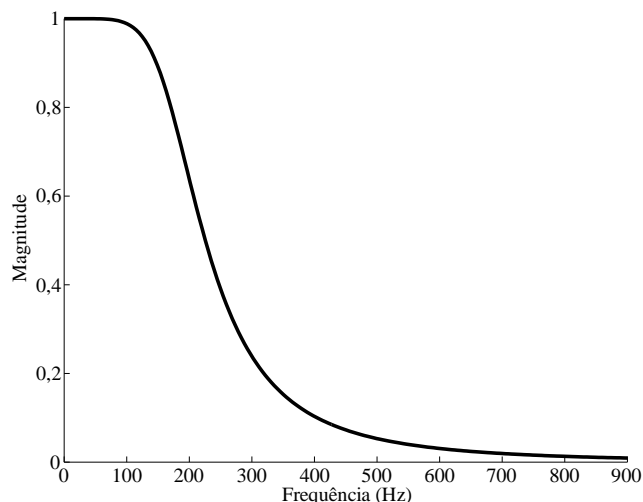


Figura 4.5 – Magnitude da resposta em frequência do filtro Butterworth passa-baixas utilizado.

Quadro 4.2 – Trecho de código do modelo `FiltroAnalogico`.

```

CONST -- coeficientes do filtro
  b0 {val:1.6452e9}
  a0 {val:1.6452e9}
  a1 {val:2.7873e6}
  a2 {val:2.3611e3}
  a3 {val:1.0}
  (...)
EXEC
  LAPLACE (sigOUT[1]/sigA) := b0|s0 / (a0|s0 + a1|s1 + a2|s2 + a3|s3)
  LAPLACE (sigOUT[2]/sigB) := b0|s0 / (a0|s0 + a1|s1 + a2|s2 + a3|s3)
  LAPLACE (sigOUT[3]/sigC) := b0|s0 / (a0|s0 + a1|s1 + a2|s2 + a3|s3)
ENDEXEC

```

No Quadro 4.2, a variável `sigOUT` é o vetor com os sinais de saída nas três fases, enquanto que `sigA`, `sigB` e `sigC` são as correntes nas fases A, B e C, respectivamente, informadas como entradas para o módulo.

4.3.1.3. Grampeador

O circuito grampeador serve para garantir que a tensão na saída do módulo `FiltroAnalogico` não ultrapasse a faixa dinâmica de ± 10 V. Para tanto, ele ceifa os sinais de tensão nas três fases para valores fora dessa faixa. Para tanto, a lógica apresentada no Quadro 4.3 é aplicada a cada fase:

Quadro 4.3 – Trecho de código do modelo Grampeador para a fase A.

```
IF ABS(sigIN1) > 10
    THEN sigOUT1:=10*sign(sigIN1)
    ELSE sigOUT1:=sigIN1
ENDIF
```

No Quadro 4.3, as variáveis sigIN1 e sigOUT1 representam, respectivamente, os sinais de entrada e de saída, na fase A, do submódulo Grampeador. Lógica semelhante é utilizada para as demais fases.

4.3.2. Módulo de Aquisição de Dados

Este é o módulo responsável pela conversão do sinal de tensão de analógico para digital, que utiliza para isso os submódulos Sampler/Holder e ConversorA/D.

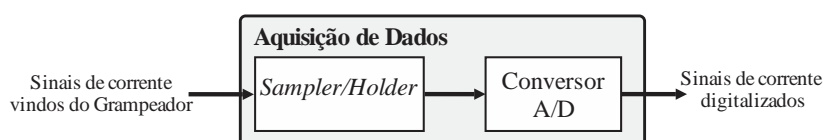


Figura 4. 6 - Estrutura do Módulo de Aquisição de Dados.

Em todos os módulos seguintes, a partir deste, define-se o intervalo de amostragem, relativo à taxa de amostragem considerada para o relé. Este passo de cálculo é definido pelo módulo ProtecaoBarra, quando da chamada de cada um dos módulos que o compõe, utilizando-se o comando `TIMESTEP MIN: 1.0416666667E-3`.

4.3.2.1. Sampler/Holder

Com a função de fornecer um sinal adequado para o ConversorA/D, o Sampler/Holder serve para coletar valores dos sinais analógicos de tensão a um intervalo de tempo definido, e mantê-los constantes. Seu sinal de saída possui formato de escada, com degraus de patamares constantes. Este intervalo de tempo entre uma coleta e outra é o intervalo de amostragem Δt definido pelo comando `TIMESTEP MIN` no módulo ProtecaoBarra. Como a taxa de amostragem utilizada no Sampler/Holder foi de 16 amostras por ciclo, este intervalo de tempo é dado por:

$$\Delta t = \frac{1}{f_{\text{fundamental}} \cdot T_{\text{amostragem}}} = \frac{1}{60 \text{ ciclos/s} \times 16 \text{ amostras/ciclo}} \cong 1,0416 \text{ ms} \quad (4.1)$$

Dessa forma, o sinal analógico enviado ao conversor A/D possui valores que se mantêm constantes durante um intervalo de tempo Δt , a fim de retirar as variações no sinal que podem provocar erros no sinal digital gerado pelo processo de conversão A/D.

Oportuno se faz esclarecer que os sinais tidos contínuos nesse trabalho são, na verdade, sinais discretos calculados pelo ATP a cada passo de cálculo, considerado como sendo de 1 μ s. Assim, ao se referir à conversão A/D, na verdade, está se fazendo uma alusão ao processo de reamostragem de um sinal discreto, para a taxa de 16 amostras por ciclo.

4.3.2.2. Conversor A/D

Este submódulo recebe o sinal gerado pelo Sampler/Holder e realiza sua conversão A/D, através da transformação de seus valores analógicos em palavras binárias (de 16 bits para este caso) pelo método da conversão por aproximação sucessiva. Seu modelo matemático, descrito a seguir, foi apresentado por Perez (2006).

O conversor A/D deve calcular um número binário, de b bits, proporcional ao nível do sinal analógico de entrada, com intervalo de excursão de $-Y$ a $+Y$. Neste caso, $b = 16$ e $Y = 10$ V. Portanto, a resolução do conversor é dada por:

$$Res = \frac{Y}{2^{b-1} - 1} = \frac{10}{2^{15} - 1} = 3,0518 \cdot 10^{-4} \text{ V} \quad (4.2)$$

O valor digitalizado de um determinado valor positivo x , que é um número inteiro na base 10, é obtido por uma operação de truncamento (INT) ou arredondamento (RON), da seguinte maneira:

$$Z_{10} = \text{INT ou RON} \left[\frac{x}{Res} \right] \quad (4.3)$$

E o valor digitalizado para x negativo é dado pela representação por complemento de dois:

$$Z_{10} = \text{INT ou RON} \left[\frac{(2Y - |x|)2^b}{Y} \right] \quad (4.4)$$

A saída final do conversor A/D é o valor digitalizado Z_{10} convertido para o número binário equivalente, em ponto flutuante, que para valores positivos de x é dado por:

$$FP = Z_{10} \cdot Res \quad (4.5)$$

E para valores negativos de x é dado por:

$$FP = [Z_{10} - 2^b] \cdot Res \quad (4.6)$$

O trecho de código do modelo ConversorA/D é apresentado no Quadro 4.4.

No Quadro 4.4, a variável sigIN1 consiste do sinal de corrente na fase A obtido na saída do módulo Sampler/Holder, enquanto que sigOUT1 consiste no sinal em ponto flutuante da fase A. Um cálculo semelhante é usado para as fases B e C.

Quadro 4.4 – Trecho de código do modelo ConversorA/D para a fase A.

```
IF sigIN1 >= 0
  THEN
    Z10A := ROUND(sigIN1/Res)
    sigOUT1 := Z10A*Res
  ELSE
    Z10A := ROUND(((2*Y-ABS(sigIN1))*(2**b))/Y)
    sigOUT1 := (Z10A-2**(b+1))*Res
ENDIF
```

4.3.3. Módulo de Estimação de Fasores

Este módulo tem a função de estimar o fasor da frequência fundamental referente às correntes nas três fases. Para isso, utiliza os submódulos `Buffer` e `FiltroCossenoABB`, descritos a seguir.

4.3.3.1. *Buffer*

É o submódulo responsável por armazenar os valores a serem utilizados pelo submódulo `FiltroCossenoABB` na estimação dos fasores. Ele consiste, basicamente, de um vetor de 17 posições, que armazena os valores recebidos do módulo `Sampler/Holder`, e a cada passo de cálculo descarta um valor antigo e acrescenta um novo. O trecho do código referente ao submódulo `Buffer` é apresentado no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 – Trecho de código do modelo `Buffer`.

```
FOR i:=2 TO 17 DO
  bufferA[i-1] := bufferA[i]
  bufferB[i-1] := bufferB[i]
  bufferC[i-1] := bufferC[i]
ENDFOR

bufferA[17] := sigIN1
bufferB[17] := sigIN2
bufferC[17] := sigIN3
```

4.3.3.2. *Filtro Cosseno ABB*

Para realizar a estimação de fasores, este submódulo utiliza o algoritmo do Filtro Cosseno Modificado proposto por Hart *et al.* (2000). Uma das grandes vantagens deste algoritmo está no fato dele ter uma boa eliminação do efeito da componente DC de decaimento exponencial, que é um dos principais problemas existentes nos métodos tradicionais de estimação de fasores.

A estimação é feita a partir de uma combinação de dois fatores, C_1 e C_2 , que são calculados aplicando-se o filtro cosseno de Fourier de um ciclo às amostras armazenadas no submódulo `Buffer`:

$$C_1 = \frac{\sqrt{2}}{M} \sum_{k=1}^M \mathbf{jan}(k) \cdot \cos(k \cdot \delta) \quad (4.7)$$

$$C_2 = \frac{\sqrt{2}}{M} \sum_{k=1}^M \mathbf{jan}(k+1) \cdot \cos(k \cdot \delta) \quad (4.8)$$

sendo M o número de amostras por ciclo; \mathbf{jan} o vetor com amostras do sinal e δ a defasagem angular entre amostras, dada por $\delta = \frac{2\pi}{M}$. As partes real e imaginária do fasor são calculadas por:

$$X_{re} = C_2 \quad \text{e} \quad X_{im} = \frac{C_1 - C_2 \cos \delta}{\sin \delta} \quad (4.9)$$

O trecho do código no qual se realiza a estimação do fasor de corrente na fase A é apresentado no Quadro 4.6. A variável $RTEF$ é usada para normalizar a corrente de cada vão para pu da corrente nominal primária do TC com maior relação de transformação, de modo que:

$$RTEF_j = \frac{RTC_j}{KI \cdot RTC_{m\acute{a}x} \cdot I_{2nom,m\acute{a}x}} \quad (4.10)$$

sendo RTC_j a relação de transformação do TC do j -ésimo vão; KI a relação de transformação do TC auxiliar do relé; $RTC_{m\acute{a}x}$ é a máxima relação de transformação dentre os TCs usados no esquema; e $I_{2nom,m\acute{a}x}$ é a corrente nominal secundária do TC com a máxima relação de transformação.

Quadro 4.6 – Trecho de código no qual é realizada a estimação do fasor corrente na fase A.

```

C1:=0
C2:=0
FOR i:=1 TO M DO
    C1 := C1 + (sqrt(2)/M)*janIa[i]*cos(i*delta)
    C2 := C2 + (sqrt(2)/M)*janIa[i+1]*cos(i*delta)
ENDFOR
reIa := RTEF*C2
imIa := RTEF*(C1-C2*cos(delta))/sin(delta)
magIa := SQRT(reIa**2 + imIa**2)

```

4.3.4. Variáveis da Proteção de Barra

Este módulo recebe como entrada os estados das chaves SCs seletoras de barra e das chaves SCs de *bypass* de cada vão, além das variáveis que indicam falha dos DJs. Ele é responsável por determinar o estado lógico das variáveis utilizadas na lógica de *trip* dos DJs que são: PB, ZABFT e ZBBFT, conforme apresentado no Capítulo 3. Além disso, é nesse módulo que se avalia o estado lógico dos *flags* de habilitação das correntes nas zonas ZA, ZB e ZAB, conforme descrito no Capítulo 3, os quais são usados, posteriormente, no módulo *AnaliseDiferencial* para determinar adequadamente as correntes I_{op} e I_{res} .

Quadro 4.7 – Trecho do código que determina o estado lógico das variáveis PB, ZABFT e ZBBFT.

```
-- Setando a lógica de paralelismo das barras pelas seccionadoras
IF (scV1A AND scV1B) OR (scV2A AND scV2B) OR (scV3A AND scV3B) OR
   (scV4A AND scV4B) OR (scV5A AND scV5B) OR (scV6A AND scV6B)
   THEN PB:=1
   ELSE PB:=0
ENDIF

-- Setando a lógica de proteção de falha de disjuntor na barra A
IF BFAMR OR
   (scV1A AND BFV1) OR (scV2A AND BFV2) OR (scV3A AND BFV3) OR
   (scV4A AND BFV4) OR (scV5A AND BFV5) OR (scV6A AND BFV6) OR
   (PB AND ((BFV1 AND scV1B) OR (BFV2 AND scV2B) OR (BFV3 AND scV3B) OR
            (BFV4 AND scV4B) OR (BFV5 AND scV5B) OR (BFV6 AND scV6B)))
   THEN ZABFT:=1
   ELSE ZABFT:=0
ENDIF

-- Setando a lógica de proteção de falha de disjuntor na barra B
IF BFAMR OR
   (scV1B AND BFV1) OR (scV2B AND BFV2) OR (scV3B AND BFV3) OR
   (scV4B AND BFV4) OR (scV5B AND BFV5) OR (scV6B AND BFV6) OR
   (PB AND ((BFV1 AND scV1A) OR (BFV2 AND scV2A) OR (BFV3 AND scV3A) OR
            (BFV4 AND scV4A) OR (BFV5 AND scV5A) OR (BFV6 AND scV6A)))
   THEN ZBBFT:=1
   ELSE ZBBFT:=0
ENDIF
```

Quadro 4.8 – Trecho de código do módulo VariaveisProtecaoBarra, no qual são determinados os estados lógicos dos *flags* de habilitação de corrente na zona ZA.

```
IF (scV1A OR PB)
   THEN fv1ZA:=1
   ELSE fv1ZA:=0
ENDIF
IF (scV2A OR PB)
   THEN fv2ZA:=1
   ELSE fv2ZA:=0
ENDIF
IF (scV3A OR PB)
   THEN fv3ZA:=1
   ELSE fv3ZA:=0
ENDIF
IF (scV4A OR PB)
   THEN fv4ZA:=1
   ELSE fv4ZA:=0
ENDIF
IF (scV5A OR PB)
   THEN fv5ZA:=1
   ELSE fv5ZA:=0
ENDIF
IF (scV6A OR PB)
   THEN fv6ZA:=1
   ELSE fv6ZA:=0
ENDIF
fvAZA:=0 -- TC do amarre ligado à barra A, logo pertence à zona ZB
IF NOT(PB)
   THEN fvbZA:=1
   ELSE fvbZA:=0
ENDIF
```

O trecho de código do módulo `VariaveisProtecaoBarra` referente à determinação do estado lógico das variáveis PB, ZABFT e ZBBFT é apresentado no Quadro 4.7, seguindo a mesma lógica apresentada no Capítulo 3. Por outro lado, o trecho de código no qual são determinados os estados lógicos dos *flags* de habilitação de correntes para a zona ZA é apresentado no Quadro 4.8.

O estado lógico dos *flags* de habilitação de correntes para a zona ZB são determinados de forma análoga à zona ZA, com a diferença de que são avaliados os estados das chaves SCs seletoras de barra B, além do *flag* referente ao TC do AMR que pertence à zona B, que tem lógica contrária a do TC do AMR pertencente à zona A. Já o estado lógico dos *flags* de habilitação das correntes dos vãos das LTs e dos ATs para a zona ZAB são sempre iguais a 1 (um), ao passo que os referentes ao vão AMR são sempre iguais a 0 (zero), conforme discutido no Capítulo 3.

4.3.5. Análise Diferencial

É o módulo que realiza a função fundamental do relé, de verificar se há defeito nas zonas de proteção, através da lógica diferencial percentual. Para cada zona, ele calcula as correntes de operação e restrição, e aplica a lógica de *trip* do elemento 87B, conforme descrito no Capítulo 3. Para isso, o módulo `AnaliseDiferencial` recebe como entrada os fasores estimados para todas as correntes dos vãos conectados ao barramento.

Devido ao dinamismo da lógica de proteção utilizada, causado pela possível variação das correntes que fazem parte de uma zona de proteção, o presente módulo se utiliza dos *flags* de habilitação de correntes, determinados no módulo `VariaveisProtecaoBarra`, para calcular as correntes I_{op} e I_{res} em cada zona de proteção, conforme discutido no Capítulo 3. Isso possibilita o uso de uma única formulação, já levando em consideração os diversos arranjos que o barramento pode assumir. O trecho do código que determina as correntes I_{op} e I_{res} da zona ZA é mostrado no Quadro 4.9. As variáveis I_{aRe} , I_{bRe} e I_{cRe} são as partes reais das correntes nas fases A, B e C de cada vão, respectivamente, ao passo que as variáveis I_{aIm} , I_{bIm} e I_{cIm} são suas partes imaginárias. Por outro lado, as variáveis $fVZA$ são os *flags* de habilitação das correntes na zona A. O cálculo para as diferentes fases e zonas é análogo, mas utilizando-se as correntes e os *flags* de habilitação apropriados.

A fim de se identificar um curto-circuito externo, avaliam-se as taxas de variação das correntes I_{op} e I_{res} , conforme discutido no Capítulo 3. A título de exemplo, apresenta-se no Quadro 4.10 o trecho de código usado no cálculo dessas taxas referentes à zona ZA, sendo o das demais zonas feito de forma análoga. Neste caso, dt é o passo de discretização referente à taxa de amostragem de

16 amostras por ciclo. Além disso, utilizou-se o comando DELAY da linguagem MODELS, que permite o acesso aos valores passados das variáveis. Para tanto, todas as correntes I_{op} e I_{res} precisaram ter sido declaradas como variáveis históricas, mediante o uso do comando HISTORY. O cálculo para as demais zonas de proteção é feito de forma análoga.

Quadro 4.9 – Trecho de código que implementa o cálculo de I_{op} e I_{res} do elemento 87B da fase A da zona ZA.

```
-- Calculando a corrente de operação na fase A
reIopAZA:=IaRe1*fV1ZA+IaRe2*fV2ZA+IaRe3*fV3ZA+
          IaRe4*fV4ZA+IaRe5*fV5ZA+IaRe6*fV6ZA+
          IaReA*fVAZA+IaReB*fVBZA
imIopAZA:=IaIm1*fV1ZA+IaIm2*fV2ZA+IaIm3*fV3ZA+
          IaIm4*fV4ZA+IaIm5*fV5ZA+IaIm6*fV6ZA+
          IaImA*fVAZA+IaImB*fVBZA
IopAZA:=sqrt(reIopAZA**2 + imIopAZA**2)

-- Calculando a corrente de restrição na fase A
IresAZA:=IaMag1*fV1ZA+IaMag2*fV2ZA+IaMag3*fV3ZA+
          IaMag4*fV4ZA+IaMag5*fV5ZA+IaMag6*fV6ZA+
          IaMagA*fVAZA+IaMagB*fVBZA
```

Quadro 4.10 – Trecho de código que implementa o cálculo das taxas de variação de I_{op} e I_{res} dos elementos 87B da zona ZA.

```
dIopAZAdt:=ABS(IopAZA-DELAY(IopAZA,dt))/dt
dIopBZAdt:=ABS(IopBZA-DELAY(IopBZA,dt))/dt
dIopCZAdt:=ABS(IopCZA-DELAY(IopCZA,dt))/dt
dIresAZAdt:=ABS(IresAZA-DELAY(IresAZA,dt))/dt
dIresBZAdt:=ABS(IresBZA-DELAY(IresBZA,dt))/dt
dIresCZAdt:=ABS(IresCZA-DELAY(IresCZA,dt))/dt
```

Em seguida, a lógica de detecção de faltas externas ilustrada no diagrama de blocos da Figura 3.5 é avaliada, conforme apresentado no Quadro 4.11, que ilustra o caso da lógica aplicada à zona ZA. Assim, no caso de uma falta externa ser identificada, a variável FLTEXTZA assume o valor lógico 1 (um), fazendo com que o relé entre num modo de operação mais seguro, no qual a inclinação SLPZA da característica de operação da zona A assume o valor SLP2, neste trabalho escolhido como 0,8. Esse modo de operação se mantém por um intervalo de tempo de 150 ms, a partir do instante de identificação da falta externa, representado pela variável $\tau_{FLTEXTZA}$. Caso contrário, mantém-se o valor da inclinação em SLP1, considerado como sendo 0,3. Nessa lógica, a variável k_{MIN} representa o valor mínimo da taxa de variação a partir do qual se verifica a falta, que foi ajustado de forma empírica para 150 pu/s, após a realização de vários testes. Oportuno se faz mencionar que foi uma escolha de implementação mais conservadora fazer com que a determinação da falta externa não fosse

segregada por fase, de modo que a mudança no valor da inclinação SLPZA da característica de operação da zona A fosse aplicada a todos os elementos 87B de fase.

Por fim, verifica-se o *trip* de cada zona, mediante a avaliação das condições apresentadas na Equação (3.6), considerando o valor da inclinação SLPZA da zona ZA apropriado e que a abertura de todos os DJs dos vãos seja tripolar. Isso é ilustrado no Quadro 4.12 para o caso da zona ZA, sendo feito para as demais zonas de forma análoga. A variável IPMIN representa a corrente mínima de operação, como apresentado no Capítulo 3, que foi ajustada nesse trabalho para o valor típico de 1 pu.

Quadro 4.11 – Trecho de código que implementa a lógica de detecção de faltas externas aplicada à zona ZA.

```

-- Lógica de detecção de faltas externas - Parte 1
IF (FLTEXTZA=0) AND
  (((dIopAZAdt<k_MIN) AND (dIresAZAdt>k_MIN)) AND
   ((delay(dIopAZAdt,dt)<k_MIN) AND
    (delay(dIresAZAdt,dt)>k_MIN))) OR
  (((dIopBZAdt<k_MIN) AND (dIresBZAdt>k_MIN)) AND
   ((delay(dIopBZAdt,dt)<k_MIN) AND
    (delay(dIresBZAdt,dt)>k_MIN))) OR
  (((dIopCZAdt<k_MIN) AND (dIresCZAdt>k_MIN)) AND
   ((delay(dIopCZAdt,dt)<k_MIN) AND
    (delay(dIresCZAdt,dt)>k_MIN))))
THEN
  SLPZA:=SLP2
  FLTEXTZA:=1
  tFLTEXTZA:=t
ENDIF

-- Lógica de detecção de faltas externas - Parte 2
IF (FLTEXTZA=1) AND (ABS(t-tFLTEXTZA)>150.E-3)
THEN
  SLPZA:=SLP1
  FLTEXTZA:=0
ENDIF

```

Quadro 4.12 – Trecho de código que implementa a lógica de *trip* da zona ZA.

```

IF (((IopAZA>IPMIN) AND (IopAZA>SLPZA*IresAZA)) OR
    ((IopBZA>IPMIN) AND (IopBZA>SLPZA*IresBZA)) OR
    ((IopCZA>IPMIN) AND (IopCZA>SLPZA*IresCZA)))
THEN
  trpZA:=1
ENDIF

```

Portanto, o módulo `AnaliseDiferencial` implementa simultaneamente o algoritmo de detecção de faltas externas e o plano operacional com característica adaptativa do relé, explicados no Capítulo 3 e mostrados nas Figuras 3.5 e 3.4 respectivamente. Os parâmetros dessa implementação são mostrados na Tabela 4.1, que os relaciona com o nome que foi dado a cada um deles no código de implementação, e mostra seus valores nesta simulação.

Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados na implementação do módulo *AnaliseDiferencial*.

Variável	Nome da variável no código	Valor da variável na implementação
I_{min}	IPMIN	1 pu
K_1	SLP1	0,3
K_2	SLP2	0,8
k_{min}	k_MIN	150 pu/s

4.3.6. Lógica de *Trip*

Este módulo recebe as seguintes variáveis lógicas como entrada: Estado das chaves SCs seletoras de barra e de *by-pass* (obtidos diretamente do ATP); ZABFT e ZBBFT (determinados pelo módulo *VariaveisProtecaoBarra*); ZA, ZB e ZAB (determinados pelo módulo *AnaliseDiferencial*). Sua função é calcular os comandos de *trip* a serem enviados para os DJs dos vãos conectados à barra defeituosa. A lógica avaliada é aquela apresentada na Tabela 3.5, a qual já contempla as situações de transferência da proteção dos vãos e da proteção de falha de DJ, além do uso da zona de supervisão para aumentar a segurança do esquema.

É importante ressaltar que se considerou que o estado lógico das variáveis que indicam falha dos DJs seria definido pela proteção de cada um dos vãos conectados ao barramento. Assim, muito embora toda a lógica da proteção de falha de DJ tenha sido implementada, atribuiu-se o estado lógico 0 (zero) a todas essas variáveis, já que a proteção dos vãos não foi incluída na simulação descrita no presente trabalho de dissertação.

A título de exemplo, apresenta-se no Quadro 4.13 o trecho do código do módulo *LogicaTrip* no qual se avalia a lógica de *trip* do DJ do vão 01, aqui representando a LT01. As variáveis ZA, ZB e ZAB representam o estado lógico do *trip* das zonas de proteção; enquanto que as variáveis *scVA* e *scVB* representam os estados lógicos das chaves SCs seletoras das barras A e B, respectivamente. Já a variável *tpDJV* representa o estado lógico do *trip* para o DJ do vão em questão. A lógica de avaliação do *trip* dos DJs dos demais vãos é feito de forma análoga, com exceção do DJAMR, que tem uma lógica diferenciada, conforme apresentado na Tabela 3.5.

Quadro 4.153 – Trecho de código que implementa a lógica de *trip* para o DJ do vão 01.

```
IF (((ZA AND scV1A) OR (ZB AND scV1B)) AND ZAB) OR  
    (ZABFT AND scV1A) OR (ZBBFT AND scV1B))  
    THEN tpDJV1:=1  
    ELSE tpDJV1:=0  
ENDIF
```

4.4. DISJUNTOR

Os DJs foram representados no ATP por chaves do tipo 13, que possuem o seu estado lógico definido a partir de uma variável da MODELS. Dessa forma, o modelo *Disjuntor*, é o que define o estado dos DJs do sistema de potência no ATP. Para tanto, considerou-se um atraso típico de dois ciclos de 60 Hz na sua atuação, o que corresponde a 33,333 ms (ANDERSON, 1999). Além disso, Como a chave do tipo 13 não possui uma lógica de abertura com a passagem da corrente pelo zero, a mesma precisou ser implementada. Para tanto, verifica-se o sinal (+ ou -) da corrente no DJ quando passados dois ciclos após o recebimento do sinal de *trip* vindo da proteção de barra, de modo que o comando de abertura para a chave do tipo 13 que representa o DJ no ATP só é dado quando houver uma mudança desse sinal. Dessa forma, propicia-se a abertura independente de cada fase do DJ quando a corrente pela mesma passar pelo zero.

Quadro 4.164 – Trecho de código que implementa o comando de abertura dos DJs.

```
IF BF=0 THEN
  IF tripRL=1 THEN
    sigAct:=1
  ENDIF

  IF sigAct=1 THEN
    IF tIni=0 THEN
      tIni:=t
    ENDIF

    IF (t-tIni)>td THEN
      IF cont=0 THEN
        cont:=cont+1
        sigIa:=SIGN(ia)
        sigIb:=SIGN(ib)
        sigIc:=SIGN(ic)
      ENDIF

      IF sigIa<>SIGN(ia) AND tripDA>0 THEN
        tripDA:=-1
      ENDIF

      IF sigIb<>SIGN(ib) AND tripDB>0 THEN
        tripDB:=-1
      ENDIF

      IF sigIc<>SIGN(ic) AND tripDC>0 THEN
        tripDC:=-1
      ENDIF
    ENDIF
  ENDIF
ENDIF
```

O trecho de código apresentado no Quadro 4.14 ilustra a lógica avaliada para se definir o envio do comando de abertura das chaves do tipo 13 no ATP, que representam cada polo do DJ de um

vão conectado ao barramento. A variável BF representa o estado de falha do DJ, enquanto que $trip_{RL}$ é o *trip* recebido pelo módulo `LogicaTrip` no instante t_{Ini} . Já $sigAct$ é o sinal para atuação do DJ e $sigIa$, $sigIb$ e $sigIc$ são as variáveis que indicam o sinal (+ ou -) das correntes nas fases A, B e C, respectivamente, ao passo que $tripDA$, $tripDB$ e $tripDC$ são os estados dos polos das fases A, B e C do DJ no ATP, respectivamente.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. O SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO

O sistema elétrico cujo diagrama unifilar é mostrado na Figura 4.1 foi considerado como estudo de caso no presente trabalho de dissertação. Ele foi simulado no software ATP, enquanto que o seu sistema de proteção foi modelado na MODELS, conforme apresentado no Capítulo 4. Basicamente, o sistema teste consiste de um barramento de 230 kV com a configuração de barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves, no qual são conectados dois vãos de ATs e quatro vãos de LTs, além do próprio vão AMR que conecta as duas barras. Os parâmetros dos componentes do sistema são apresentados nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3. Na Tabela 5.1, estão os parâmetros das LTs, que foram consideradas todas iguais e modeladas como perfeitamente transpostas, com parâmetros distribuídos e constantes com a frequência. Na Tabela 5.2 são apresentados os parâmetros dos ATs, enquanto que na Tabela 5.3 são apresentados os parâmetros dos equivalentes de Thévenin conectados nos terminais remotos das LTs e ATs.

A fim de avaliar o desempenho do sistema de proteção modelado na MODELS, foram simulados diversos tipos de curtos-circuitos no sistema teste da Figura 4.1. A seguir, apresentam-se os resultados obtidos para seis desses curtos-circuitos.

Tabela 5.1 – Parâmetros das LTs do sistema simulado.

	Z_0	Z_1	Y_0	Y_1	Comprimento
LTs	$0,532 + j1,541 \Omega/\text{km}$	$0,098 + j0,510 \Omega/\text{km}$	$2,293 \mu\text{S}/\text{km}$	$3,252 \mu\text{S}/\text{km}$	100 km

Tabela 5.2 – Parâmetros dos ATs do sistema simulado.

	Tensão 1° enrolamento (Lado da barra)	Tensão 2° enrolamento (Lado da LT)	Tensão 3° enrolamento (Em aberto)	Potência
AT01	230 kV	69 kV	13,8 kV	3x100 MVA
AT02	230 kV	500 kV	13,8 kV	3x150 MVA

Tabela 5.3 – Parâmetros dos equivalentes de Thévenin do sistema simulado.

	Amplitude e Fase	Z_0	Z_1
FTE01	$1\angle 0^\circ$ pu	$1,014 + j18,754 \Omega$	$0,871 + j25,661 \Omega$
FTE02	$1,02\angle 20^\circ$ pu	$1,127 + j20,838 \Omega$	$0,968 + j28,513 \Omega$
FTE03	$0,98\angle 40^\circ$ pu	$1,127 + j20,838 \Omega$	$0,968 + j28,513 \Omega$
FTE04	$0,99\angle -20^\circ$ pu	$1,014 + j18,754 \Omega$	$0,871 + j25,661 \Omega$
FTE05	$0,98\angle 40^\circ$ pu	$1,127 + j20,838 \Omega$	$0,968 + j28,513 \Omega$
FTE06	$0,99\angle -20^\circ$ pu	$1,014 + j18,754 \Omega$	$0,871 + j25,661 \Omega$

5.2. CURTOS-CIRCUITOS COM O SISTEMA NA SUA CONFIGURAÇÃO NORMAL

Com o sistema operando na sua configuração normal, as duas barras permanecem energizadas e interligadas via o DJAMR, com os vãos distribuídos entre elas de forma homogênea, conforme ilustrado na Figura 5.1. Da análise do estado das chaves SCs seletoras de barra, observa-se que são normalmente conectados na barra A os vãos LT01, LT02 e AT02, enquanto que os vãos AT01, LT03 e LT04 são conectados na barra B. Nessa situação, o curto-circuito em uma das barras resultará na abertura de apenas os DJs conectados na barra defeituosa, mantendo a outra barra e os seus vãos correspondentes ainda em operação. A seguir, apresentam-se situações de curto-circuito com o sistema operando com essa configuração.

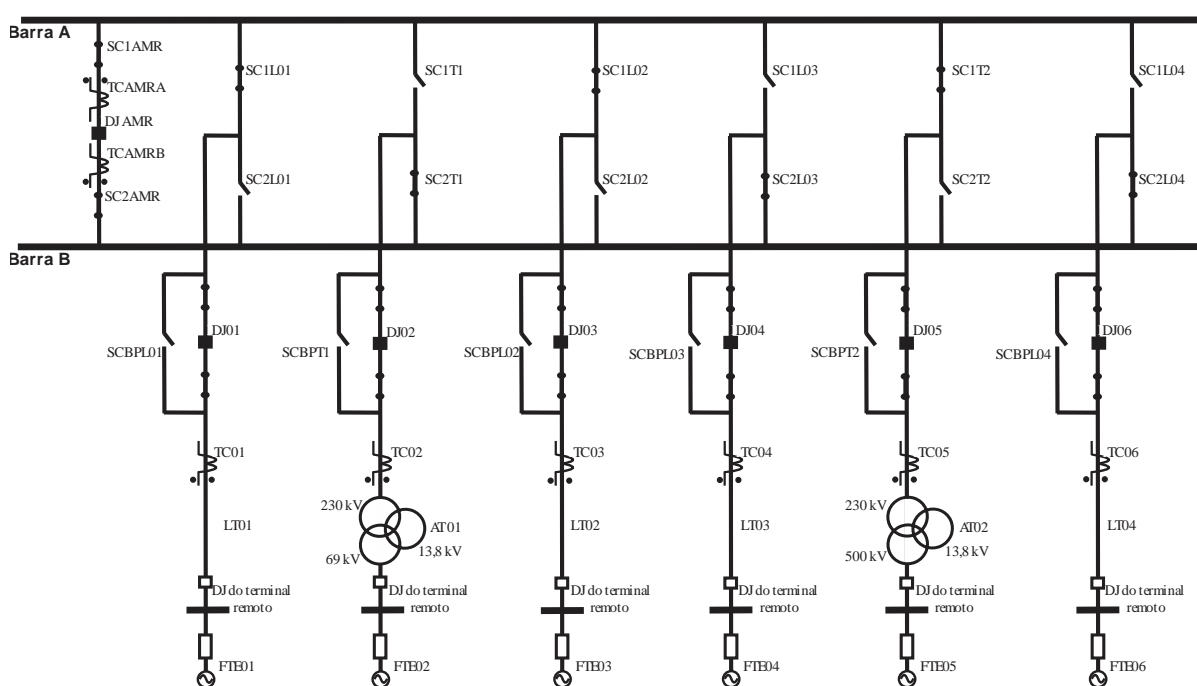


Figura 5.1 – Sistema operando em sua configuração normal.

5.2.1. Curto-Circuito Trifásico na Barra A – Caso 1

Na Figura 5.2 são apresentados os estados de algumas das variáveis avaliadas na lógica de proteção implementada. As variáveis ZA, ZB e ZAB representam os *trips* dos elementos 87B das zonas de proteção, enquanto que as variáveis FLEXTZA, FLEXTZB e FLEXTZAB os *flags* de detecção de faltas externas em cada uma das zonas. A variável PB indica a condição de paralelismo de barras, conforme discutido no Capítulo 3. Já as variáveis DJ01, DJ02, DJ03, DJ04, DJ05, DJ06 e DJAMR representam o estado lógico tripolar dos DJs dos vãos conectados ao barramento. Observa-se que, no caso de um curto-circuito trifásico na barra A, as zonas ZA e ZAB detectaram o defeito 4,2 ms após o seu início em 42 ms. Como resultado, um comando de *trip* foi emitido para os DJs dos vãos conectados na barra A, a saber: DJ01, DJ03, DJ05 e DJAMR, que tiveram sua abertura tripolar 40,35 ms após o recebimento do comando de *trip*. Por outro lado, a zona ZB não detectou o defeito. Além disso, a lógica de detecção de faltas externas atuou corretamente indicando uma falta externa à zona ZB em 4,2 ms, passando a operar no modo de operação para faltas externas, no qual a inclinação da sua característica de operação passa a ser 0,8, permanecendo nele durante 150 ms, quando ela volta ao seu valor normal que é de 0,3.

Nas Figuras 5.3 são ilustradas as operações dos elementos 87B de todas as fases das zonas ZA, ZB e ZAB. Pode-se verificar que, no caso de um curto-circuito trifásico na barra A, todos os elementos da zona ZA e ZAB detectaram o defeito. Por outro lado, observa-se que, os elementos da zona ZB permaneceram na região de restrição.

Nas Figuras 5.4 são apresentadas as correntes nos DJs dos vãos conectados ao barramento, vistas do secundário dos TCs correspondentes, para o Caso 1. Observa-se que, o comando de *trip* enviado pela zona ZA culminou na abertura apenas dos vãos conectados na barra A. Consequentemente, houve uma redistribuição do fluxo de potência dentre os vãos que permaneceram conectados na barra B, que se manteve em operação estável.

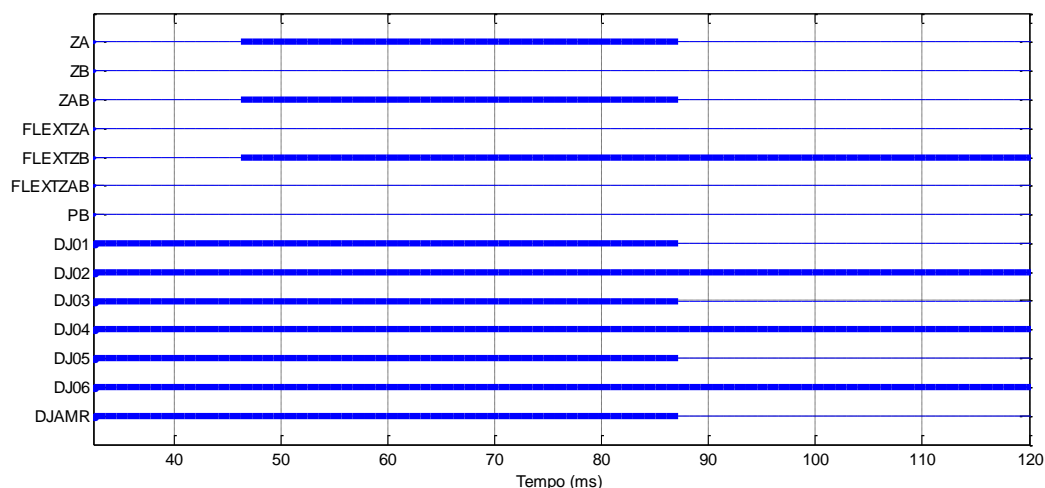


Figura 5.2 – Estado das variáveis lógicas do relé para o Caso 1.

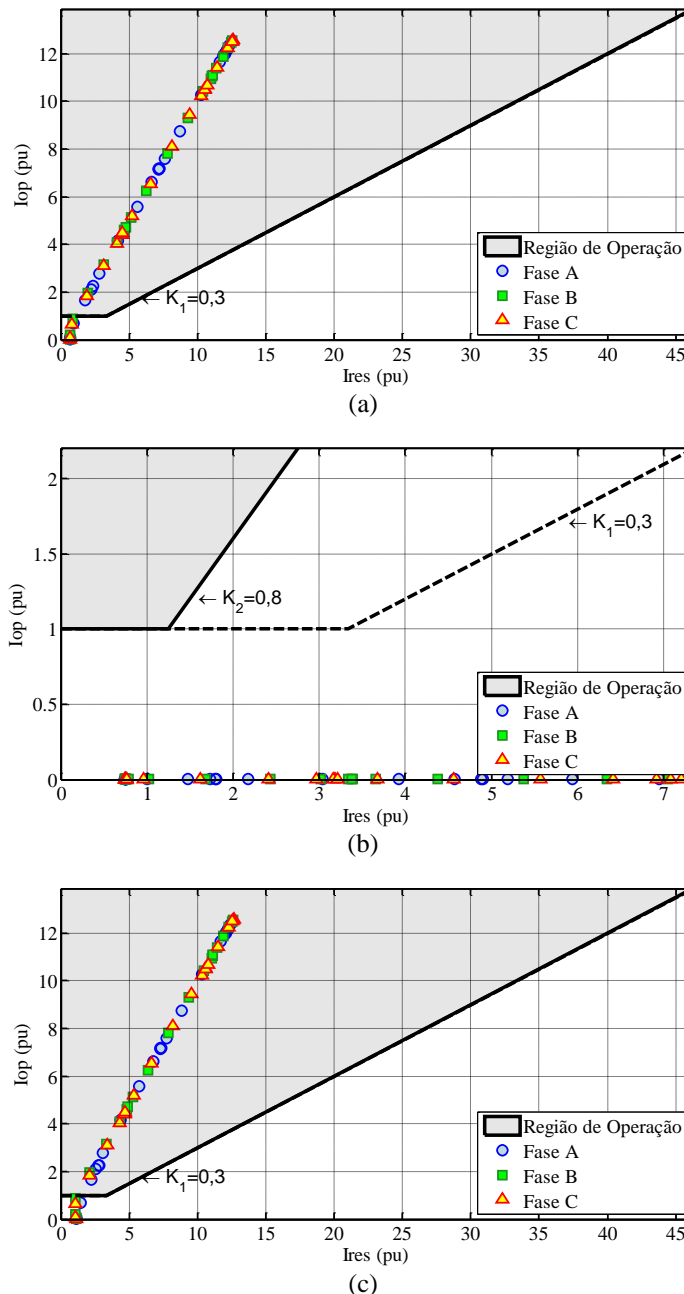


Figura 5.3 – Planos operacionais das zonas para o Caso 1: (a) ZA, (b) ZB e (c) ZAB.

5.2.2. Curto-Circuito no DJAMR – Caso 2

Outra falta analisada foi um curto-circuito no DJAMR. O intuito era verificar se a ocorrência de um defeito nessa localidade realmente seria detectada pelas zonas de proteção das barras A e B simultaneamente, por ser um trecho do circuito em que há a superposição de ZA e ZB. Para tanto, aplicou-se um curto-circuito trifásico sem envolvimento da terra próximo do DJAMR, em 42 ms. Neste caso, como era de se esperar, todas as zonas detectaram o curto-circuito 4,2 ms após o seu início, já que este ocorreu em um local supervisionado por ZA e ZB simultaneamente. Quanto aos *flags* de detecção de faltas externas, nenhum deles foi ativado. Isso é mostrado na Figura 5.5.

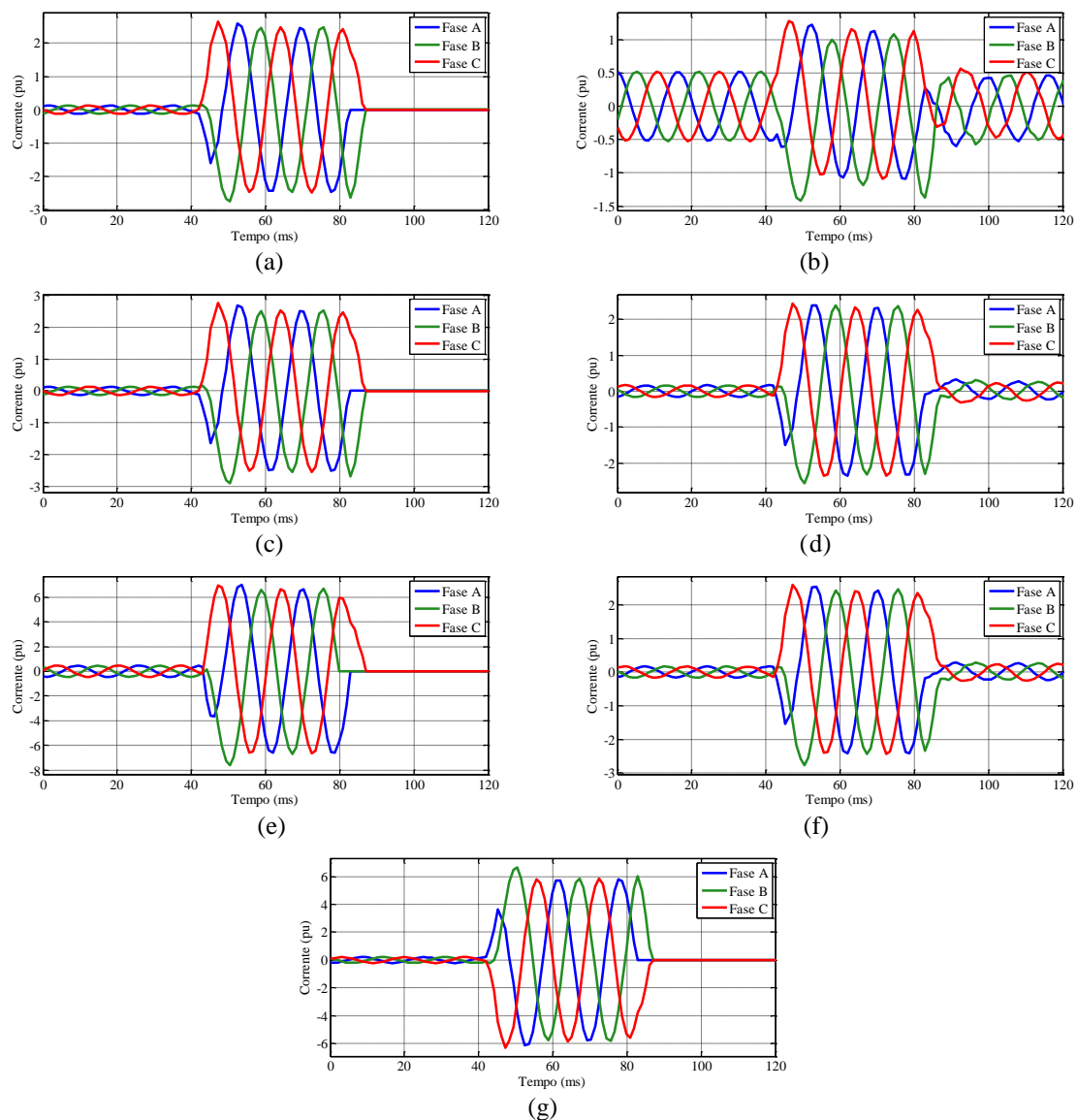


Figura 5.4 – Correntes nos DJs do sistema para o Caso 1: (a) DJ01, (b) DJ02, (c) DJ03, (d) DJ04, (e) DJ05, (f) DJ06, (g) DJAMR.

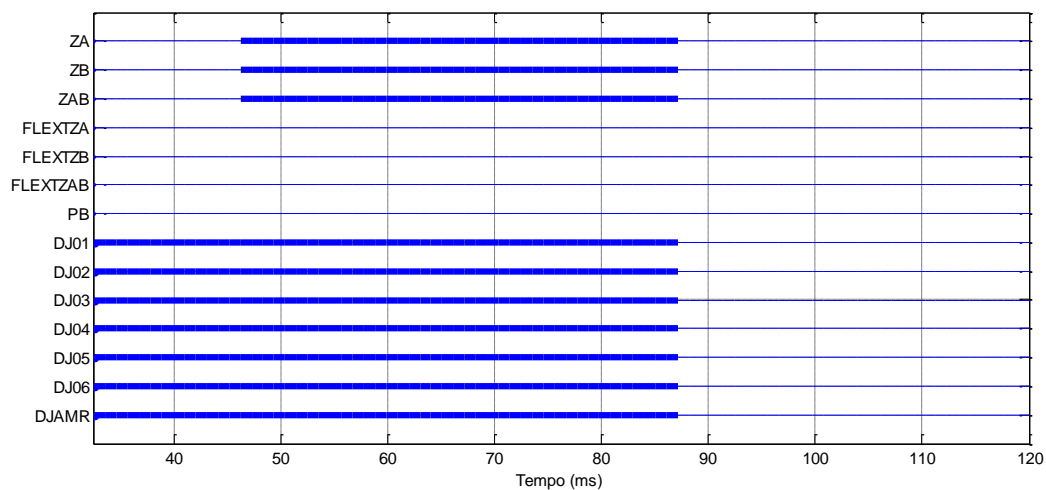


Figura 5.5 - Estado das variáveis lógicas do relé para o Caso 2.

Dessa forma, todos os DJs do sistema receberam o comando de abertura, e foram abertos 45,15 ms após o recebimento do comando de *trip*. Como esperado, os elementos 87B das três zonas entraram em sua região de operação, o que pode ser observado na Figura 5.6.

Nas Figuras 5.7, são apresentadas as correntes nos DJs dos vãos conectados ao barramento, vistas do secundário dos TCs correspondentes, para o Caso 2. Pode-se observar a abertura de todos os DJs do sistema após o recebimento do comando de *trip*.

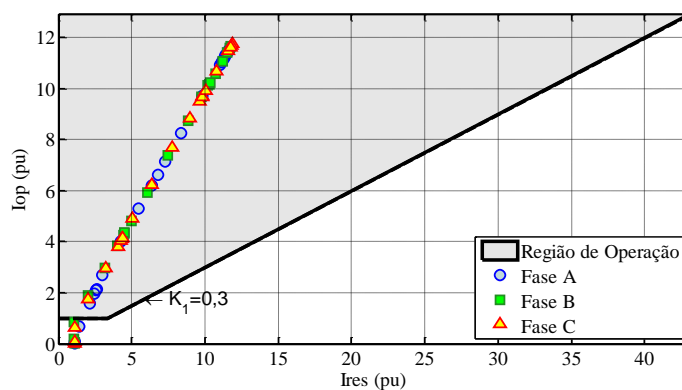
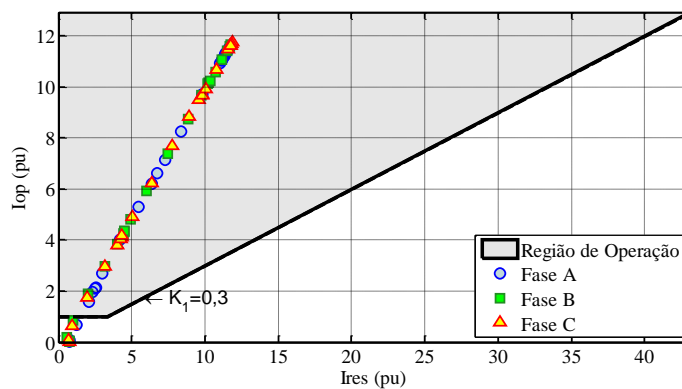
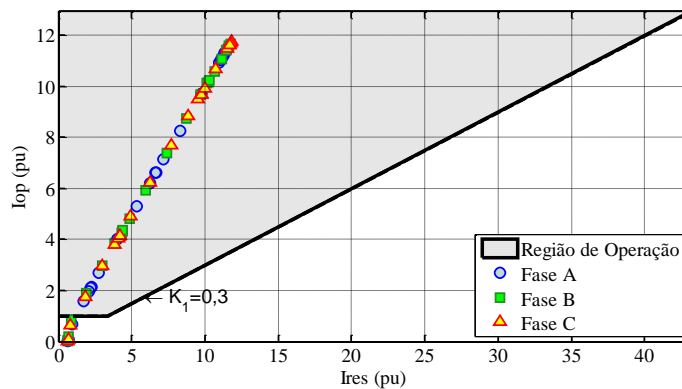


Figura 5.6 – Planos operacionais das zonas para o Caso 2: (a) ZA, (b) ZB e (c) ZAB.

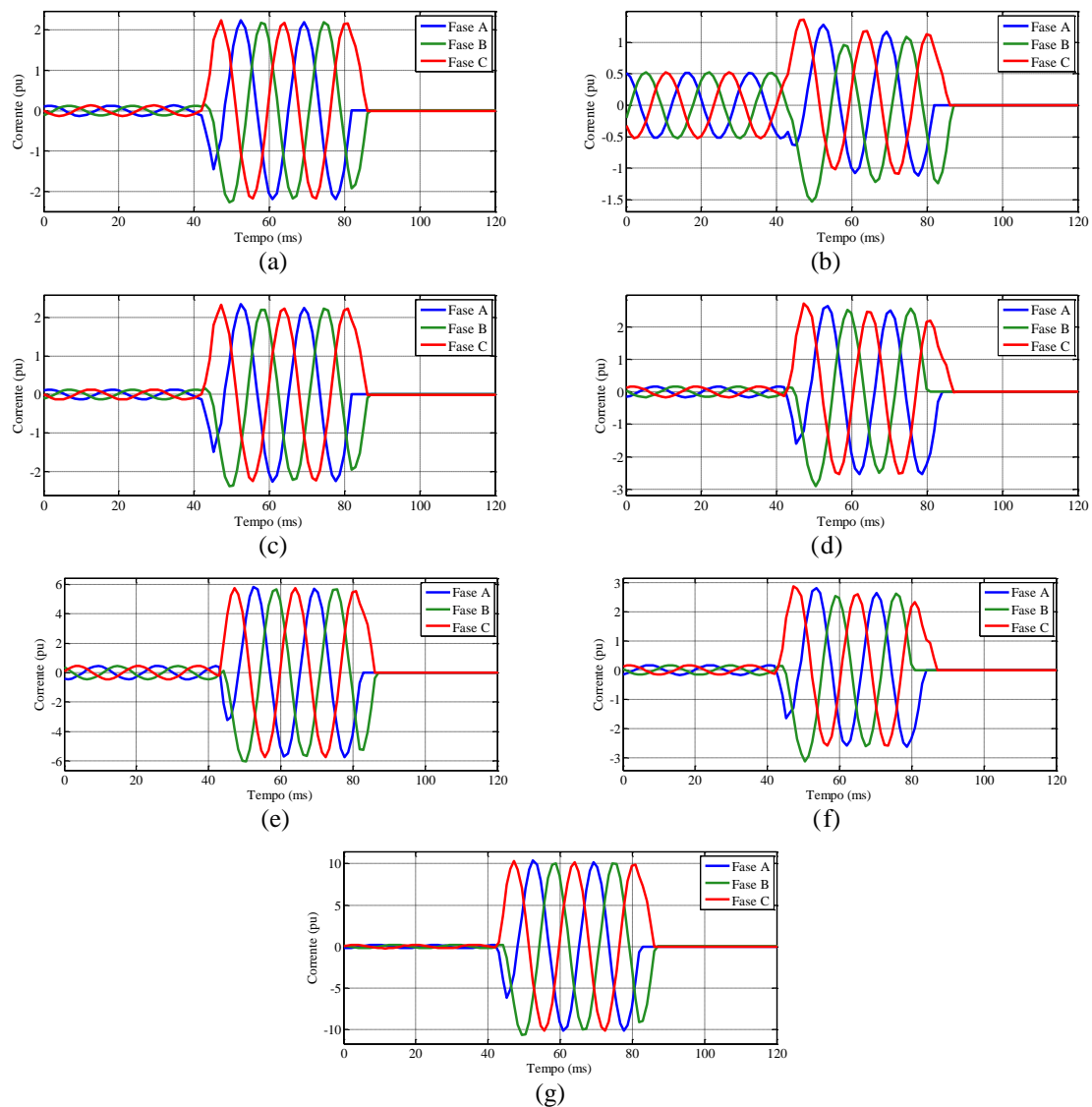


Figura 5.7 – Correntes nos DJs do sistema para o Caso 2: (a) DJ01, (b) DJ02, (c) DJ03, (d) DJ04, (e) DJ05, (f) DJ06, (g) DJAMR.

5.2.3. Curto-Circuito Externo sem Saturação do TC – Caso 3

Avaliou-se também o comportamento do relé em situação de falta externa à sua zona de proteção, com a barra operando em sua configuração normal. Para tanto, aplicou-se um curto-circuito monofásico na fase A da LT01, em 5% do seu comprimento, medidos a partir da barra, em 42 ms. Neste caso, como era de se esperar, nenhuma das zonas detectou o curto-circuito, já que o mesmo foi externo a todas elas, conforme observado na Figura 5.8. No entanto, os *flags* de detecção de faltas externas das três zonas foram ativados. Primeiramente FLEXTZA e FLEXTZAB, 4,2 ms após o início do defeito, e logo depois FLEXTZB, em 9,45 ms após o início do defeito. Assim, nenhum dos DJs do sistema recebeu o comando de *trip*, permanecendo todos fechados. Além disso, as três zonas passaram a operar no modo de operação para faltas externas, alterando a inclinação de suas características de operação para 0,8. E assim permaneceram durante 150 ms, quando a inclinação voltou ao seu valor

normal de 0,3. Como esperado, os elementos 87B de nenhuma das zonas entrou em sua região de operação, visto que o curto-circuito foi externo a todas elas, o que pode ser observado na Figura 5.9.

Nas Figuras 5.7, são apresentadas as correntes nos DJs dos vãos conectados ao barramento, vistas do secundário dos TCs correspondentes, para o Caso 3. Como nenhum DJ do sistema recebeu o comando de *trip* e como a proteção do vão LT01 não foi implementada nesse trabalho, o curto-circuito na LT01 não foi extinto durante a simulação.

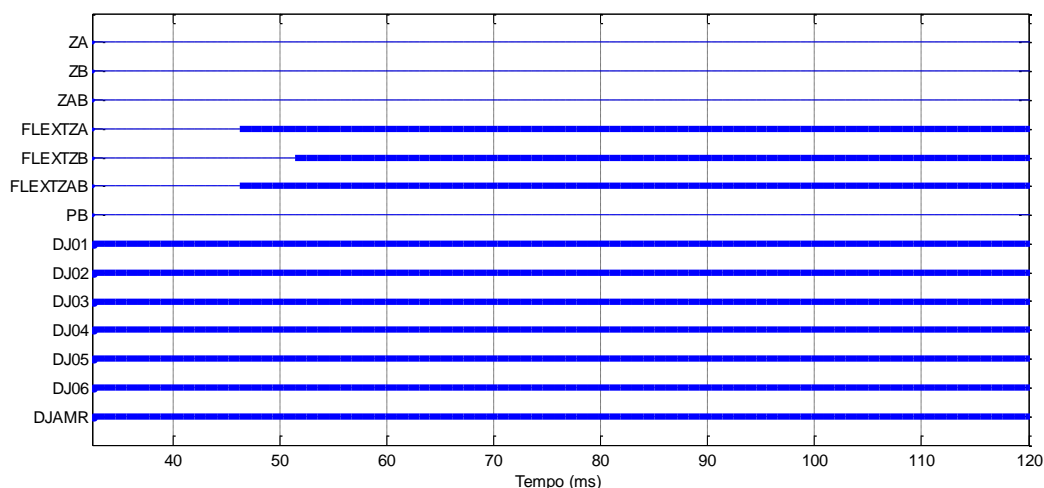


Figura 5.8 - Estado das variáveis lógicas do relé para o Caso 3.

5.2.4. Curto-circuito Externo com Saturação do TC – Caso 4

A fim de avaliar o efeito da saturação do núcleo magnético dos TCs no desempenho da proteção, aplicou-se em 42 ms um curto-circuito monofásico na LT01, no mesmo local considerado no Caso 3, mas dessa vez na fase C. Para simular o efeito da saturação do TC01 aumentou-se, propositalmente, sua impedância secundária até que seu núcleo magnético saturasse. O efeito dessa saturação fica claro, pela forma das correntes medidas no secundário do TC01 (referentes à LT01).

Conforme pode ser observado na Figura 5.11, da mesma forma que no Caso 3, nenhuma das zonas de proteção detecta o defeito, mas as variáveis FLEXTZA, FLEXTZB e FLEXTZAB são ativadas, visto que o curto é externo a todas as zonas. Primeiramente, FLEXTZA é ativada em 4,2 ms após o início do defeito, enquanto que FLEXTZB e FLEXTZAB foram ativadas após 5,25 ms. Conseqüentemente, nenhum DJ do sistema recebeu o comando de *trip*, permanecendo todos fechados.

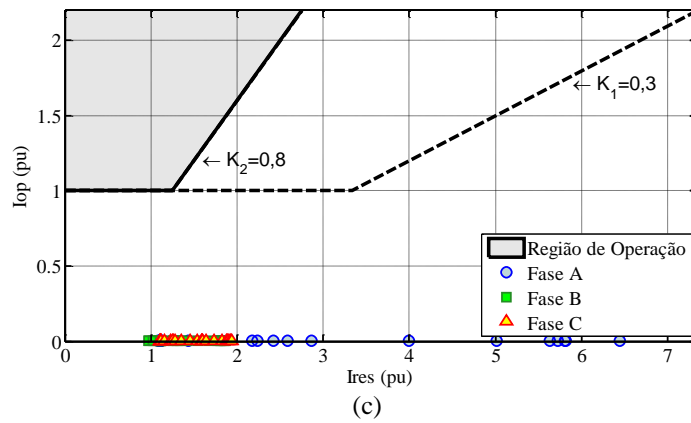
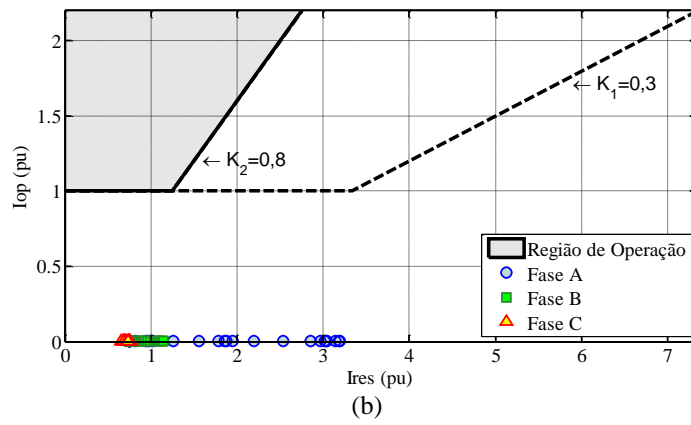
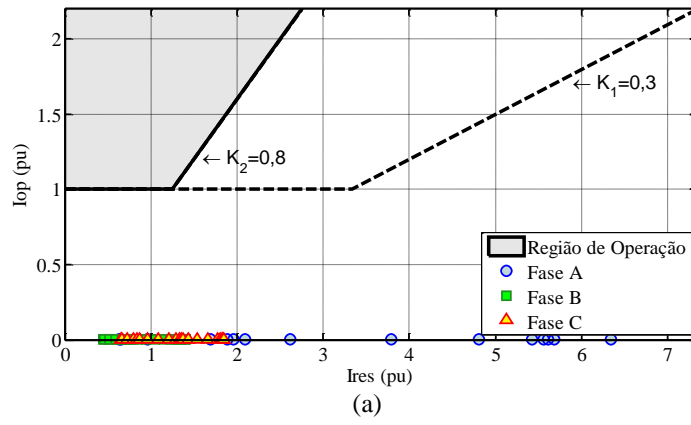


Figura 5.9 – Planos operacionais das zonas para o Caso 3: (a) ZA, (b) ZB e (c) ZAB.

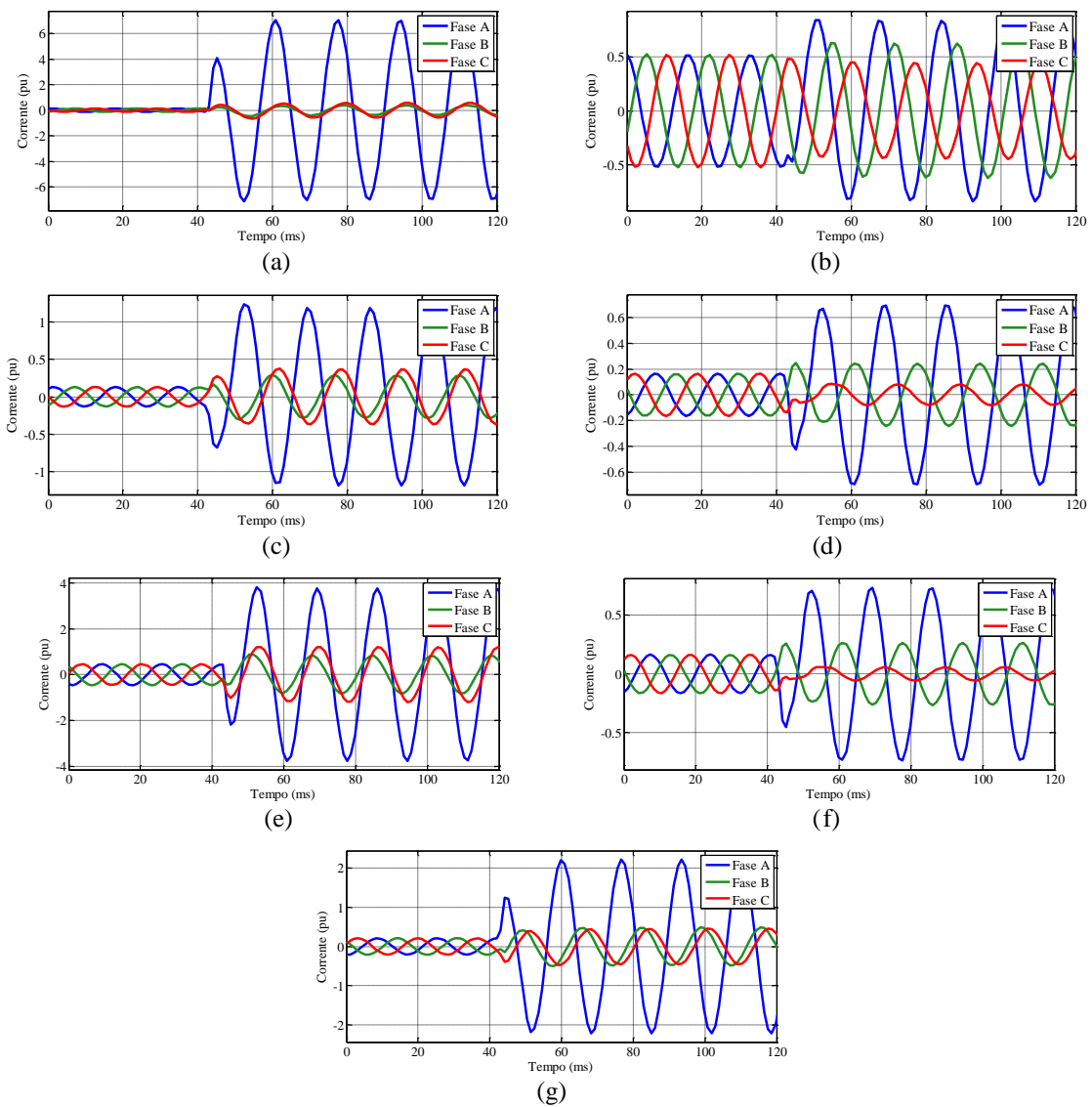


Figura 5.10 – Correntes nos DJs do sistema para o Caso 3: (a) DJ01, (b) DJ02, (c) DJ03, (d) DJ04, (e) DJ05, (f) DJ06, (g) DJAMR.

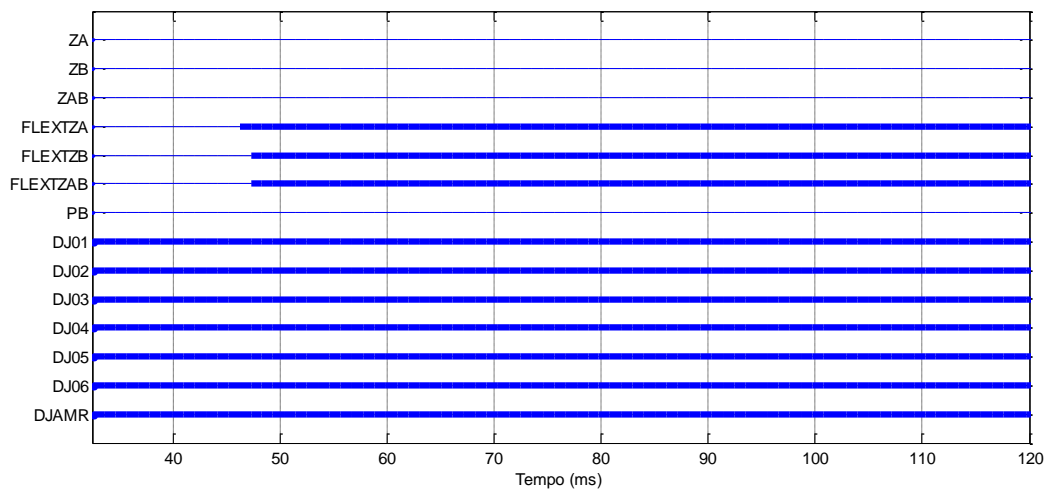


Figura 5.11 – Estado das variáveis lógicas do relé para o Caso 4.

Da mesma forma que no Caso 3, as características de operação das três zonas passaram a ter inclinação 0,8, e em nenhuma delas o relé saiu de sua região de restrição, como mostra a Figura 5.12. Percebe-se ainda que o elemento 87B da fase C das zonas ZA e ZAB teria identificado o curto-circuito em suas regiões de operação, no caso em que a inclinação de suas características de operação tivesse sido mantida em 0,3. Conseqüentemente, isso causaria o envio de um sinal de *trip* indevido, desconectando os vãos ligados à barra A de forma equivocada. Isso ocorre justamente devido à saturação do núcleo magnético do TC da LT01, que resulta no surgimento de uma corrente de operação espúria nas zonas ZA e ZAB. Isso já não é verificado na zona ZB, pelo fato do TC da LT01 não pertencer à mesma. Assim, os elementos 87B da zona ZB mantêm-se estáveis na sua região de restrição.

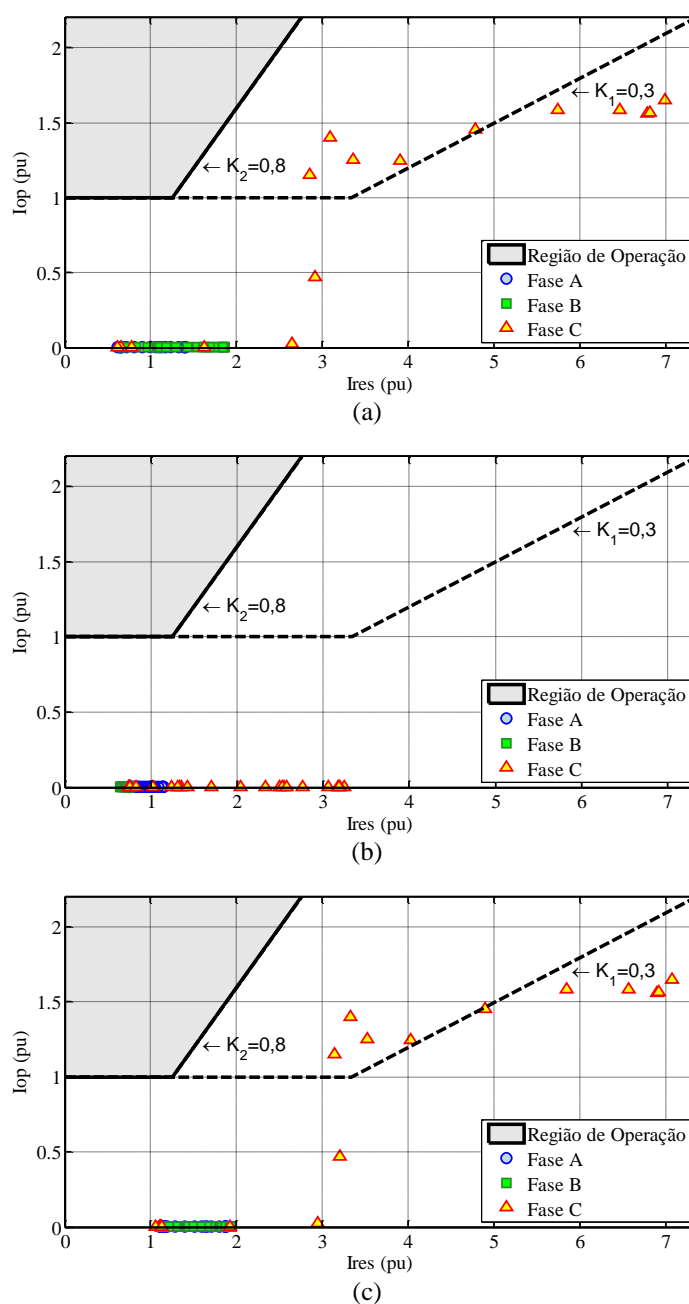


Figura 5.12 – Planos operacionais das zonas para o Caso 4: (a) ZA, (b) ZB e (c) ZAB.

Como mostra a Figura 5.13, nenhum dos DJs dos vãos abriu, uma vez que a proteção de barra não atuou, já que se trata de um curto-circuito externo. Assim, o curto-circuito monofásico na fase C permaneceu sem ser extinto até o final da simulação. Além disso, fica claro na Figura 5.13(a) que o TC da LT01 estava saturado, uma vez que a forma de onda da corrente em seu secundário está distorcida. No entanto, graças à lógica de detecção de faltas externas, associada à mudança adaptativa da inclinação da característica de operação, a proteção não atuou indevidamente, mesmo no caso em que se fez presente o problema da saturação do núcleo magnético do vão defeituoso.

5.3. CURTOS-CIRCUITOS NA LT04 COM SUA PROTEÇÃO TRANSFERIDA

Conforme discutido no Capítulo 3, a configuração de barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves permite que um DJ seja liberado para manutenção, mantendo-se o seu vão correspondente ainda em operação, mediante o fechamento da sua chave de *bypass* e o remanejamento de todos os vãos em uma das barras, que passa a operar como barra principal, com exceção daquele cujo DJ está liberado para manutenção, que fica isolado na outra barra, que opera como barra de transferência. Nessa situação, o comando de *trip* da proteção do vão é então transferido para o DJAMR (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2009).

A fim de verificar o desempenho da lógica de proteção implementada para esta situação, considerou-se que o sistema operava com o arranjo ilustrado na Figura 5.14, no qual o DJ da LT04 encontra-se em manutenção, de modo que o *trip* da proteção desse vão está transferido para o DJAMR, mas ele continua conectado a barra B por meio da sua chave SC de *bypass*. Além disso, observa-se que todos os outros vãos foram remanejados para a barra A, que passou a operar como barra principal. Nessa situação, a zona ZB é constituída apenas dos vãos LT04 e AMR, ao passo que a zona ZA é constituída dos vãos LT01, LT02, LT03, AT01, AT02 e AMR.

A seguir, descreve-se o comportamento do sistema de proteção para o caso de um curto-circuito monofásico na LT04, enquanto ela estiver com sua proteção transferida para o DJAMR.

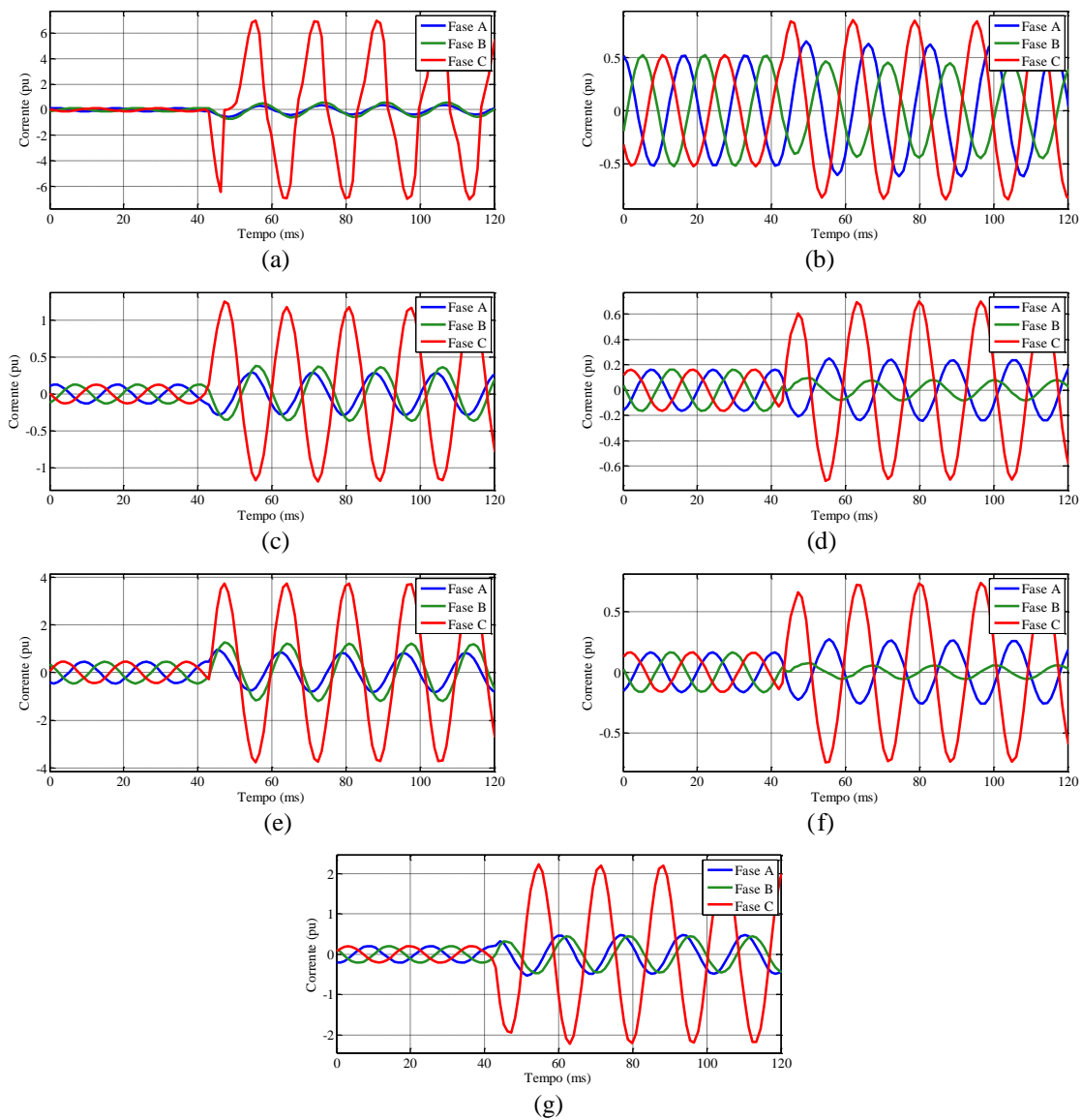


Figura 5.13 – Correntes nos DJs do sistema para o Caso 4: (a) DJ01, (b) DJ02, (c) DJ03, (d) DJ04, (e) DJ05, (f) DJ06, (g) DJAMR.

5.3.1. Curto-circuito na LT04 – Caso 5

Para o sistema operando com o arranjo ilustrado na Figura 5.14, no qual a proteção da LT04 encontra-se transferida para o DJAMR, considerou-se a ocorrência em 42 ms de um curto-circuito monofásico na fase C da LT04, em 20% do seu comprimento, medidos a partir da barra.

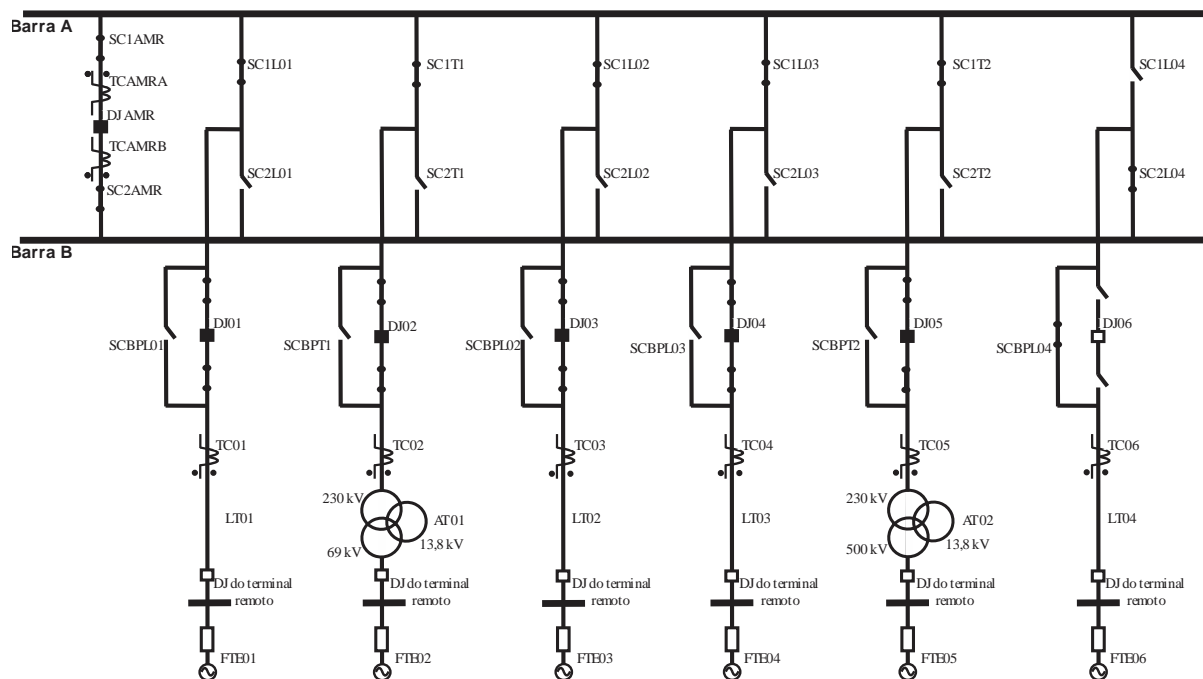


Figura 5.14 – Arranjo do sistema operando com a proteção da LT04 transferida para o DJAMR.

Neste caso, como o curto-circuito foi externo a todas as zonas de proteção, nenhuma delas detectou-o, de modo que nenhum DJ do sistema recebeu comando de *trip*, conforme ilustrado na Figura 5.15. Por outro lado, a lógica de detecção de faltas externas operou corretamente, fazendo com que os *flags* FLEXTZA, FLEXTZB e FLEXTZAB passassem para o estado lógico 1 (um) 5,25 ms após o início do defeito. Assim, todas as zonas de proteção passaram a operar no seu modo de operação para faltas externas, provocando a mudança da inclinação das suas características de operação para 0,8 durante 150 ms, conforme ilustrado na Figura 5.16. Além disso, observa-se que, como esperado, todos os elementos 87B das zonas de proteção mantiveram-se na sua região de restrição.

Nas Figuras 5.14, são apresentadas as correntes nos DJs dos vãos conectados ao barramento, vistas do secundário dos TCs correspondentes, para o Caso 5. Como já mencionado, nenhum dos DJs dos vãos abriu, de modo que o curto monofásico na fase C permaneceu sem ser extinto até o final da simulação. Neste caso, a proteção da LT04, não implementada neste trabalho de dissertação, é que seria a responsável pela extinção desse defeito.

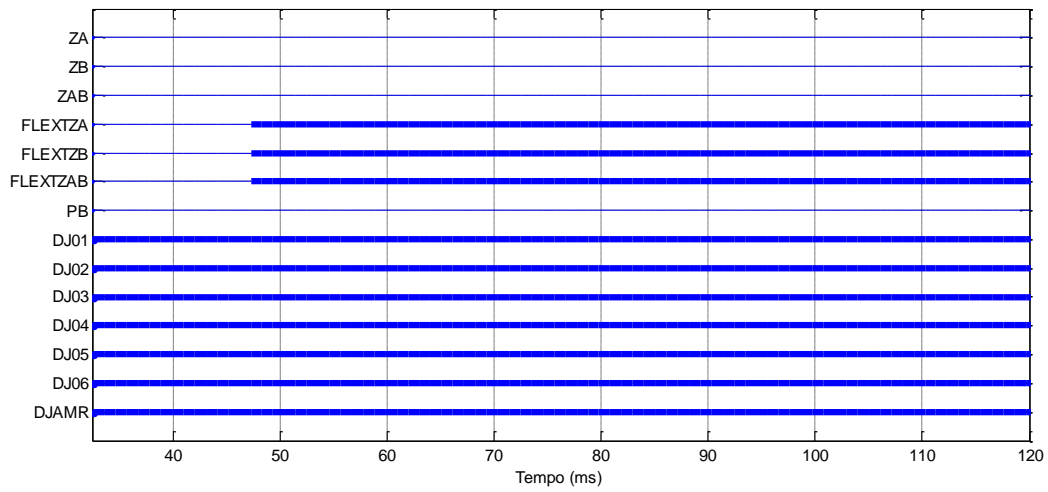


Figura 5.15 – Estado das variáveis lógicas do relé para o Caso 5.

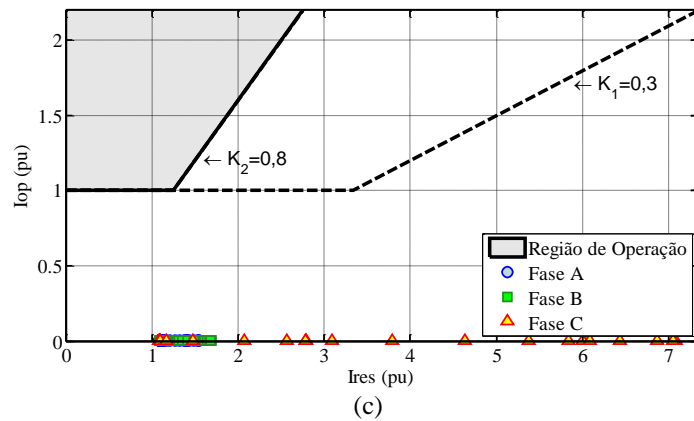
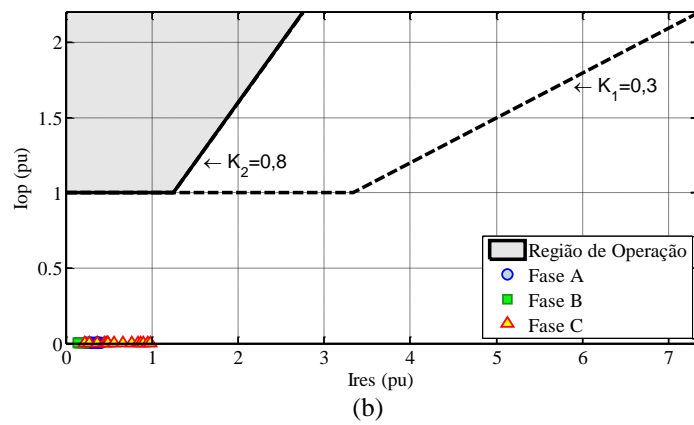
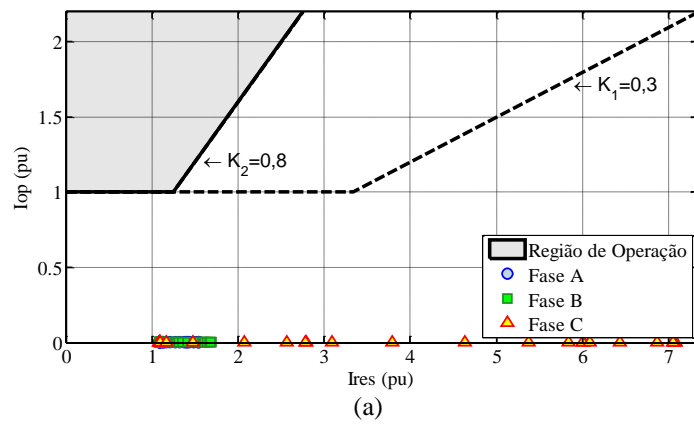


Figura 5.16 – Planos operacionais das zonas para o Caso 5: (a) ZA, (b) ZB e (c) ZAB.

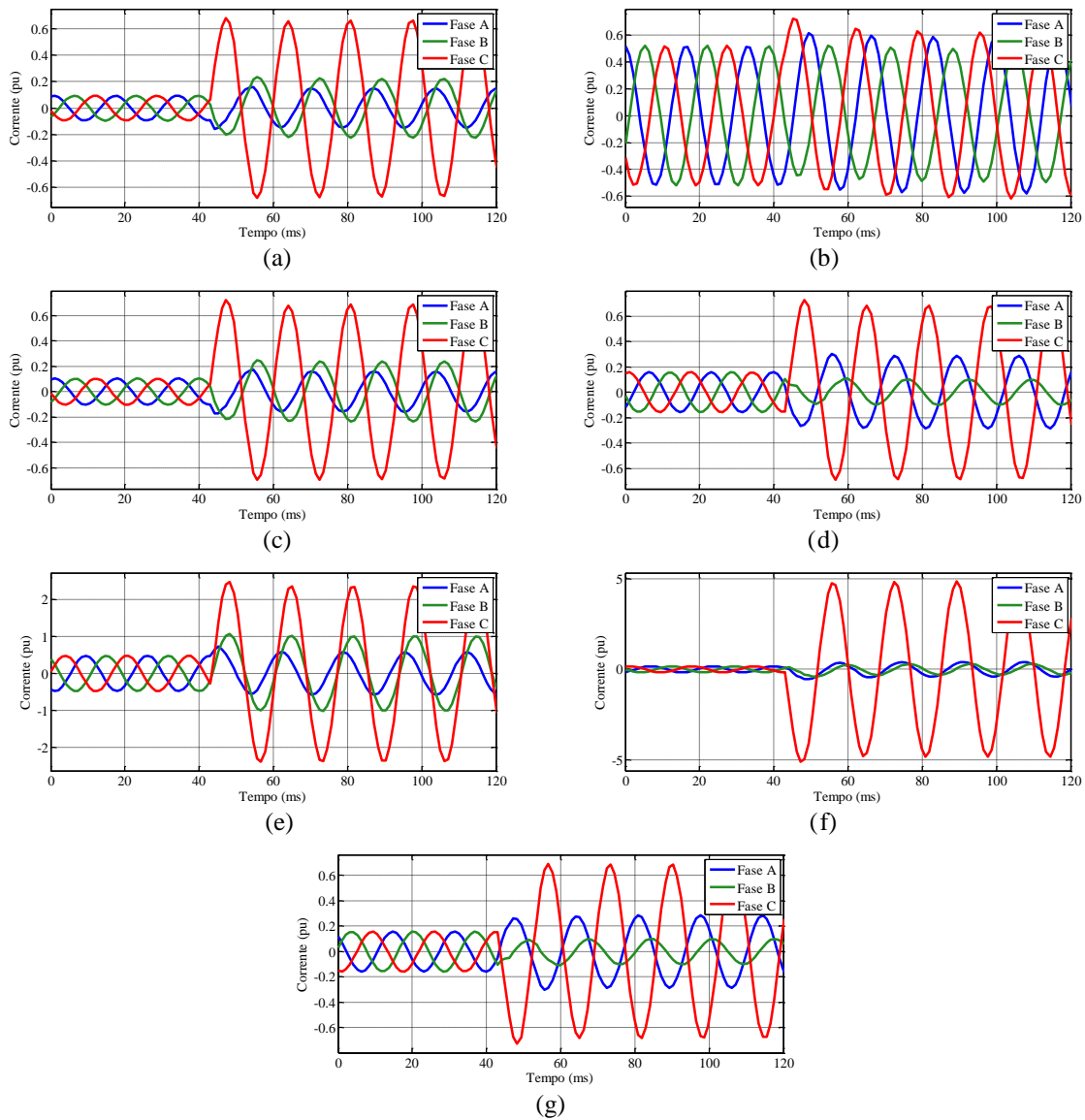


Figura 5.17 – Correntes nos DJs do sistema para o Caso 5: (a) DJ01, (b) DJ02, (c) DJ03, (d) DJ04, (e) DJ05, (f) DJ06, (g) DJAMR.

5.4. CURTOS-CIRCUITOS COM PARALELISMO DE BARRAS

Conforme discutido no Capítulo 3, o paralelismo das barras ocorre durante a manobra de remanejamento dos vãos entre elas, quando ambas as chaves SCs seletoras de barras permanecem fechadas. Nessa situação, ambas as zonas ZA e ZB são afetadas, pelo fato de se ter uma corrente adicional na zona de proteção que não está sendo considerada no cálculo das correntes de operação e restrição (IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE, 2009). A solução implementada nessa dissertação é aquela apresentada no Capítulo 3, que considera o uso da zona de supervisão ZAB em conjunto com a expansão de ambas as zonas ZA e ZB para englobar as duas barras. Sendo assim, um curto-circuito em qualquer uma das barras durante a situação de paralelismo irá provocar a abertura de todos os vãos do sistema.

A situação de paralelismo de barras foi simulada através do fechamento simultâneo de ambas as chaves SCs seletoras de barra do vão AT01, durante o seu remanejamento da barra B, na qual ele é normalmente conectado, para a barra A, conforme ilustrado na Figura 5.18.

A seguir, apresenta-se o desempenho da proteção implementada para dois curtos-circuitos durante a situação de paralelismo das barras, a saber: curto-circuito trifásico na barra A e curto-circuito trifásico na LT01.

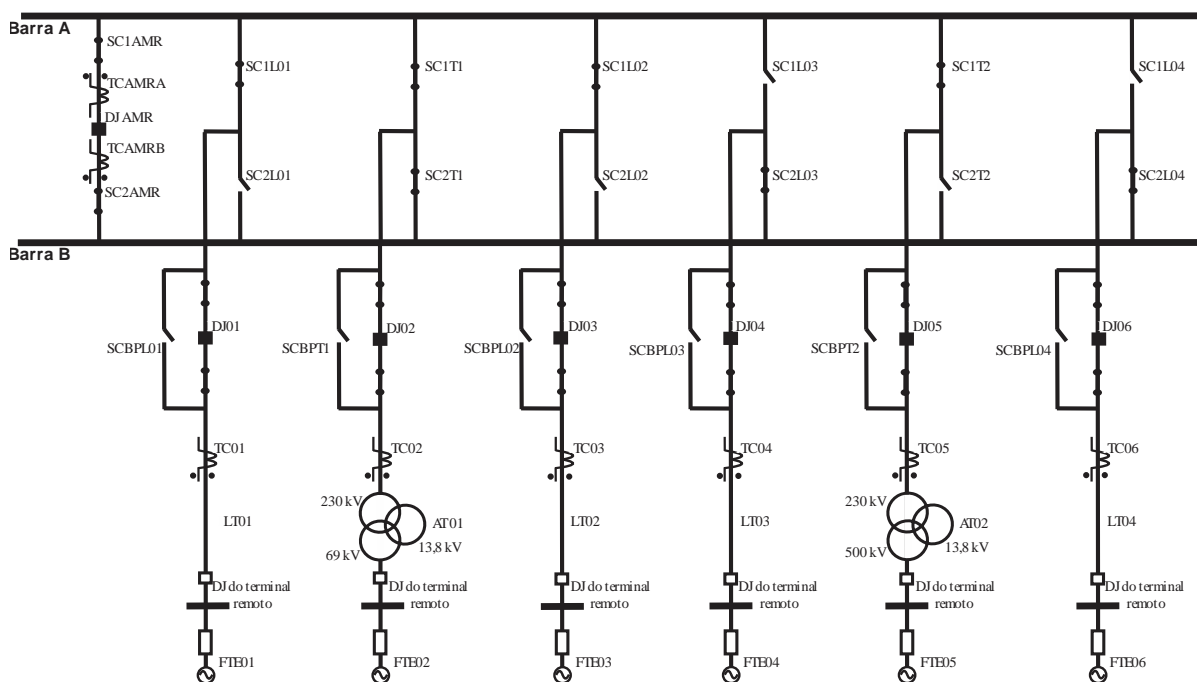


Figura 5.18 – Sistema operando com paralelismo das barras.

5.4.1. Curto-Circuito na Barra A – Caso 6

Primeiramente, simulou-se em 42 ms um curto-circuito trifásico na barra A, durante a situação de paralelismo das barras. O estado de algumas das variáveis utilizadas na lógica da proteção implementada são apresentadas na Figura 5.19. Observa-se que o paralelismo das barras foi identificado desde o início pela variável PB , permanecendo ativa durante toda a simulação. Devido a isso, o curto-circuito ocorrido na barra A foi identificado por ambas as zonas ZA e ZB, além da zona de supervisão ZAB, o que é verificado na Figura 5.19 pela mudança do estado lógico das variáveis ZA, ZB e ZAB de 0 (zero) para 1 (um) em 4,20 ms após o início do defeito e pelas Figuras 5.17, que representam no plano operacional o desempenho dos elementos 87B de todas as zonas. Os *flags* de detecção de faltas externas, $FLEXTZA$, $FLEXTZB$ e $FLEXTZAB$, por sua vez, permaneceram inativos durante toda a simulação. Com isso, as zonas ZA e ZB enviaram comando de *trip* para todos os DJs do sistema, que tiveram sua abertura tripolar 41,73 ms após o recebimento do comando de *trip*.

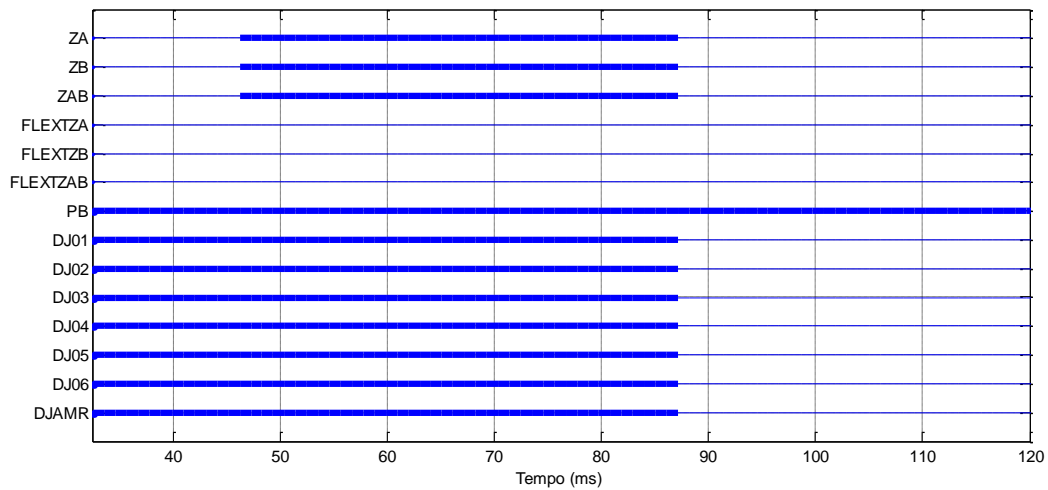


Figura 5.19 – Estado das variáveis lógicas do relé para o Caso 6.

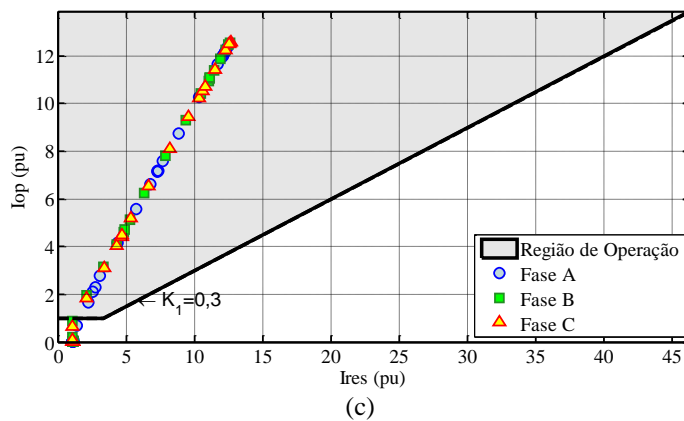
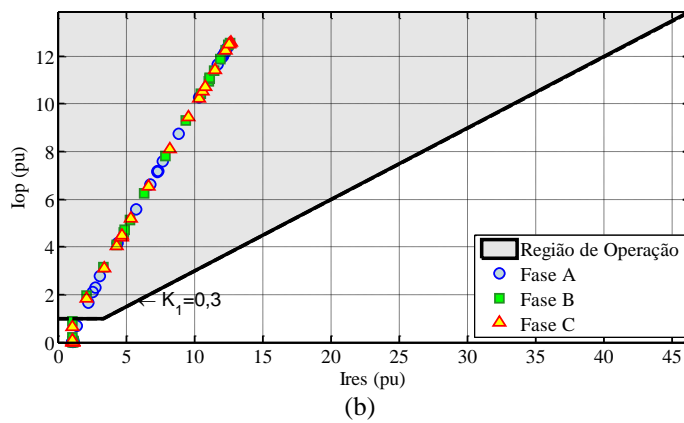
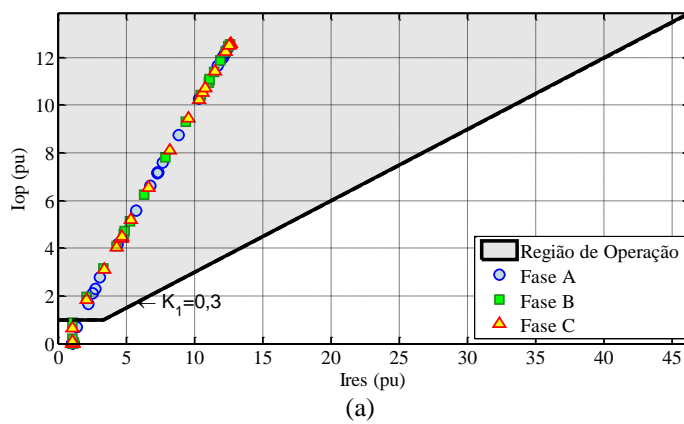


Figura 5.20 – Planos operacionais das zonas para o Caso 6: (a) ZA, (b) ZB e (c) ZAB.

Nas Figuras 5.18, são apresentadas as correntes nos DJs dos vãos conectados ao barramento, vistas do secundário dos TCs correspondentes, para o Caso 6. Observa-se que, de fato, todos os DJs do sistema abriram, desconectando todos os vãos das barras A e B.

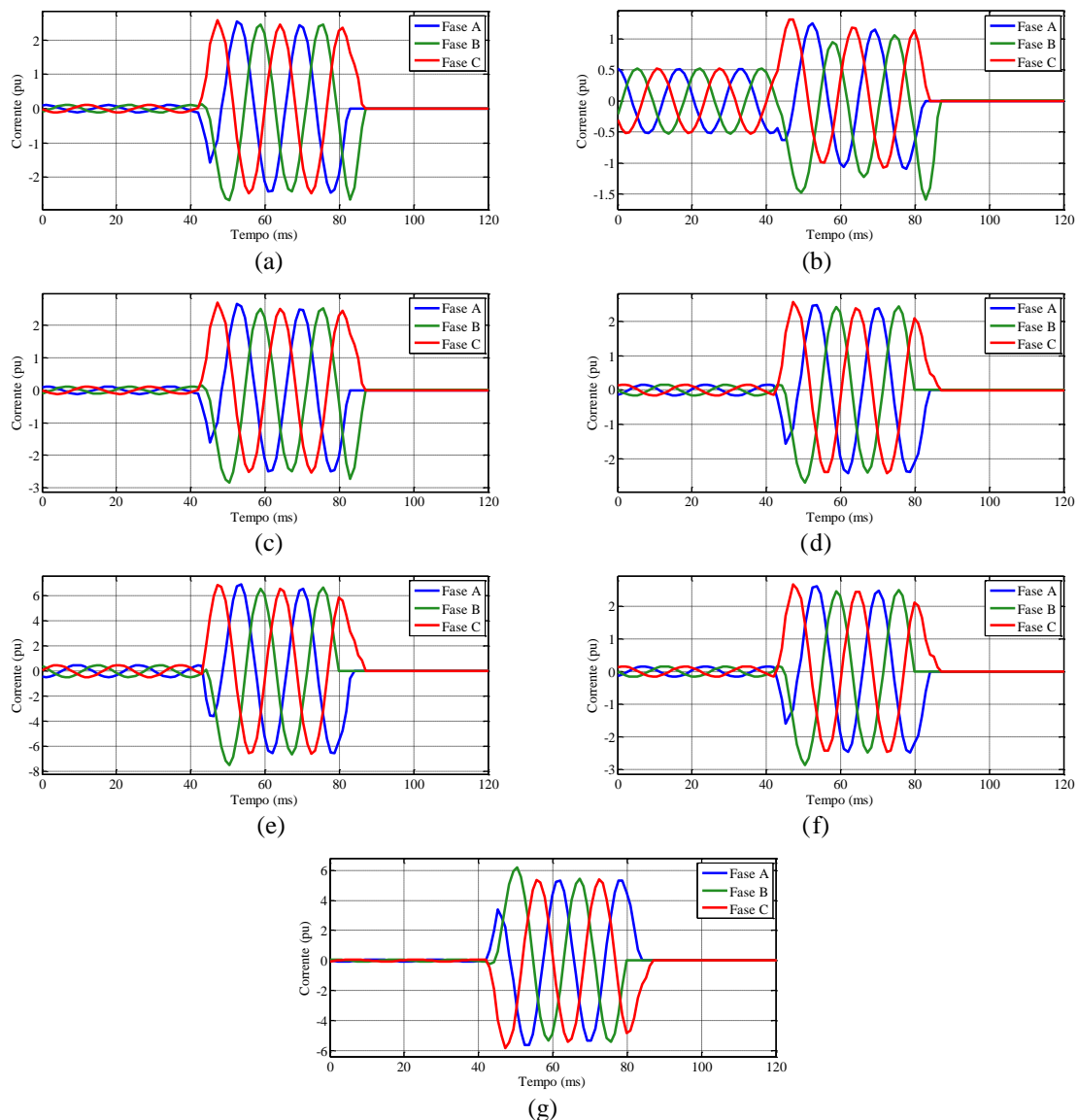


Figura 5.21 – Correntes nos DJs do sistema para o Caso 6: (a) DJ01, (b) DJ02, (c) DJ03, (d) DJ04, (e) DJ05, (f) DJ06, (g) DJAMR.

5.4.2. Curto-Circuito na LT01 – Caso 7

O outro curto-circuito considerado no sistema operando durante a situação de paralelismo das barras foi um trifásico na LT01 em 42 ms, localizado em 5% do comprimento da LT, medidos a partir da barra local. Nesse caso, não foi considerada a saturação do núcleo magnético do TC. Como esperado, nenhuma das zonas de proteção do relé atuou, pois a falta foi externa, conforme pode ser observado nas Figuras 5.19 e 5.20. Já os *flags* FLEXTZA, FLEXTZB e FLEXTZAB foram ativados, 4,20 ms após o início do defeito, de modo que todas as zonas passaram a operar no modo de operação para faltas externas, mudando a inclinação das suas característica de operação para 0,8.

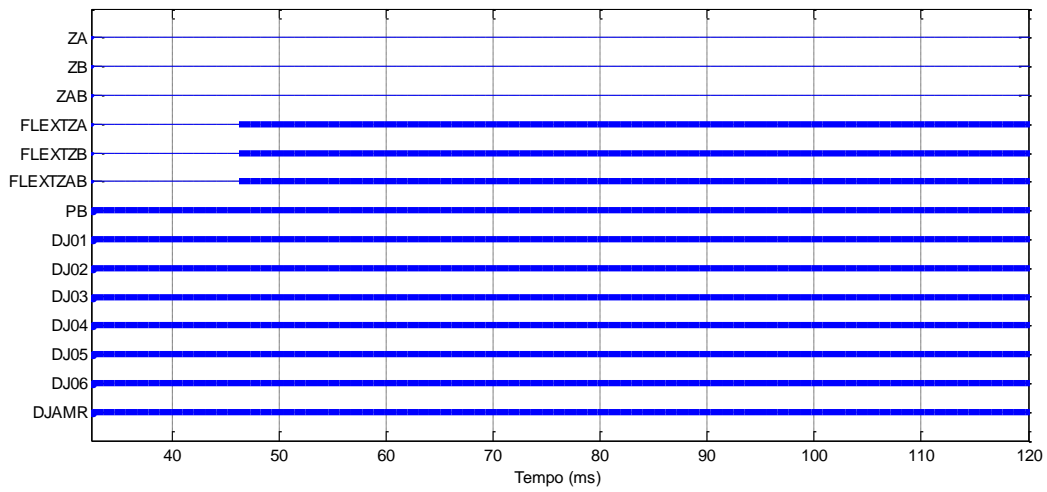


Figura 5.22 – Estado das variáveis lógicas do relé para o Caso 7.

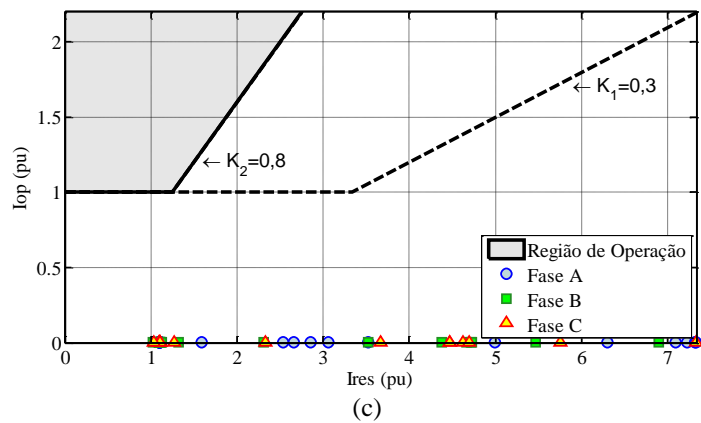
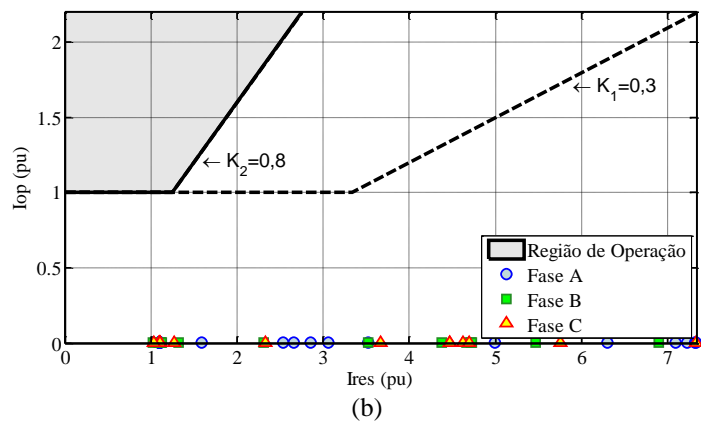
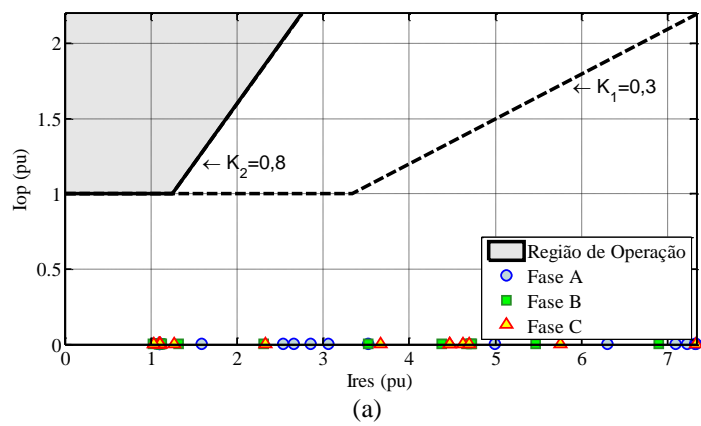


Figura 5.23 – Planos operacionais das zonas para o Caso 7: (a) ZA, (b) ZB e (c) ZAB.

Nas Figuras 5.21, são apresentadas as correntes nos DJs dos vãos conectados ao barramento, vistas do secundário dos TCs correspondentes, para o Caso 7. Como nenhuma das zonas de proteção detectou o defeito, já que ele é externo a todas elas, nenhum dos DJs recebeu um comando de *trip*, permanecendo fechados durante toda a simulação. Oportuno se faz mencionar que, neste caso, a proteção da LT01, não implementada neste trabalho de dissertação, é que seria a responsável pela extinção desse defeito.

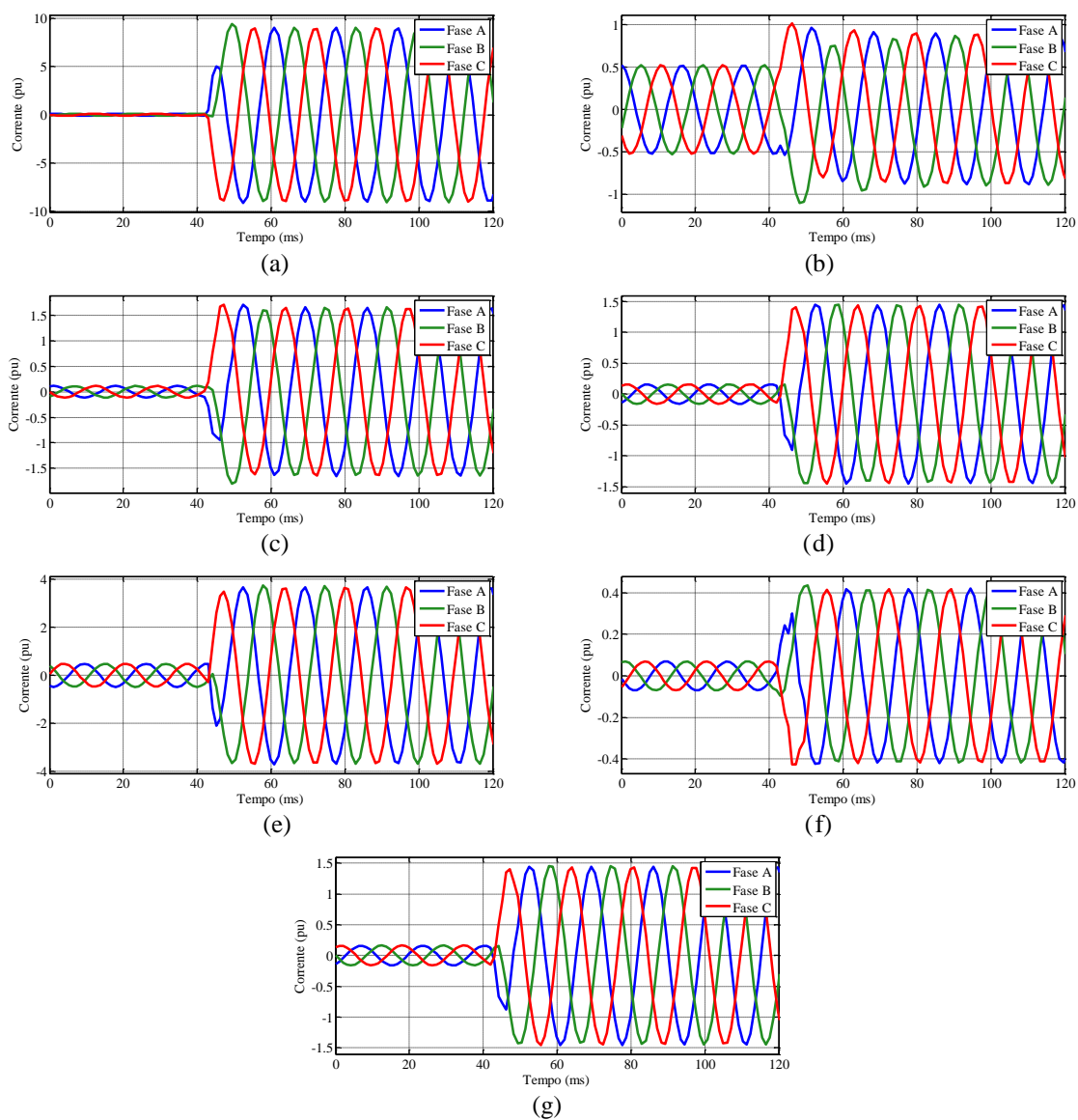


Figura 5.24 – Correntes nos DJs do sistema para o Caso 7: (a) DJ01, (b) DJ02, (c) DJ03, (d) DJ04, (e) DJ05, (f) DJ06, (g) DJAMR.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho de dissertação apresentou-se a modelagem e simulação da proteção diferencial de baixa impedância de barramentos. Para tanto, foi utilizado o software ATP e o seu ambiente MODELS, de tal forma a se obter uma simulação em malha fechada do sistema de potência e do seu sistema de proteção. Foi escolhido como estudo de caso um sistema com configuração de barramento duplo com disjuntor simples a cinco chaves.

A lógica de proteção implementada foi baseada naquela apresentada pelo IEEE Power System Relaying Committee (2009), que usa uma zona de proteção para cada uma das barras, que são ainda protegidas por uma zona de supervisão, utilizada para evitar operações indevidas no caso de atraso na mudança de estados ou de falha dos contatos lógicos das chaves SCs seletoras de barra. Variáveis lógicas auxiliares foram utilizadas, de modo a adaptar automaticamente as zonas de proteção das barras às diversas configurações de operação que o barramento pode assumir. A fim de aumentar a segurança do esquema para faltas externas com saturação do núcleo magnético do TC do vão defeituoso, implementou-se uma lógica baseada na apresentada por Ferrer & Schweitzer (2011), por meio da qual varia-se de forma adaptativa o valor da inclinação da característica de operação das zonas de proteção em caso de faltas externas.

Diferentes tipos de curtos-circuitos, internos e externos, foram simulados no sistema teste analisado, considerando-se diferentes configurações de operação do barramento. Os resultados obtidos indicaram que a lógica de proteção implementada mostrou-se eficiente, atuando corretamente em todos os casos analisados. Além disso, eles evidenciam as vantagens da utilização desse tipo de modelagem para a avaliação do desempenho dos sistemas de proteção de barramentos, por meio da qual é possível verificar o comportamento do sistema de potência frente à operação da sua proteção, bem como o da proteção frente às mais diversas situações de operação às quais pode ser submetida.

Outra constatação é a importância do uso de modelos adequados para cada um dos componentes do sistema, de forma a se obter uma melhor representação dos mesmos considerando uma faixa maior de frequência e fenômenos. De fato, ao contrário de softwares do tipo EMTP, na maioria dos softwares de análise de sistemas de proteção, os modelos limitam-se à frequência fundamental, o que pode não reproduzir corretamente o desempenho do sistema de proteção.

Como propostas de trabalhos futuros, deixam-se as seguintes sugestões:

- Aprimorar o algoritmo de detecção de faltas externas utilizando o elemento diferencial que avalia as amostras dos sinais de corrente, o que resulta na obtenção de maiores taxas de variação das correntes de operação e restrição, permitindo uma detecção mais rápida e segura de faltas externas;
- Implementar um algoritmo de detecção de faltas internas que atue durante o modo de operação para faltas externas, possibilitando uma atuação mais rápida para o caso de curtos-circuitos que evoluam de externos para internos ou no caso de curtos-circuitos simultâneos.
- Incorporar à simulação a modelagem da proteção dos diferentes vãos conectados ao barramento, a fim de viabilizar a avaliação do sistema de proteção como um todo, permitindo a verificação do desempenho das lógicas de proteção de falha de DJs e de zona morta.
- Aprimorar as lógicas de atribuição dos estados lógicos dos *flags* de habilitação das correntes nas zonas de proteção, a fim de torná-la aplicável a diferentes tipos de barramento;
- Realizar uma comparação do desempenho das proteções de baixa e alta impedância aplicadas aos barramentos com topologia fixa, evidenciando as vantagens e desvantagens de cada uma delas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB. **Protection Application Handbook**. Book N° 6, BA THS / BU Transmission Systems and Substations LEC Support Programme, 1999.
- ANDERSON, P.M. **Power System Protection**. Piscataway, New Jersey, EUA. John Wiley & Sons, Inc., Publication, 1999.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª Edição, Brasília, 2008.
- ALSTOM GRID. **Network Protection and Automation Guide**. 2st Edition, 2011.
- ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. **Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia**. 1. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2006.
- ARVIND, K. S.; TAM, K.; PHADKE, A. G. **Modeling and Validation of a Transformer Differential Relay in EMTP**. IEEE, 1992.
- BUI, L.X.; MORIN, G.; REEVE, J. **EMTP TACS – FORTRAN Interface Development For Digital Controls Modeling**. *IEEE Transactions on Power systems*, vol. 7, N° 1, February 1992.
- BEHRENDT, K.; COSTELLO, D.; ZOCHOLL, S. E., **Considerations for using high-impedance or low-impedance relays for bus differential protection**. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, Washington USA, Tech. Rep., 2010.
- CHAUDHARY, A.K.S.; TAM, K.; PHADKE, A.G. **Protection System Representation in the Electromagnetic Transients Program**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, N° 2, April 1994.
- CIGRÉ Working Group. **Relay Software Models for Use With Electromagnetic Transient Analysis Programs**. N° 295, 2006.
- CONCEIÇÃO, E. N. **Modelagem e Simulação da Proteção de Alimentadores de Distribuição Utilizando Softwares Tipo EMTP**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Elétrica. Brasília, Brasil, 2012.
- DUBE, L. **Models in ATP: Language Manual**, 1996.
- ESPINOZA, R. G. F. **Análise de Proteção de Linhas de Transmissão Através de Relés Numéricos e Uso de Models Externos No ATP (Alternative Transient Program)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Elétrica. Ilha Solteira, Brasil, 2011.
- ESPINOZA, R. G. F.; LEÃO, F.B.; MANTOVANI, J.R.S. **Simulation Environment of Distance Protection With ATP and Foreign Models**. *IEEE Electrical Power and Energy Conference*, 2011.
- FURST, G. **MODELS Primer**. Can/Am Electromagnetic Transients Programs, Vancouver, Canada, 1996.

- FERRER, H.J.A.; SCHWEITZER, E.O. **Modern Solutions for Protection, Control and Monitoring of Electric Power Systems**. Schweitzer Engineering Laboratories, Quality Books Inc. 2010.
- GLINKOWSKI, M. T.; ESZTERGALYOS, J. **Transient Modeling of Electromechanical Relays**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, N° 2, April, 1996.
- GUZMÁN, A.; LABUSCHAGNE, C.; QIN, B.-L. **Reliable Busbar and Breaker Failure Protection with Advanced Zone Selection**. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, Washington USA, Tech. Rep., 2014.
- HART, D. G.; NOVOSEL, D.; SMITH, R. A. **Modified Cosine Filters**. Patent Number 6154687, November 2000.
- HEO, J.Y.; KIM, C.H.; SO, K.H.; PARK, N.O. **Realization of Distance Relay Algorithm Using EMTP MODELS**. *International Conference on Power Systems Transients*. New Orleans, USA, 2003.
- IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. **IEEE Guide for Protective Relay – Applications to Power System Buses**. New York, 2009.
- KIM, C.; LEE, M.; AGGARWAL, R. K.; JOHNS, A. T. J. **Educational Use of EMTP MODELS for Study of a Distance Relaying Algorithm for Protecting Transmission Lines**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, n. 1, February 2000.
- KINDERMAN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Volume 1. UFSC, Florianópolis, 2005.
- KINDERMAN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Volume 3. UFSC, Florianópolis, 2008.
- LEUVEN EMTP CENTER. **ATP - Alternative Transient Program: Rule book**. Herverlee, Belgium, 1987.
- LUO, X.; KEZUNOVIC, M. **Interactive Protection System Simulation Using ATP MODELS and C++**. *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, 2006.
- MANITOBA HVDC Research Centre Inc. **Applications of PSCAD/EMTDC**. Manitoba, Canada, 2007.
- MASON, C. R. **The Art and Science of Protective Relaying**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1956.
- MCLAREN, P.G.; DIRKS, E.N.; JAYASINGHE, R.P.; FERNANDO, I.; SWIFT, G.W.; ZHANG, Z. **An Accurate Software Model for Off-line Assessment of a Digital Relay**. *IEE Communications, Power, and Computing*, 1996.

- MCLAREN, P.G.; DIRKS, E.N.; JAYASINGHE, R.P.; FERNANDO, I.; SWIFT, G.W., ZHANG, Z. **An Accurate Software Model of a Digital Relay for Use in Off-line Studies.** *Developments in Power System Protection*, Nottingham UK, 1997.
- MCLAREN, P.G.; MUSTAPHI, K.; BENMOUYAL, G.; CHANO, S.; GIRGIS, A.; HENVILLE, M.; KEZUNOVIC, M.; KOJOVIC, L.; MARTTILA, R.; MEISINGER, M.; MICHEL, G.; SACHDEV, M.S.; SKENDZIC, V.; SIDHU, T.S. e TZIOUVARAS, D. **Software Models for Relays.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, n. 2, April 2001.
- MIGUEL, P. M. **Introdução à Simulação de Relés de Proteção Usando a Linguagem “MODELS” do ATP.** Editora Ciência Moderna. Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- MOLAS, E. C.; SILVA, K.M. **Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão no ATP.** *IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos.* Goiânia, Brasil, 2012.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS), **Procedimentos de Rede – Submódulo 2.6: Requisitos Mínimos para os Sistemas de Proteção e Telecomunicações.** Brasília, Brasil, 2011.
- PAITHANKAR, Y. G. e BHIDE, S. R. **Fundamentals of Power System Protection.** Prentice-Hall, New Delhi, India, 2003.
- PEREZ, S. G. A. **Modeling Relays for Power System Protection Studies.** PhD Thesis, University of Saskatchewan, Department of Electrical Engineering. Saskatoon, Canada, 2006.
- SILVA, K.M.; NEVES, W.L.A. e SOUZA, B.A. **EMTP Applied to Evaluate Three-Terminal Line Distance Protection Schemes.** *International Conference on Power Systems Transients.* Lyon, France, June 2007.
- SILVA, K. M., **Estimação de Fasores Baseada na Transformada Wavelet para Uso na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2009.
- SZTYKIEL, M; BAK C.L.; WIECHOWSKI, W.; DOLLERUP, S. **Line Differential Protection Scheme Modelling for Underground 420 kV Cable Systems.** *Modern Electric Power Systems.* Wroclaw, Poland, 2010.
- TAVARES, K.A.; SILVA, K.M.; FERNANDES, R.O. **Validação da Modelagem da Proteção Diferencial de Transformadores no ATP/ATPDraw.** *XI Seminário Técnico de Proteção e Controle.* Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2012.
- WILSON, R. E.; NORDSTROM, J. M. **EMTP Transient Modeling of a Distance Relay and a Comparison with EMTP Laboratory Testing.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, N° 3, July 1993.

ZANETA JÚNIOR, L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. 1. ed. São Paulo: EDUSP, 2003.

ZIEGLER, G., **Numerical Differential Protection: Principles and Applications**. Siemens, 2nd ed., Berlin, Germany, 2012.

A LINGUAGEM MODELS

Os programas do tipo EMTP são os mais difundidos e utilizados em estudos de transitórios eletromagnéticos. No entanto, na sua essência, esses programas são capazes de simular uma sequência pré-definida de estados do sistema de potência, de forma a emular mudanças súbitas em sua configuração, como curtos-circuitos e abertura ou fechamento de disjuntores. Para cada um dos estados, o EMTP fornece as formas de onda das tensões e correntes do sistema (Figura A.1), que podem posteriormente ser utilizadas, por exemplo, como dados de entrada em ferramentas computacionais para teste de relés de proteção.

Rotinas auxiliares já integradas a programas do tipo EMTP, a exemplo da TACS e da MODELS, permitem uma maior flexibilidade nas simulações, de modo que o estado do sistema possa ser modificado dinamicamente durante a simulação. Assim, a característica funcional sequencial de programas do tipo EMTP, resumida na Figura A.1, é modificada para a apresentada na Figura A.2 utilizando a MODELS, onde os estados do sistema podem modificar a partir do resultado do processamento de programas (ou modelos) na MODELS.

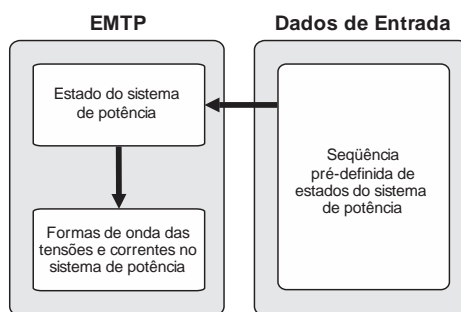


Figura A.1 – Diagrama Funcional de programas do tipo EMTP.

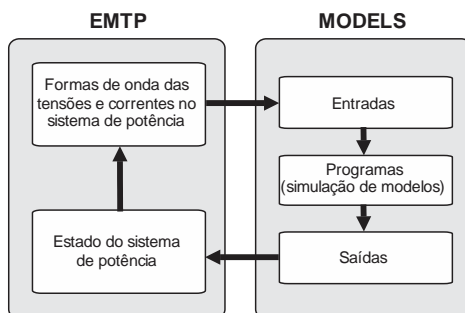


Figura A.2 – Diagrama Funcional de programas do tipo EMTP utilizando a MODELS.

A MODELS é uma linguagem de descrição de uso geral, que se concentra na descrição da estrutura de um modelo e na função de seus elementos, como mostrado no Quadro A.1. Os modelos podem ser desenvolvidos separadamente, agrupados em uma ou mais bibliotecas e usados em outros modelos como blocos independentes na montagem de um sistema. Um sistema pode ser descrito como um arranjo de submodelos inter-relacionados, independentemente de suas descrições internas e de suas simulações (FURST, 1994; DUBE, 1996).

Quadro A.1 – Estrutura básica da linguagem da MODELS.

MODEL	Exemplo
COMMENT	
	Espaço usado para comentários sobre o modelo.
ENDCOMMENT	
INPUT	
	Variáveis de entrada, que podem vir do sistema ou de outro modelo.
VAR	
	Declaração das variáveis.
OUTPUT	
	Variáveis de saída, que podem ir para sistema ou para outro modelo.
DATA	
	Parâmetros de entrada.
CONST	
	Declaração das constantes.
INIT	
	Ambiente para inicialização de variáveis.
ENDINIT	
EXEC	
	Ambiente no qual são realizadas as operações pertinentes ao modelo.
ENDEXEC	
ENDMODEL	

As principais características descritivas da linguagem MODELS são as seguintes:

- A sintaxe da MODELS permite a representação de um sistema de acordo com a sua estrutura funcional;
- A descrição de um modelo pode também ser usada como documentação do modelo;
- A interface do modelo é facilmente especificada;
- Aos componentes do modelo podem ser dados nomes que representem suas próprias funções;
- O sistema pode ser particionado em submodelos individuais, cada um com seu nome local;
- Os modelos e funções usadas para descrição da operação de um sistema pode ser construídos em outra linguagem de programação que não seja a linguagem MODELS.

As principais características de simulação suportada pela linguagem MODELS são as seguintes:

- Distinção entre a descrição de um modelo e seu uso, permitindo várias replicações independentes, de um modelo, com gerenciamento individual da simulação (passo de simulação, quantidade, condições iniciais, etc.);
- Combinação hierárquica de três métodos de inicialização (padrão, dependente do uso e embutido), cada um contribuindo para a descrição do histórico de simulação de um modelo;
- Modificações controladas dinamicamente dos valores das entradas e variáveis de um modelo durante a simulação;
- Modificações controladas dinamicamente da estrutura de um modelo (tanto a composição topológica quanto o fluxo algoritmo) durante o curso da simulação.