



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Rafaella Nascimento Meira

Relatório de Estágio Supervisionado

Campina Grande, Paraíba

Março de 2016

Rafaella Nascimento Meira

Relatório de Estágio Supervisionado

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Local de Estágio: Laboratório de Sistemas de Potência

(LSP/UFCG)

Orientador:

Professora Núbia Silva Dantas Brito

Campina Grande, Paraíba

Março de 2016

Rafaella Nascimento Meira

Relatório de Estágio Supervisionado

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Local de Estágio: Laboratório de Sistemas de Potência

(LSP/UFCCG)

Aprovado em ___ / ___ / _____

Professor Avaliador

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador

Professora Núbia Silva Dantas Brito

Universidade Federal de Campina Grande

Orientadora

Agradecimentos

Agradeço a Deus, em sua plena bondade, por me dar sabedoria e paciência para enfrentar os momentos difíceis.

Agradeço à minha mãe Rosângela, aos meus avós Rômulo e Iracy, à minha irmã Lethícia e ao meu namorado Adriano, por me ajudarem na realização desse sonho.

À professora Núbia Brito, minha orientadora, pela confiança e oportunidade de trabalhar no Grupo de Sistemas Elétricos.

Aos professores Célio Anésio e Benemar de Alencar, por todo suporte e comprometimento.

Aos colegas do Laboratório de Sistemas de Potência, cujo auxílio foi indispensável para a realização deste trabalho.

A todos os professores e funcionários desta instituição, que contribuíram decisivamente, na minha formação acadêmica.

Resumo

Este relatório apresenta as atividades da aluna Rafaella Nascimento Meira realizadas durante o Estágio Supervisionado no Laboratório de Proteção Digital (**LabPro**), do Departamento de Engenharia Elétrica (**DEE**), da Universidade Federal de Campina Grande (**UFCG**), sob orientação da professora Núbia Silva Dantas Brito e supervisão dos professores Benemar Alencar de Souza e Célio Anésio da Silva.

Palavras-chave: RSCAD, RTDS™, relé de distância, faltas.

Sumário

Resumo	5
Sumário.....	6
Lista de Figuras.....	7
1. Apresentação	9
2. Local do Estágio	9
3. O Estágio.....	10
3.1 Estudo da arquitetura do RTDS™.....	10
3.1.1 O <i>Software</i> do RTDS™.....	11
3.1.2 O <i>Hardware</i> do RTDS™.....	16
3.2 Modelagem de sistemas fictícios	17
3.3 Modelagem do sistema-teste.....	19
3.4 Estudo do Princípio dos fundamentos de um relé de distância	22
3.5 Modelagem de um relé de distância	24
3.5 Estudos de Casos.....	27
4. Considerações Finais	38
5. Referências Bibliográficas	38

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Fachada do LSP.....	9
Figura 2.2- RTDS no Laboratório - LABPro.....	10
Figura 3.1 – RTDS™ de tamanho médio	11
Figura 3.2 - Tela de iniciação do RSCAD (Versão 4.007.1)	11
Figura 3.3 - Relação entre os módulos do RSCAD	12
Figura 3.4 - Tela do <i>FileManager</i>	12
Figura 3.5 - Tela do módulo <i>Draft</i>	13
Figura 3.6 - Tela do <i>RunTime</i>	14
Figura 3.7 - Tela do <i>Cbuilder</i>	15
Figura 3.8 - Tela do <i>TLine</i>	15
Figura 3.9 - Tela do módulo Cable.....	16
Figura 3.10 – (a)Cartão GPC, (b) Cartão IRC, (c) Cartão WIF.....	17
Figura 3.11 – Sistema divisor de tensão..	18
Figura 3.12 – Sistema de energia AC simples, modelado no modulo <i>Draft</i>	18
Figura 3.13 – Sistema modelado no módulo Draft com inserção de transformador.....	19
Figura 3.14 – Sistema modelado no módulo Draft com inserção de transformador de instrumento..	19
Figura 3.15 – Sistema elétrico de 230 kV adotado, (a) Diagrama unifilar do sistema teste, (b) Esquema elétrico modelado no módulo <i>Draft</i>	21
Figura 3.16 – Modelo do TPC adotado.....	22
Figura 3.17 – TPC modelado no módulo <i>Draft</i>	22
Figura 3.18 – Esquema mostrando a impedância que deve ser medida para uma falta monofásica (LIMA,2006)..	23
Figura 3.19 – Diagrama R-X (SILVA,2006).....	23
Figura 3.20 – Tipos de características de operação do relé de distância: (a) impedância; (b) mho; (c) lenticular; (d) retângulo (ANDERSON,1999)..	24
Figura 3.21 – Característica de um relé tipo mho (SIQUEIRA,2007).....	24
Figura 3.22 - Arquitetura básica de um relé microprocessado.....	25
Figura 3.23 - Filtro passa-baixa com frequencia de corte 360 Hz	25
Figura 3.24 - Amostragem do sinal na frequencia de 960 Hz.....	26
Figura 3.25 - Bloco relativo ao cosseno modificado ABB.....	26
Figura 3.26 – Sistema- teste com o esquema de aplicação de falta.....	27
Figura 3.27 – Botão utilizado na aplicação da falta..	29

Figura 3.28 – Controles deslizantes utilizados para ajuste angular e de duração da falta, respectivamente.....	29
Figura 3.29 – Controles deslizantes utilizados para ajuste da resistência de falta entre fases e entre fases e a terra..	29
Figura 3.30 – Chaves de seleção das fases.....	29
Figura 3.31 - Controle de faltas para o estudo dos casos 1,2 e 3, respectivamente.....	30
Figura 3.32 - Registro de simulação de falta AT: Tensão na barra emissora - falta a 25% da linha de transmissão, (a) Tensão primária, (b) Tensão secundária.....	31
Figura 3.33 - Registro de simulação de falta AT: Tensão na barra receptora - falta a 25% da linha de transmissão, (a) Tensão primária, (b) Tensão secundária.....	31
Figura 3.34 - Registro de simulação de falta AT a 25% (50km) da linha de transmissão: Comportamento das variáveis D_p e D_s	32
Figura 3.35 - Registro de simulação de falta AT: Tensão na barra emissora - falta a 50% (100 Km) da linha de transmissão, (a) Tensão primária, (b) Tensão secundária.	32
Figura 3.36 - Registro de simulação de falta AT: Tensão na barra receptora - falta a 50% (100 Km) da linha de transmissão, (a) Tensão primária, (b) Tensão secundária.	33
Figura 3.37 - Registro de simulação de falta AT a 50% (100 Km) da linha de transmissão: Comportamento das variáveis D_p e D_s	33
Figura 3.38 - Registro de simulação de falta AT: Tensão na barra emissora - falta a 75% (150 Km) da linha de transmissão, (a) Tensão primária, (b) Tensão secundária.	34
Figura 3.39 - Registro de simulação de falta AT: Tensão na barra receptora - falta a 75% (150 Km) da linha de transmissão, (a) Tensão primária, (b) Tensão secundária.	34
Figura 3.40 - Registro de simulação de falta AT a 75% (150 Km) da linha de transmissão: Comportamento das variáveis D_p e D_s	35
Figura 3.41 - Controle de falta para o estudo de caso 4.....	36
Figura 3.42 - Registro de simulação de falta ABC: Tensão na barra emissora - falta a 75% (150 Km) da linha de transmissão, (a) Tensão primária, (b) Tensão secundária.	37
Figura 3.43 - Registro de simulação de falta ABC: Tensão na barra receptora - falta a 75% (150 Km) da linha de transmissão, (a) Tensão primária, (b) Tensão secundária.	37
Figura 3.44 - Registro de simulação de falta ABC a 75% (150 Km) da linha de transmissão: Comportamento das variáveis D_p e D_s	38

1. Apresentação

O Estágio Supervisionado foi realizado no Laboratório de Proteção Digital (**LabPro**) do DEE/UFCG, durante o período de 21/12/2015 a 11/02/2016, sob orientação da professora Núbia Silva Dantas Brito e supervisão dos professores Benemar Alencar de Souza e Célio Anésio da Silva.

Este relatório apresenta um resumo das principais atividades desenvolvidas durante o período do estágio, que foram:

- ❖ Estudo da arquitetura do *Real Time Digital Simulator* (RTDS™);
- ❖ Estudo das funcionalidades do *software* do RTDS™;
- ❖ Modelagens de sistemas elétricos de potência diversos no RTDS™;
- ❖ Estudo de caso.

2. Local do Estágio

O LabPro está alocado no prédio do Laboratório de Sistemas Elétricos de Potência (LSP), que foi construído com recursos da Reitoria/UFCG (valor total de R\$ 741.645,18) e possui área construída de cerca de 600 m² distribuídos em três pavimentos, contendo os seguintes ambientes: duas salas de aula, uma sala de reunião, um auditório, sete salas de professores, dois laboratórios (o LabPro e o LabSim), uma copa, três almoxarifados, cinco sanitários e um *hall* de entrada. Apesar do LSP ainda não ter sido inaugurado oficialmente, suas atividades iniciaram no dia 15 de abril de 2015 e desde então, alunos de graduação e pós-graduação veem se beneficiando de sua infraestrutura (Figura 2.1).

O estágio, propriamente dito, foi realizado nas dependências do **LabPro** (Figura 2.2), que possui equipamentos de última geração, dentre os quais destaca-se o RTDS™, um simulador digital em tempo real e que foi o foco do estágio.



Figura 2.1. Fachada do LSP.



Figura 2.2. RTDS no Laboratório - LABPro.

3. O Estágio

As atividades realizadas durante o estágio foram divididas em duas etapas, em ambas o *software* e o *hardware* do RTDS™ foram empregados na construção e simulação de sistemas:

- Na primeira etapa foram modelados sistemas fictícios disponíveis no *Real Time Digital Simulator Tutorial Manual*;
- Na segunda etapa, modelou-se um sistema de transmissão real, possibilitando a análise da localização de faltas utilizando um relé de distância. Um resumo das atividades é apresentado a seguir.

3.1 Estudo da arquitetura do RTDS™

O RTDS™ é um equipamento considerado como sendo referência mundial para simulações em tempo real de sistemas de energia elétrica, com clientes em 37 países e mais de 1.100 unidades em operação. O equipamento disponível na UFCG foi adquirido através de uma Chamada do PROINFRA (Chamada Pública MCT/FINEP/ CT-INFRA/PROINFRA – 1/2005).

Dentre as muitas vantagens proporcionadas pelo RTDS™, destaca-se a possibilidade de realizar estudos e simulações de sistemas elétricos em tempo real, em ambiente seguro, eliminando riscos no sistema elétrico e evitando interrupções no fornecimento de energia.

A capacidade de simulação do RTDS™ pode ser aumentada com a inserção de módulos, de modo que existem tamanhos diversos disponíveis no mercado, inclusive o portátil. O RTDS™ disponível na UFCG tem tamanho médio, cujo *layout* é mostrado na Figura 3.1.

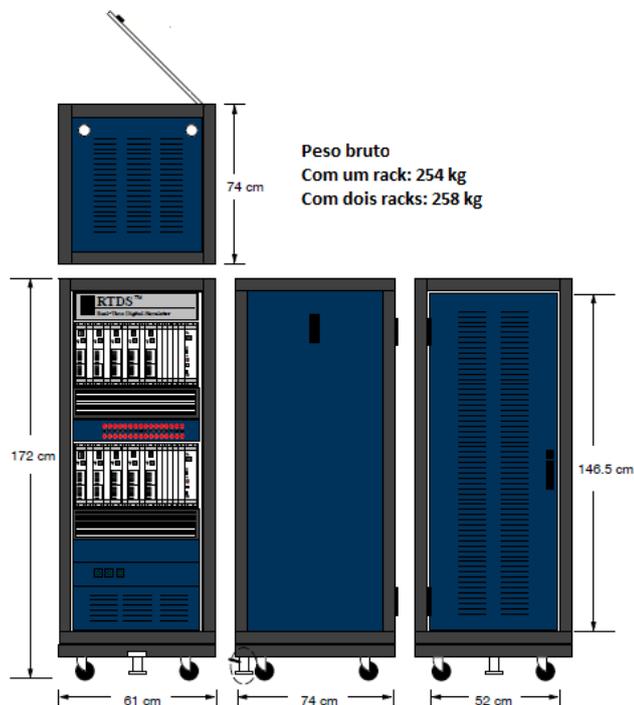


Figura 3.1. RTDS™ de tamanho médio.

A arquitetura do RTDS™ é composta de *hardware* e *software*, a qual é apresentada de forma resumida a seguir.

3.1.1 O *Software* do RTDS™

O *software* do RTDS™ é organizado em três níveis distintos: a biblioteca de modelos dos componentes, no nível mais baixo; o compilador, no nível médio e a GUI (*Graphical User Interface*), denominada de RSCAD, no nível mais alto. A tela inicial do *software* é mostrada na Figura 3.2.

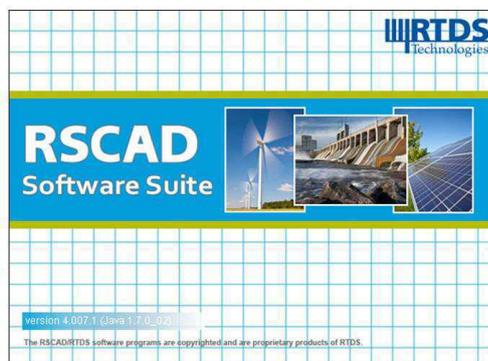


Figura 3.2. Tela de iniciação do RSCAD (Versão 4.007.1).

O RSCAD oferece capacidade de construir, modificar e controlar os parâmetros do sistema, além de analisar e armazenar os resultados das simulações, ou seja, por meio do RSCAD, o usuário realiza todas as etapas da simulação. A relação entre os seus diversos módulos é mostrada na Figura 3.3, a qual é detalhada a seguir.

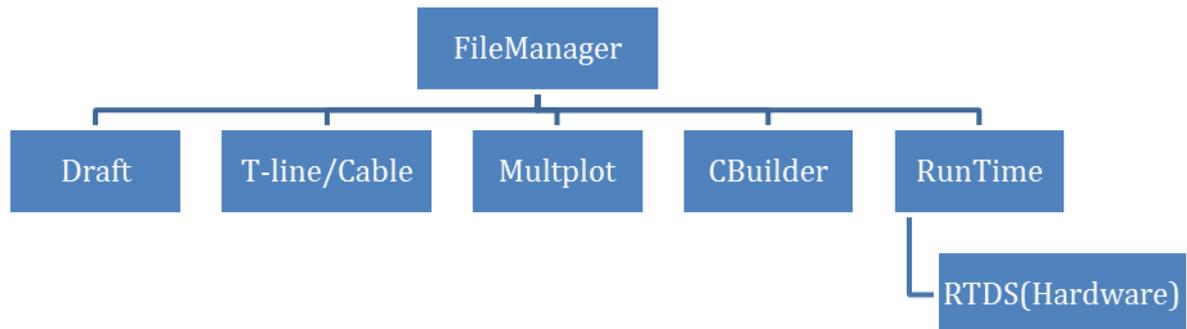


Figura 3.3. Relação entre os módulos do RSCAD.

FileManager: fornece um espaço para organização e compartilhamento de projetos de simulação e casos. Em sua janela (Figura 3.4), o usuário pode acessar os ícones dos outros módulos, os manuais disponíveis, editar as preferências, realizar atualizações e editar o arquivo de configuração do *hardware* RTDS™.

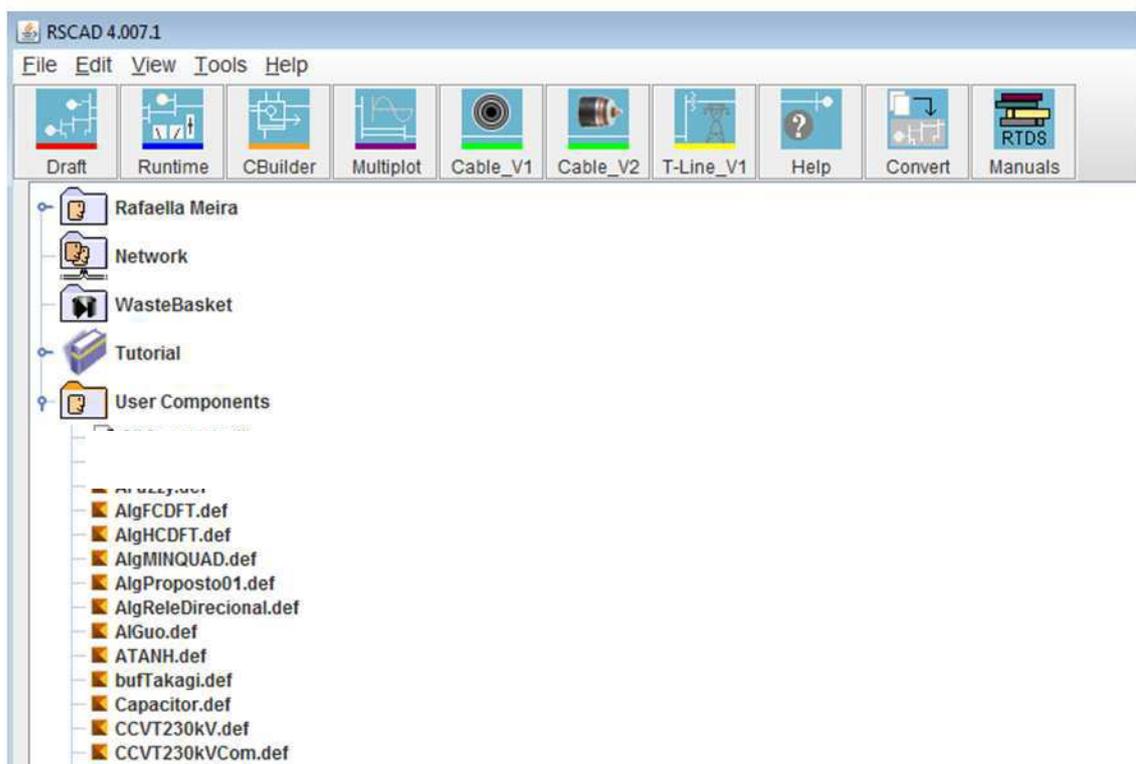


Figura 3.4. Tela do Módulo *FileManager*.

Draft: nesse módulo, o usuário pode montar um diagrama esquemático do sistema a ser simulado. O módulo contém a tela de desenho, as bibliotecas de componentes, e todas as ferramentas necessárias para editar os parâmetros dos componentes. A tela é dividida em duas partes, como mostrado na Figura 3.5, onde do lado direito, no módulo *Draft*, contém as bibliotecas de componentes, e do lado esquerdo o espaço é destinado para a construção do circuito. Para criar um esquema, os componentes são copiados da biblioteca e colados no projeto no lado esquerdo da tela. O usuário também pode importar componentes criados no módulo *Cbuilder*, conforme será abordado posteriormente. Após a compilação é possível observar se existe algum erro, informado em uma mensagem exibida numa caixa de texto na parte inferior da tela.

RunTime: todas as execuções e controle das simulações são feitas através do módulo *RunTime*, sendo sua tela personalizável para cada simulação, criando plotagens, controles deslizantes, botões, mostradores, interruptores, entre outros, como mostrado na Figura 3.6. Usando essas ferramentas, o usuário é capaz de controlar e interagir com a simulação. Esse módulo aciona automaticamente atualizações durante as simulações. Os dados dos gráficos podem ser guardados para o pós-processamento, impressos ou salvos em PDF, JPEG, etc.

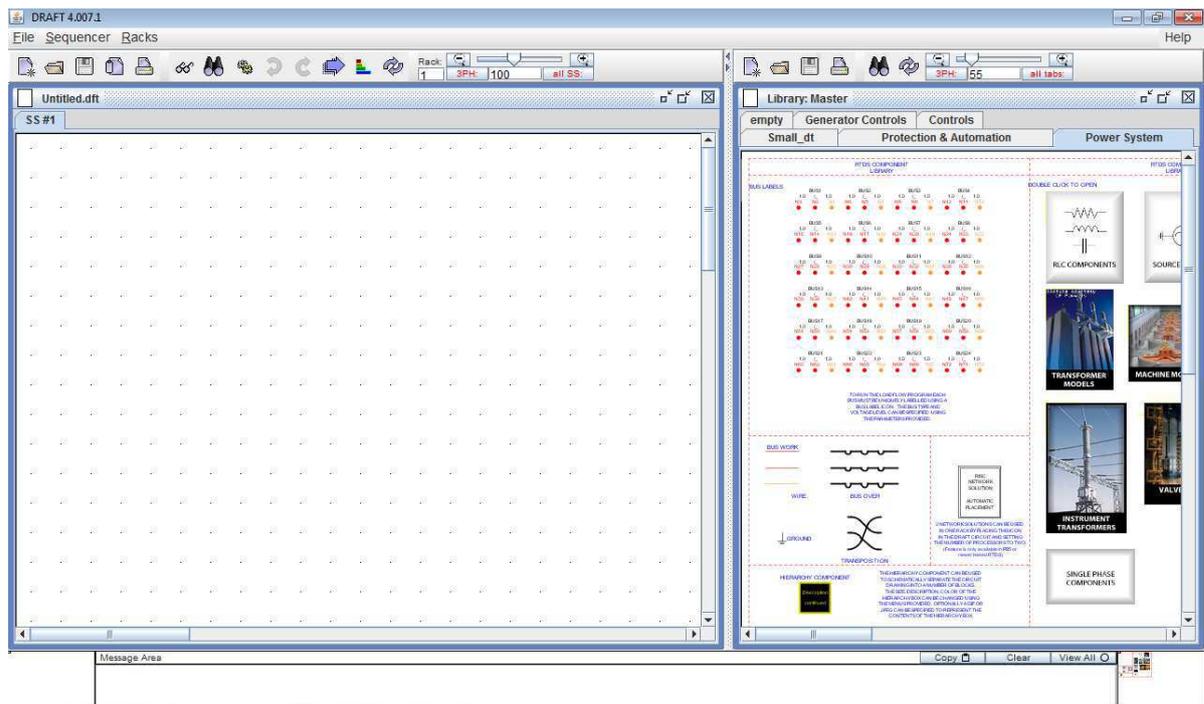


Figura 3.5. Tela do módulo *Draft*.

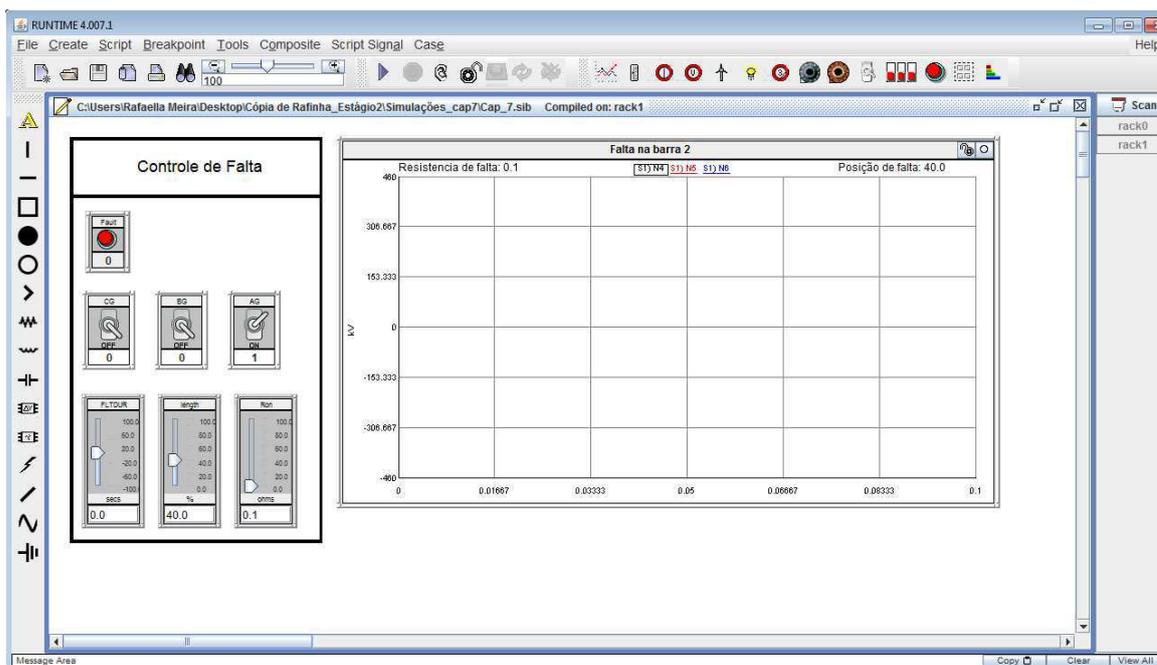


Figura 3.6. Tela do Módulo *RunTime*.

CBUILDER: *ComponentBuilder* ou *Cbuilder* é um módulo usado para a criação de projetos de componentes personalizados que podem ser utilizados para criação de sistemas com os modelos existentes na biblioteca do RSCAD, como mostrado na Figura 3.7. O usuário dispõe de um editor gráfico com diversas ferramentas de desenho para criar os ícones. Conforme se vê, o lado esquerdo apresenta a estrutura física do componente, enquanto o lado direito, a configuração desse, no qual se faz a programação em linguagem C.

Tline: Este módulo é destinado à modelagem de linhas de transmissão, que tem como resultado, a geração de um arquivo com os dados da linha modelada para ser usado no *Draft*. A tela do *TLine* é apresentada na Figura 3.8. Os dados de entrada para a modelagem de uma linha podem ser de dois tipos: i) dados relacionados com as características físicas dos condutores e geometria da linha, como a disposição dos condutores entre si e em relação ao solo; ii) impedâncias de sequência positiva e zero. Ao definir qual o tipo de dado, alguns ícones da barra de ferramentas do *TLine* serão desativados e outros ativados. Nas configurações iniciais da linha de transmissão informa-se o tipo dos dados de entrada, o modelo usado para representação da linha, o tipo de transposição, entre outros. Este arquivo é utilizado no módulo *Draft*, onde as linhas de transmissão são representadas por suas torres e por um bloco, no qual se coloca o nome do arquivo criado no *TLine*, para que ele possa ter acesso aos dados do modelo da linha.

Cable: módulo utilizado para o cálculo das características das ondas viajantes dos cabos tendo como base os dados físicos, sua tela é apresentada na Figura 3.9. Os cabos podem ser representados de três formas: padrão Bergeron, dependente da frequência ou no domínio da fase.

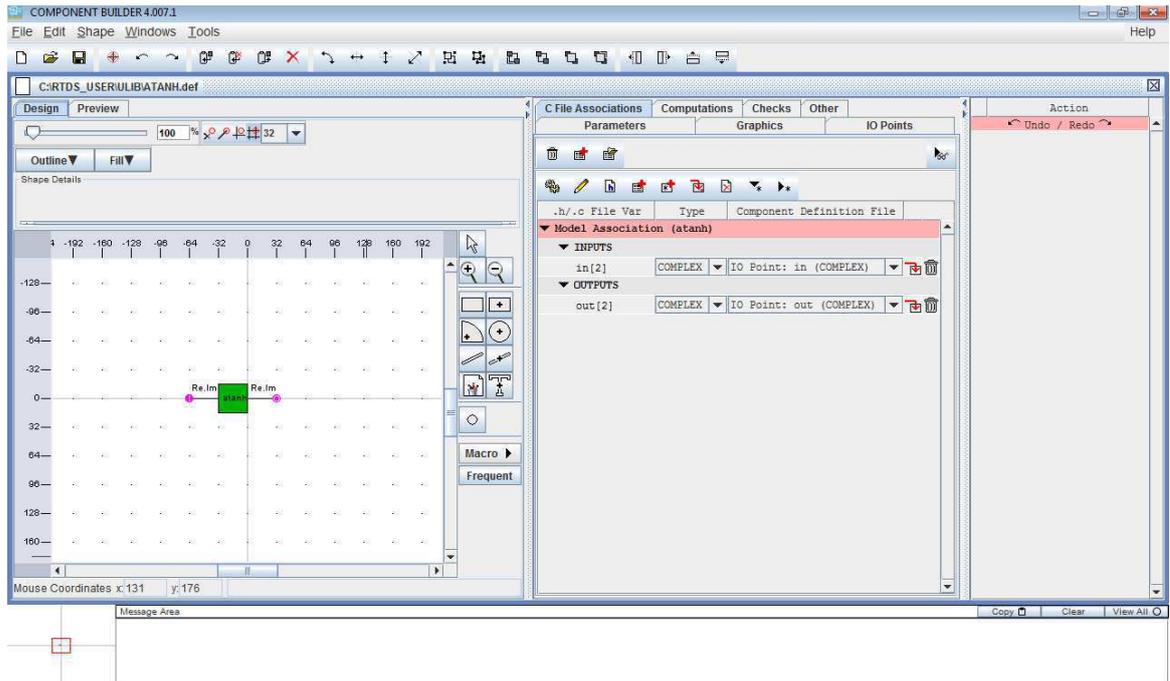


Figura 3.7. Tela do Módulo *Cbuilder*.

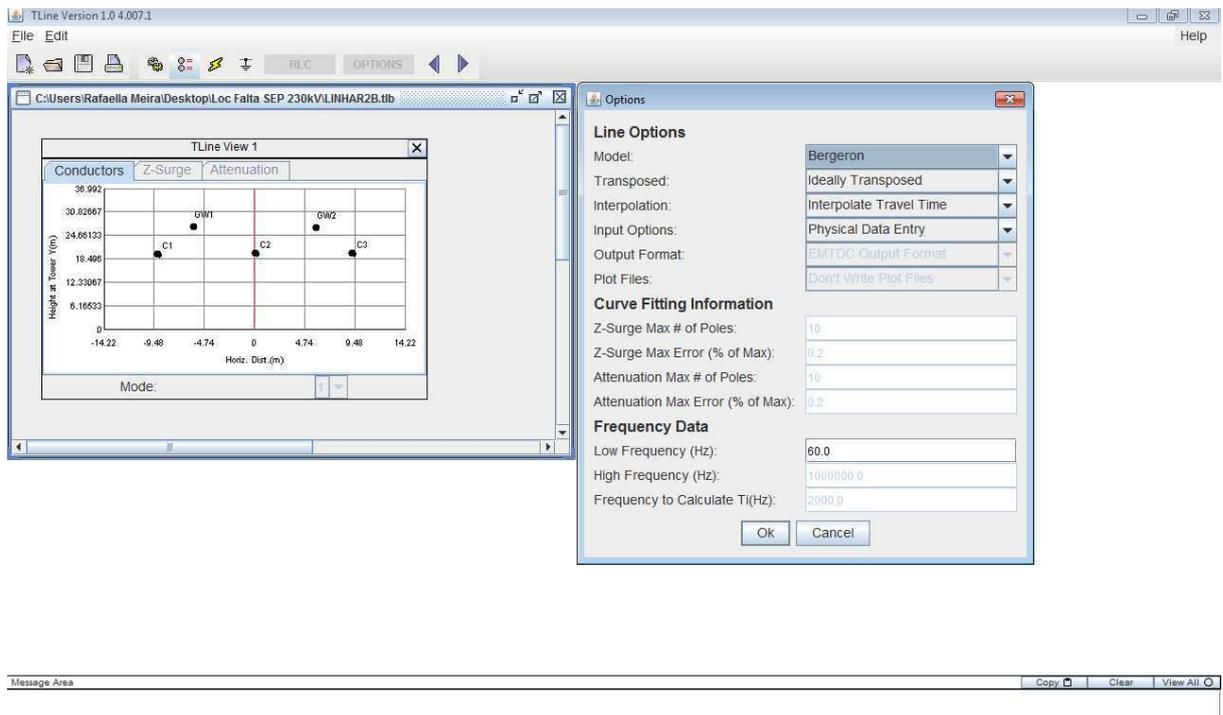


Figura 3.8. Tela do Módulo *Tline*.

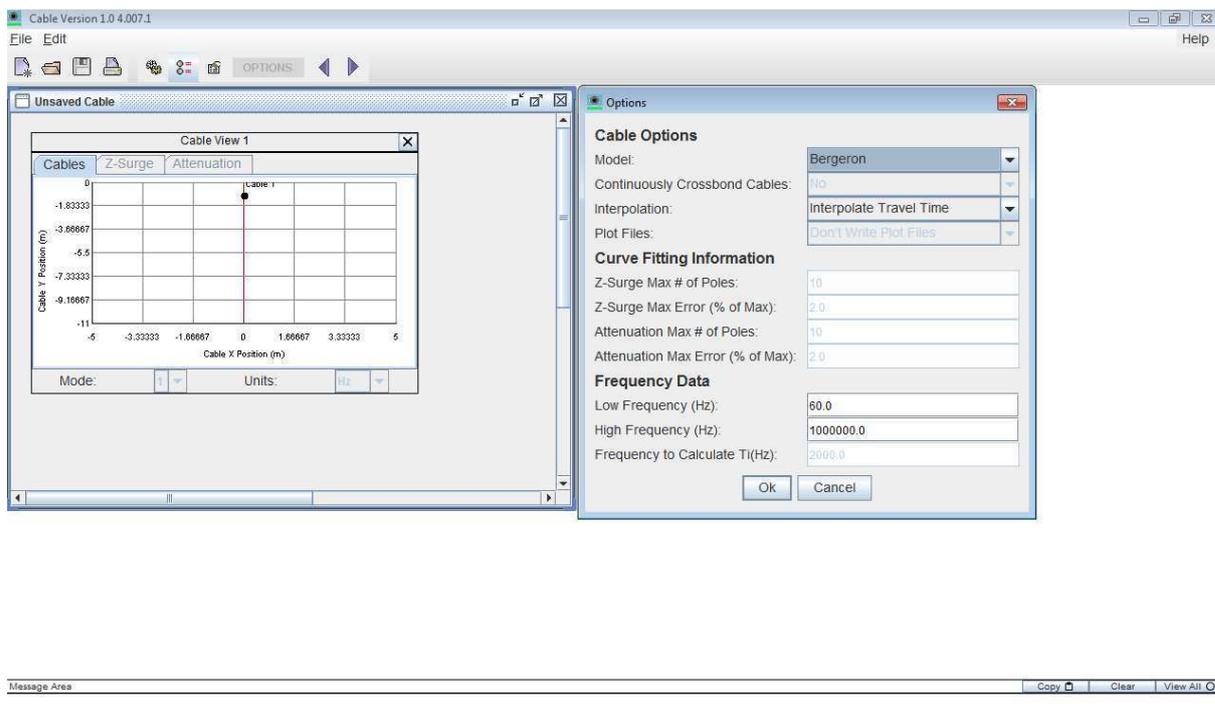


Figura 3.9. Tela do Módulo *Cable*.

3.1.2 O *Hardware* do RTDS™

O RTDS™ foi projetado para simular sistemas de energia e equipamentos de teste, tais como dispositivos de proteção e controle físicos. O *hardware* utiliza vários processadores digitais de alta velocidade que operam em paralelo para garantir a operação em tempo real. Considera-se em **tempo real** o fato de se obter soluções do sistema em um intervalo de tempo menor que as constantes de tempo do próprio sistema. O passo de tempo de simulação utilizado é da ordem de **50 μs**.

Para funcionar de forma eficiente, o simulador precisa estar localizado em um ambiente com temperatura de, no máximo, 25°C e com umidade menor que 90%.

O *hardware* do RTDS™ possui uma estrutura modular, composta por unidades denominadas *racks*. Cada unidade possui cartões de processamento e de comunicação: GPC (*Giga Processor Card*), IRC (*InterRack Communications Card*) e WIF (*Workstation InterFace Card*). Cada *rack* é capaz de simular um sistema com um determinado número de equipamentos e barras. Em geral, é possível simular, por *rack*, sistemas com até 54 nós (18 3Ø), como é o caso do simulador pertencente à UFCG. Para simular sistemas mais complexos, contendo número maior do que o número limite de nós, é necessário que o simulador tenha vários *racks* operando em conjunto. Com isso, o sistema é dividido em subsistemas e esses são executados em *racks* distintos.

Cartão GPC - *Giga Processor Card* (Figura 3.10a): componente utilizado para resolver as equações que representam o sistema de potência e os componentes do sistema de controle. Conecta vários tipos de cartões de entrada/saída por meio de fibra ótica.

Cartão IRC - *InterRack Communication Card* (Figura 3.10b): realiza a comunicação entre um rack e até seis outros racks. Cada rack comporta duas placas IRC, permitindo a formação de um RTDS com 13 racks interconectados.

Cartão WIF - *Workstation Interface Card* (Figura 3.10c): desempenha muitas das funções da placa GTWIF, sendo responsável pela comunicação entre o rack do RTDS e o computador que está utilizando o RSCAD, sincronização entre o rack individual em um caso de simulação *multi-rack*, coordenação dos dados entre os processadores localizados na parte posterior do rack e pelo diagnóstico do rack.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.10. a) Cartão GPC; b) Cartão IRC; c) Cartão WIF.

3.2 Modelagem de sistemas fictícios

Após estudo da arquitetura do RTDS, a próxima atividade consistiu em construir e simular vários exemplos de sistemas fictícios disponíveis no *Real Time Digital Simulator Tutorial Manual*, tais como:

- Divisor de tensão (Figura 3.11): Possibilitando a inserção de fonte, barra e carga, como ilustrado.

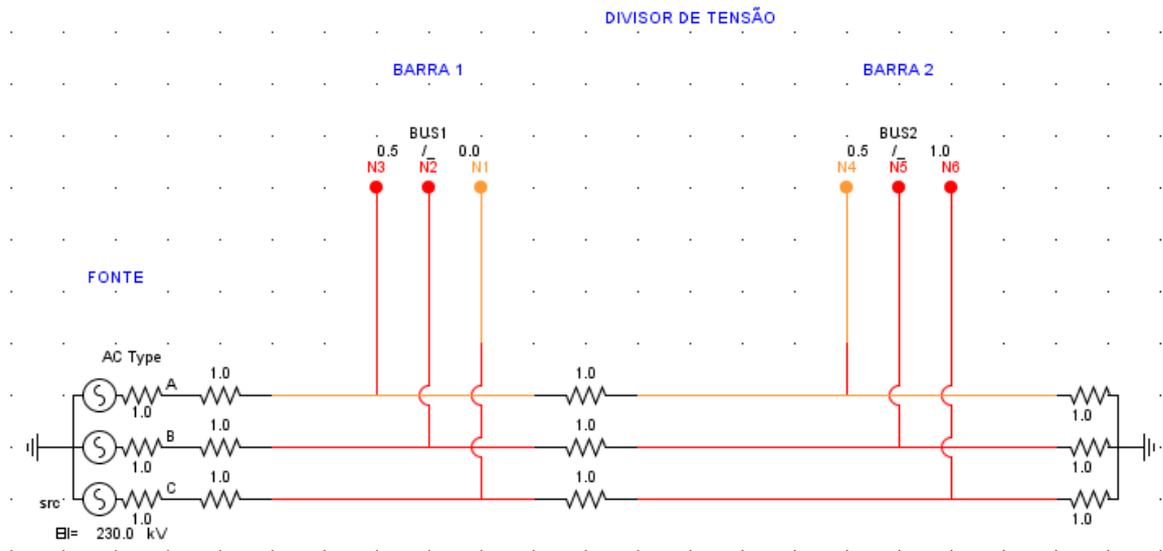


Figura 3.11. Circuito divisor de tensão.

- Sistema de energia AC simples (Figura 3.12): nessa etapa deu-se início: i) à etapa de modelagem de linhas de transmissão usando o módulo T-Line; ii) à introdução de um ramo de falta e envio de um sinal para um canal de saída analógico.

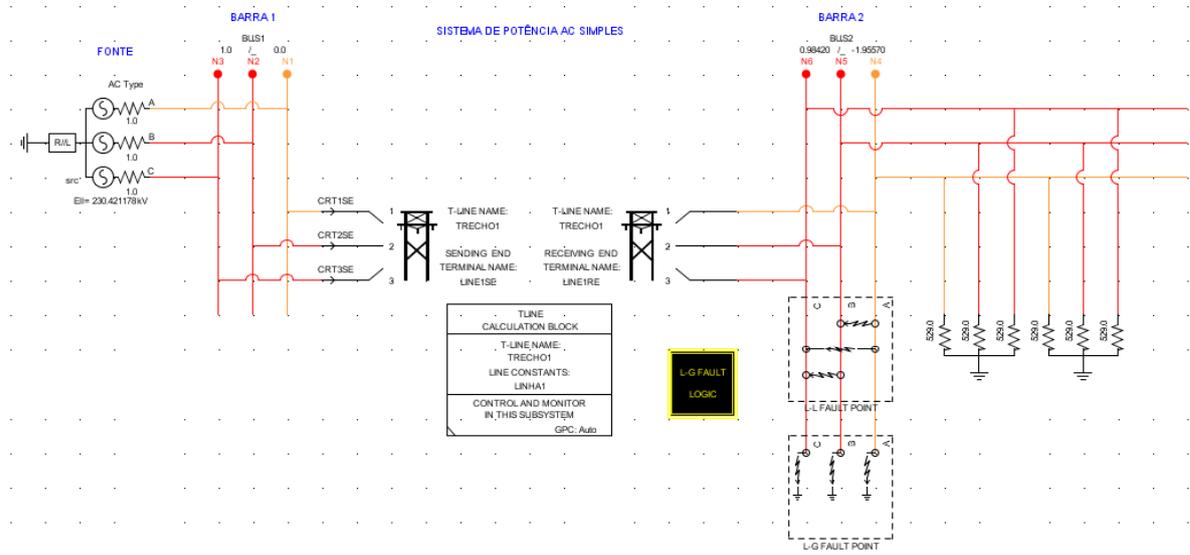


Figura 3.12. Sistema de energia AC simples, modelado no módulo *Draft*.

- Transformadores (Figura 3.13): modelou-se diferentes tipos, ligações e modelos de transformadores de potência.

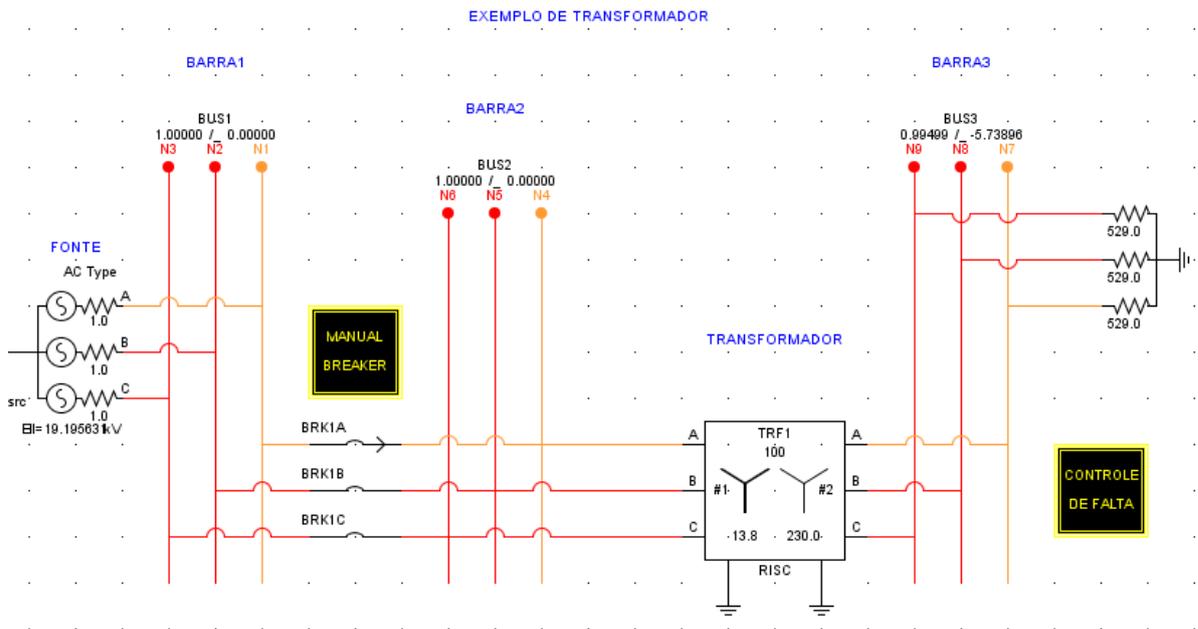


Figura 3.13. Inserção de transformador.

- Transformadores para instrumentos (Figura 3.14): modelou-se diferentes configurações com TC e TPC.

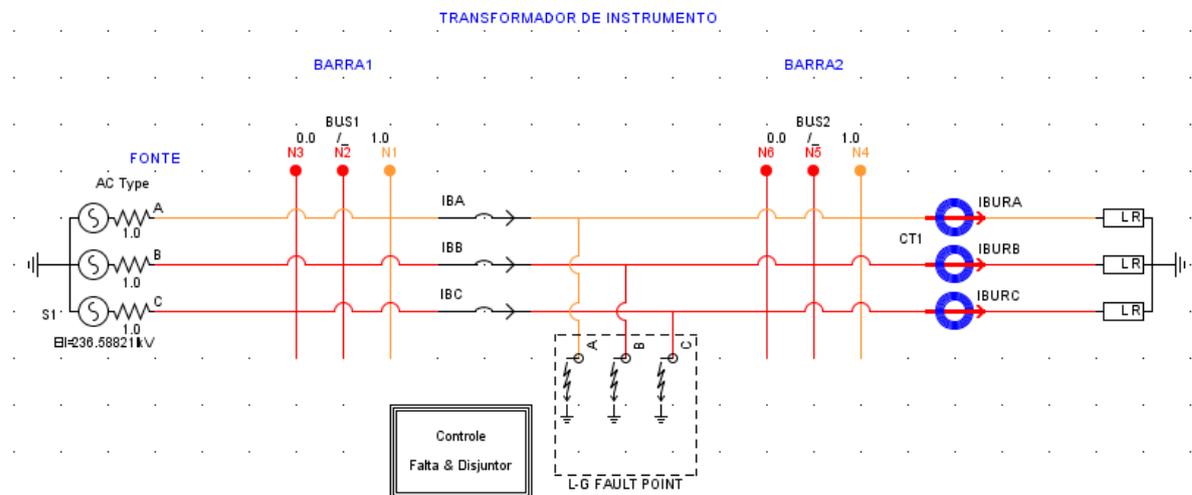


Figura 3.14. Inserção de transformadores para instrumentos.

3.3 Modelagem do sistema-teste

Seguiu-se então, para implementação de um sistema-teste para realizar um Estudo de Caso. Para isso selecionou-se um sistema elétrico simplificado de 230 kV, baseado em um sistema real, cujo diagrama unifilar é mostrado na Figura 3.15(a) e o esquema elétrico modelado no módulo *Draft* na Figura 3.15(b). Na modelagem foram utilizados dados de uma linha de transmissão de 200 km de extensão, cujos valores de resistência, reatância e susceptância de sequência positiva e zero são correspondentes às de uma

linha real de 230 kV. Os dados da linha e dos equivalentes das fontes A e B são apresentados na Tabela 3.2.

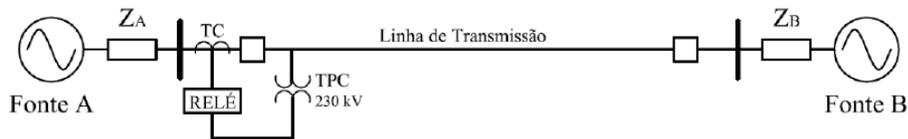
O modelo de TPC utilizado e modelado no módulo Draft são apresentados nas Figuras 3.16 e 3.17, respectivamente. Este modelo considera os principais elementos de um TPC, cujos dados são apresentados na Tabela 3.1: coluna capacitiva composta pelas capacitâncias C1 e C2; reator de compensação formado pela resistência Rc, indutância Lc e capacitância Cc; transformador de potencial indutivo representado pelo enrolamento primário (resistência Rp, indutância Lp e capacitância Cp) e pelo núcleo magnético (resistência de perdas Rm e indutância de magnetização Lm); circuito supressor de ferroressonância formado por um reator (indutâncias Lf1, Lf2 e M), capacitor Cf e uma resistência de amortecimento Rf.

Tabela 3.1. Dados do modelo do TPC.

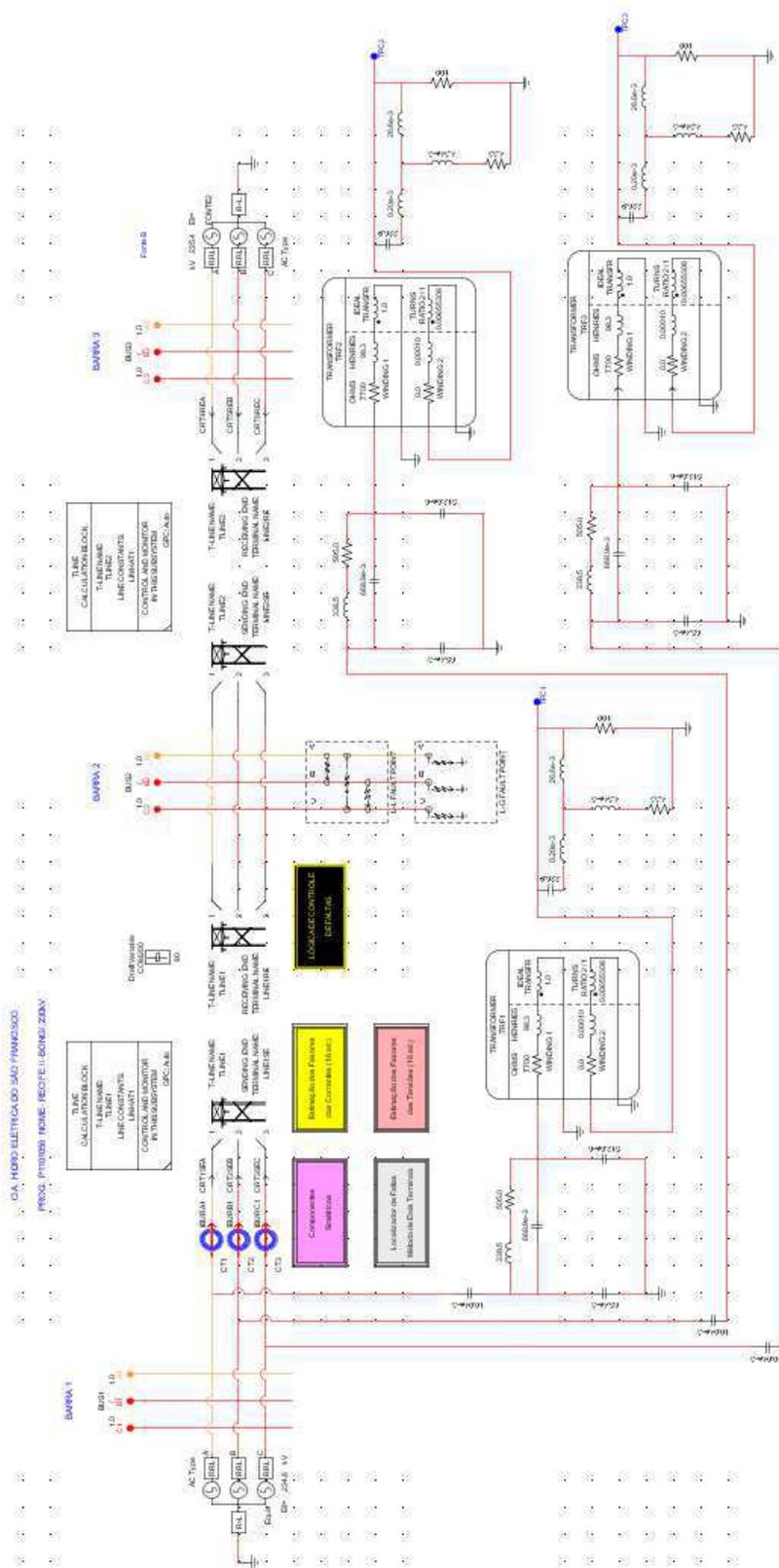
Dados relativos ao TPC modelado			
C1	10,04 nF	Cf	226,9 μF
C2	65,4 nF	Lf1	0,20 μH
Lc	338,5 H	Lf2	26,6 μH
Rc	505 Ω	M	4,34 mH
Cc	668,9 nF	Rf	4,33 Ω
Cp	512,8 pF	Rb	100 Ω

Tabela 3.2. Dados do modelo do sistema-teste.

Linha de transmissão	Fonte A	Fonte B
L= 200 Km	$V_A = 1,02/0^\circ$	$V_B = 0,98 / 10^\circ$
$Z_{L,0} = 0,532 + j 1,541 \Omega$ $Y_{L,0} = j 2,293 \mu S / Km$	$Z_{A,0} = 1,014 + j 18,754 \Omega$	$Z_{B,0} = 1,127 + j 20,838 \Omega$
$Z_{L,1} = 0,098 + j 0,510 \Omega / Km$ $Y_{L,1} = j 3,252 \mu S / Km$	$Z_{A,1} = 0,871 + j 25,661 \Omega$	$Z_{B,1} = 0,968 + j 28,513 \Omega$



(a)



(b)

Figura 3.15. Sistema teste de 230 kV: (a) Diagrama unifilar do sistema teste, (b) Esquema elétrico modelado no módulo *Draft*.

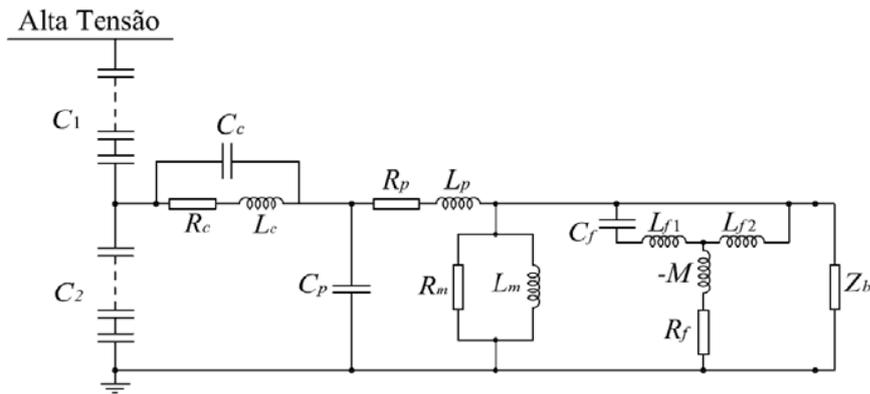


Figura 3.16. Modelo do TPC.

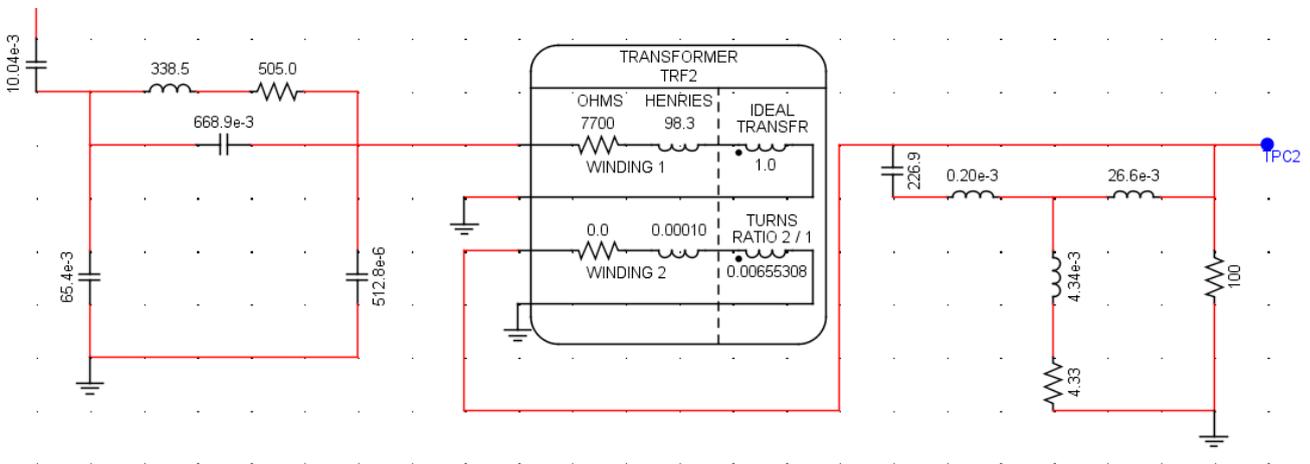


Figura 3.17. TPC modelado no módulo *Draft*.

3.4 Estudo do Princípio dos fundamentos de um relé de distância

Os relés de distância são representados pelo número 21 da Norma ANSI (*American National Standards Institute*) e seu funcionamento baseia-se na medição da impedância, admitância ou reatância entre o ponto onde está instalado e o ponto de defeito, o que resulta em vários tipos de relés: relé de impedância (ohm), relé de admitância (mho) e relé de reatância (Figura 3.18). A origem do nome se deve à proporcionalidade entre esses parâmetros e a distância (SILVA, 2006).

As características de um relé de distância são apresentadas no diagrama R - X , cujo eixo das abscissas representa a resistência R e o eixo das ordenadas, a reatância X (Figura 3.19). A partir da razão entre os fasores tensão e corrente medidos pelo relé, obtém-se a impedância aparente. O relé deve operar caso a impedância aparente esteja dentro da sua característica de operação, que consiste em uma figura geométrica no plano R - X . Diversas figuras geométricas são utilizadas, como por exemplo: círculos, retângulos, elipses, bem como a combinação delas (Figura 3.20). A escolha da característica a ser

usada depende do sistema a ser protegido e das características disponíveis nos relés (ANDERSON, 1999).

Na era dos relés eletromecânicos, a característica mho foi a mais utilizada. Quando desenhada em um diagrama $R-X$ resulta em um círculo, cuja circunferência passa pela origem, o que transmite a sua direcionalidade conforme mostrado na Figura 3.21.

Dentre as diversas características de um relé mho , o tipo auto-polarizado foi sem dúvida o mais estudado e utilizado, de modo que ainda hoje muitos relés digitais comerciais a implementam (ZIEGLER, 2006). O conceito de autopolarização baseia-se no fato de que, nessa característica, a grandeza de polarização utilizada nos comparadores é a própria tensão de entrada do relé, ou seja, pode ser implementada a partir de um único comparador. Ela tem alcance bem definido, é inerentemente direcional e pode tolerar a resistência de falta sem sofrer erros sérios de sobrealcance devido ao carregamento. Sua principal vantagem é a alta velocidade e boa coordenação, além de ser uma ferramenta útil contra a perda de sincronismo entre sistemas.

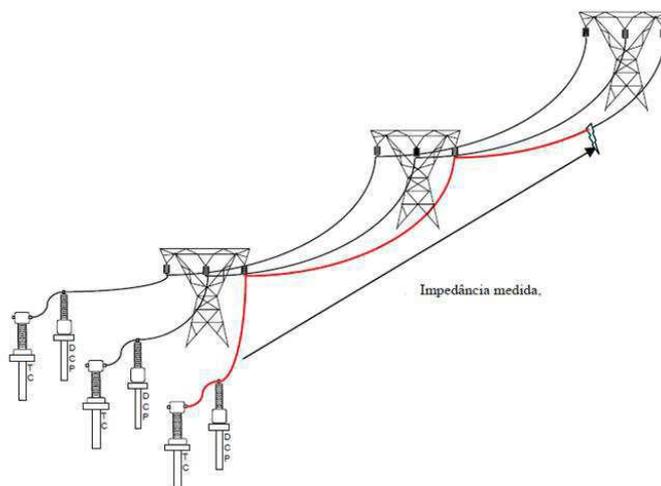


Figura 3.18. Esquema mostrando a impedância que deve ser medida para uma falta monofásica (LIMA, 2006).

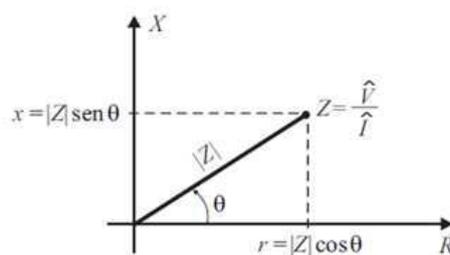


Figura 3.19. Diagrama $R-X$ (SILVA, 2006).

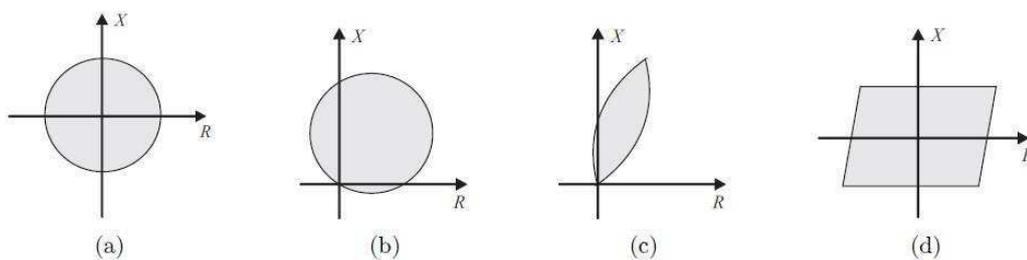


Figura 3.20. Tipos de características de operação do relé de distância: (a) impedância; (b) mho; (c) lenticular; (d) retângulo (ANDERSON, 1999).

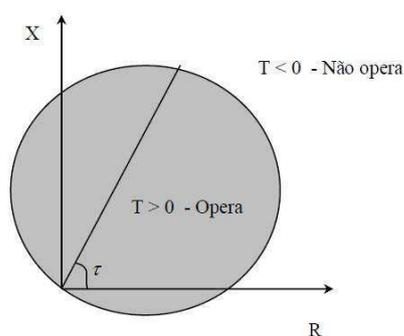


Figura 3.21. Característica de um relé tipo mho (SIQUEIRA, 2007).

3.5 Modelagem de um relé de distância

O próximo passo consistiu em modelar o relé de distância, o que foi feito fazendo uso de um modelo disponível no RTDS™. Conforme a literatura especializada, a arquitetura básica de um relé microprocessado é composta de seis unidades (SILVA, C. A, 2014), conforme mostrado na Figura 3.22:

- Unidade de Condicionamento de Sinais: onde os transformadores auxiliares garantem a isolamento elétrica entre o circuito de força e o circuito eletrônico de controle, seguido de um filtro *anti-aliasing* que limita o espectro de frequências do sinal a ser processado (tensão ou corrente);
- Unidade de Aquisição de Dados: nesta unidade operam o circuito que realiza a amostragem dos sinais, o circuito multiplexador e o conversor A/D (analógico-digital);
- Unidade de Processamento de Dados: local onde os dados são computados, e conseqüentemente, onde as decisões são definidas;
- Unidade de Memória: parte do *hardware* onde os algoritmos são armazenados, contemplando também o registro das variáveis e constantes;
- Unidade de Comunicação: onde configura-se o tipo de comunicação que o dispositivo realizará com outros elementos do sistema elétrico;
- Unidade de Interface Lógica: a qual tem por fim enviar ou receber *trips* de comando para o disjuntor.

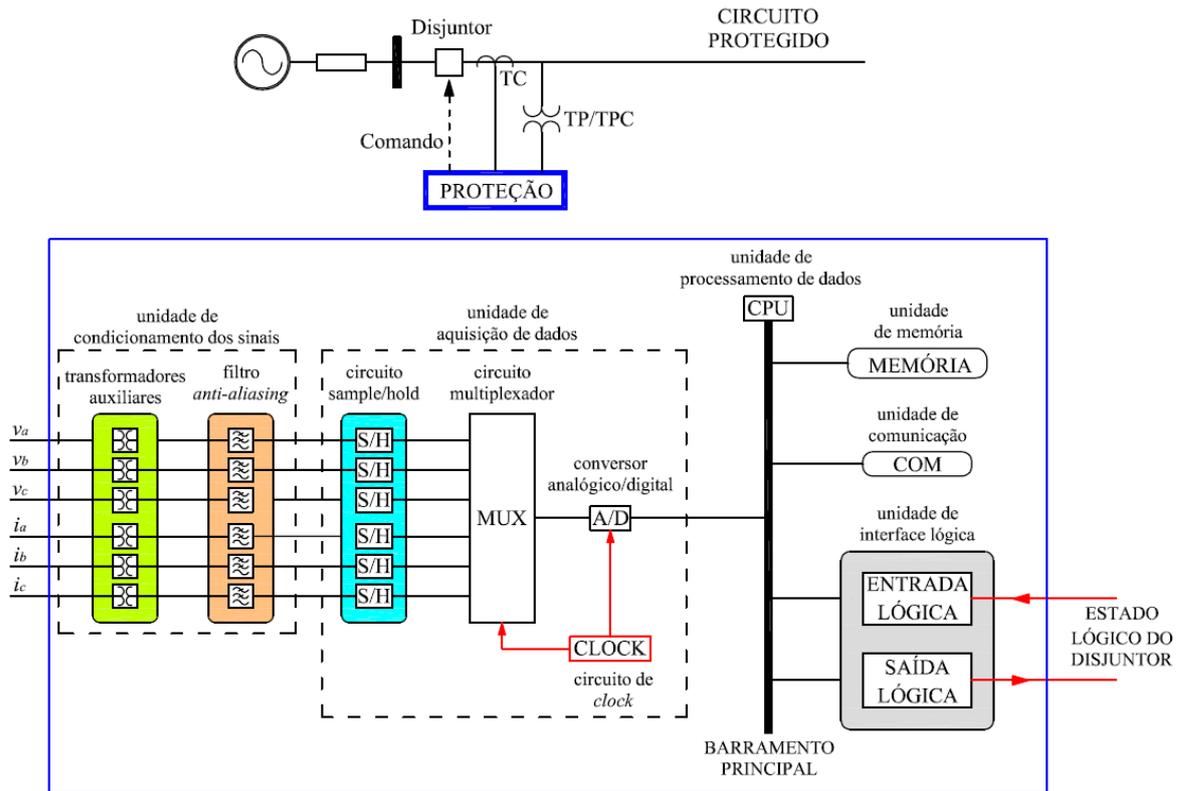


Figura 3.22. Arquitetura básica de um relé microprocessado.

Para implementação dos filtros *anti-aliasing* foram utilizados seis filtros passa-baixas Butterworth de segunda ordem, com frequência de corte igual a 360 Hz (Figura 3.23).

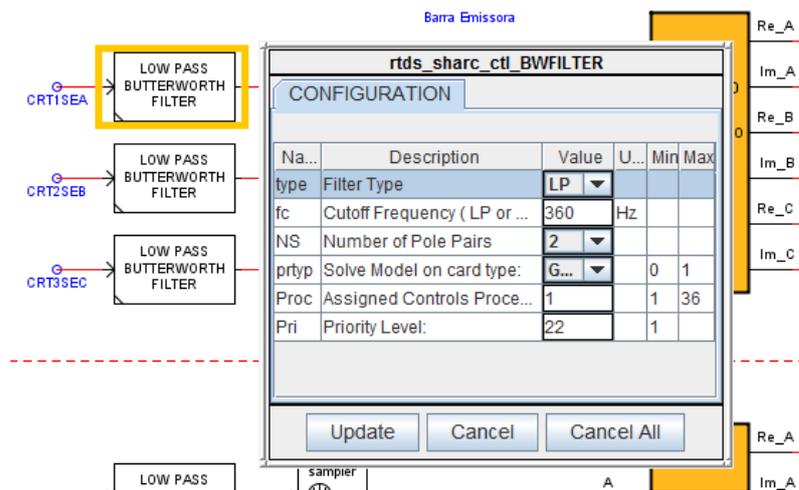


Figura 3.23. Filtro passa-baixa com frequência de corte igual a 360 Hz.

Os blocos que realizam a amostragem dos sinais de tensão e corrente foram configurados para operar com frequência de amostragem de 960 Hz, como apresentado na Figura 3.24, que corresponde a 16 amostras por ciclo.

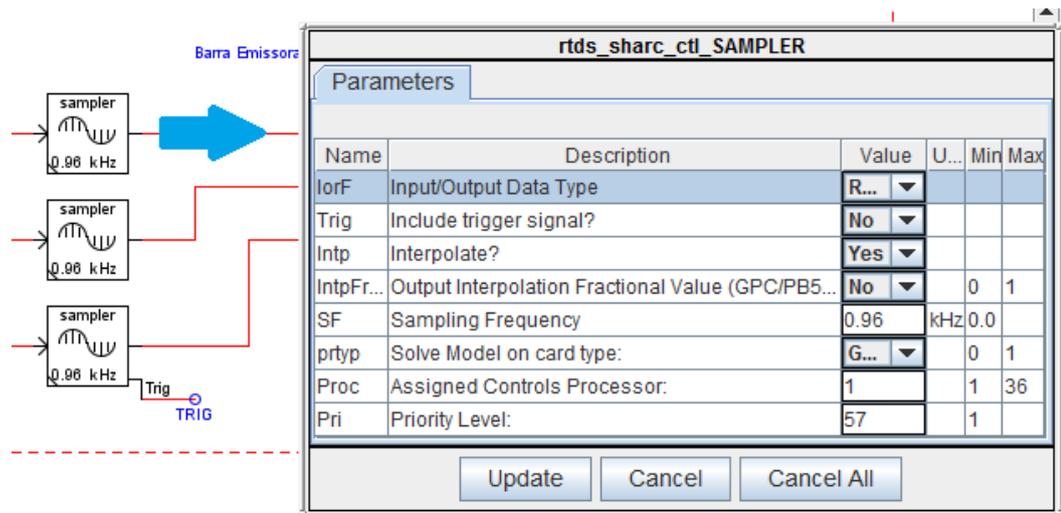


Figura 3.24. Amostragem do sinal na frequência de 960 Hz.

As unidades de processamento de dados e memória foram modeladas no *software* Cbuilder, por meio de um bloco que implementa o algoritmo do Cosseno Modificado ABB, [HART *et al.*,2000]. Nesse bloco, conforme mostrado na Figura 3.25, os dados de entrada são as variáveis relativas às tensões e correntes discretas no tempo, e os dados de saída consistem num grupo de doze variáveis que correspondem às seis grandezas de interesse V_a , V_b , V_c , I_a , I_b e I_c , expressas como um número complexo (partes real e imaginária) estimado mediante o algoritmo do Cosseno Modificado ABB.



Figura 3.25. Bloco relativo ao cosseno modificado ABB.

Para o cálculo das impedâncias de sequência positiva que servirão de parâmetro para determinar a distância de localização de uma falta, foram utilizados blocos do RSCAD que realizam operações matemáticas com números complexos.

Obtidas as impedâncias de sequência positiva, segue-se para o último estágio de operação do relé, ou seja: execução do processo de comparação das grandezas medidas com valores previamente armazenados na memória (valores de referência) para, em seguida, tomar a decisão de atuação ou não. Essa modelagem foi feita fazendo uso de blocos disponíveis no próprio RSCAD™.

A lógica que dita o funcionamento do relé de distância consiste em verificar se a impedância de operação é maior que a impedância de polarização (comparador de magnitude). Adicionalmente, implementou-se um modelo de relé proposto em SCHWEITEZ & ROBERTS [1993], baseado na atuação de um comparador do tipo cosseno com característica mho polarizada e com memória de tensão de sequência positiva.

3.5 Estudos de Casos

Por fim, efetuou-se Estudos de Casos, que consistiu em avaliar o funcionamento de um relé de distância perante uma falta, inclusive, comparando a distância da falta captada pelo relé com a distância onde a falta realmente foi aplicada. Para isso, utilizou-se um método de localização de faltas baseado em componentes fundamentais, que segundo a literatura especializada, é um dos mais precisos, visto que é imune ao efeito capacitivo das linhas de transmissão e à resistência de falta. Avaliou-se também, o impacto da resposta transitória dos TPC sobre métodos de localização de faltas baseados em componentes fundamentais através do desempenho do algoritmo de dois terminais, proposto por JOHNS & JAMALI (1990).

Para facilitar a compreensão do método avaliado, reproduz-se na Figura 3.26, o sistema-teste.

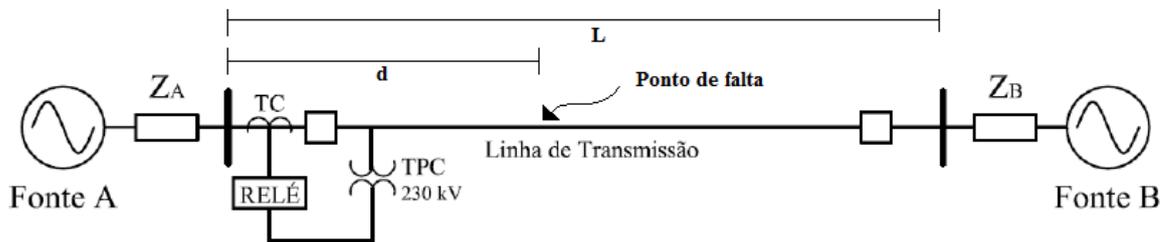


Figura 3.26. Sistema-teste com o esquema de aplicação de falta.

Considerando uma falta localizada a uma distância d da Barra A, o método estima a localização do defeito através da Equação (3.1), sendo: V_E , V_R , I_E e I_R os fasores das tensões e correntes modais (modos aéreos) nas barras emissora (da esquerda) e receptora (da direita), respectivamente.

O parâmetro Z_c é a impedância característica da linha definida pela Equação (3.2) e o parâmetro γ , é a constante de propagação da linha calculada pela Equação (3.3), na qual ω é a frequência angular nominal do sistema e r , l , g e c são a resistência série, indutância série, condutância *shunt* e capacitância *shunt* da linha, por unidade de comprimento, respectivamente.

No método utilizado, a distância de localização da falta é estimada a partir da barra emissora (da esquerda).

$$d = \frac{\tanh^{-1} \left[\frac{\hat{V}_A - \hat{V}_B \cosh(\gamma L) + Z_c \hat{I}_B \sinh(\gamma L)}{Z_c \hat{I}_A - \hat{V}_A \sinh(\gamma L) + Z_c \hat{I}_B \cosh(\gamma L)} \right]}{\gamma} \quad (3.1)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{(r + j\omega l)}{(r + j\omega c)}} \quad (3.2)$$

$$\gamma = \sqrt{(r + j\omega l)(r + j\omega c)} \quad (3.3)$$

Para avaliar apenas a influência dos TPC sobre o método de localização de faltas, os TC foram modelados como ideais, evitando-se problemas de saturação ou de desvios de módulo e fase das correntes requeridas para cálculo de d usando a Equação 3.1. A influência dos erros provenientes da resposta transitória dos TPC sobre a localização de faltas baseada na análise de componentes fundamentais foi avaliada por meio de simulações digitais via RTDS™.

As análises foram realizadas considerando diferentes condições de faltas e SIR (*System Impedance Ratio*) nas barras, igual ao do sistema original. Foram simuladas faltas a uma distância de 25% (50 km), 50% (100 km) e 75% (150 km) da barra emissora. Para cada caso, foram calculadas as localizações D_p e D_s as quais foram obtidas por meio da aplicação do método de localização de faltas avaliado, considerando as tensões primárias e secundárias, respectivamente.

Para ilustrar apresentam-se: i) as tensões nas três fases, nas barras emissora e receptora, respectivamente; ii) o comportamento das variáveis que determinam a distância de localização da falta – D_p (Distância primária componente Real) e D_s (Distancia secundária componente real), calculadas a partir das tensões primárias e secundárias, respectivamente.

Em todos os casos avaliados, observou-se que os erros causados pelas tensões transitórias do TPC de 230 kV, em estudo, não comprometeram o funcionamento do método utilizado para localização de faltas, pois não é necessário que a análise seja feita muito próximo ao momento da falta, exatamente onde ocorre as tensões transitórias do TPC.

Controle de faltas referente aos Estudos de Casos 1, 2 e 3

O controle de faltas é realizado no módulo RunTime, onde são adicionados botões, controles deslizantes, gráficos, chaves, dentre outros, como mostrado a seguir nas Figuras 3.27, 3.28, 3.29, 3.30.

A configuração dos botões, controles e chaves utilizados no controle de faltas para os três primeiros estudos de caso é mostrada na Figura 3.31.

- A resistência de falta utilizada foi de 1.0 Ohm;
- O ângulo de incidência da falta pode ser alterado utilizando o botão deslizante CONTROLE ANGULAR, o valor utilizado foi de 0° e 90° (valores de maior

relevância), transformado em segundos por meio da equação: $t = (\text{graus}/360) * T$, onde t = tempo em segundos e T é o período da onda;

A duração da falta pode ser modificada através do botão deslizante DURAÇÃO DA FALTA, o valor empregado foi de 3 ciclos, transformado em segundos por intermédio da equação: $t = (\text{ciclos}/f)$, onde t = tempo em segundos e f = frequência



Figura 3.27. Botão utilizado na aplicação da falta.

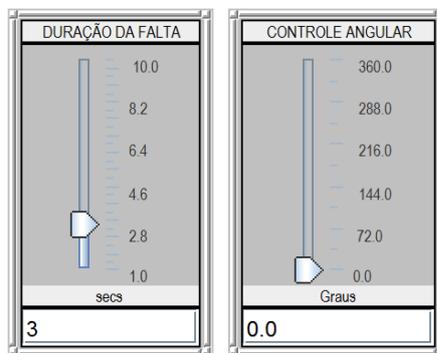


Figura 3.28. Controles deslizantes utilizados para ajuste angular e de duração da falta, respectivamente.

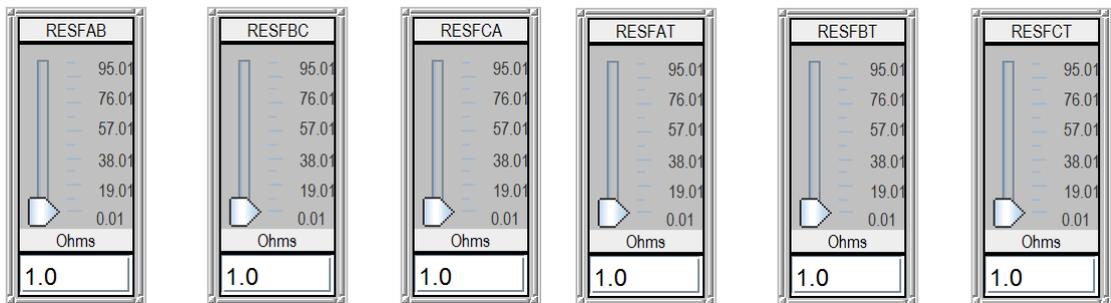


Figura 3.29. Controles deslizantes utilizados para ajuste da resistência de falta entre fases e entre fases e a terra, respectivamente.

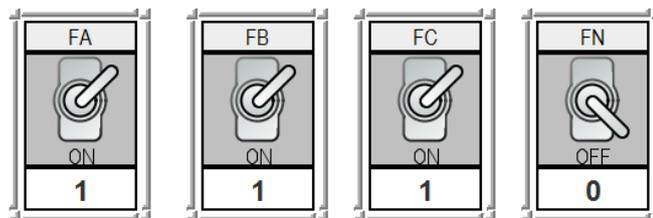


Figura 3.30. Chaves de seleção das fases.

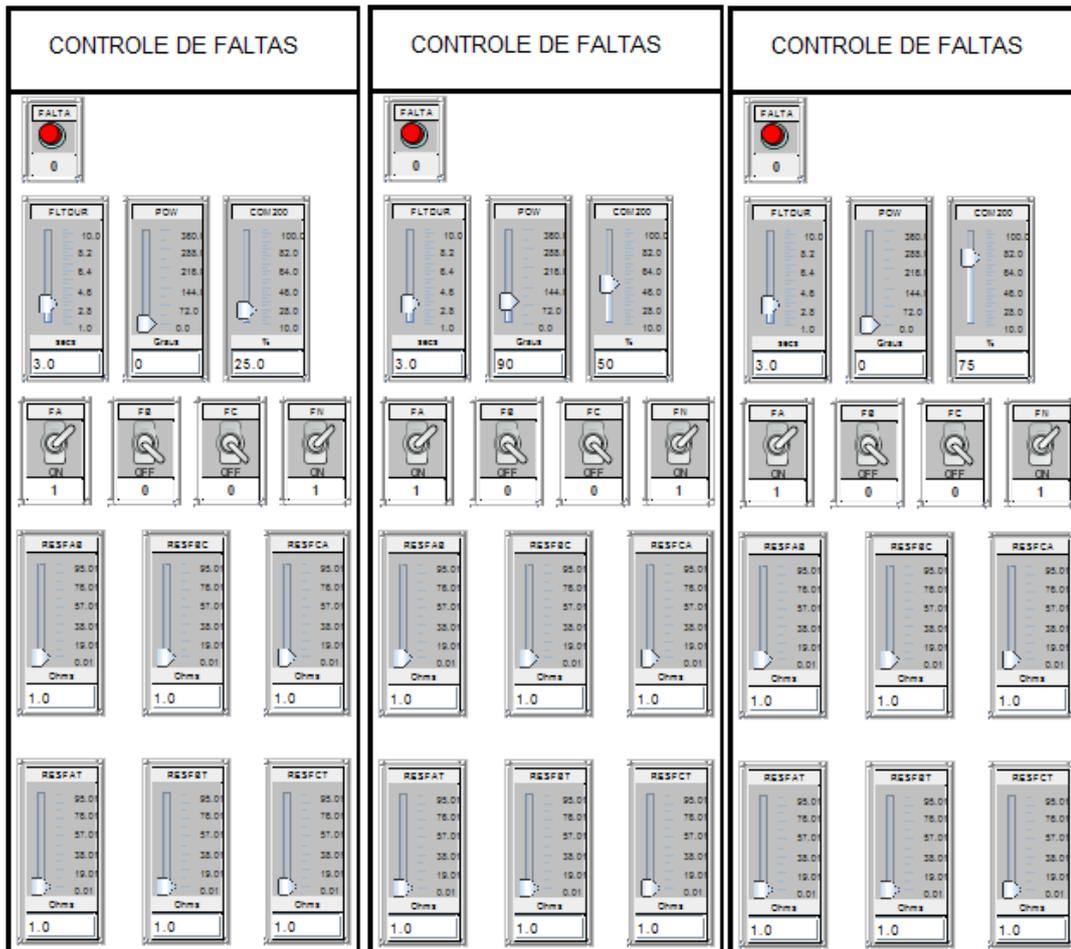


Figura 3.31. Controle de faltas para os estudos dos casos 1,2 e 3, respectivamente.

Estudo de Caso 1: Falta AT a 25% da linha

Neste caso, simulou-se uma falta AT localizada à 50 km (25%) da barra emissora. Nas Figuras 3.32 e 3.33 apresenta-se as tensões nas fases A, B e C, respectivamente, nas barras emissora e receptora obtidos a partir da tensão primária e secundária. Na Figura 3.34 apresenta-se o comportamento das variáveis que determinam a distância de localização da falta D_p e D_s , calculadas a partir das tensões primárias e secundárias, respectivamente.

Observa-se que em regime permanente, o valor informado pelo relé de distância é próximo a 150 km, esse valor corresponde a impedância do sistema sem a aplicação da falta. Após a falta, a localização informada pelo relé de distância modelado foi muito próxima de 50 km, distância onde a falta foi aplicada.

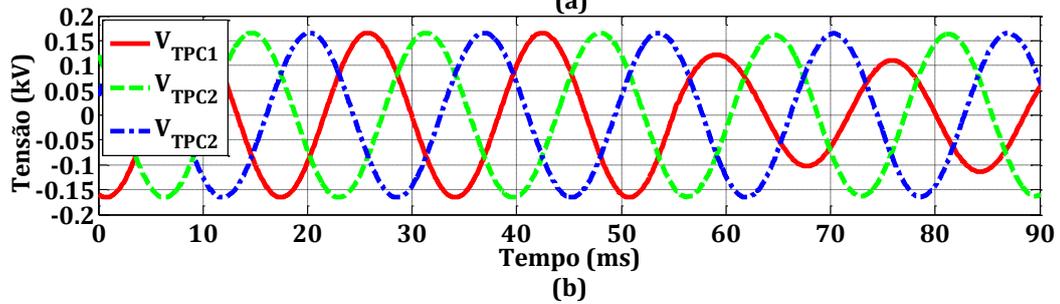
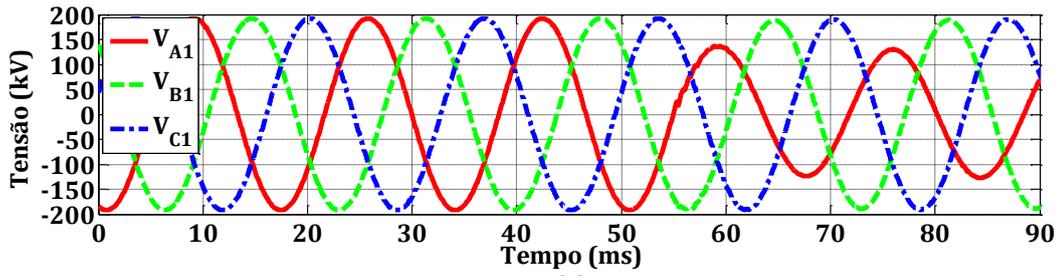


Figura 3.32. Registro de simulação de falta AT. Tensão na barra emissora. Falta a 25% da linha de transmissão. (a) Tensão primária; (b) Tensão secundária.

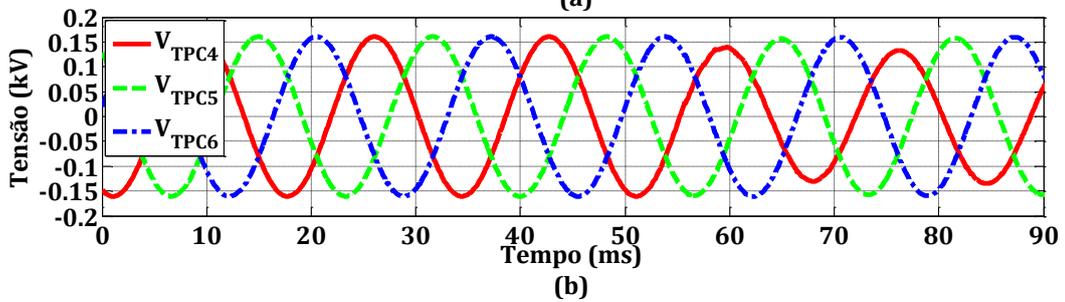
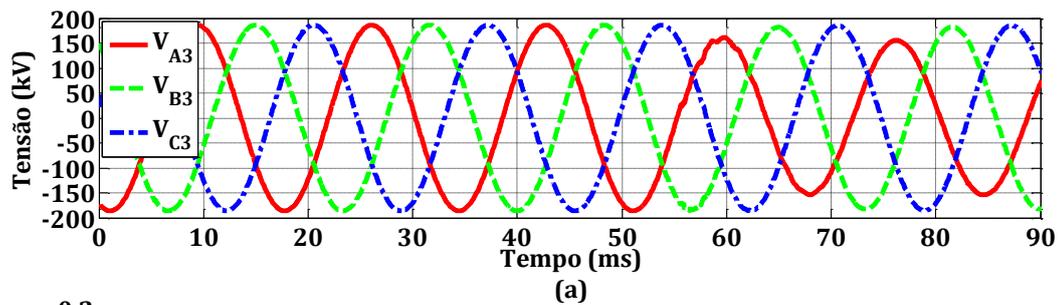


Figura 3.33. Registro de simulação de falta AT. Tensão na barra receptora. Falta a 25% da linha de transmissão. (a) Tensão primária; (b) Tensão secundária.

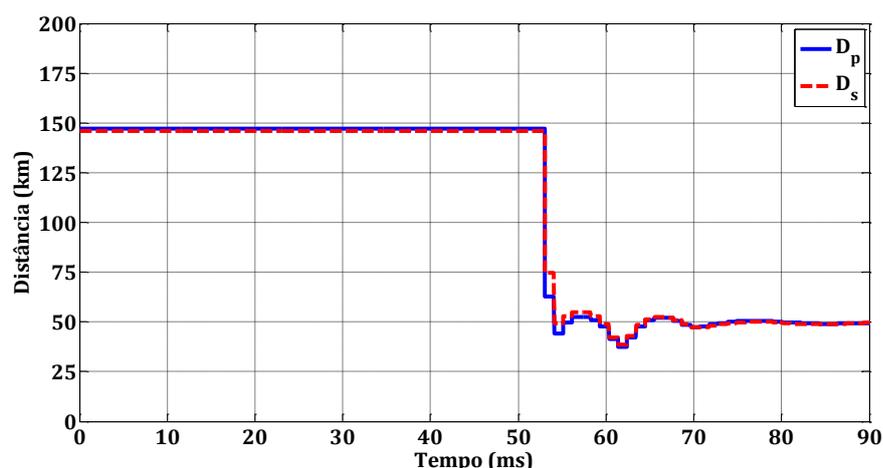


Figura 3.34. Registro de simulação de falta AT a 25% (50 km) da linha de transmissão: comportamento das variáveis D_p e D_s .

Estudo de Caso 2: Falta AT a 50% da linha

Neste caso, simulou-se uma falta AT localizada à 100 km (50%) da barra emissora. Nas Figuras 3.35e 3.36 apresenta-se as tensões nas fases A, B e C, respectivamente, nas barras emissora e receptora obtidos a partir da tensão primária e secundária. Na Figura 3.37 apresenta-se o comportamento das variáveis que determinam a distância de localização da falta D_p e D_s , calculadas a partir das tensões primárias e secundárias, respectivamente.

Observa-se que em regime permanente, o valor informado pelo relé de distância é próximo a 150 km, esse valor corresponde a impedância do sistema sem a aplicação da falta. Após a falta, a localização informada pelo relé de distância modelado foi muito próxima de 100 km, distância onde a falta foi aplicada.

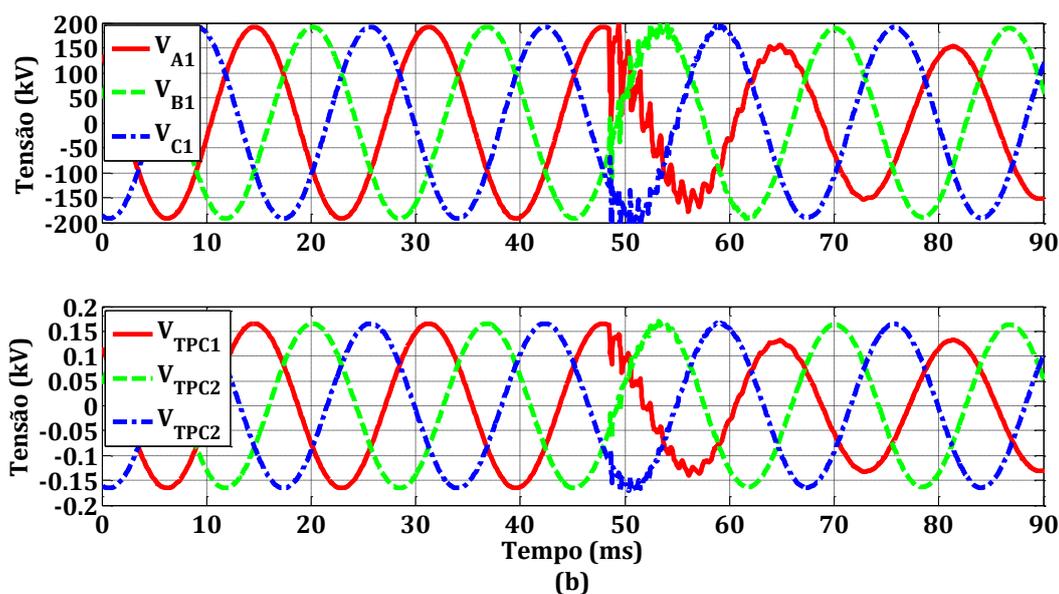


Figura 3.35. Registro de simulação de falta AT. Tensão na barra emissora. Falta a 50% da linha de transmissão. (a) Tensão primária; (b) Tensão secundária.

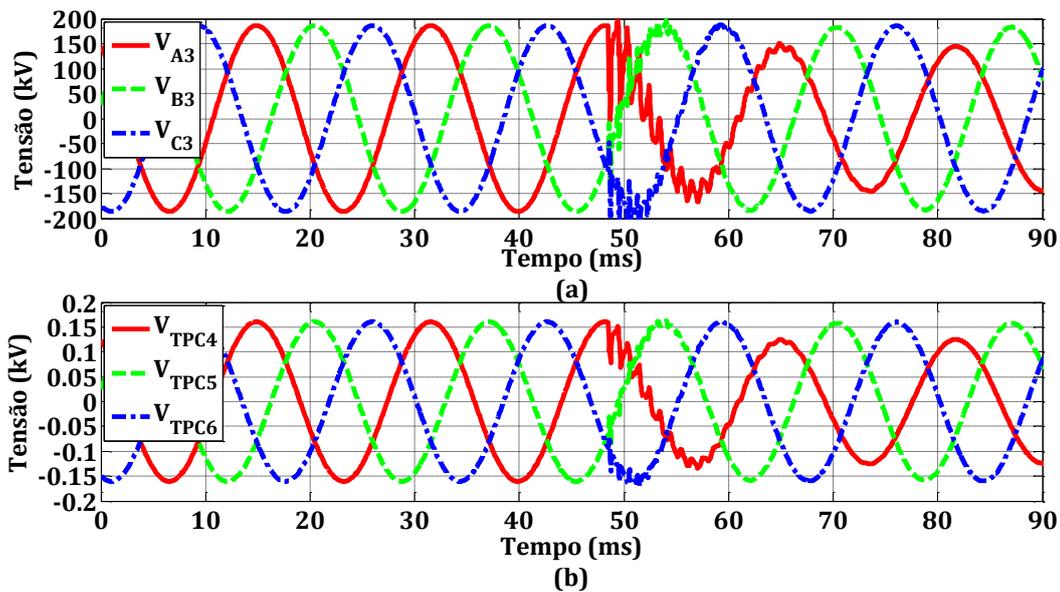


Figura 3.36. Registro de simulação de falta AT. Tensão na barra receptora. Falta a 50% da linha de transmissão. (a) Tensão primária; (b) Tensão secundária.

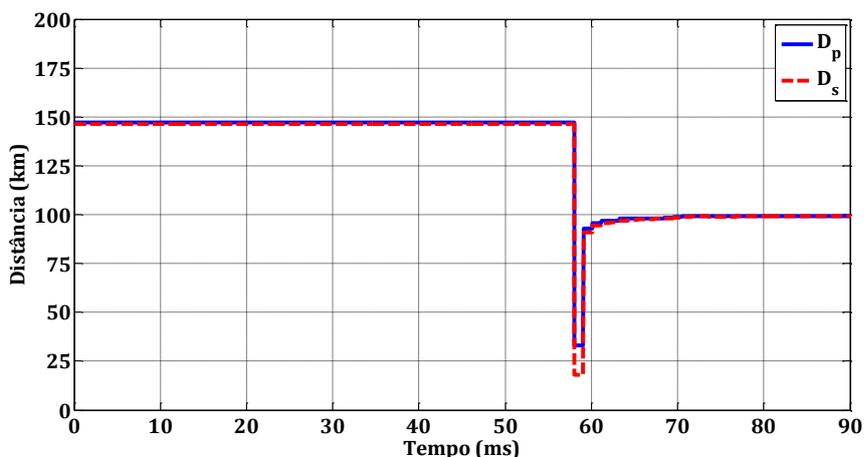


Figura 3.37. Registro de simulação de falta AT a 50% (100 km) da linha de transmissão: comportamento das variáveis D_p e D_s .

Estudo de Caso 3: Falta AT a 75% da linha

Neste caso, simulou-se uma falta AT localizada à 150 km (75%) da barra emissora. Nas Figuras 3.38 e 3.39 apresenta-se as tensões nas fases A, B e C, respectivamente, nas barras emissora e receptora, obtidos a partir da tensão primária e secundária. Na Figura 3.40 apresenta-se o comportamento das variáveis que determinam a distância de localização da falta D_p e D_s , calculadas a partir das tensões primárias e secundárias, respectivamente.

Observa-se que em regime permanente, o valor informado pelo relé de distância é próximo a 150 km, esse valor corresponde a impedância do sistema sem a aplicação da

falta. Após a falta, a localização informada pelo relé de distância modelado foi muito próxima de 150 km, distância onde a falta foi aplicada

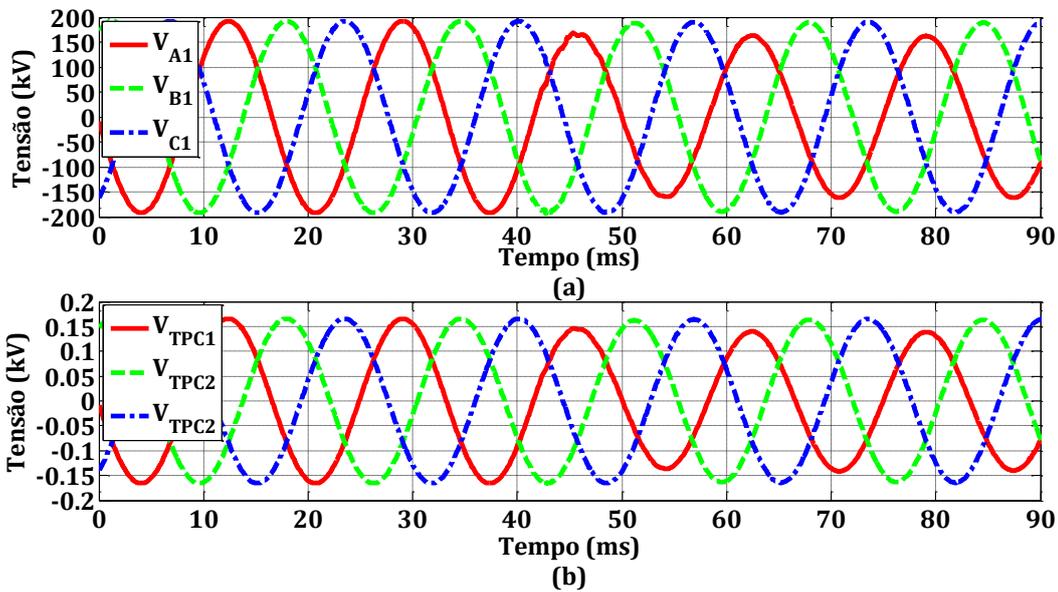


Figura 3.38. Registro de simulação de falta AT. Tensão na barra emissora. Falta a 75% da linha de transmissão. (a) Tensão primária; (b) Tensão secundária.

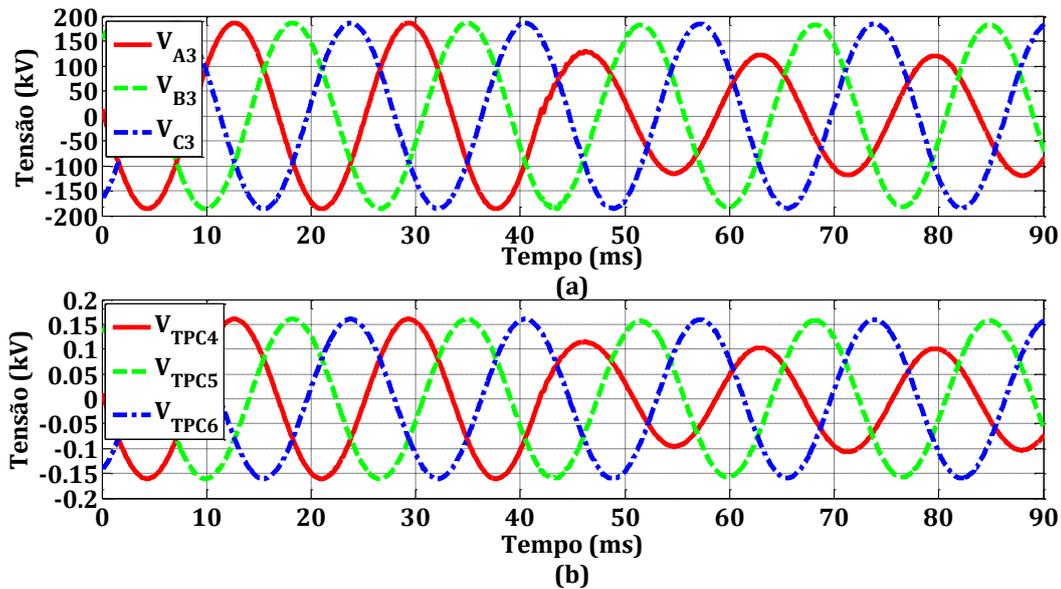


Figura 3.39. Registro de simulação de falta AT. Tensão na barra receptora. Falta a 75% da linha de transmissão. (a) Tensão primária; (b) Tensão secundária.

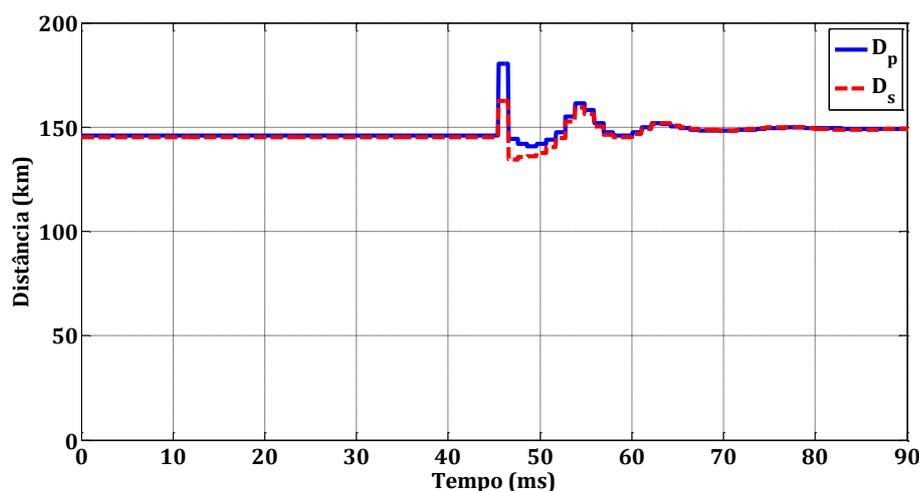


Figura 3.40. Registro de simulação de falta AT a 75% (150 km) da linha de transmissão: comportamento das variáveis D_p e D_s .

Controle de faltas para o Estudo de Caso 4

A configuração dos botões, chaves e controles utilizados no controle da falta para o Estudo de Caso 4 é mostrada na Figura 3.41.

- A resistência de falta utilizada foi de 1 Ohm;
- O ângulo de incidência da falta pode ser alterado utilizando o botão deslizante FLTDUR, o valor utilizado foi de 90° , transformado em segundos por meio da equação: $t = (\text{graus}/360) * T$, onde t = tempo em segundos e T é o período da onda;
- A duração da falta pode ser modificada através do botão deslizante FTDUR, o valor empregado foi de 3 ciclos, transformado em segundos por intermédio da equação: $t = (\text{ciclos}/f)$, onde t = tempo em segundos e f = frequência.

Estudo de Caso 4: Falta ABC a 75% da linha

Para concluir as análises de localização de faltas foi simulada uma falta trifásica localizada à 150 km (75%) da barra emissora. Nas Figuras 3.42 e 3.43 apresenta-se as tensões nas fases A, B e C, respectivamente, nas barras emissora e receptora obtidos a partir da tensão primária e secundária. Na Figura 3.44 apresenta-se o comportamento das variáveis que determinam a distância de localização da falta D_p e D_s , calculadas a partir das tensões primárias e secundárias, respectivamente.

Observa-se que em regime permanente, o valor informado pelo relé de distância é próximo a 150 km, esse valor corresponde a impedância do sistema sem a aplicação da falta. Após a falta, a localização informada pelo relé de distância modelado foi muito próxima de 150 km, distância onde a falta foi aplicada

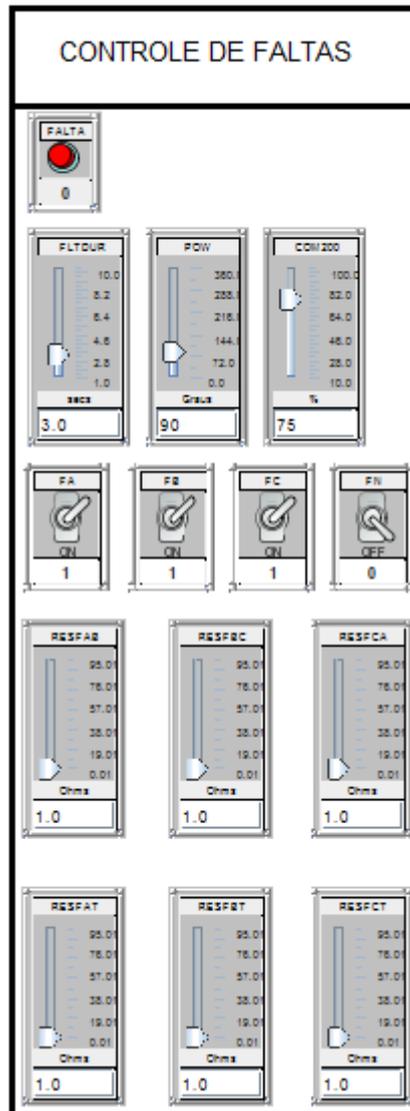


Figura 3.41. Controle de falta para o estudo de caso 4.

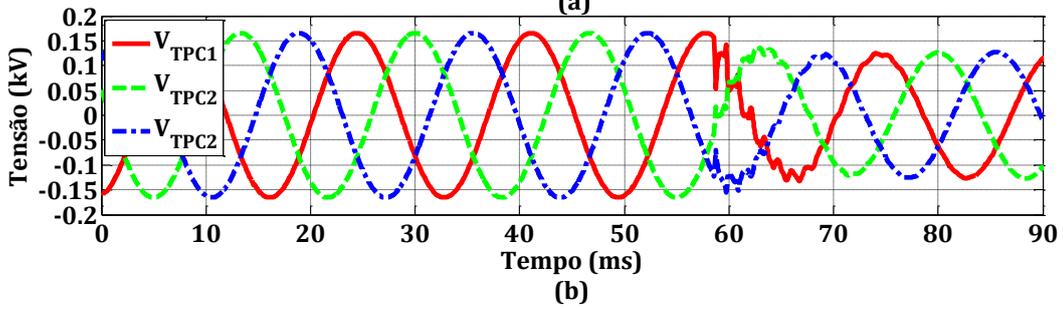
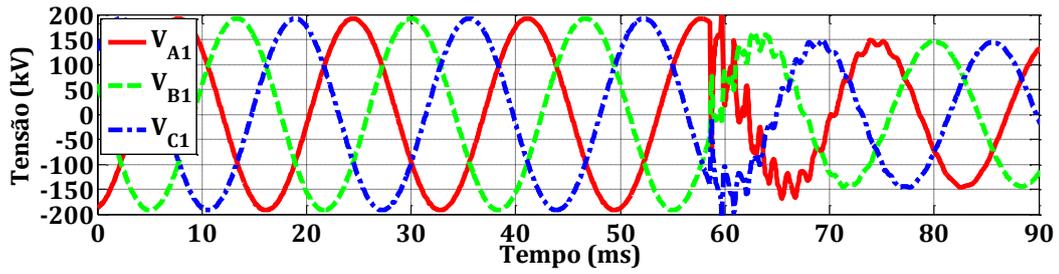


Figura 3.42. Registro de simulação de falta ABC. Tensão na barra emissora. Falta a 75% da linha de transmissão. (a) Tensão primária; (b) Tensão secundária.

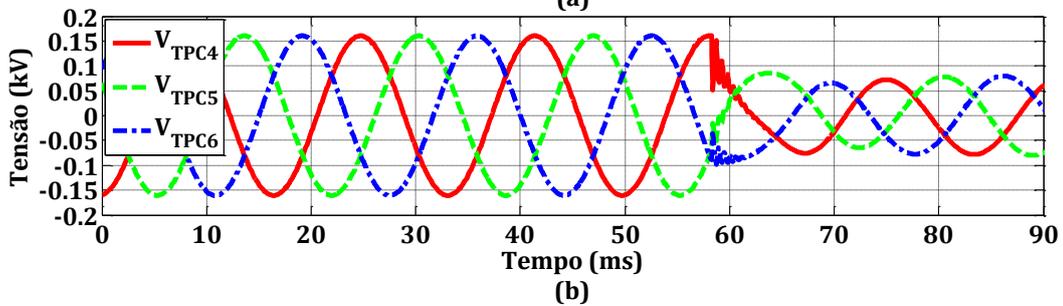
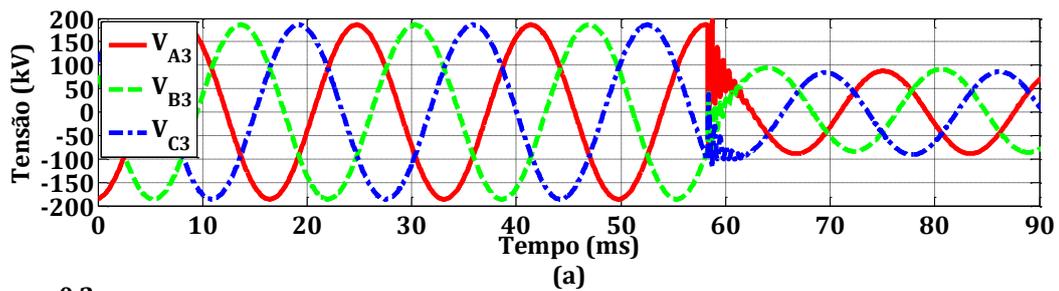


Figura 3.43. Registro de simulação de falta ABC. Tensão na barra receptora. Falta a 75% da linha de transmissão. (a) Tensão primária; (b) Tensão secundária.

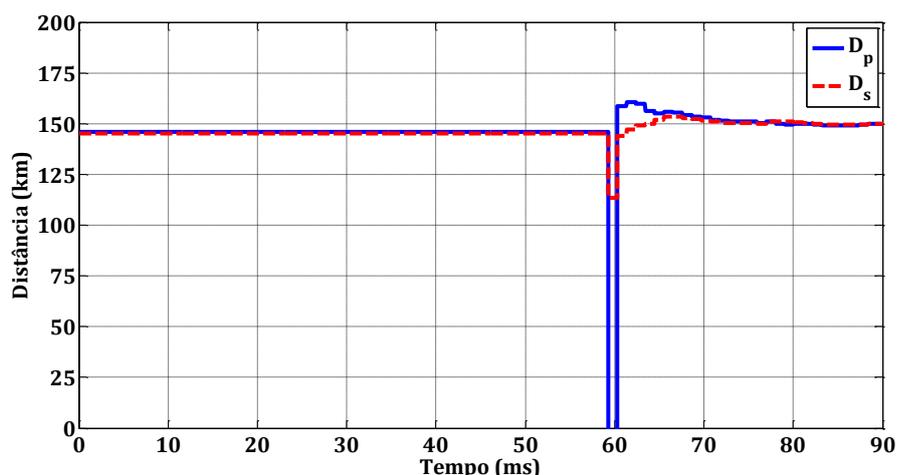


Figura 3.44. Registro de simulação de falta ABC a 75% (150 km) da linha de transmissão: comportamento das variáveis D_p e D_s .

4. Considerações Finais

O Estágio Supervisionado contribuiu decisivamente em minha formação acadêmica, visto que complementou uma parte importante do conhecimento adquirido ao longo da minha caminhada discente.

O estudo do RTDS foi de imensa relevância, visto que permitiu o contato com um equipamento moderno e disponível em poucas instituições no mundo.

As simulações se concentraram em um sistema real, elevando ainda mais a capacidade de aprendizado, pois utilizou-se o RTDS™ para simular os sistemas elétricos de potência e o *software* CBuilder para implementar a lógica do relé.

Analisando os resultados obtidos, pôde-se constatar que em todos os casos a localização da falta informada pelo relé de distância foi muito próxima a do local onde realmente foi aplicada, mesmo diante dos erros causados pelas tensões transitórias do TPC, validando o método de localização de faltas baseado em componentes fundamentais, através do desempenho do algoritmo de dois terminais.

5. Referências Bibliográficas

HART, D. G.; NOVOSEL, D.; SMITH, R. A. *Modified Cosine Filters*. Patente US006154687A, November 2000.

JOHNS, A. and JAMALI, S. "Accurate fault location technique for power transmission lines" *Generation, Transmission and Distribution*, IEE Proceedings C, vol. 137, no. 6, pp. 395–402, November 1990.

RTDS Technologies. Disponível em: <http://rtds.com/index/index.html>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2016.

RTDS Technologies. *RTDS^{MT} User's Manual*. Canadá, 2007.

SCHWEITZER, E. O. and ROBERTS, J. "*Distance Relay Element Design*". Forty-Sixth Annual Conference for Protective Relays Engineers, Texas A&M University College Station, 1993.

SILVA, C. A. *Filtros Digitais Recursivos para Redução do Impacto da Resposta Transitória do TPC*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, março de 2014.