



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

Aluna: Daphne De La Torre Barros

Orientador: Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Campina Grande – Paraíba

Maior de 2011

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

*Relatório de Estágio Supervisionado
apresentado à Unidade Acadêmica de
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande em
cumprimento parcial às exigências
para obtenção do Grau de Engenheiro
Eletricista.*

ALUNA: _____

Daphne De La Torre Barros

ORIENTADOR: _____

Damásio Fernandes Júnior, D. Sc.

Campina Grande – PB.

Mai de 2011

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

Estagiária: Daphne De La Torre Barros

Local: LARCA – UFCG

Período de Estágio: Janeiro/2011 a Fevereiro/2011

Orientador: Damásio Fernandes Júnior, D.Sc

Campina Grande – PB.

Maior de 2011

Agradecimentos

A Deus, que sempre estar presente, iluminando meu caminho e me abençoando em todos os momentos da vida.

Aos meus pais e irmãos pela confiança em mim depositada, pela enorme paciência, e além de tudo, pelo amor.

Ao meu tio Renato, que contribui com a minha chegada até esta etapa da minha formação acadêmica.

Ao professor Damásio Fernandes Jr. pela oportunidade de estágio e por sempre ter confiado na minha capacidade, me apoiando e me incentivando, contribuindo significativamente com minha formação acadêmica.

A minha amiga Yonatha, que foi minha parceira durante todo o estágio, assim como durante todo o curso, sempre me ajudando e me apoiando.

Aos meus amigos e colegas do período 2006.1 pela amizade e pelas contribuições no decorrer do curso.

A Tony pelo apoio, incentivo, paciência e amor.

A Célio Anésio da Silva pelas valiosas orientações, contribuições e disposição de sempre ajudar durante todo o estágio.

A Alana pela colaboração e disposição de sempre ajudar.

Apresentação

O estágio supervisionado foi realizado no Laboratório de Referência em Controle e Automação (LARCA) da Universidade Federal de Campina Grande, durante o período de 10 de janeiro de 2011 a 18 de fevereiro de 2011.

As atividades desenvolvidas durante o estágio foram: estudo e uso do software TPCalc, estudo e uso do simulador digital RTDSTM (*Real Time Digital Simulator*) e reprodução de simulações no RDTSTM referentes ao uso de transformador de potencial capacitivo (TPC) para medição de sinais com componentes harmônicas.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	8
1. INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	10
1.2 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS.....	10
2. TRANSFORMADOR DE POTENCIAL CAPACITIVO (TPC).....	11
2.1 O USO DO TPC NA MEDIÇÃO.....	13
3. TPCALC.....	14
3.1 COMO USAR O TPCALC.....	15
3.2 EXEMPLO DO USO DO TPCALC	19
4. RTDS	22
4.1 HARDWARE DO RTDS™	23
4.1.1 GPC.....	24
4.1.2 IRC	25
4.1.3 WIF.....	26
4.2 SOFTWARE DO RTDS	26
4.2.1 RSCAD	26
4.2.2 <i>Compilador</i>	34
4.2.3 <i>Modelos dos componentes dos sistemas de potência e de controle</i>	35
5. RESULTADOS E ANÁLISES	35
5.1 SIMULAÇÃO NO RTDS	36
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
BIBLIOGRAFIA	44
ANEXO 1 – DADOS DA LINHA DE TRANSMISSÃO RECIFE II – BONGI I.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema básico de um TPC a 60 Hz.	12
Figura 2 – Modelo de TPC adotado pelo TPCalc.....	144
Figura 3 – Tela principal do TPCalc.	155
Figura 4 – Atalho usado para carregar as estimativas iniciais.....	155
Figura 5 – Atalho usado para informar algumas configurações.....	166
Figura 6 – Janela de Configurações.....	166
Figura 7 – Atalho para execução do programa.....	177
Figura 8 – Mensagem de erro apresentada pelo software.	177
Figura 9 – Mensagem de sucesso no cálculo dos parâmetros apresentada pelo software.	188
Figura 10 – Atalho para salvar gráficos no formato de imagem.	19
Figura 11 – Curva de módulo da tensão do TPC.....	200
Figura 12 – Curva de fase da tensão do TPC.	211
Figura 13 – Arquivo no formato do cartão do ATP externado pelo TPCalc.....	211
Figura 14 – Representação Esquemática dos módulos do RSCAD.	277
Figura 15 – Janela inicial do RSCAD (<i>FileManager</i>).....	28
Figura 16 – Janela do módulo <i>Draft</i>	30
Figura 17 – Tela do módulo <i>TLine</i>	31
Figura 18 – Janela do módulo <i>RunTime</i>	322
Figura 19 – Janela do módulo <i>CBuilder</i>	34
Figura 20 – Esquema básico do sistema simulado.	36
Figura 21 – Esquema do sistema elétrico simulado no <i>Draft</i>	39
Figura 22 – Tensões no primário e no secundário do TPC.	40
Figura 23 – Curvas da fase em função da frequência do TPC.	41
Figura 24 – Tensões no primário e no secundário do TPC com o compensador.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativas iniciais dos parâmetros de um TPC de 230 kV.....	18
Tabela 2 – Parâmetros ajustados.	20
Tabela 3 – Parâmetros do TPC de 230 kV.	36

1. Introdução

O Laboratório de Referência em Controle e Automação (LARCA) da Universidade Federal de Campina Grande foi inaugurado em novembro de 2009. Este laboratório foi criado para abrigar equipamentos de pesquisa, acomodar professores, estudantes e pesquisadores que atuam em programas de pós-graduação e que desenvolvem pesquisas na área de Controle e Automação de Processos Elétricos e Industriais. O LARCA possui: um laboratório de controle de processos, um laboratório de automação de sistemas de energia elétrica, salas para acomodar professores e alunos de pós-graduação, uma sala para a Coordenação e Pessoal de Apoio, um auditório com capacidade para 35 pessoas, uma sala de reunião e banheiros masculino e feminino. Os laboratórios presentes no LARCA são laboratórios dos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia Química, contando com equipamentos para experimentos práticos, como coluna de destilação (convencional, extrativa e azeotrópica), simulador digital em tempo real de sistema de energia elétrica e sistema de manufatura flexível. Os professores que coordenam o laboratório são Romildo Brito, do departamento de Engenharia Química, e os professores Antônio Marcus Nogueira Lima e Benemar Alencar, do departamento de Engenharia Elétrica.

O laboratório de automação de sistemas de energia elétrica foi o local onde foram desenvolvidas as atividades do estágio. Este laboratório abriga o RTDSTM (*Real Time Digital Simulator*), que é um simulador digital em tempo real. Este equipamento representa um grande avanço para a análise de sistemas de energia elétrica, pois permite que sistemas elétricos possam ser estudados por meio de simulações e analisados em tempo real. Com o RTDSTM é possível estudar configurações de redes de energia elétrica, verificar o comportamento de dispositivos de controle e de proteção em determinadas situações de operação, avaliar a viabilidade de soluções para determinados problemas em um sistema elétrico, tudo isso em tempo real. Dessa forma, percebe-se a importância deste simulador digital para as diversas empresas de energia elétrica. Além disso, o RTDSTM está sendo bastante aplicado em estudos e pesquisas em diferentes áreas, como na área de transitórios eletromagnéticos, proteção digital, controle e automação de sistemas de energia elétrica, entre outras.

O laboratório de automação de sistemas de energia elétrica pertence ao Grupo de Sistemas Elétricos (GSE), grupo criado em 1999 por pesquisadores dos grupos de Sistemas de

Potência e de Alta Tensão. A criação deste grupo proporcionou a incorporação de novas linhas de pesquisa, assim como consolidou e fortaleceu as linhas de pesquisas já existentes. As atividades desenvolvidas pelo GSE desde sua criação são voltadas para simulação digital de sistemas de energia elétrica e experimentos com equipamentos de alta tensão.

1.1 Objetivos

O objetivo principal do estágio foi a identificação do problema do uso de transformadores de potencial capacitivos (TPC) na medição, na presença de harmônicos no sistema elétrico de potência no qual está inserido, além da apresentação de uma solução para este problema. Os objetivos específicos, que deram respaldo ao objetivo principal, foram o estudo e uso do *software* TPCalc e do RTDS™.

1.2 Atividades desenvolvidas

As principais atividades desenvolvidas ao longo do estágio no laboratório de automação de sistemas de energia elétrica foram:

- Estudo e uso do TPCalc;
- Estudo e uso do RTDS™;
- Reprodução de simulações referentes ao uso de transformador de potencial capacitivo para medição de sinais com componentes harmônicas.

Este relatório está organizado em 6 capítulos. No capítulo 2 é apresentado um pouco sobre o transformador de potencial capacitivo e o uso desse equipamento para medições em sistemas com distorção harmônica. No capítulo 3, o *software* TPCalc usado para cálculo de parâmetros lineares de um TPC é apresentado. No capítulo 4, é apresentado o simulador digital em tempo real, o RTDS™. No capítulo 5, são apresentadas as simulações feitas no RTDS™ para verificar o problema do uso de TPC na medição de sinais com distorção harmônica, além de apresentar uma solução para este problema. E no capítulo 6 são feitas as considerações finais.

2. Transformador de Potencial Capacitivo (TPC)

Os transformadores de potencial são ditos transformadores para instrumentos, isto é, são utilizados para alimentar instrumentos de medição, de proteção e de controle. O uso desses transformadores é feito, em geral, em sistemas acima de 600 V, pois os instrumentos mencionados não podem ser conectados diretamente à rede elétrica. As duas principais funções de um TP são: isolar o circuito de baixa tensão do circuito de alta tensão e reproduzir os efeitos transitórios e em regime permanente aplicados ao circuito de alta tensão no circuito de baixa tensão.

Há quatro tipos de transformadores de potencial: do tipo indutivo (TPI), do tipo capacitivo (TPC), do tipo resistivo (TPR) e do tipo misto. Os dois últimos são usados mais em laboratórios para pesquisa e em circuitos de ensaio. Enquanto que o TPI é comumente utilizado em sistemas de potência com tensões entre 600 V e 69 kV, e o TPC predomina nos sistemas com tensões acima de 138 kV. Nos sistemas com tensões entre 69 kV e 138 kV não há preferência para um tipo de TP específico, valendo a ressalva apenas de que se o sistema utiliza PLC (*Power Line Carrier*) o uso de um TPC é obrigatório (D'AJUZ *et al*, 1985). Dentre os tipos de TP, será dada atenção ao TPC.

O transformador de potencial capacitivo é composto basicamente dos seguintes elementos: coluna capacitiva, reator de compensação, transformador de potencial indutivo e circuito supressor de ferorrressonância. Na Figura 1 é apresentado o esquema básico de um TPC a 60 Hz.

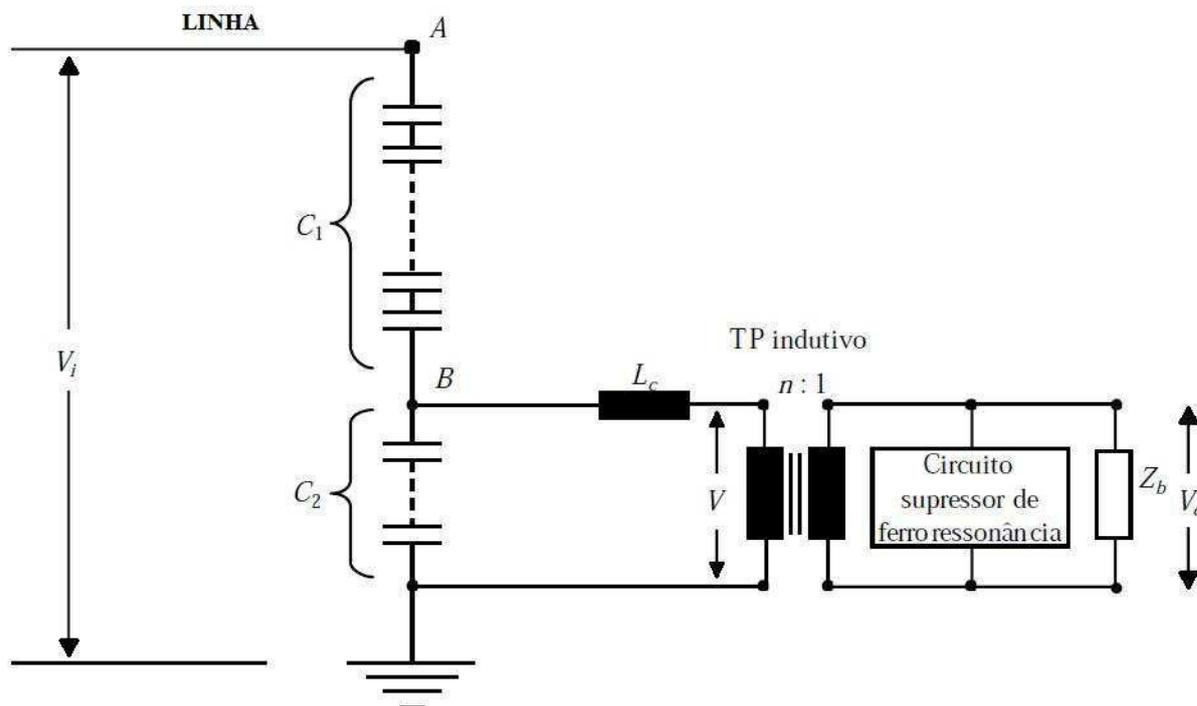


Figura 1 – Esquema básico de um TPC a 60 Hz.

O reator de compensação é necessário para controlar a defasagem que surge devido ao divisor capacitivo. É importante destacar que esse reator é projetado para controle da defasagem em 60 Hz, de modo em outras frequências haverá a defasagem do sinal de tensão no primário em relação ao sinal de tensão no secundário do TPC.

Quanto ao circuito supressor de ferroressonância, este é usado para minimizar o efeito da ferroressonância, que é um fenômeno que ocorre quando capacitâncias do circuito entram em ressonância com um valor específico de indutância não-linear de elementos que possuem núcleo ferromagnético. Em um TPC esse fenômeno pode ocorrer após a eliminação de um curto-circuito nos terminais do secundário do TPC, por exemplo, devido ao surgimento de sobretensões no capacitor C_2 do divisor capacitivo ou de oscilações em baixas frequências. A ferroressonância é indesejável para o TPC, pois acarretará a transferência de informações incorretas para instrumentos de medição, proteção ou controle. O circuito supressor de ferroressonância é colocado, em geral, no secundário do TPI.

O TPC merece maior atenção no tocante à reprodução dos efeitos transitórios aplicados ao circuito de alta tensão no circuito de baixa tensão. Devido à complexidade do seu circuito equivalente, em função da presença de capacitores de alta tensão, elementos não

lineares, dispositivos de proteção e capacitâncias parasitas dos enrolamentos do transformador indutivo, a reprodução fiel da tensão do primário no secundário é comprometida quando, de alguma forma, são aplicados sinais com frequências distintas da frequência nominal do sistema. Isto pode acarretar problemas que comprometerão, por exemplo, o funcionamento adequado do sistema de proteção, ou a medição correta da tensão do sistema.

2.1 O uso do TPC na Medição

O uso crescente de cargas com características não lineares têm contribuindo significativamente com a questão da distorção harmônica nos sistemas elétricos de potência, distorcendo os sinais de tensão e corrente. Dentre as fontes de harmônicos, destacam-se inversores, conversores, lâmpadas fluorescentes, equipamentos eletrônicos de modo geral, entre outros, que se encontram conectados à rede elétrica. E até mesmos os próprios transformadores representam uma fonte de harmônicos, pois, por razões econômicas, esses são construídos de tal forma que o núcleo magnético satura quando opera próximo das condições nominais. Essa saturação acarreta uma corrente de magnetização com componentes harmônicas, principalmente a terceira harmônica. Além disso, ao operar na condição de carga leve, o seu núcleo magnético também estará sujeito à saturação, o que resulta em uma corrente de excitação bastante distorcida (LEÃO, 2010).

Os harmônicos nos sistemas elétricos de potência podem afetar o funcionamento de alguns dispositivos e equipamentos que estão conectados ao sistema, como equipamentos eletrônicos, dispositivos de proteção, aparelhos de medição, entre outros. Isto pode resultar em falhas de operação, proteção e controle. Além disso, o número de grandes consumidores conectados diretamente à rede elétrica tem aumentado. Por essas razões, a distorção harmônica deve ser monitorada com precisão. Para isso, indica-se o uso de um divisor capacitivo ou um divisor resistivo, porém estes são caros. Uma solução mais barata é o uso de transformadores de potencial capacitivos, de maneira que a taxa de distorção harmônica é monitorada a partir da tensão nos terminais secundários do transformador. Uma empresa de equipamentos de potência do Canadá (*Trench Company*) desenvolveu um TPC com terminais específicos para medição da taxa de distorção harmônica. Porém, esta é uma solução dispendiosa já que para esta finalidade deve-se usar um TPC específico. Dessa forma, foi desenvolvida uma técnica de compensação no GSE (SILVA, 2010), permitindo o uso de um TPC na medição de sinais distorcidos devido à presença de componentes harmônicas.

3. TPCalc

Para realizar estudos no âmbito de simulações com um TPC, é necessário, primeiramente, adotar um modelo para representá-lo. Em seguida, é necessário determinar os parâmetros dos elementos que constituem este modelo.

O TPCalc é um software para cálculo dos parâmetros lineares de transformadores de potencial capacitivos (TPC), ou seja, calcula os valores de resistências, indutâncias e capacitâncias lineares de um modelo de TPC. Este software foi desenvolvido pelo Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) da Universidade Federal de Campina Grande em trabalhos de pesquisa.

O modelo de TPC adotado pelo TPCalc é apresentado na Figura 2. Este modelo considera os principais elementos de um TPC: coluna capacitiva composta pelas capacitâncias C_1 e C_2 ; reator de compensação formado pela resistência R_C , indutância L_C e capacitância C_C ; transformador de potencial indutivo representado pelo enrolamento primário (resistência R_P , indutância L_P e capacitância C_P) e pelo núcleo magnético (resistência de perdas R_m e indutância de magnetização L_m); circuito supressor de ferroressonância formado por um reator (indutâncias L_{f1} , L_{f2} e M), capacitor C_f e uma resistência de amortecimento R_f .

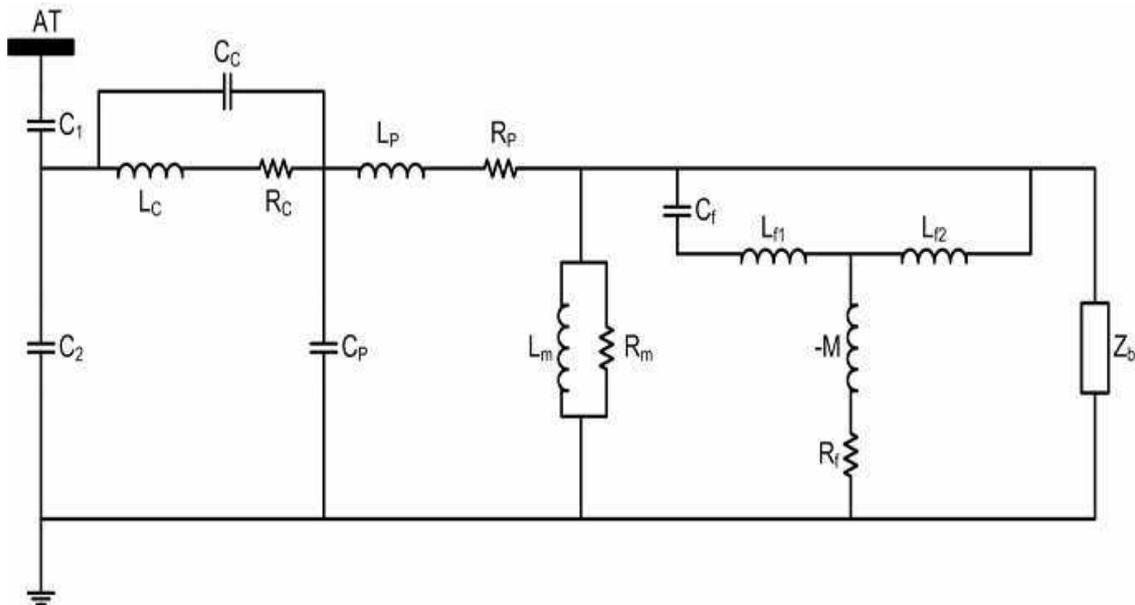


Figura 2 – Modelo de TPC adotado pelo TPCalc.

Os parâmetros do modelo adotado são calculados a partir de dados da resposta em frequência, que corresponde aos valores de módulo e fase da tensão do TPC para diferentes

frequências, utilizando o método de otimização de Levenberg-Marquardt, o qual foi implementado em FORTRAN. Para a utilização deste método é necessário um sistema gráfico que permita a visualização dos resultados, pois é preciso comparar as curvas de referência com as curvas de módulo e de fase da tensão do TPC obtidas com os parâmetros estimados pelo método.

3.1 Como usar o TPCalc

Ao iniciar o TPCalc, a janela apresentada pelo programa é mostrada na Figura 3. Nesta tela, observa-se o modelo do TPC adotado pelo software, e logo abaixo deste modelo estão as caixas de texto onde são colocadas as estimativas iniciais dos parâmetros do TPC. Essas estimativas iniciais podem ser colocadas individualmente nessas caixas, ou caso exista um arquivo com o conjunto de estimativas iniciais, este pode ser carregado no programa diretamente por meio do atalho em destaque na Figura 4, que permitirá a seleção do arquivo que contém os valores iniciais dos parâmetros do TPC.

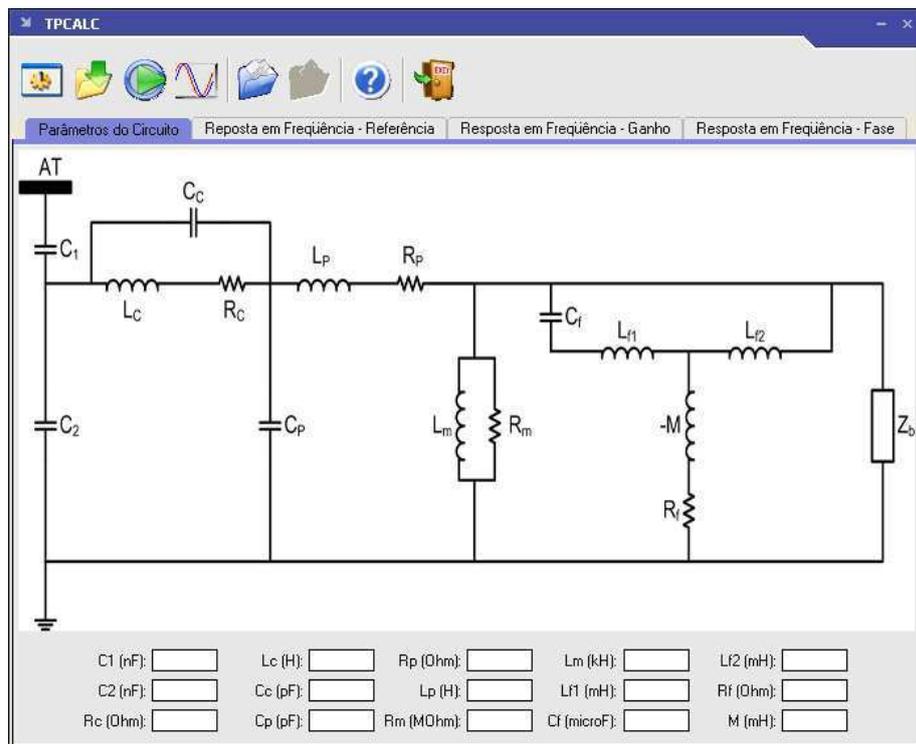


Figura 3 – Tela principal do TPCalc.



Figura 4 – Atalho usado para carregar as estimativas iniciais.

Após definir as estimativas iniciais, é necessário entrar com os dados das curvas de referência de módulo e fase da tensão do TPC utilizados pela rotina computacional. Esses dados são carregados pelo programa no menu *Resposta em Frequência-Referência*, onde há o atalho *Carregar arquivo* que permitirá que o arquivo com os dados seja selecionado. Este arquivo deve estar no formato ASCII.

Em seguida é necessário informar algumas configurações ao programa. Essas configurações são feitas por meio do atalho em destaque na Figura 5.



Figura 5 – Atalho usado para informar algumas configurações.

A janela de configurações apresentada pelo programa é mostrada na Figura 6. Como se observa, há diferentes campos a serem preenchidos.

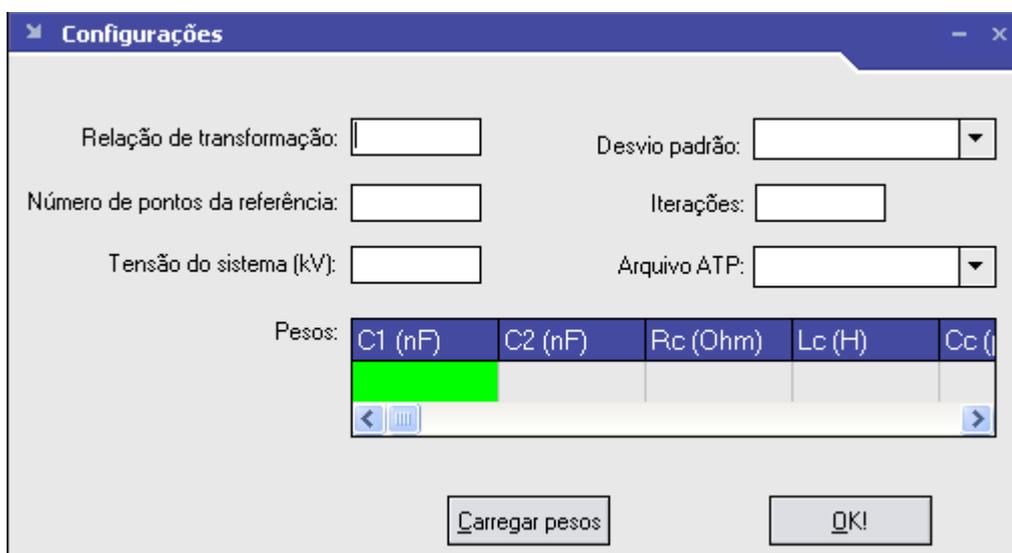


Figura 6 – Janela de configurações.

No campo de *Relação de transformação* é informada a relação de transformação do transformador de potencial indutivo do TPC. No campo *Números de pontos de referência* é informado o número de pontos da resposta em frequência carregados no programa no passo anterior. Em seguida, há o campo *Tensão do sistema (kV)*, onde será colocado a valor da tensão na qual o TPC irá operar. Em relação ao erro associado ao método, é possível escolher entre dois tipos de desvios: Desvio 1 e Desvio 2, no campo *Desvio Padrão*. Se o Desvio 1 é

selecionado, significa que o método realizará a minimização do erro percentual. E caso o Desvio 2 seja selecionado, o método realizará a minimização do erro absoluto. O método de otimização utilizado é um processo iterativo, desse modo é importante que o número máximo de iterações seja definido. No campo *Iterações* será colocado o número de iterações desejado. Outra característica interessante do TPCalc é quanto a um dos arquivos externados por ele. No campo *Arquivo ATP* o usuário pode selecionar qual dos arquivos no formato de cartão do ATP com o modelo do TPC com os parâmetros calculados o programa gerará: unifilar ou trifilar. O último campo é o de *Pesos*. Neste campo é carregado um conjunto de pesos que multiplicará os valores da estimativa inicial, de modo que os parâmetros iniciais sejam escalonados uniformemente, contribuindo com a convergência do processo iterativo.

Ao finalizar as configurações, o programa pode ser executado. O cálculo dos parâmetros é iniciado por meio do atalho em destaque na Figura 7.



Figura 7 – Atalho para execução do programa.

Quando a execução do programa é finalizada, duas mensagens podem ser apresentadas pelo software: de erro ou de sucesso no cálculo dos parâmetros. Caso o processo não convirja, é mostrada uma mensagem de erro, como apresentada na Figura 8. Neste caso, significa que os dados informados pelo usuário não permitiram a convergência do processo iterativo referente ao cálculo dos parâmetros do TPC, logo é necessário que esses dados sejam verificados, desde as estimativas iniciais aos dados de configurações.

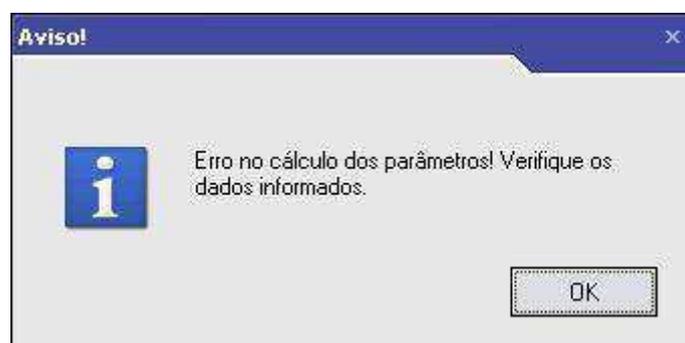


Figura 8 – Mensagem de erro apresentada pelo software.

No caso dos parâmetros terem sido calculados com sucesso, a mensagem mostrada na Figura 9 é apresentada pelo programa. Os parâmetros calculados são apresentados nas caixas de texto da janela principal do programa, onde as estimativas iniciais haviam sido carregadas. Esses parâmetros também podem ser visualizados em um arquivo gerado pelo programa, arquivo denominado de *Parametros_Ajustados.sai*.

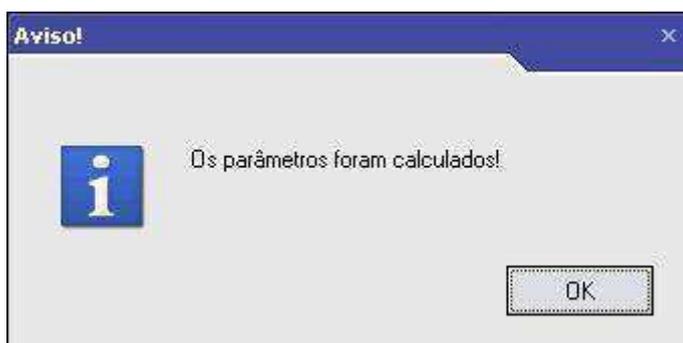


Figura 9 – Mensagem de sucesso no cálculo dos parâmetros apresentada pelo software.

Além dos valores dos parâmetros calculados, o programa apresenta as curvas de módulo e de fase da tensão do TPC após o ajuste, assim como essas curvas anteriores ao ajuste final. Essas curvas podem ser visualizadas nos menus *Resposta em Frequência – Ganho* e *Resposta em Frequência – Fase*. Os erros associados ao ganho e a fase, tanto o inicial como o final, além de apresentados nas próprias curvas plotadas pelo programa, são também apresentados em dois arquivos: *erro_modulo.sai* e *erro_fase.sai*.

O programa também gera um arquivo no formato do cartão do ATP com o modelo do TPC. Como já mencionado, esse arquivo do ATP pode ser unifilar ou trifilar. No caso unifilar, o arquivo terá o modelo de uma unidade do TPC, enquanto que no caso trifilar será gerado um arquivo com três unidades do modelo do TPC. Outro arquivo gerado pelo programa é o *FunAjust.sai*. Esse arquivo contém os dados referentes à resposta em frequência ajustados pelo programa.

Os gráficos gerados pelo programa, como a curva de módulo e a curva de fase, podem ser salvos no formato de arquivo de imagem. Isto é feito por meio do atalho em destaque na Figura 10.



Figura 10 – Atalho para salvar gráficos no formato de imagem.

3.2 Exemplo do Uso do TPCalc

Para exemplificar o uso do software, o TPCalc foi utilizado para calcular os parâmetros de um TPC de 230 kV.

As estimativas iniciais usadas para determinar os parâmetros são apresentadas na Tabela 1. Quanto aos dados da resposta em frequência, esses foram obtidos a partir de medições realizadas no Laboratório de Alta Tensão com um TPC de 230 kV.

Tabela 1 – Estimativas iniciais dos parâmetros de um TPC de 230 kV.

$C1 = 10,04 \text{ nF}$	$Lc = 100 \text{ H}$	$Rp = 1 \cdot 10^5 \Omega$	$Lm = 10 \text{ kH}$	$Lf2 = 100 \text{ mH}$
$C2 = 65,4 \text{ nF}$	$Cc = 10000 \text{ pF}$	$Lp = 100 \text{ H}$	$Lf1 = 10 \text{ mH}$	$Rf = 1 \Omega$
$Rc = 10000 \Omega$	$Cp = 100 \text{ pF}$	$Rm = 1 \text{ M } \Omega$	$Cf = 100 \mu\text{F}$	$M = 10 \text{ mH}$

Nas configurações, foi informada a relação de transformação, que é de 152,6. Lembrando que esta relação se refere ao transformador de potencial indutivo. A tensão de saída de um TPC é de 115 V, em geral. O número de pontos de referência foram 44, que corresponde ao número de pontos da resposta em frequência. O número de iterações foi 100. O desvio selecionado foi o Desvio 1, de modo que o processo minimizou o erro percentual. E quanto ao arquivo do ATP, foi selecionado o trifilar.

Com os dados de entrada colocados, as estimativas iniciais e a resposta em frequência, e feito o ajuste das configurações, o método convergiu. Os parâmetros ajustados pelo programa são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros ajustados.

$C1 = 10,04 \text{ nF}$	$Lc = 3.57 \text{ H}$	$Rp = 2271.48 \text{ } \Omega$	$Lm = 3.47 \text{ kH}$	$Lf2 = 26.39 \text{ mH}$
$C2 = 65,4 \text{ nF}$	$Cc = 872992.24 \text{ pF}$	$Lp = 113.03 \text{ H}$	$Lf1 = 6.15 \text{ mH}$	$Rf = 5.22 \text{ } \Omega$
$Rc = 343.64 \text{ } \Omega$	$Cp = 856.87 \text{ pF}$	$Rm = 3.45 \text{ M } \Omega$	$Cf = 182.79 \text{ } \mu\text{F}$	$M = 5.37 \text{ mH}$

As curvas de módulo e de fase externadas pelo software foram salvas no formato JPEG, e são apresentadas nas Figuras 11 e 12, respectivamente. É possível observar que as curvas ajustadas são bem semelhantes às curvas de referência. O erro médio inicial para a curva de módulo foi de 133,7%. Após o ajuste, o erro médio reduziu para 6,4%. E quanto à curva de fase, inicialmente o erro médio foi 32,02°. Após o ajuste, o erro médio foi de 8,41°. Esses números indicam o quanto o processo iterativo foi eficiente.

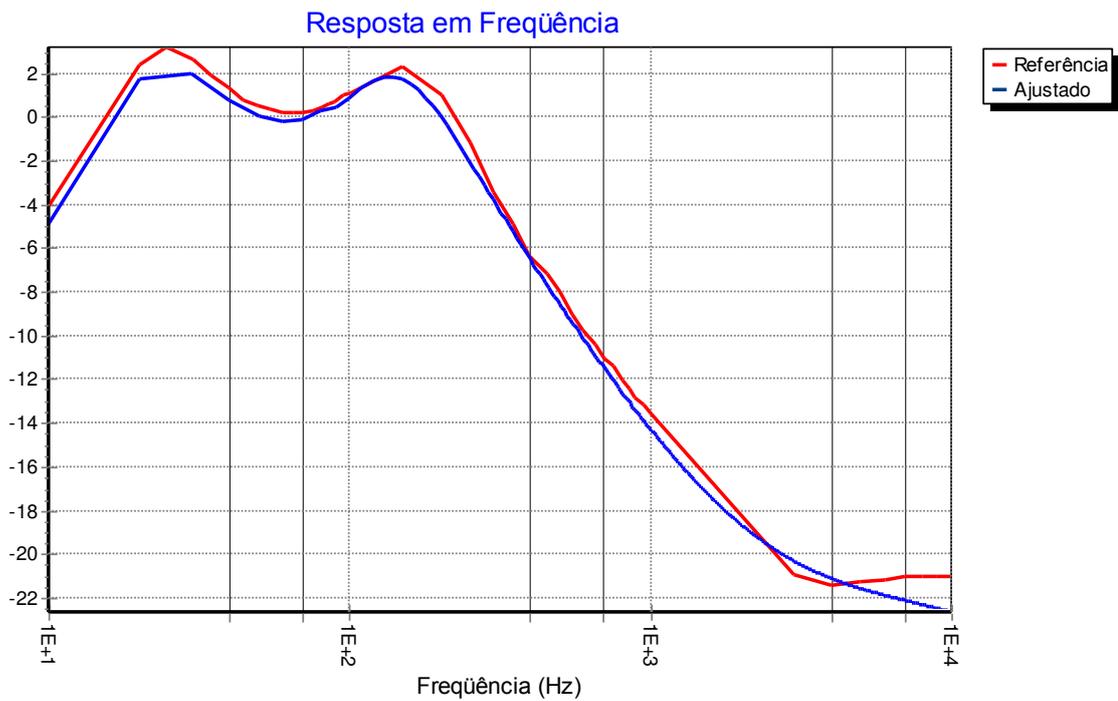


Figura 11 – Curva de módulo da tensão do TPC.

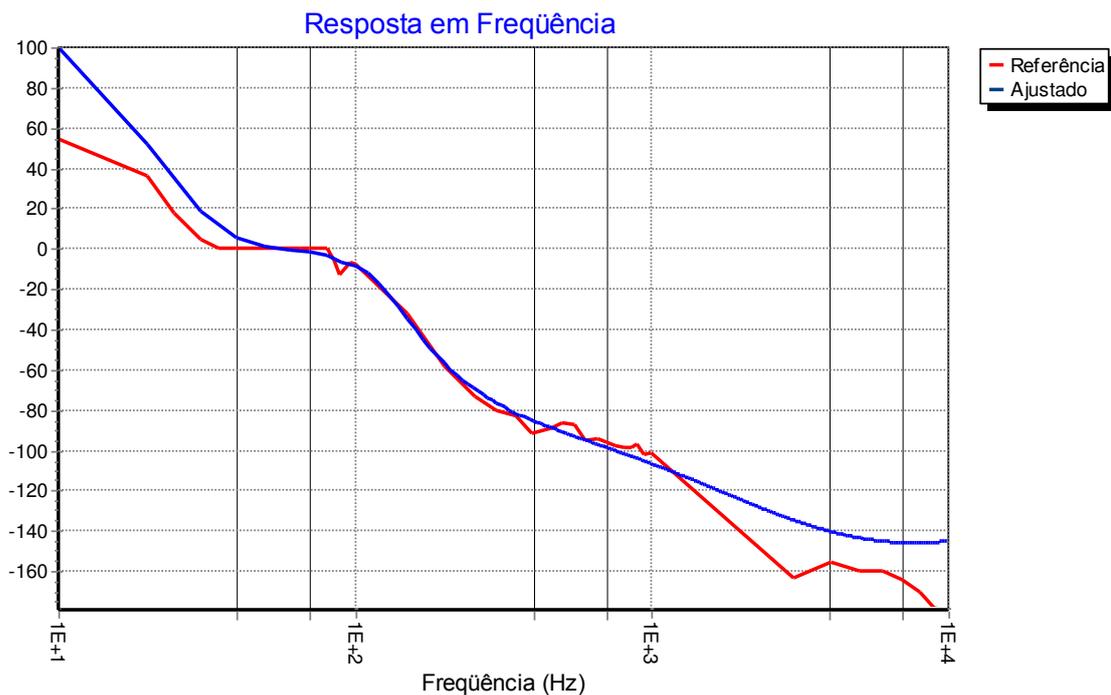


Figura 12 – Curva de fase da tensão do TPC.

O arquivo no formato de cartão do ATP gerado pelo programa em função dos parâmetros calculados é apresentado na Figura 13.

```

c ===== Arquivo com o modelo do TPC =====
c
c ===== TPC1 =====
c <BUS1><BUS2><BUS3><BUS4>< R(Ohm) >< L(mH) >< C(microF) >< >< >
TPC1 TPCa1 .1004000E-01
TPC1a .6540000E-01
TPC1a TPC1b .3436362E+03 .3565935E+04
TPC1a TPC1b .8729922E+00
TPC1b .8568726E-03
TPC1c .1483204E+03
TPC1c .1489254E+03
TPC1c TPC1d .6148449E+01 .1827898E+03
TPC1c TPC1d .2639407E+02
TPC1d .5217578E+01 -.537181E+01
c
c ===== TPind do TPC1 =====
TRANSFORMER TPIND1
9999
1 TPC1b .2E+04 .1E+06 17.67
2 TPC1c .1E-07 .1E-07 .1158
c
c ===== TPC2 =====
c <BUS1><BUS2><BUS3><BUS4>< R(Ohm) >< L(mH) >< C(microF) >< >< >
TPC2 TPC2a .1004000E-01
TPC2a .6540000E-01
TPC2a TPC2b .3436362E+03 .3565935E+04
TPC2a TPC2b .8729922E+00

```

Figura 13 – Arquivo no formato do cartão do ATP externado pelo TPCalc.

4. RTDS

O RTDSTM (*Real Time Digital Simulator*) é um simulador digital em tempo real, capaz de simular sistemas elétricos de potência em tempo real. Trata-se de um equipamento que combina software com hardware, de modo que, além de permitir a simulação em tempo real, permite que dispositivos de controle e de proteção possam ser simulados em malha fechada com o sistema elétrico. Desta forma, é fácil perceber as grandes vantagens que este tipo de equipamento é capaz de proporcionar para empresas do setor de energia elétrica, fabricantes de dispositivos de proteção e controle e grupos de pesquisas.

As simulações de sistemas elétricos de potência antes do surgimento dos simuladores digitais em tempo real eram feitas com simuladores analógicos, como os Analisadores de Rede, em que o sistema era analisado por meio de modelos elétricos em miniatura. Depois surgiram os simuladores digitais, como o ATP/EMTP, porém este não realiza simulações em tempo real. Porém, para alguns estudos é indispensável que as simulações sejam em tempo real. O desenvolvimento desses simuladores tornou-se viável devido ao avanço da tecnologia computacional, além do surgimento de dispositivos de processamento digital cada vez mais eficazes e rápidos.

Com o RTDSTM, é possível realizar simulações com diferentes configurações de sistemas a fim de avaliar o desempenho de cada uma dessas configurações e verificar a viabilidade das mesmas. Além disso, dispositivos de proteção e de controle podem ser testados nas mais variadas condições de operação e em distintos sistemas. Estes testes estão cada vez mais comuns, proporcionando grandes vantagens para os fabricantes dos dispositivos, assim como para as empresas do setor elétrico.

Como mencionado, o RTDSTM combina software com hardware. O hardware se baseia no uso de Processadores Digitais de Sinal (DSP) e na arquitetura RISC (*Reduced Instruction Set Computer*), utilizando avançadas técnicas de processamento paralelo para garantir a operação em tempo real continuamente. Ele foi projetado especificamente para solucionar o Algoritmo de Dommel para Transitórios Eletromagnéticos, isto é, o mesmo algoritmo usado em programas do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), porém modificado para realizar as simulações em tempo real. Quanto ao software, este possui uma interface gráfica que permite que o usuário simule sistemas elétricos e de controle e analise o comportamento desses em tempo real. O software disponibiliza modelos de diversos equipamentos de

sistemas de potência e dispositivos de controle, os quais são agrupados em bibliotecas. Além disso, o usuário pode implementar e incorporar às simulações modelos e algoritmos próprios.

Nas seções seguintes serão apresentadas mais informações sobre o hardware e software do RTDS™.

4.1 Hardware do RTDS™

O hardware do RTDS™ utiliza vários processadores digitais de alta velocidade, os quais operam em paralelo a fim de garantir a operação em tempo real. A simulação é considerada em tempo real pelo fato de se obter as soluções do sistema em um intervalo de tempo menor que as constantes de tempo do próprio sistema. Isso é possível devido ao processamento em paralelo, pois os diversos cálculos referentes à solução do sistema são divididos entre os vários processadores e esses operam simultaneamente. O passo de tempo de simulação do RTDS™ é da ordem de 50 μ s (RTDS Technologies Inc., 2007).

O hardware do RTDS™ possui uma estrutura modular, composta por unidades denominadas *racks*. Cada unidade desta possui cartões de processamento e de comunicação: GPC (*Giga Processor Card*), IRC (*InterRack Communications Card*) e WIF (*Workstation InterFace Card*). A seguir serão apresentadas as funcionalidades de cada um destes cartões.

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, como é o caso do simulador pertencente à UFCG (DANTAS, 2009). Porém, existem versões mais recentes do RTDS™ cuja capacidade aumentou para 66 nós por *rack*. Para simular sistemas mais complexos, contendo mais 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.

Em termos de processamento em paralelo, dois níveis de processamento podem ser identificados. O primeiro deles ocorre dentro de um mesmo *rack*, onde há o processamento em paralelo dos componentes que constituem o sistema executado pelo *rack*. E o outro nível corresponde ao processamento em paralelo de subsistemas no caso de simulações com múltiplos *racks*. São esses dois níveis de processamento que garantem a simulação em tempo real.

4.1.1 GPC

O cartão GPC é composto por dois processadores IBM PowerPC 750GX RISC, cada um deles operando a 1 GHz. Em geral, em um *rack*, um processador do GPC é responsável por resolver as equações do circuito simulado, enquanto que os demais são utilizados para resolver os modelos de componentes presentes neste circuito simulado. O RTDS™ instalado no laboratório de automação de sistemas de energia elétrica possui um *rack* com três cartões GPC. A comunicação entre os cartões GPC é feita ou por meio de um *backplane* comum entre eles, onde todos os cartões se encontram conectados, ou diretamente via fibra óptica.

Conectados ao GPC via links de fibra óptica de 2 GHz, há uma família de cartões denominada GT-I/O (*Gigabit Transceiver – Input/Output*): GTA0 (*Gigabit Transceiver Analogue Output Card*), GTAI (*Gigabit Transceiver Analogue Input Card*), GTDO (*Gigabit Transceiver Digital Output Card*), GTDI (*Gigabit Transceiver Digital Input Card*), GTFPI (*Gigabit Transceiver Front Painel Interface Card*) e GTNET (*Gigabit Transceiver Network Interface System Card*). Estes cartões representam as interfaces de entrada e de saída de dados do sistema simulado, permitindo a conexão de dispositivos externos ao sistema.

O cartão GTA0 fornece 12 canais analógicos de saída, cada um deles de 16 bits, e isolados opticamente, disponíveis para equipamentos externos. Este cartão é usado para gerar sinais analógicos com valores de pico entre ± 10 V.

O cartão GTAI possui, ao todo, 12 entradas diferenciais de ± 10 V. Essas entradas se encontram em dois conversores de sinais analógicos para digitais de 16 bits. Este cartão é utilizado para receber sinais analógicos de equipamentos externos.

O cartão GTDO oferece 64 canais digitais de saída, podendo gerar sinais digitais entre 7 e 24 V. Estes canais estão disponíveis para conexão com equipamentos externos.

O cartão GTDI é um cartão com 64 canais digitais de entrada, os quais recebem sinais digitais entre 0 e 5 V oriundos de equipamentos externos.

O RTDS™ possui, em geral, dois painéis frontais, um de entrada e saída digital de baixa tensão (*Low Voltage Digital I/O Panel*) e um de saída de alta tensão (*High Voltage Digital Interface panel*). A interface entre um cartão GPC e esses dois painéis é feita pelo cartão GTFPI, o qual está conectado ao GPC via fibra óptica.

O cartão GTNET realiza a interface de protocolos de rede com o simulador. Um dos protocolos que se encontra previamente instalado no cartão é o IEC 61850, logo o cartão pode ser configurado para enviar ou receber mensagens GSSE (*Generic Substation State Events*) ou GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Events*). Este cartão fornece também a funcionalidade *playback*, que permite que os registros oscilográficos capturados por um IED (*Intelligent Electronic Devices*) sejam capturados e reproduzidos no RTDS™. Com isso, os registros podem ser analisados para a identificação de possíveis causas de falha de operação do sistema de proteção que acarretou no distúrbio registrado pelo IED.

4.1.2 IRC

O cartão IRC realiza a comunicação entre *racks* no caso de simulações com múltiplos *racks*. Ao simular sistemas mais complexos, em que se torna necessário dividir o sistema em sistemas menores, cada subsistema criado é executado em um *rack*. Dessa forma, as equações de cada subsistema são resolvidas em paralelo, porém existem dados que precisam ser trocados entre os *racks* tendo em vista que os subsistemas compõem um único sistema. Logo, a função do cartão IRC é realizar essa troca de informações durante a simulação.

Cada *rack* possui um cartão IRC instalado, e esse, por sua vez, contém 6 canais de comunicação bidirecional. Desta forma, um *rack* pode estabelecer comunicação direta com outros 6 *racks*. Portanto, no caso do RTDS™ possuir 7 *racks*, esses podem se comunicar diretamente uns com os outros. Caso o simulador tenha mais de 7 *racks*, essa comunicação direta não será mais possível, de modo que um *rack* se comunicará com um outro *rack* indiretamente através de um terceiro *rack* comum entre eles.

Para cada um dos seis canais do cartão IRC há um par de LEDs, um verde e outro vermelho, que se encontram no painel frontal do RTDS™. O LED verde indica quando está ocorrendo uma comunicação através daquele canal. Portanto, quando aceso, significa que o canal ao qual está associado está transmitindo informações de um *rack* para outro. Enquanto que o LED vermelho indica quando há erro na transmissão de dados. Logo, quando um pacote de dados inválidos é recebido pelo canal, o LED vermelho é aceso e permanece assim até a simulação seja parada. É importante ressaltar que o protocolo de comunicação serial de envio e recebimento de dados apenas detecta que houve erro na comunicação por meio do uso de bits extras, não o corrigindo.

4.1.3 WIF

Para cada rack há um cartão WIF instalado, que é um cartão de processamento baseado no processador MPC860. A principal função desempenhada por este cartão é estabelecer a comunicação entre o simulador RTDS e o computador *host*. O meio usado para essa comunicação é um padrão de Ethernet (10/100baseT) TPC/IP baseada na rede local. O cartão WIF também é responsável pela sincronização dos cálculos que ocorrem nos cartões de processamento presentes em um *rack*, assim como pela coordenação da comunicação entre *racks* no caso de simulações com vários deles. Para simuladores com 3 ou mais *racks*, torna-se necessário o uso de um GBH (*Global Bus Hub*), que é usado para a troca de sinais de sincronização entre os cartões WIF. No caso de simuladores com dois *racks*, a comunicação entre os cartões WIF pode ser feita diretamente, dispensando, assim, o GBH. É importante destacar que a comunicação GBH é separada da comunicação Ethernet que é usada para a troca de dados entre cartão WIF e o computador *host*.

Em versões mais recentes do RTDS™ é utilizado o cartão GTWIF (*Giga Transceiver Workstation InterFace*), que substitui os cartões WIF e IRC. Esta substituição trouxe importantes vantagens, como uma maior taxa de transferência de dados entre os cartões de processamento.

4.2 Software do RTDS

O software do RTDS™ é composto, basicamente, por três níveis: a GUI (*Graphical User Interface*), o Compilador e os Modelos de Componentes dos Sistemas de Controle e de Potência. Estes últimos representam o nível mais baixo, enquanto que a GUI, que é a interface gráfica do software, denominada RSCAD, representa o nível mais alto.

4.2.1 RSCAD

A interface gráfica do software do RTDS é bastante sofisticada e robusta, permitindo que o usuário construa seus sistemas, simule-os e analise-os. O RSCAD é composto por vários módulos: *FileManager*, *Draft*, *RunTime*, *T-Line/Cable* e *Multiplot*. Há ainda outro módulo, o *CBuilder*. No esquema apresentado na Figura 14 é mostrada a organização dos módulos no RSCAD. Observa-se que a partir do módulo *FileManager* todos os demais módulos podem ser acessados. Além disso, pode-se notar que o módulo que se comunica com

o hardware é o *RunTime*. A seguir são apresentadas as principais funções de cada um desses módulos.

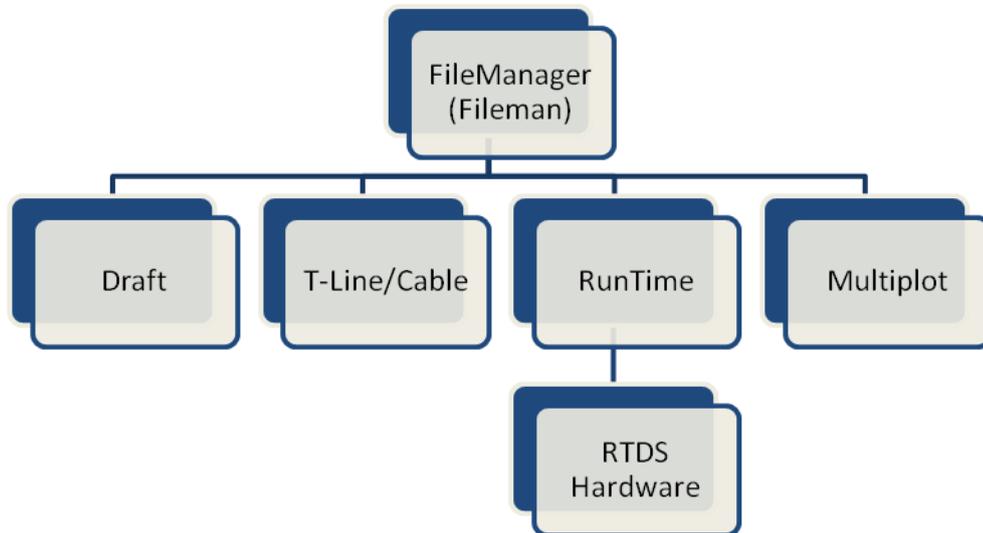


Figura 14 – Representação Esquemática dos módulos do RSCAD.

FILEMANAGER

Este módulo corresponde à janela inicial do RSCAD, apresentada na Figura 15. No *FileManager* o usuário organiza e acessa casos de simulação, além de ter acesso a documentos do RSCAD, como exemplos de casos de simulação. Ele representa o nível mais alto do RSCAD por meio do qual todo o sistema gráfico é gerenciado, de modo que os demais módulos são acessados a partir dele. Na janela do *FileManager* há uma barra com os ícones de todos os outros módulos, conforme mostrado na Figura 15. Na área principal da tela deste módulo estão presentes algumas pastas, nas quais se encontram os casos de simulação e os arquivos associados, arquivos da documentação do RSCAD, entre outros.

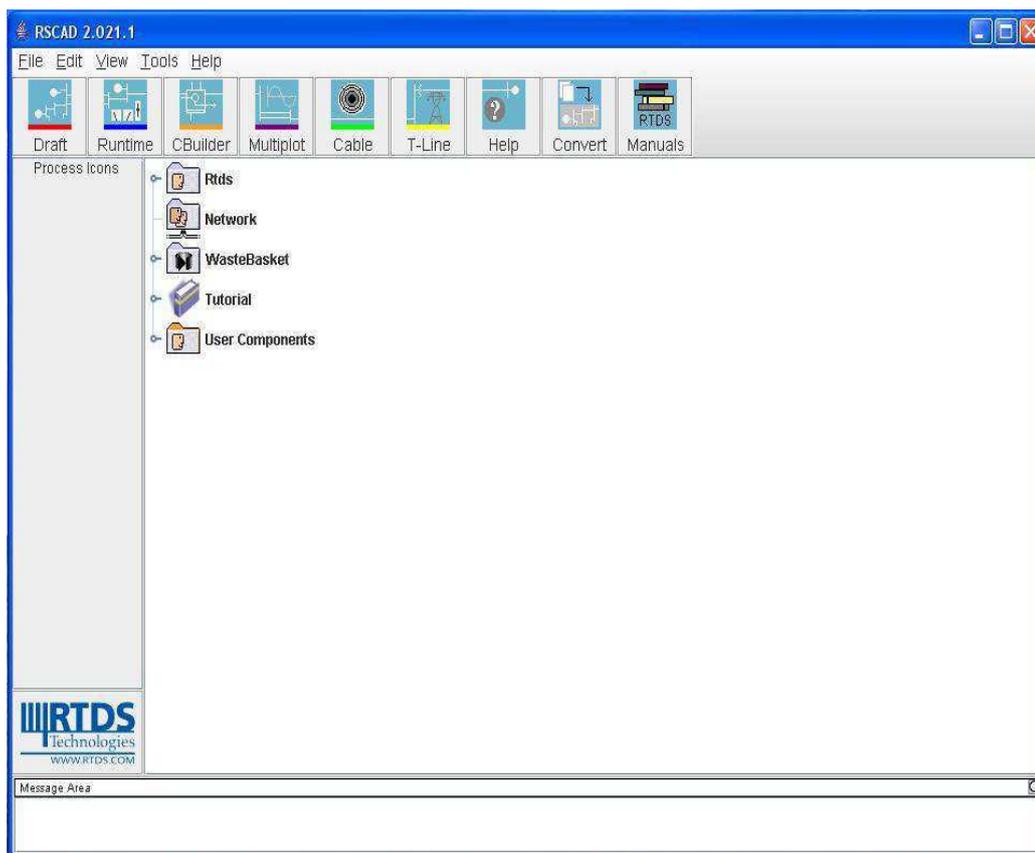


Figura 15 – Janela inicial do RSCAD (*FileManager*).

DRAFT

O *Draft* é o módulo destinado à construção dos circuitos. A janela do *Draft* é apresentada na Figura 16. Como é possível observar, a tela do módulo é dividida em duas áreas. A área à esquerda da tela é o espaço destinado à construção do circuito, enquanto que à direita se encontram as bibliotecas com os modelos dos componentes de potência, de controle, de proteção e de automação.

Para a montagem de um circuito, os componentes necessários devem ser buscados nas suas respectivas bibliotecas e copiados, e em seguida colados na área de projeto. Para copiar um componente, basta colocar o mouse sobre o componente desejado e clicar com o botão direito. Com isso, surge um menu que lista as ações que podem ser feitas com o componente, como copiar e rotacionar, além de ser possível alterar algumas características da representação gráfica do componente, como nome e cor. Então, a opção de copiar é selecionada. Para concluir a cópia, deve-se levar o mouse, sem pressioná-lo, até o local da área de projeto onde

se deseja colocar o componente. Outra maneira, e mais rápida, de copiar o componente é por meio de um atalho pelo teclado do computador. Ao colocar o mouse sobre o componente, pressiona-se a tecla “c” do teclado, e com isso o componente já foi copiado. As ações de mover, espelhar ou rotacionar um componente também podem ser feitas por meio de atalhos pelo teclado do computador.

Existem alguns recursos que facilitam o arranjo dos componentes na tela. Um deles é de agrupamento de componentes, o qual permite que vários componentes sejam agrupados, tornando-se um único bloco. Isso possibilita que vários componentes sejam movidos simultaneamente na área de projeto ao invés de mover componente por componente.

O *Draft* também oferece um recurso para visualização dos sistemas montados. Ao montar sistemas de potência é possível visualizá-los de duas maneiras: diagrama monofásico e diagrama trifásico. Essa escolha é feita por meio de um botão que se encontra na barra de ferramentas do *Draft*. Dessa forma, ao montar um sistema trifásico é possível visualizar o seu equivalente monofásico.

Cada componente usado para a montagem de um circuito exige que alguns parâmetros sejam informados. O menu com os parâmetros necessários é acessado ao clicar no componente. Para uma fonte de tensão alternada, por exemplo, é necessário informar o módulo, a fase e a frequência da tensão, além de outros parâmetros.

Após conectar os componentes corretamente e entrar com todos os dados exigidos, o circuito montado pode ser salvo e compilado. O processo de compilação verifica se há erros nos parâmetros informados e gera o código para execução da simulação em tempo real. Caso seja encontrado algum erro nos parâmetros, esse é indicado em uma mensagem apresentada após sua detecção durante a compilação, o que facilita a identificação e a correção do problema.

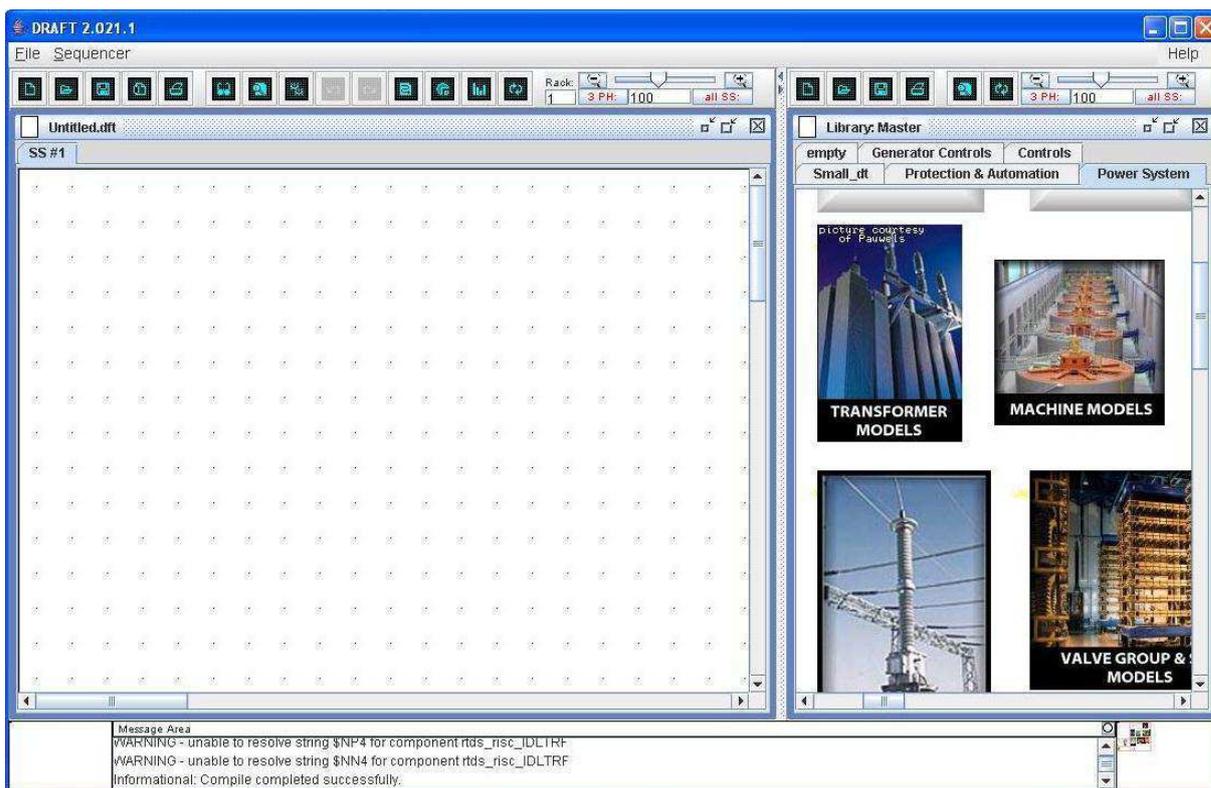


Figura 16 – Janela do módulo *Draft*.

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 17.

Os dados de entrada para a modelagem de uma linha pode ser de dois tipos. Podem ser informados os dados quanto às características físicas dos condutores e à geometria da linha, como a disposição dos condutores entre si e em relação ao solo. Ou então podem ser informadas as impedâncias de sequência positiva e zero. Ao definir qual o tipo de dados que serão informados, alguns ícones da barra de ferramentas do *TLine* serão desativados e outros ativados. Caso o usuário deseje entrar com os dados das impedâncias de sequência positiva e zero, o ícone *RLC* da barra será ativado, que é o caso mostrado na Figura 17. Ao clicar neste ícone o usuário colocará os valores das impedâncias. Porém, os ícones de configuração dos condutores de fase e terra serão desativados. Enquanto que para o outro tipo de dados de entrada ocorre o inverso, os ícones referentes aos condutores de fase e terra são ativados e o

ícone *RLC* é desativado. Ao clicar no ícone para entrada de dados para os condutores de fase, é apresentada uma tela com os campos dos dados necessários, como número de condutores por fase, altura da torre, resistividade do solo, entre outros. Da mesma forma ocorre ao clicar no ícone para entrada dos dados do condutor terra, em que é necessário informar o número de condutores terra, o raio do condutor, etc.

Nas configurações iniciais da linha de transmissão informa-se o tipo dos dados de entrada, o modelo usado para a representação, o tipo de transposição, entre outros. O modelo para representação da linha de transmissão pode ser o de Bergeron, o dependente da frequência ou de domínio de fase. Quanto à transposição, o usuário pode escolher se a linha será transposta ou não-transposta.

Após informar todos os dados necessários para o cálculo do modelo da linha de transmissão a ser usado na simulação, o arquivo é salvo e compilado. Este arquivo é utilizado no módulo *Draft*, onde as linhas de transmissão são representadas por suas torres e por um bloco no qual é colocado o nome do arquivo criado no *TLine* para que ele possa ter acesso aos dados do modelo da linha.

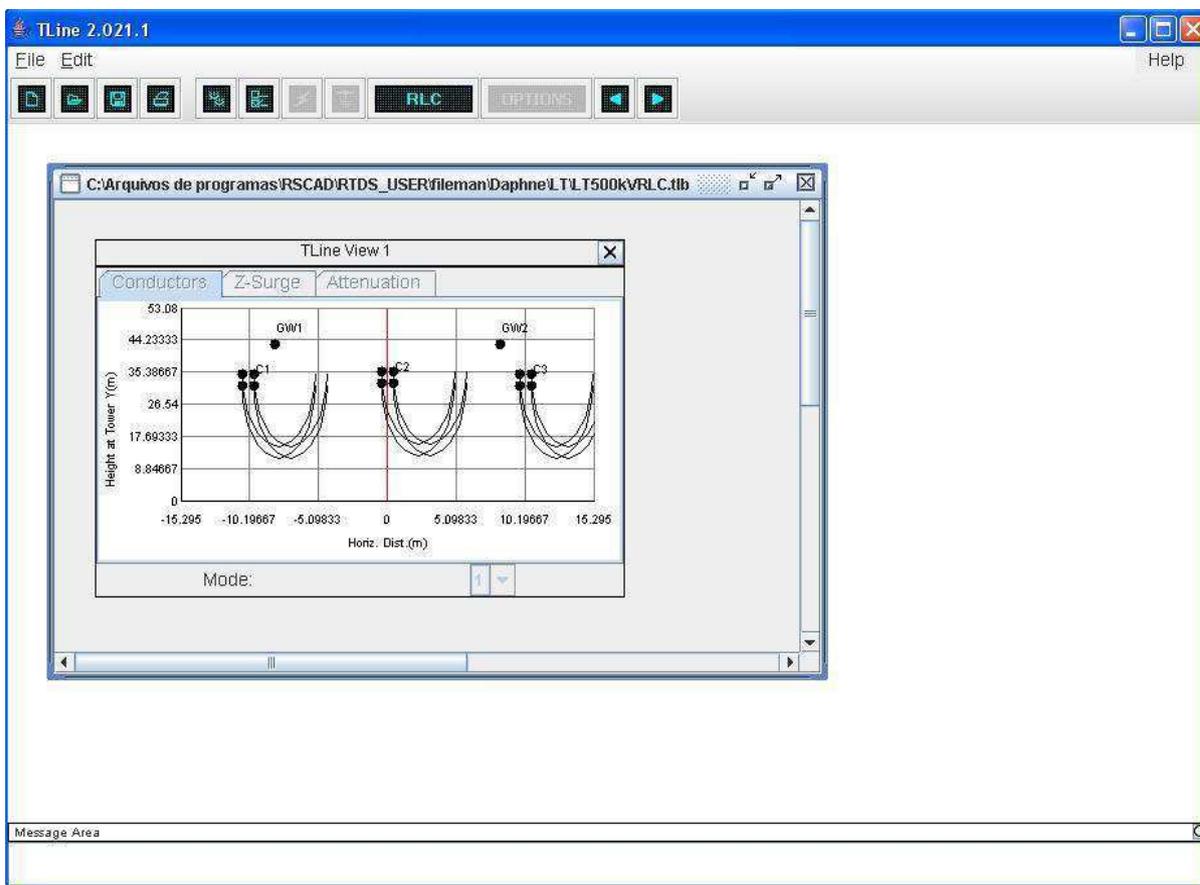


Figura 17 – Tela do módulo *TLine*.

CABLE

O módulo *Cable* é o módulo usado para o cálculo das características das ondas viajantes dos cabos, cujos dados de entrada são os dados físicos dos cabos. É possível escolher entre três tipos de modelos para a representação do cabo: Bergeron, dependente da frequência ou no domínio da fase.

RUNTIME

A execução e controle de uma simulação é feita por meio do módulo *RunTime*. A tela deste módulo é apresentada na Figura 18.

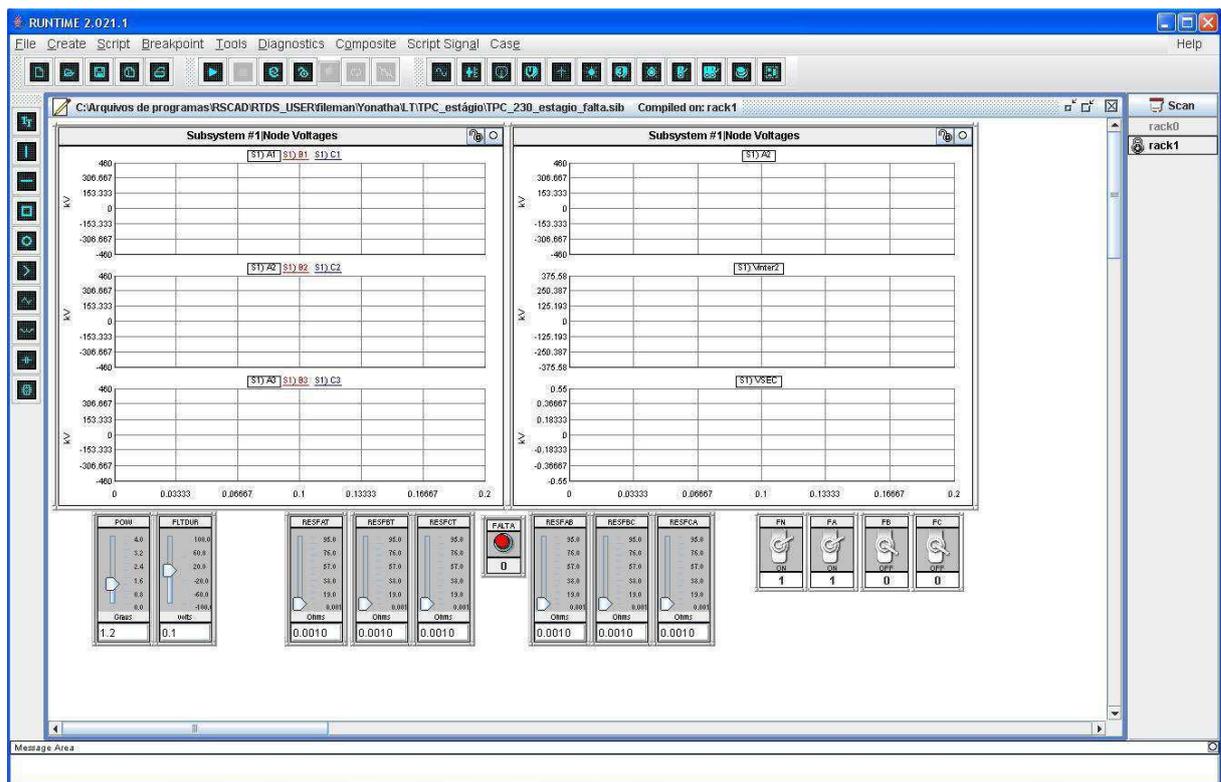


Figura 18 – Janela do módulo *RunTime*.

Neste módulo o usuário pode interagir com a simulação. Para isso vários recursos estão disponíveis para controle da simulação e análise do comportamento do sistema

simulado. A qualquer instante durante a simulação pode-se verificar o estado do sistema simulado.

Existe um ícone na barra de ferramentas do *RunTime* que permite que o usuário selecione grandezas para serem plotadas em um gráfico. Para um sistema elétrico de potência, por exemplo, pode-se verificar o comportamento da corrente em um transformador. É importante destacar que as grandezas que o usuário deseja monitorar durante a simulação devem ter sido habilitadas no *Draft*, ao definir os parâmetros de cada componente. Também podem ser usados medidores para monitoramento de grandezas como potência ativa e tensão.

Existem alguns dispositivos para controle da simulação, como chaves, *sliders*, botões, entre outros, os quais são acessados por meio de ícones presentes na barra de ferramentas. Para utilizar esses dispositivos no *RunTime* é necessário que o usuário tenha feito a lógica de controle no *Draft*, usando os componentes da biblioteca de controle. Em simulações em que se deseja verificar o comportamento de um sistema elétrico de potência na presença de um curto-circuito em um determinado ponto do sistema, por exemplo, o controle para aplicação dessa falta é feita no *Draft* e no *RunTime* são colocados os dispositivos que permitem que o usuário aplique a falta no instante desejado por meio botões e *sliders*.

No *RunTime* também é possível salvar os dados de gráficos para uma posterior análise no *MultiPlot*, ou ainda salvar os gráficos como imagem ou em pdf, além de ser possível salvar esses dados para utilizar em outros softwares, como o Matlab®.

Dessa forma, pode-se observar que o *RunTime* é o módulo do RSCAD que permite a comunicação de software com hardware, é onde o usuário é capaz de exercer controle sobre a simulação e monitorar em tempo real o comportamento de um sistema.

MULTILOT

Trata-se de um módulo que permite a captura dos dados de simulação para um pós-processamento, análise e impressão. Além disso, o usuário pode gerar relatórios com gráficos e anotação utilizando o *MultiPlot*. Outra funcionalidade deste módulo é a possibilidade de criar um arquivo ASCII dos dados de simulação, de modo que possa ser importado por outros programas para uma posterior análise.

CBUILDER

O *CBuilder* é o módulo que permite que o usuário implemente modelos de componentes próprios para serem utilizados no *Draft*. Na Figura 19 é apresentada a tela deste módulo.

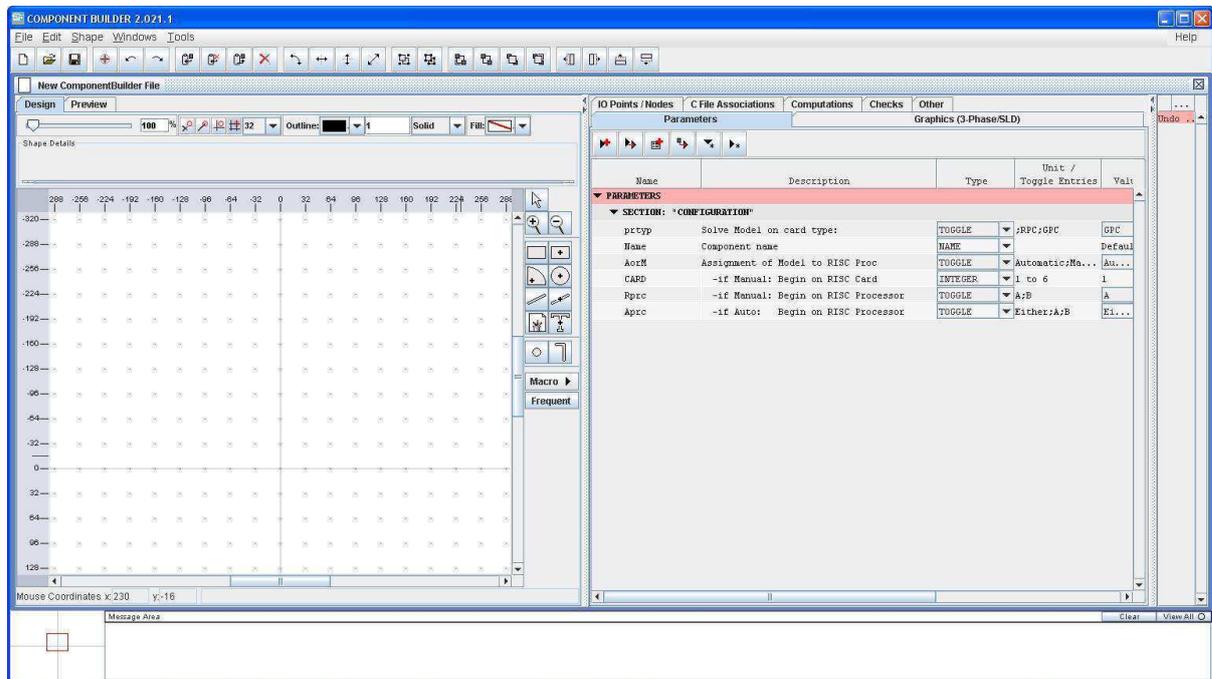


Figura 19 – Janela do módulo *CBuilder*.

No *CBuilder* o usuário cria o ícone do componente que será visualizado no *Draft*, implementa o código de simulação dele e define os seus parâmetros de entrada. Diversas ferramentas de desenho estão disponíveis para a construção do ícone do componente. E a linguagem usada para escrever o código de simulação é a linguagem C.

Este módulo permite, então, que modelos de componentes de sistemas elétricos de potência sejam implementados, além de dispositivos de proteção e de controle, e possam ser utilizados em simulações.

4.2.2 Compilador

O compilador é responsável por realizar a conexão entre o software e o hardware do RTDS™. As informações a cerca do circuito simulado são coletadas do *Draft* pelo

compilador e então, levadas para o simulador, onde são processadas em paralelo nos diversos processadores do hardware. A definição das tarefas a serem realizadas por cada processador durante a simulação é feita pelo compilador, o qual avaliará o esquema do circuito e a disponibilidade do hardware. Porém, a solução de cada componente pode ser direcionada para um processador específico, o qual é definido no *Draft*. Neste caso a escolha dos processadores que serão utilizados é feita manualmente pelo usuário.

4.2.3 Modelos dos componentes dos sistemas de potência e de controle

O RSCAD possui diversos modelos de componentes de sistemas de potência e de controle para a construção do sistema a ser simulado. Estes modelos estão organizados em bibliotecas: *Power System, Controls, Protection & Automation*.

Na biblioteca de Sistemas de Potência encontram-se modelos de componentes de fontes de tensão, de transformadores, de pára-raios, de máquinas de indução, de resistores, indutores e capacitores, entre outros. Além disso, essa biblioteca disponibiliza esses modelos tanto para sistemas trifásicos como para sistemas monofásicos.

Na biblioteca de Sistemas de Controle estão presentes modelos de conversores analógico/digital, geradores de sinais, portas lógicas, comparadores, elementos para exportar ou importar variáveis entre o sistema de controle e o elétrico, entre outros.

Além dos modelos existentes, o usuário pode inserir novos modelos nas bibliotecas para utilizar em simulações. Como visto anteriormente, o módulo que permite a criação de novos modelos de componentes é o *CBuilder*.

5. Resultados e Análises

Com os conhecimentos e práticas adquiridas ao longo do estágio, como o uso do software TPCalc e o uso do RTDS, foi possível realizar algumas simulações a fim de mostrar o desempenho do TPC quando usado em medição na presença de harmônicos no sistema elétrico. E em seguida será apresentado o compensador desenvolvido no GSE para contornar este problema, de modo que o TPC pode ser usado em medição e apresentar valores de medição confiáveis.

5.1 Simulação no RTDS

Para avaliar o comportamento de um TPC de 230 kV na presença de harmônicos, foi simulado um sistema fictício com três fontes de harmônicos e com duas linhas de transmissão. Os dados das linhas de transmissão utilizados são dados reais de uma linha de transmissão com 200 km de extensão de um sistema elétrico da CHESF de 230 kV, a Recife II – Bongi I. O esquema básico do sistema simulado é apresentado na Figura 20.

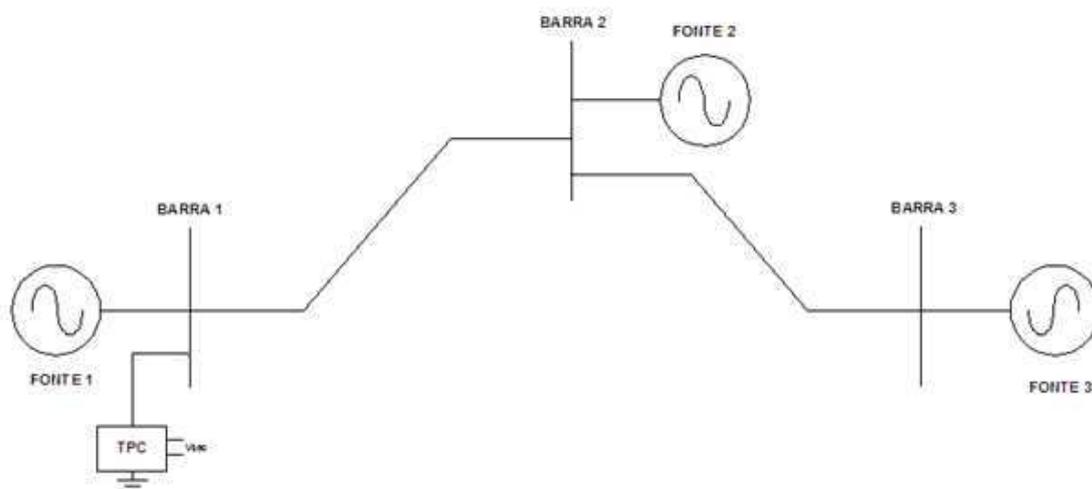


Figura 20 – Esquema básico do sistema simulado.

Antes de iniciar a montagem do sistema elétrico a ser simulado, o primeiro passo foi determinar os parâmetros do TPC de 230 kV utilizando o software TPCalc. Na Tabela 3 é apresentado o conjunto de parâmetros obtidos para o TPC.

Tabela 3 – Parâmetros do TPC de 230 kV.

Coluna Capacitiva	Reator de Compensação	TPI	Circuito Supressor de Ferroresonância
$C_1 = 10,04 \text{ mF}$	$R_c = 505,0 \text{ } \Omega$	$R_p = 7,7 \text{ k } \Omega$	$L_{f1} = 4,1 \text{ mH}$
$C_2 = 65,40 \text{ mF}$	$L_c = 338,5 \text{ H}$	$L_p = 98,3 \text{ k H}$	$C_f = 226,9 \text{ } \mu\text{F}$
	$C_c = 668,9 \text{ pF}$	$C_p = 512,8 \text{ pF}$	$L_{f2} = 32,7 \text{ mH}$
		$R_m = 1826,6 \text{ M } \Omega$	$R_f = 4,3 \text{ } \Omega$
		$L_m = 7,0 \text{ k H}$	$M = 3,9 \text{ mH}$

Com os parâmetros do TPC definidos, partiu-se para a montagem do sistema elétrico no *Draft* conforme mostrado na Figura 21. Todos os componentes utilizados para a simulação do sistema elétrico estão presentes na biblioteca *Power System*.

Foram utilizadas três fontes de tensão, e essas foram configuradas para gerar harmônicos. A primeira fonte foi configurada para gerar 3°, 5° e 7° harmônicos, enquanto que a segunda fonte foi configurada para gerar 9°, 11° e 13° harmônicos, e a terceira fonte, 15°, 17° e 19° harmônicos. A interligação dessas fontes é feita através de duas linhas de transmissão, cada uma com 100 km de extensão. A modelagem da linha foi feita no módulo *TLine*, no qual foram informados os dados físicos dos condutores e os dados referentes à geometria da linha de transmissão, como número de condutores por fase, distância horizontal, resistência de aterramento, entre outros. Como já mencionado, os dados usados para a modelagem da linha são dados reais da linha Recife II – Bongi I, cujos dados se encontram no Anexo 1. Após entrar com todos os dados necessários, o modelo da linha é salvo e compilado.

No *Draft* foram colocadas as torres das duas linhas de transmissão. É preciso associar o modelo da linha feito no *TLine* no *Draft*. Esta associação foi feita por meio de um bloco, também da biblioteca *Power System*, no qual é informado o nome do arquivo que contém o modelo da linha. Este bloco foi colocado acima das torres de transmissão como pode ser visto na Figura 21.

Em seguida construiu-se o modelo do TPC. O reator e o circuito supressor de ferromressonância foram feitos com elementos R, L e C, e quanto ao TPI, utilizou-se o modelo ideal de transformador disponível na biblioteca de sistemas de potência. Feitas as ligações dos elementos corretamente e colocados os valores dos parâmetros apresentados na Tabela 3, a construção do modelo do TPC foi finalizada. E com isso, terminou-se a construção do sistema elétrico.

Após a montagem do sistema no *Draft*, o arquivo é salvo e compilado a fim de verificar se todas as informações dadas e conexões feitas estão corretas. O passo seguinte corresponde à execução da simulação do sistema. Isto é feito no módulo *RunTime*. Para analisar o comportamento da tensão nos terminais do secundário do TPC e verificar se o equipamento está reproduzindo fielmente a tensão de entrada do TPC nos terminais secundários do mesmo, são plotados os gráficos da tensão no primário em função do tempo e

a tensão no secundário em função do tempo. O comportamento dessas curvas de tensão pode ser acompanhado em tempo real no *RunTime*.

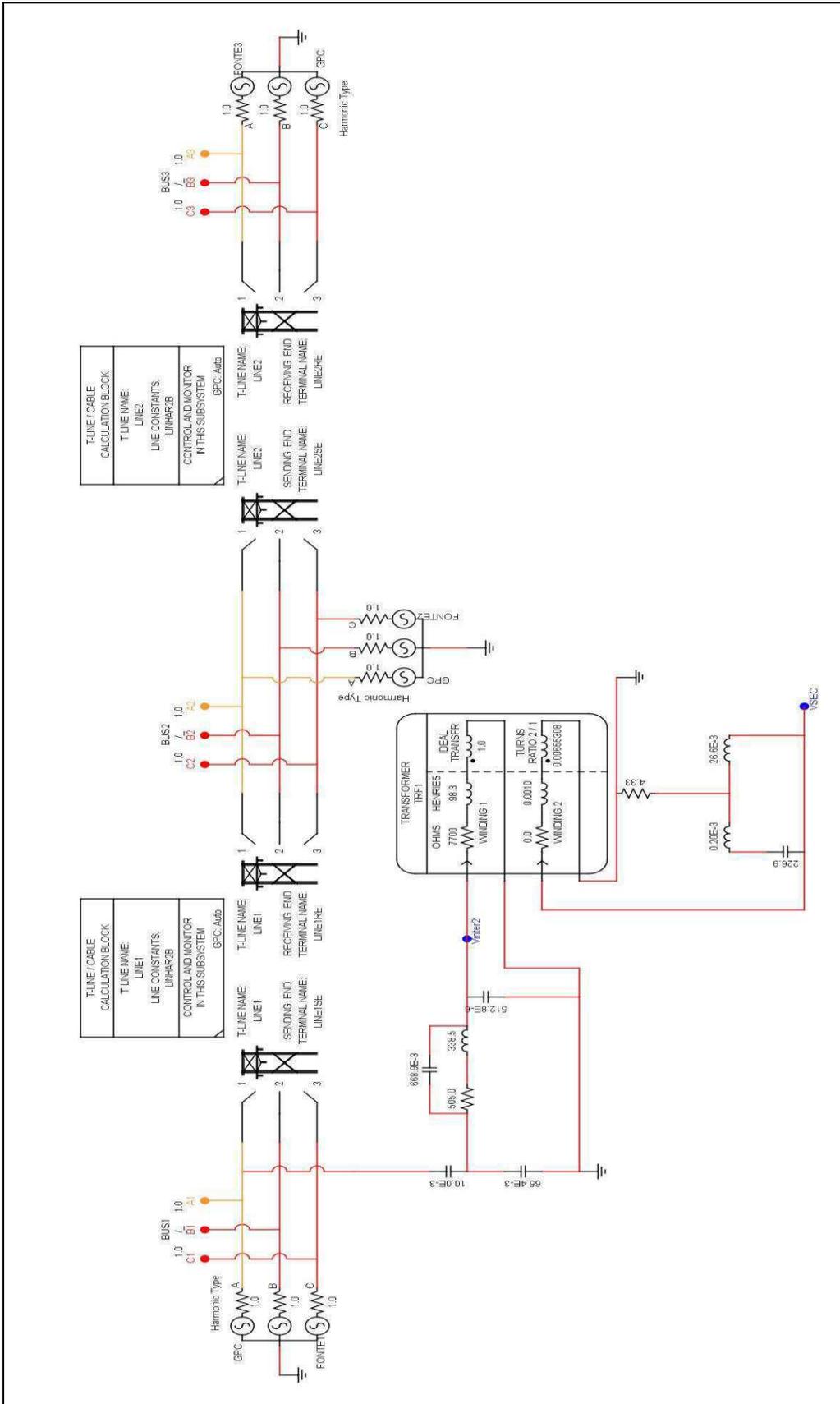


Figura 21 – Esquema do sistema elétrico simulado no *Draft*.

Para melhor analisar os resultados, os dados das curvas de tensão apresentados na tela do *RunTime* foram salvos no formato CONTRADE para serem utilizados no Matlab®. Neste software foi implementada uma rotina para manipulação dos dados a fim de apresentar em um mesmo gráfico as tensões no primário e no secundário do TPC em p.u. em função do tempo. A rotina desenvolvida no Matlab® é apresentada no Anexo 2. Na Figura 22 é apresentado o gráfico das tensões do TPC em um determinado intervalo de tempo.

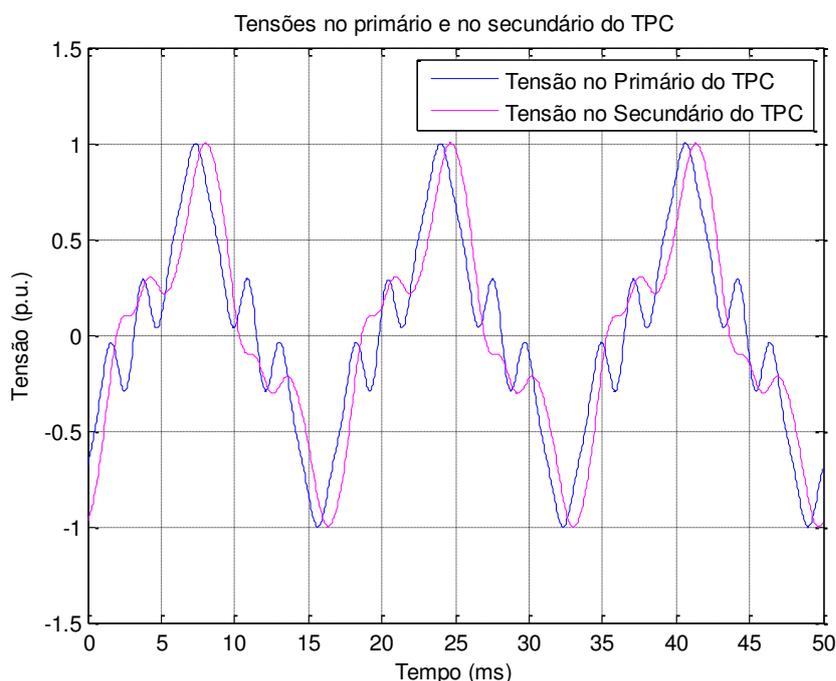


Figura 22 – Tensões no primário e no secundário do TPC.

Ao observar a Figura 22, percebe-se que a tensão no secundário do TPC não representa uma réplica da tensão no primário. Além disso, é possível observar uma defasagem entre os sinais de tensão, em torno de 15° . Esta defasagem pode ser explicada com auxílio da resposta em frequência de fase do TPC obtida no TPCalc, Figura 23. Analisando a resposta em frequência do modelo, observa-se que a fase é zero apenas para a frequência de 60 Hz e para frequências em torno dela, intervalo em destaque na Figura 23. Para frequências fora desse pequeno intervalo, nota-se que a fase já não é zero. Este comportamento da fase em função da frequência está diretamente associado ao projeto do reator de compensação. Como mencionado no capítulo 2, o reator é projetado para atuar na frequência fundamental. Dessa

maneira, nas demais frequências não se pode garantir que o reator eliminará a defasagem causada pelo divisor capacitivo presente na entrada do TPC, como constatado ao observar a resposta em frequência de fase. E devido às componentes harmônicas presentes no sistema elétrico simulado, a frequência das tensões não é a fundamental, logo a defasagem não pode ser controlada pelo reator projetado. Por isto se observa a defasagem entre as tensões no primário e no secundário do TPC.

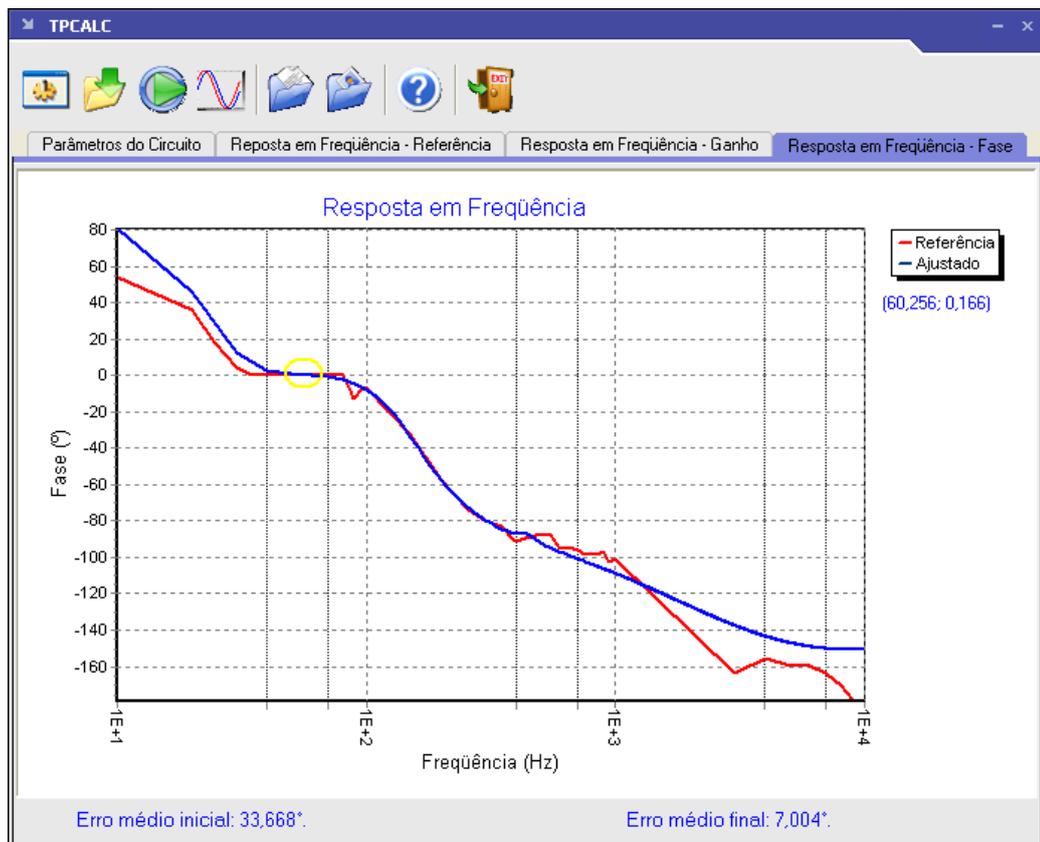


Figura 23 – Curvas da fase em função da frequência do TPC.

(Fonte: SILVA, 2010)

Com estes resultados da simulação, verificou-se o desempenho do TPC em medição quando estão presentes no sistema componentes harmônicas, pois a reprodução da tensão no primário no secundário não é fiel, acarretando erros de medição. Porém, foi desenvolvido um compensador no GSE (SILVA, 2010) que torna possível o uso do TPC na medição. Este compensador realiza a correção da tensão secundária.

O compensador projetado trata-se, basicamente, de um filtro recursivo baseado na função de transferência do TPC, o qual foi implementado em um DSP (*Digital Signal Processor*). Na Figura 24 é apresentado o resultado obtido com o uso do compensador.

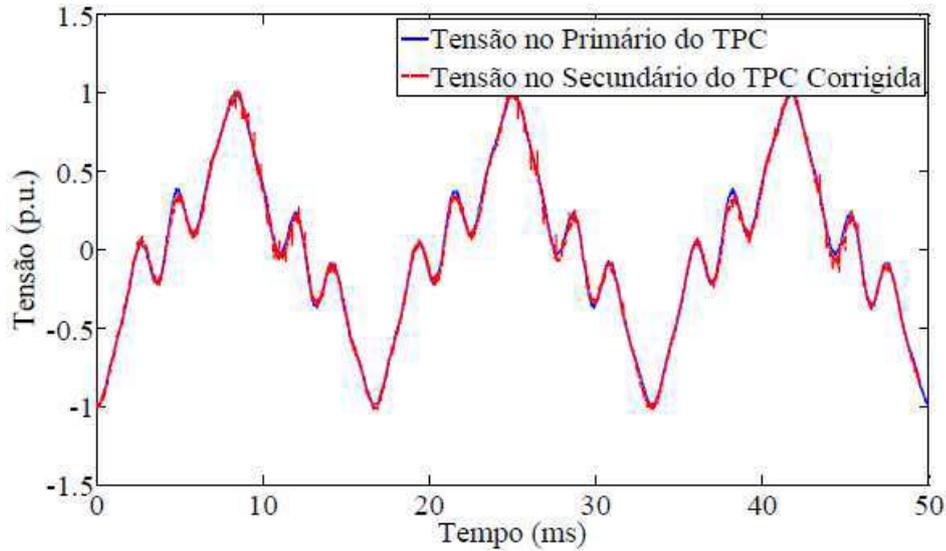


Figura 24 – Tensões no primário e no secundário do TPC com o compensador.

(Fonte: SILVA, 2010)

Como se pode observar o compensador corrigiu a tensão no secundário do TPC, de modo que este equipamento pode ser usado para realizar medições de sinais com distorção harmônica com maior exatidão.

6. Considerações Finais

A realização do estágio supervisionado no LARCA foi de grande importância para minha formação acadêmica. Além de ter agregado novos conhecimentos, possibilitou a aplicação de conhecimentos adquiridos ao longo do curso nas atividades desenvolvidas durante o estágio.

O uso do TPC para medições de sinais com distorção harmônica se mostrou inviável, pois se verificou que a reprodução desses sinais aplicados aos terminais primários do TPC nos terminais secundários não era fiel, acarretando erros significativos de medição. Para eliminar este problema, foi desenvolvido um compensador no GSE. Este compensador é colocado nos terminais secundários do TPC para corrigir a tensão secundária. Trata-se basicamente de um filtro digital recursivo, que é implementado em um DSP, e cujos coeficientes são dependentes dos parâmetros do TPC.

De modo geral, o estágio possibilitou que o desempenho do TPC na medição na presença de distorção harmônica fosse exposta. Para isso foi necessário familiarizar-se com alguns softwares, como o TPCalc e o RSCAD, e com o próprio simulador digital em tempo real, o RTDS™.

Bibliografia

DANTAS, K. M. C. *Introdução ao Real-Time Digital Simulator (RTDS™)*. Campina Grande, 2009.

D'AJUZ, A., RESENDE, F. M., CARVALHO, F. M. S., NUNES, I. G., AMON FILHO, J., DIAS, L. E. N., PEREIRA, M. P., KASTRUP FILHO, O., MORAIS, S. A. *Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*. FURNAS. Rio de Janeiro, 1985.

GSE/UFCG. *Relatório Final do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Representação de Transformadores de Potencial Capacitivos em Estudos de Transitórios Eletromagnéticos*, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, abril 2007.

LEÃO, R. P. S. *Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência*. Universidade Federal do Ceará. 2010. Disponível em: www.dee.ufc.br/~rleao. Acessado em: 14 de fevereiro de 2011.

RTDS Technologies Inc. *Real Time Digital Simulator Tutorial Manual. (RSCAD Version)*. Canadá, March 2008.

RTDS Technologies Inc. *RTDS™ User's Manual*, 2007.

SILVA, C. A. *Correção de Tensão Secundária de Transformadores de Potencial Capacitivos em Tempo Real*. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

ANEXO 1 - Dados da Linha de Transmissão Recife II - Bongi I

