



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ADRIANO COSTA DE OLIVEIRA

**APLICAÇÃO DO SOFTWARE PSCAD EM SIMULAÇÕES DE
TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

Campina Grande, Paraíba
Maio de 2013

ADRIANO COSTA DE OLIVEIRA

APLICAÇÃO DO SOFTWARE PSCAD EM SIMULAÇÕES DE
TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido a 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.

Adriano Costa de Oliveira
Aluno

Professor George Rossany Soares de Lira, D. Sc.
Orientador

Campina Grande, Paraíba
Maio de 2013

ADRIANO COSTA DE OLIVEIRA

APLICAÇÃO DO SOFTWARE PSCAD EM SIMULAÇÕES DE
TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido a
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.*

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande

Professor George Rossany Soares de Lira
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha família,
aos meus amigos, pelo apoio durante o curso e
aos professores que contribuíram para a minha
formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu pai, Alciônio, e à minha mãe, Miriam, por terem se empenhado tanto para me proporcionar uma boa educação, por terem sempre me apoiado e me ajudado a superar todas as adversidades durante minha vida.

Agradeço ao Professor George Rossany Soares de Lira pela supervisão e orientação deste trabalho. Pela atenção, paciência e disponibilidade.

Agradeço ao Professor Francisco das Chagas Fernandes Guerra pela grande contribuição para a realização deste trabalho.

Agradeço a todos os professores que tive durante o curso de graduação pelo conhecimento transmitido.

Agradeço às amigas que fiz durante o curso.

RESUMO

A compreensão dos fenômenos transitórios que ocorrem nos sistemas elétricos de potência é de fundamental importância, visto que possibilita uma correta coordenação de isolamento entre os equipamentos e os dispositivos de proteção, evitando possíveis falhas ou, até mesmo, interrupções do fornecimento de energia. Este trabalho apresentará o PSCAD como uma ferramenta computacional capaz de simular, com precisão, diversos fenômenos transitórios decorrentes de operações de manobra ou da incidência de descargas atmosféricas, e também serão simuladas algumas técnicas empregadas para reduzir as sobretensões ou sobrecorrentes geradas.

Palavras-chave: Fenômenos transitórios, PSCAD, sobretensão, sobrecorrente, energização, linhas de transmissão, bancos de capacitores, saturação, transformadores de corrente.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1: Circuito RL série.	14
Figura 3.2: Tensão sobre o resistor do circuito RL série.	14
Figura 3.3: Circuito RC série.	15
Figura 3.4: Tensão sobre o capacitor do circuito RC série.	16
Figura 3.5: Circuito RLC série.	17
Figura 3.6: Corrente do circuito RLC não amortecido.	17
Figura 3.7: Corrente do circuito RLC sub-amortecido.	18
Figura 3.8: Corrente do circuito RLC criticamente amortecido.	18
Figura 3.9: Corrente do circuito RLC superamortecido.	19
Figura 4.1: Circuito montado no PSCAD para simulação de TRT.	20
Figura 4.2: Tensão de restabelecimento transitória.	21
Figura 4.3: Corrente interrompida na simulação de TRT.	21
Figura 4.4: <i>Zoom</i> da tensão de restabelecimento transitório.	21
Figura 4.5: <i>Zoom</i> da corrente interrompida na simulação de TRT.	22
Figura 4.6: TRT com a utilização de resistores de pré-inserção.	22
Figura 4.7: Corrente interrompida na simulação de TRT com a utilização de resistores de pré-inserção.	23
Figura 4.8: Circuito montado no PSCAD para simulação de TRT com frequências múltiplas.	23
Figura 4.9: TRT com frequências múltiplas.	24
Figura 4.10: <i>Zoom</i> da TRT com frequências múltiplas.	24
Figura 5.1: Circuito equivalente para análise de ferroressonância [2].	25
Figura 5.2: Diagrama fasorial do circuito equivalente para análise de ferroressonância [2].	25
Figura 5.3: Localização do ponto de operação do circuito [2].	25
Figura 5.4: Ferroressonância gerada pelo aumento da tensão da fonte [2].	26
Figura 5.5: Ferroressonância gerada pela diminuição da frequência da fonte [2].	26
Figura 5.6: Circuito montado no PSCAD para simulação de ferroressonância.	27
Figura 5.7: Corrente em condições estáveis de funcionamento.	27
Figura 5.8: Tensão sobre o transformador em condições estáveis de funcionamento.	28
Figura 5.9: Tensão sobre o capacitor em condições estáveis de funcionamento.	28
Figura 5.10: Corrente em condição de ferroressonância gerada pelo aumento da tensão da fonte.	28
Figura 5.11: Tensão sobre o transformador em condição de ferroressonância gerada pelo aumento da tensão da fonte.	29
Figura 5.12: Tensão sobre o capacitor em condição de ferroressonância gerada pelo aumento da tensão da fonte.	29
Figura 5.13: Corrente em condição de ferroressonância gerada pela diminuição da frequência da fonte.	29
Figura 5.14: Tensão sobre o transformador em condição de ferroressonância gerada pela diminuição da frequência da fonte.	30
Figura 5.15: Tensão sobre o capacitor em condição de ferroressonância gerada pela diminuição da frequência da fonte.	30
Figura 6.1: Circuito equivalente para análise de transitórios em TCs [2].	31
Figura 6.2: Representação da saturação do núcleo magnético [2].	32
Figura 6.3: Comportamento típico de correntes de curto-circuito [2].	33
Figura 6.4: Circuito montado no PSCAD para simulação de transitórios em TCs.	33
Figura 6.5: Corrente de um TC com saturação CC com baixa indutância no secundário.	34
Figura 6.6: Corrente de um TC com saturação CC com alta indutância no secundário.	34
Figura 6.7: Corrente de um TC com saturação CA com carga de 50 ohms.	35
Figura 6.8: Corrente de um TC com Saturação CA com carga de 90 ohms.	35
Figura 6.9: Corrente de um TC com saturação CC e CA.	36
Figura 6.10: Fluxo magnético em um TC sem fluxo remanescente.	36
Figura 6.11: Fluxo magnético em um TC com fluxo remanescente.	37
Figura 6.12: Corrente de um TC saturado com fluxo remanescente.	37
Figura 7.1: Circuito equivalente para análise de energização de bancos de capacitores isolados [2].	38
Figura 7.2: Circuito montado no PSCAD para simulação de energização de bancos de capacitores isolados.	39

Figura 7.3: Corrente <i>inrush</i> para um banco de capacitores energizado no instante em que a tensão da fonte é mínima.	40
Figura 7.4: Corrente <i>inrush</i> para um banco de capacitores energizado no instante em que a tensão da fonte é máxima.	40
Figura 7.5: Corrente <i>inrush</i> Com a resistência equivalente do sistema reduzida.	41
Figura 7.6: Circuito equivalente para análise de energização de bancos de capacitores em paralelo [2]. ...	41
Figura 7.7: Circuito montado no PSCAD para simulação de energização de bancos de capacitores paralelos.	42
Figura 7.8: Corrente <i>inrush</i> em um chaveamento back to back.	42
Figura 8.1: Circuito equivalente para análise de energização de transformadores a vazio [2].	44
Figura 8.2: Comportamento do fluxo magnético na energização de um transformador a vazio [2].	45
Figura 8.3: Representação da saturação devido à assimetria do fluxo magnético [2].	45
Figura 8.4: Circuito montado no PSCAD para simulação de energização de transformadores a vazio.	46
Figura 8.5: Corrente de <i>inrush</i> de energização de um transformador a vazio.	46
Figura 8.6: Fluxo de um transformador a vazio sendo energizado.	47
Figura 8.7: Corrente de <i>inrush</i> com chaveamento controlado.	47
Figura 8.8: Fluxo magnético com chaveamento controlado.	47
Figura 8.9: Corrente de <i>inrush</i> utilizando resistores de pré-inserção.	48
Figura 8.10: Fluxo magnético com a utilização de resistores de pré-inserção.	48
Figura 9.1: Modelos PI nominal e PI acoplado disponíveis no PSCAD.	50
Figura 9.2: Circuito montado no PSCAD para simulação de energização de linhas de transmissão.	50
Figura 9.3: Tensão nos terminais de uma linha de transmissão de 100 km.	51
Figura 9.4: Tensão nos terminais de uma linha de transmissão de 400 km.	51
Figura 9.5: Tensão nos terminais de uma linha de transmissão utilizando resistores de pré-inserção.	52
Figura 9.6: Tensão nos terminais de uma linha de transmissão utilizando chaveamento controlado.	52
Figura 10.1: Circuito montado no PSCAD para simulação de incidência de descargas atmosféricas.	54
Figura 10.2: Impulso de corrente de uma descarga atmosférica de 8/20 μ s.	54
Figura 10.3: Sobretensão atmosférica gerada.	54
Figura 10.4: Sobretensão atmosférica utilizando um para-raios.	55
Figura A.1: "PSCAD Button".	58
Figura B.1: Biblioteca principal e suas subseções.	60
Figura C.1: Tela de configurações principais de fontes.	62
Figura C.2: Tela de configuração de parâmetros de fontes.	63
Figura C.3: Tela de configuração de canais de saída.	63
Figura C.4: Tela de configurações principais de transformadores.	64
Figura C.5: Tela de definição da curva de saturação de transformadores.	65
Figura C.6: Tela de configurações adicionais de disjuntores.	66
Figura C.7: Tela de configurações principais de disjuntores.	66
Figura C.8: Tela de configuração de resistores de pré-inserção de disjuntores.	67
Figura C.9: Disjuntores e seus controladores temporais disponíveis no PSCAD.	67
Figura C.10: Tela de configuração de Controladores temporais de disjuntores.	68
Figura C.11: Tela de configurações principais de TCs.	68
Figura C.12: Tela para configuração da curva B-H de TCs.	69
Figura C.13: Falhas e seus controladores temporais disponíveis no PSCAD.	69
Figura C.14: Tela de configuração de controladores temporais para falhas.	70
Figura C.15: Exemplo de aplicação de falhas no PSCAD.	70
Figura C.16: Exemplo de utilização de linhas de transmissão no PSCAD.	71
Figura C.17: Tela de configurações principais de uma linha de transmissão.	71
Figura C.18: Tela para configuração das definições de linhas de transmissão.	72
Figura D.1: Tela para configuração dos parâmetros de canais de saída.	73
Figura D.2: Exemplo de definição do período de duração de simulações.	74
Figura D.3: Opção utilizada para exibição de gráficos.	74
Figura D.4: Exemplo de aplicação de zoom em gráficos.	75
Figura D.5: Exemplo de utilização de "Data Merge".	75
Figura E.1: Opção a ser selecionada para exportar dados para o MATLAB.	76
Figura E.2: Cópia de dados para exportar para o MATLAB.	77
Figura E.3: Exibição dos dados importados no MATLAB.	77

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Resumo	vi
Lista de Ilustrações	vii
Sumário	ix
1 Introdução	10
2 Histórico de Simuladores de Transitórios	12
3 Transitórios em Circuitos Lineares Básicos	13
3.1 Circuito RL	13
3.2 Circuito RC	14
3.3 Circuito RLC	16
4 Tensão de Restabelecimento Transitório	19
5 Ferroressonância	24
6 Regime Transitório de Transformadores de Corrente	31
7 Energização de Bancos de Capacitores	37
7.1 Energização de Bancos Isolados	38
7.2 Energização de um Bancos em Paralelo	41
8 Energização de Transformadores a Vazio	43
9 Energização de Linhas de Transmissão	49
10 Descargas Atmosféricas	53
11 Conclusão	56
12 Referências Bibliográficas	57
Apêndice A: Interface	58
Apêndice B: Acesso aos Componentes	60
Apêndice C: Definição de Parâmetros e Utilização de Componentes	62
Apêndice D: Exibição de Gráficos	73
Apêndice E: Comunicação com o MATLAB	76

1 INTRODUÇÃO

O projeto de um sistema de potência deve ser feito de tal forma que os equipamentos possam suportar as solicitações impostas pela ocorrência de fenômenos transitórios, evitando assim uma possível falha ou destruição dos equipamentos e, até mesmo, a interrupção no fornecimento de energia. Os fenômenos transitórios podem ser causados por oscilações mecânicas em sistemas turbo-geradores, incidências de descargas atmosféricas ou manobras de chaveamento em circuitos contendo elementos indutivos e capacitivos. Vários estudos são realizados nessa área de pesquisa com o objetivo de possibilitar a correta coordenação de isolamento entre os equipamentos e os dispositivos de proteção, além de encontrar meios de prevenção contra a ocorrência de falhas.

Os cálculos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia podem ser feitos analiticamente ou por meio de métodos gráficos, no entanto estes métodos se tornam cada vez mais inviáveis conforme a complexidade dos circuitos aumentam. Desse modo, os softwares específicos para cálculos de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência se apresentam como as melhores alternativas para realização destes estudos.

Neste trabalho será feita uma contribuição para os estudos relacionados a transitórios eletromagnéticos, mediante simulações utilizando o software PSCAD. Serão abordados fenômenos transitórios envolvendo circuito lineares básicos, transformadores de corrente, energização de bancos de capacitores, linhas de transmissão e transformadores, bem como os fenômenos de ferroressonância, tensão de restabelecimento transitória (TRT) e a incidência de descargas atmosféricas. Além disso, será elaborado um pequeno tutorial descrevendo os procedimentos adotados para realização das simulações com o PSCAD, que serão disponibilizados em forma de anexos referenciados ao longo do texto, de modo que qualquer engenheiro ou estudante não familiarizado com o tema que se depare com este trabalho possa, não apenas reproduzir o que já foi feito, mas também fazer suas próprias simulações com facilidade.

Uma das maiores motivações para realização deste trabalho, foi a quase inexistência da abordagem de fenômenos transitórios durante o curso de graduação. Sendo apenas mencionado superficialmente em algumas disciplinas como proteção de sistemas elétricos, técnicas de alta tensão e equipamentos elétricos.

A abordagem deste trabalho será feita inicialmente através de revisões bibliográficas descrevendo os fenômenos que envolvem cada tipo de transitório das simulações. Em seguida, se possível, será feito um estudo analítico das tensões e correntes do circuito de modo que seja

apresentado um resultado esperado das simulações para efeito de comparação. Serão apresentadas figuras para ilustrar os circuitos que foram simulados e gráficos para exibir os resultados, seguidos por comentários finais.

2 HISTÓRICO DE SIMULADORES DE TRANSITÓRIOS

Os parâmetros e variáveis a serem estudados em sistemas elétricos de potência são representados por funções contínuas, enquanto que, em simulações digitais, são de natureza discreta. Portanto surgiu a necessidade do desenvolvimento de algoritmos capazes de resolver digitalmente as equações diferenciais e algébricas dos sistemas de potência. Em 1969, H. W. Dommel da *Bonneville Power Administration* (BPA) publicou um artigo mostrando soluções digitais para os transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência baseadas em equações diferenciais. O método foi chamado de *Electromagnetic Transients Program* (EMTP), que imediatamente foi tomado como um padrão industrial em todo o mundo. Vários projetos de pesquisa foram então direcionados para ajudar no aprimoramento desse método, que logo foi disponibilizado em escala mundial como o *Alternative Transient Program* (ATP), desenvolvido por W. S. Meyer da BPA como coordenador. O *Transient Analysis of Control Systems* (TACS) foi uma grande contribuição feita por L. Dubé em 1976.

A versatilidade do EMTP se deve aos modelos de componentes, que podem ser montados livremente para representar o sistema sob estudo. Dentre os vários componentes que podem ser modelados encontram-se: resistências não lineares, indutâncias, resistências variantes no tempo, chaves, elementos discretos, transformadores de dois ou três enrolamentos, linhas de transmissão transpostas ou não transpostas, modelos de geradores, circuitos conversores, supressores de surtos, etc. Com isso, vários fenômenos podem ser simulados, como: coordenação de isolamentos, correntes de falta, sobretensões devido à operações de chaveamento, operações de disjuntores, ferroressonância, etc.

Nos anos 1980s, O EMTDC se tornou o primeiro programa do tipo EMTP disponibilizado para computadores pessoais. O *Manitoba HVDC Research Center* desenvolveu então um programa com interface gráfica chamado de *Power System Computer Aided Design* (PSCAD), e o PSCAD/EMTDC versão 2 que foi disponibilizado no início dos anos 1990s para os UNIS work stations, e em 1998 para o Windows/PC. O EMTP-RV é uma versão reestruturada do EMTP.

Outros programas do tipo EMTP são: MicroTran da *Micro Tran Power System Analysis Corporation*; Transient Program Analyzer (TPA) baseado no MATLAB, NETOMAC da Siemens; SABER da Avant [10].

3 TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS LINEARES BÁSICOS

Com o objetivo de proporcionar uma familiaridade maior com o PSCAD, inicialmente serão realizadas algumas simulações mostrando o comportamento transitório de circuitos elétricos lineares, formados pelos componentes mais básicos de circuitos elétricos: resistores, indutores e capacitores. As diferentes configurações de ligação entre estes componentes são capazes de formar filtros passivos.

3.1 CIRCUITO RL

O circuito RL é um dos mais simples filtros analógicos possíveis de se obter. É constituído por um resistor e um indutor que podem ser ligados em série ou paralelo. Analisado no domínio da frequência a resposta ao degrau de um circuito RL série, são obtidas as seguintes expressões para as tensões sobre o indutor e o resistor, respectivamente:

$$U_L(s) = U \frac{sL}{R + sL} \frac{1}{s} \quad (1)$$

$$U_R(s) = U \frac{R}{R + sL} \frac{1}{s} \quad (2)$$

Onde U representa a tensão da fonte que alimenta o circuito. Utilizando expansão em frações parciais e a transformada inversa de Laplace, são obtidas as mesmas equações no domínio do tempo, mostradas a seguir:

$$U_L(t) = Ue^{-t(R/L)} \quad (3)$$

$$U_R(t) = U(1 - e^{-t(R/L)}) \quad (4)$$

A partir das equações anteriores, observa-se que, com o passar do tempo, a tensão sobre o resistor tende a U , já que com o carregamento do indutor, o mesmo passa a funcionar como um curto-circuito. Também é possível obter a constante de tempo do circuito, dada por $\tau = L/R$, que é definida como sendo o tempo para que um sinal, neste caso a tensão sobre o resistor, alcance 63,2% do seu valor em regime permanente.

Para simular o comportamento transitório de um circuito RL série com o PSCAD foi utilizado o circuito mostrado na Figura 1. As descrições de como acessar os componentes utilizados e de como editar os seus parâmetros estão disponibilizadas nos Apêndices B e C, respectivamente.

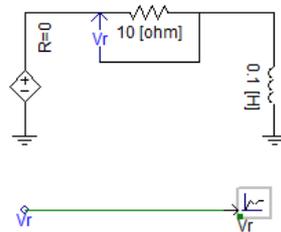


Figura 3.1: Circuito RL série.

Para este circuito, o valor teórico da constante de tempo é dada por $\tau = 0,1/10 = 0,01$. A Figura 2 mostra um gráfico com o valor da tensão sobre o resistor em função do tempo. A exibição dos gráficos foi feita de acordo com o procedimento descrito no Apêndice D.

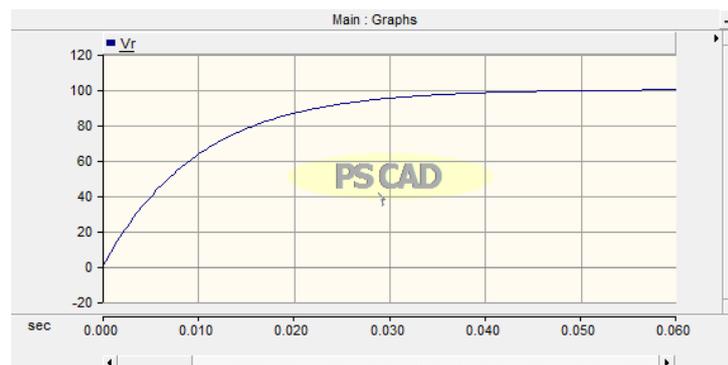


Figura 3.2: Tensão sobre o resistor do circuito RL série.

Observa-se que o resultado obtido com a simulação foi praticamente igual aos resultado esperado, pois a tensão sobre o resistor assumiu 63,2% do seu valor em regime permanente (100 V) exatamente aos 0,01 segundos, como foi calculado anteriormente.

3.2 CIRCUITO RC

Analogamente a análise feita para o circuito RL série, as equações a seguir mostram, respectivamente, as tensões sobre o capacitor e sobre o resistor, que foram obtidas para a resposta ao degrau de um circuito RC série.

$$U_L(s) = U \frac{1}{1 + sRC} \frac{1}{s} \quad (5)$$

$$U_L(s) = U \frac{sRC}{1 + sRC} \frac{1}{s} \quad (6)$$

Utilizando expansão em frações parciais e a transformada inversa de Laplace, são obtidas as mesmas equações no domínio do tempo, mostradas a seguir:

$$U_C(t) = U(1 - e^{-t/(RC)}) \quad (7)$$

$$U_R(t) = Ue^{-t/(RC)} \quad (8)$$

Nesse caso, a tensão sobre o capacitor tende ao valor da tensão da fonte de alimentação (100 V), pois a medida que um capacitor vai se carregando, o mesmo passa a se comportar como um circuito aberto. A constante de tempo evidenciada nas equações anteriores para o circuito RC série é dada por $\tau = RC$.

Para analisar o comportamento transitório de um circuito RC série com o PSCAD, foi utilizado o circuito mostrado na Figura 3. As descrições de como acessar os componentes utilizados e de como editar os seus parâmetros estão disponibilizadas nos Apêndices B e C, respectivamente.

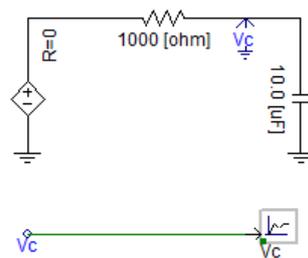


Figura 3.3: Circuito RC série.

Para este circuito, o valor teórico da constante de tempo é de $\tau = 1000 \cdot (0,00001) = 0,01$. A Figura 4 mostra um gráfico com o valor da tensão sobre o capacitor em função do tempo. A exibição dos gráficos foi feita de acordo com o procedimento descrito no Apêndice D.

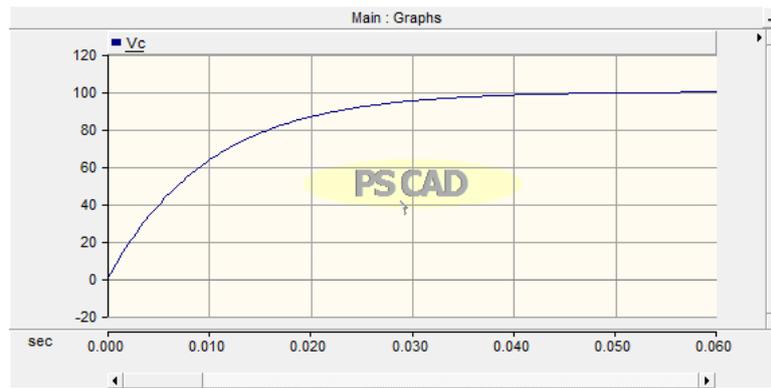


Figura 3.4: Tensão sobre o capacitor do circuito RC série.

Observa-se que o resultado obtido foi de acordo com os valores esperados, pois a tensão sobre o capacitor atingiu 63,2% do seu valor em regime permanente exatamente aos 0,01 segundos, como foi calculado anteriormente.

3.3 CIRCUITO RLC

Circuitos RLC são compostos por um resistor, um capacitor e um indutor que podem ser ligados em série ou paralelo. Os comportamentos das tensões e da corrente no circuito podem ser descritos por uma equação diferencial de segunda ordem.

Para um circuito RLC série, a seguinte expressão foi obtida no domínio da frequência utilizando a lei de Kirchhoff:

$$U(s) = RI(s) + sLI(s) + \frac{I(s)}{Cs} \quad (9)$$

Desenvolvendo-se a equação 9, é obtida a seguinte expressão para a corrente:

$$I(s) = \frac{sU(s)/L}{s^2 + 2\alpha s + \omega_0^2} \quad (10)$$

Onde α representa a constante de amortecimento do circuito dada por $\alpha = R/2L$ e ω_0 representa a frequência de oscilação natural do circuito dada por $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$.

Utilizando a transformada inversa de Laplace, a equação 11 é obtida:

$$i(t) = \frac{Ee^{-\alpha t}}{2L\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}} (e^{\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}t} - e^{-\sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}t}) \quad (11)$$

Obviamente, o comportamento da corrente depende dos valores de α e de ω_0 . Nas simulações a seguir, serão mostradas as quatro diferentes características do comportamento transitório da corrente em circuitos RLC série.

Para simulação do comportamento transitório de circuitos RLC no PSCAD, foi utilizado o circuito mostrado na Figura 5. As descrições de como acessar os componentes utilizados e de como editar os seus parâmetros estão disponibilizadas nos Apêndices B e C, respectivamente.

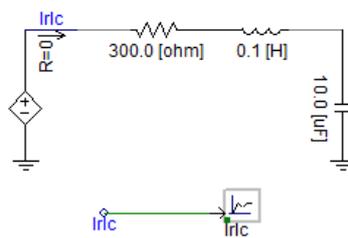


Figura 3.5: Circuito RLC série.

- Circuito não amortecido: $\alpha = 0$

O resultado mostrado na Figura 6 foi obtido com $R = 0$ ohm, $L = 0,1$ H e $C = 10$ μ F.

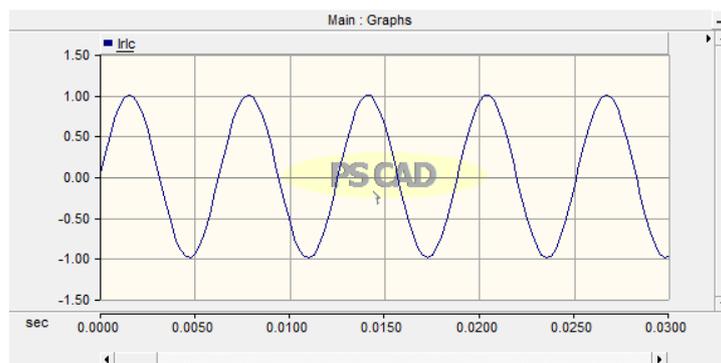


Figura 3.6: Corrente do circuito RLC não amortecido.

- Circuito sub-amortecido: $\alpha < \omega_0$

O resultado mostrado na Figura 7 foi obtido com $R = 50$ ohm, $L = 0,1$ H e $C = 10$ μ F, resultando num $\alpha = 250$ e $\omega_0 = 1000$.

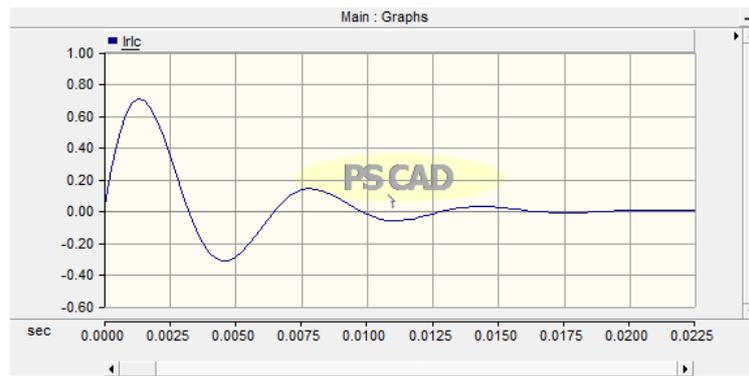


Figura 3.7: Corrente do circuito RLC sub-amortecido.

- Circuito criticamente amortecido: $\alpha = \omega_0$

O resultado mostrado na Figura 8 foi obtido com $R = 200 \text{ ohm}$, $L = 0,1 \text{ H}$ e $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$, resultando num $\alpha = 1000$ e $\omega_0 = 1000$.

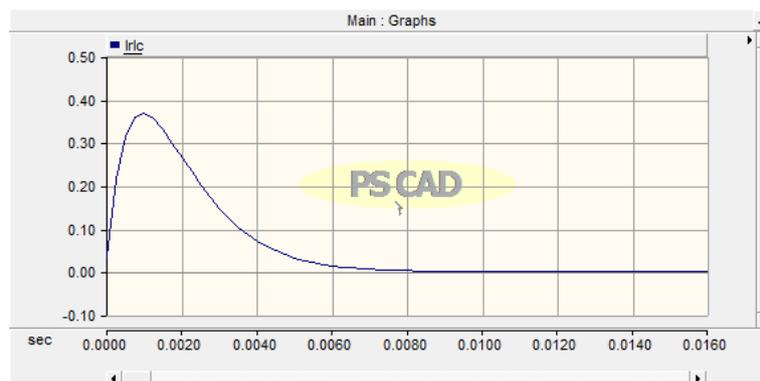


Figura 3.8: Corrente do circuito RLC criticamente amortecido.

- Circuito superamortecido: $\alpha > \omega_0$

O resultado mostrado na Figura 9 foi obtido com $R = 500 \text{ ohm}$, $L = 0,1 \text{ H}$ e $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$, resultando num $\alpha = 1000$ e $\omega_0 = 1000$.

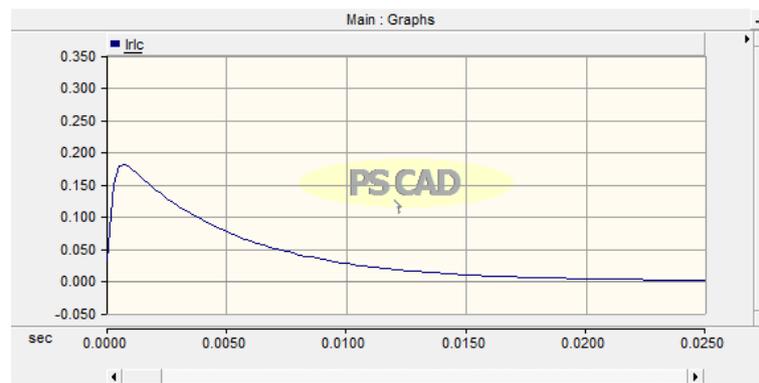


Figura 3.9: Corrente do circuito RLC superamortecido.

4 TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIO

Disjuntores são dispositivos de proteção projetados para conduzir, restabelecer e interromper correntes em um determinado ponto do circuito. Podem ser acionados manualmente ou automaticamente através de relés de proteção. Disjuntores geralmente são acionados para isolar parte de um circuito no caso de uma falha no sistema, devendo atuar o mais rápido possível antes que algum dano seja causado as pessoas ou as instalações elétricas protegidas.

Alguns fenômenos que ocorrem durante a operação do disjuntor merecem atenção especial. Um deles é a formação de um arco elétrico, que caracteriza-se pela passagem de corrente elétrica por um meio normalmente não-condutivo, como o ar, devido ao processo de ionização térmica. A alta temperatura gerada pela formação do arco elétrico (podendo atingir aproximadamente 25000 K) exige que este arco seja extinto rapidamente de modo a evitar danos aos equipamentos. Portanto, os disjuntores fazem uso de diversas técnicas de extinção de arco, utilizando óleo, vácuo, ar-comprimado, gases inertes, entre outros [5].

Uma tensão de alta frequência (na ordem de kHz) surge entre os contatos do disjuntor no instante da abertura, conhecida como tensão de restabelecimento transitória (TRT) que pode atingir valores de pico várias vezes superiores a tensão do sistema em que o disjuntor está operando [2].

A TRT traz consigo a tendência de reignição arco elétrico através da ruptura do dielétrico ou até mesmo por reignição térmica, portanto, o disjuntor deve ser capaz de resfriar e recuperar o meio no interior da sua câmara de extinção mais rápido que o crescimento da TRT, além disso a rigidez dielétrica na câmara de extinção deve ser capaz de suportar as solicitações impostas pelos valores de pico atingidos pela TRT.

Para o cálculo da TRT, os seguintes fatores devem ser convenientemente selecionados e combinados de forma a cobrir a diversa gama de possibilidades de operação de um sistema real:

- Tipo de falta;
- Local de aplicação da falta;
- Extensão da rede a ser representada;
- Cálculo e localização dos equivalentes da rede não representada;
- Modelagem dos elementos da rede;
- Tempo de observação do fenômeno.

Disjuntores devem ser projetados para suportar as solicitações impostas pela TRT. Desse modo, durante a etapa de especificação de disjuntores, estudos devem ser realizados com a finalidade de prever a intensidade das solicitações. O cálculo da TRT pode ser feito mediante formulações analíticas, no entanto esse método pode ser inviável dependendo da complexidade do circuito. A utilização de *softwares* voltados para a simulação de fenômenos transitórios se apresenta, então, como uma das melhores alternativas para o cálculo da TRT.

A simulação da tensão de restabelecimento transitória pode ser feita com o circuito mostrado na Figura 10.

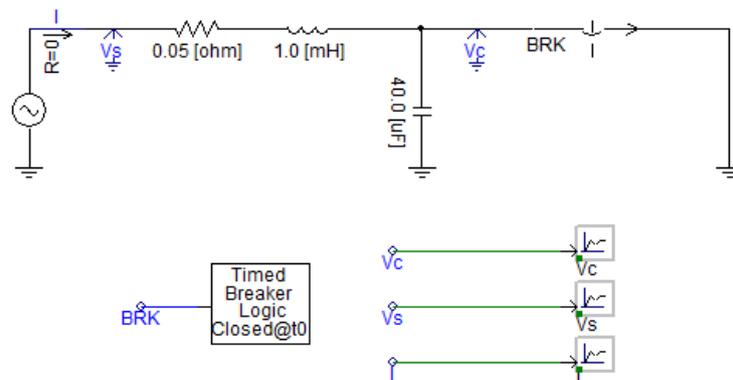


Figura 4.1: Circuito montado no PSCAD para simulação de TRT.

Foram utilizados um resistor de $0,05 \Omega$, um indutor de $1,0 \text{ mH}$, uma fonte de tensão de 100 V (RMS), um capacitor de $40,0 \mu\text{F}$ e um disjuntor. A descrição de como acessar os componentes utilizados está disponível no Apêndice B e a forma como se definiu os parâmetros dos componentes está descrita no Apêndice C.

As Figuras 11 e 12 mostram, respectivamente, os sinais de tensão sobre o disjuntor e corrente elétrica no capacitor obtidos com a simulação. A exibição dos gráficos foi feita de acordo com o procedimento descrito no Apêndice D.

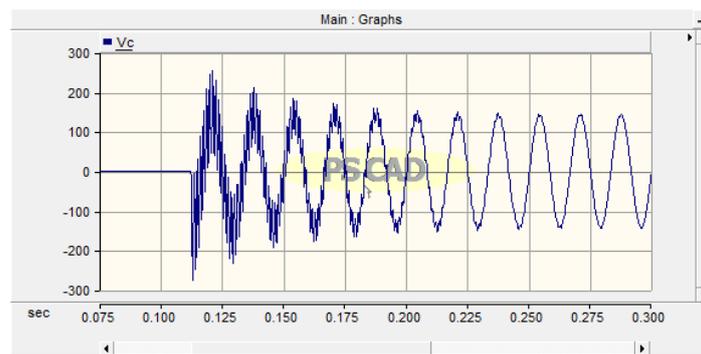


Figura 4.2: Tensão de restabelecimento transitória.

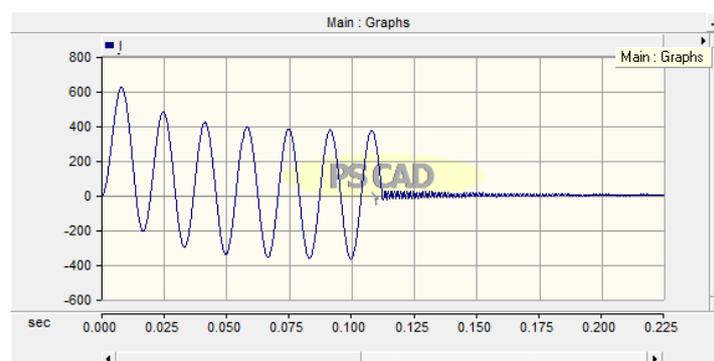


Figura 4.3: Corrente interrompida na simulação de TRT.

Nota-se que a tensão V_C atinge quase o dobro do valor da tensão da fonte. Um pequeno amortecimento acontece devido a presença da resistência.

Nas Figuras 13 e 14 são mostrados os mesmos gráficos anteriores, no entanto, foi dado um *zoom* para mostrar o exato momento do surgimento da TRT.

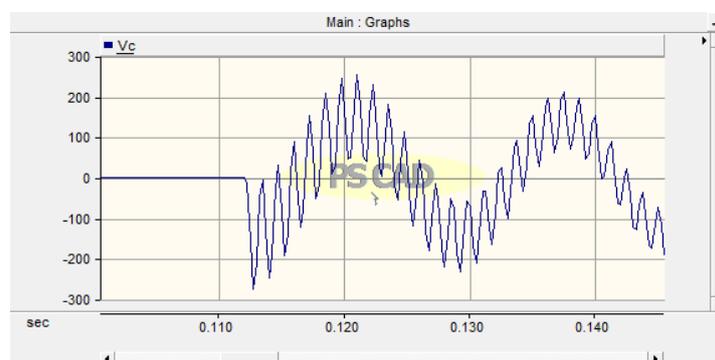


Figura 4.4: *Zoom* da tensão de restabelecimento transitório

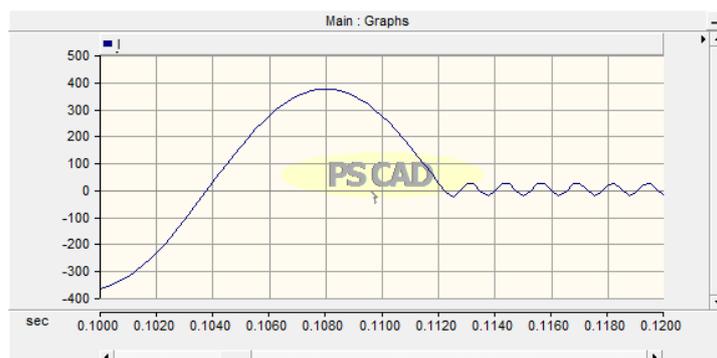


Figura 4.5: Zoom da corrente interrompida na simulação de TRT.

Nota-se que mesmo programando o disjuntor para abrir no tempo de 0,108 s, o surgimento da TRT só ocorre realmente no momento da passagem natural da corrente por zero, em aproximadamente 0,112 s.

Existem diversos fatores que podem influenciar na forma de onda e no valor máximo da TRT, entre eles temos: capacitâncias, indutâncias, resistências, tipo e local de falta. O pior caso a ser considerado é a ocorrência de uma falta trifásica. O grau de solitação que a TRT pode causar depende não apenas do seu valor de pico, mas também da sua taxa de crescimento (TCTRT). Falhas nos terminais do disjuntor geram as maiores amplitudes da TRT e falhas distantes do disjuntor (quilométricas) causam maiores TCTRT.

Uma das técnicas utilizadas para ajudar a minimizar os efeitos da TRT é a utilização de um resistor de pré-inserção, que como o próprio nome já diz, é uma pequena resistência inserida momentaneamente entre os contatos do disjuntor antes que estes se fechem. As Figuras 15 e 16 mostram os sinais de tensão sobre o disjuntor e corrente no capacitor, respectivamente, utilizando um resistor de pré inserção de $0,5 \Omega$ que foi inserido no circuito durante 0,05 s. As alterações dos parâmetros do disjuntor foram feitas de acordo com o Apêndice C.

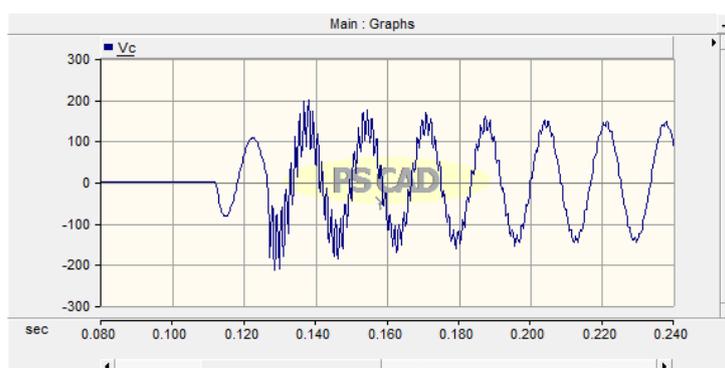


Figura 4.6: TRT com a utilização de resistores de pré-inserção.

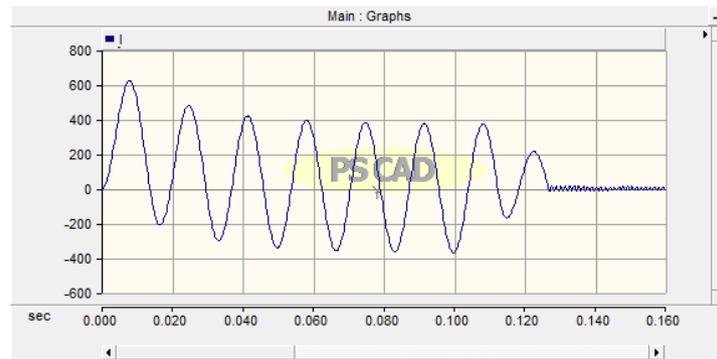


Figura 4.7: Corrente interrompida na simulação de TRT com a utilização de resistores de pré-inserção.

Vale lembrar que, para as simulações anteriores, a contribuição para a TRT ocorreu de apenas um lado para o disjuntor, pois o outro estava em curto circuito. Em casos onde o disjuntor encontra-se entre dois circuitos que contêm indutâncias e capacitâncias, a TRT pode atingir valores de pico ainda maiores, pois ambos os lados contribuem para a TRT.

O circuito mostrado na Figura 17 foi montado no PSCAD para simular um caso específico, onde a contribuição para a TRT vem de ambos os lados do disjuntor. Foi utilizada uma fonte de tensão de 100 V (RMS) e os valores das resistências e indutâncias, que representam as impedâncias equivalentes em série das linhas, bem como das capacitâncias equivalentes, também estão mostrados na Figura 17.

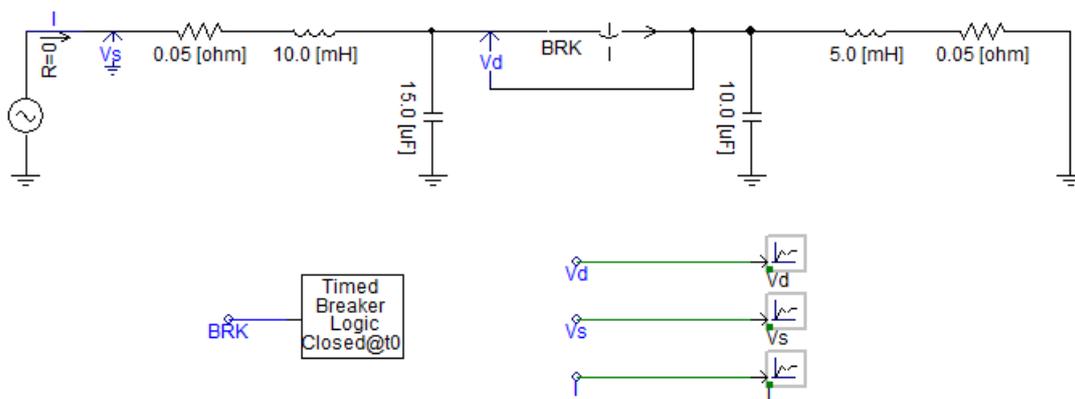


Figura 4.8: Circuito montado no PSCAD para simulação de TRT com frequências múltiplas.

Na Figura 18 é mostrado o resultado obtido efetuando o chaveamento do disjuntor no instante em que a tensão da fonte é máxima.

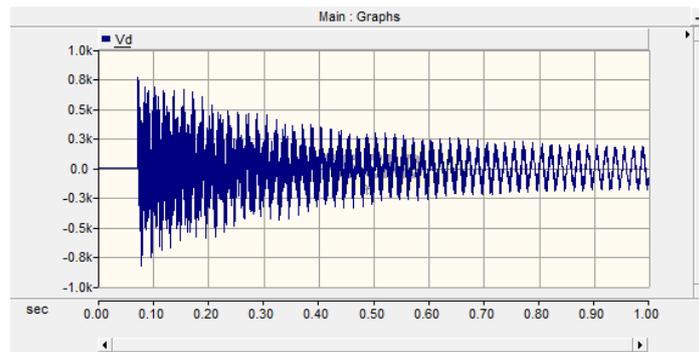


Figura 4.9: TRT com frequências múltiplas.

Observa-se que nos primeiros ciclos após o chaveamento, a TRT atingiu valores de aproximadamente 4,3 vezes maior que a tensão sobre o disjuntor em regime permanente. Na Figura 19 é mostrado um *zoom* em uma área específica do gráfico mostrado na Figura 18. Fica evidente que a TRT com contribuições de ambos os lados do disjuntor pode possuir frequências múltiplas.

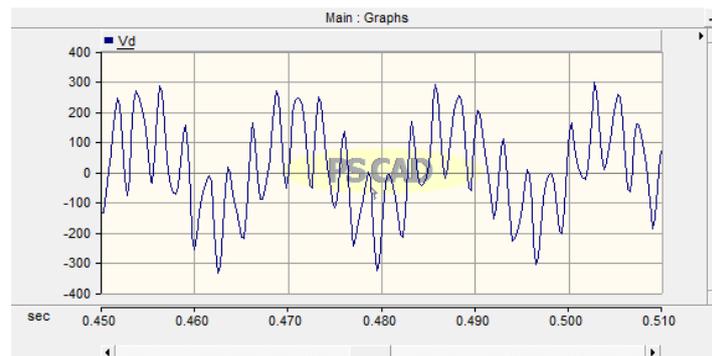


Figura 4.10: *Zoom* da TRT com frequências múltiplas.

5 FERRORESSONÂNCIA

A ferroressonância é um fenômeno de caráter não linear que ocorre em circuitos com indutâncias saturáveis e capacitâncias, e se caracteriza por apresentar variações rápidas e descontínuas nas amplitudes de corrente e tensão, com formas de ondas distorcidas e altos valores de pico. Para descrever como este fenômeno ocorre, considera-se o circuito mostrado na Figura 20.

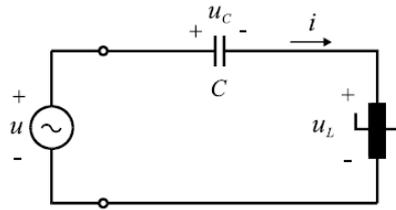


Figura 5.1: Circuito equivalente para análise de ferroressonância [2].

Fasorialmente tem-se que:

$$U = U_L + U_C \quad (12)$$

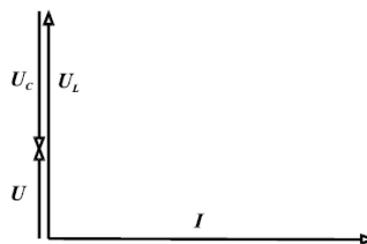


Figura 5.2: Diagrama fasorial do circuito equivalente para análise de ferroressonância [2].

Para os módulos das tensões:

$$U_L = U + U_C = U + \frac{1}{\omega C} I \quad (13)$$

Portanto a condição de funcionamento irá depender do ponto de operação determinado pela intercessão da reta $f(I)$ com a curva U_L , como mostra a Figura 22.

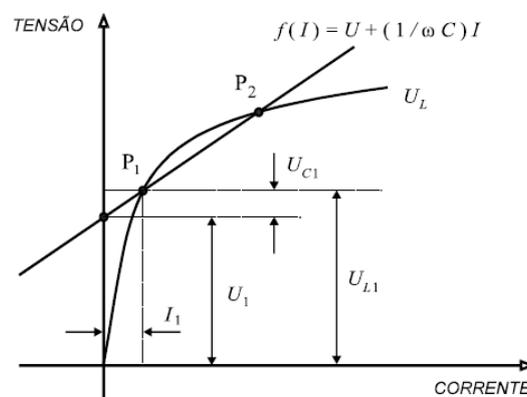


Figura 5.3: Localização do ponto de operação do circuito [2].

Em condições estáveis de funcionamento o circuito irá trabalhar no ponto de operação P_1 e será predominantemente indutivo, no entanto é possível que com o aumento da tensão U as duas curvas não se interceptem no 1º quadrante e passem a se interceptar somente no 3º quadrante como mostra a Figura 23. O que também pode ocorrer com a redução da frequência ω , como mostra a Figura 24.

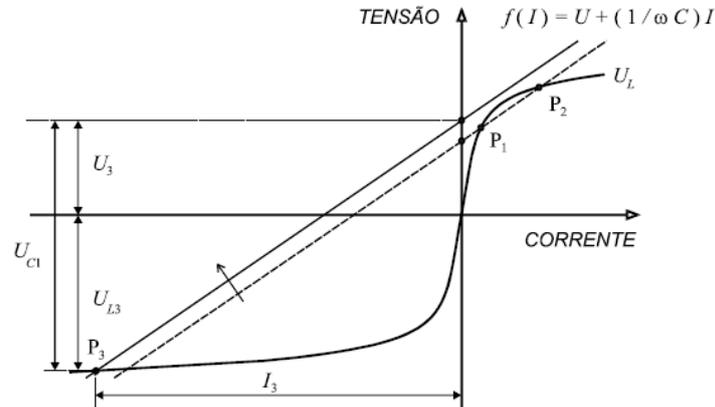


Figura 5.4: Ferroressonância gerada pelo aumento da tensão da fonte [2].

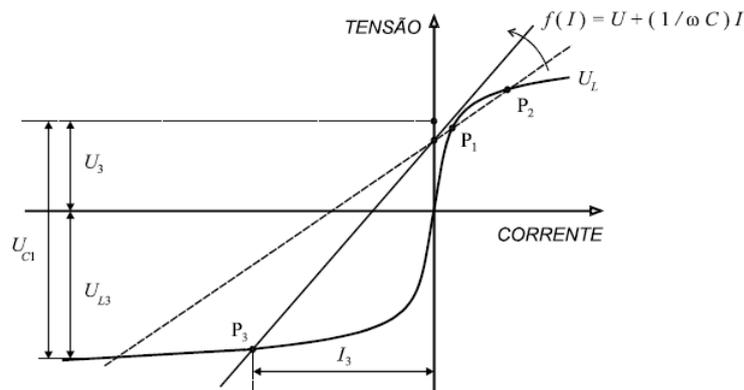


Figura 5.5: Ferroressonância gerada pela diminuição da frequência da fonte [2].

Em ambas as situações o ponto de operação muda bruscamente de P_1 para P_3 gerando as seguintes consequências:

- Passa a predominar o efeito capacitivo;
- Além da mudança de fase da corrente, a amplitude aumenta de I_1 para I_3 ;
- As tensões U_L e U_C se elevam, com risco de danos aos equipamentos;
- O aumento da tensão U_L provoca aumento do fluxo no núcleo magnético, o que faz crescer as perdas dinâmicas, causando sobreaquecimento;
- As formas de onda passam a conter harmônicas e sub-harmônicas.

Para simular um caso de ferroressonância utiliza-se uma fonte de tensão senoidal, um resistor de $0,5 \Omega$, um capacitor de $0,2 \text{ mF}$ e um transformador saturável com o secundário em aberto. A Figura 25 mostra o circuito montado no PSCAD. A descrição de como acessar os componentes utilizados está disponível no Apêndice B e a forma como se definiu os parâmetros dos componentes está descrita no Apêndice C.

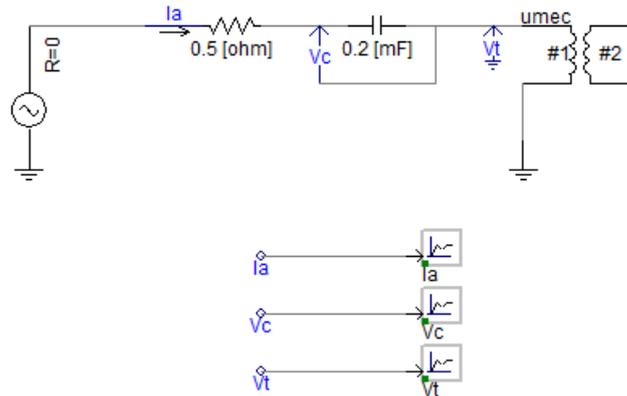


Figura 5.6: Circuito montado no PSCAD para simulação de ferroressonância.

Para efeito de comparação foram obtidas primeiramente as formas de onda da corrente, da tensão no transformador e da tensão no capacitor em condições de funcionamento estável, mostrados respectivamente nas Figuras 26, 27 e 28.

Para obter os gráficos a seguir foi seguido o procedimento descrito no Apêndice D.

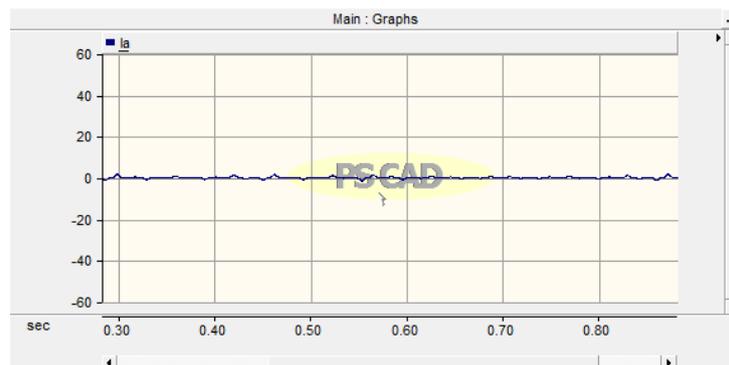


Figura 5.7: Corrente em condições estáveis de funcionamento.

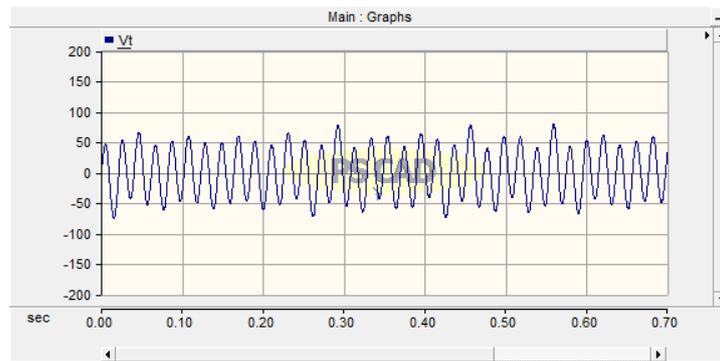


Figura 5.8: Tensão sobre o transformador em condições estáveis de funcionamento.

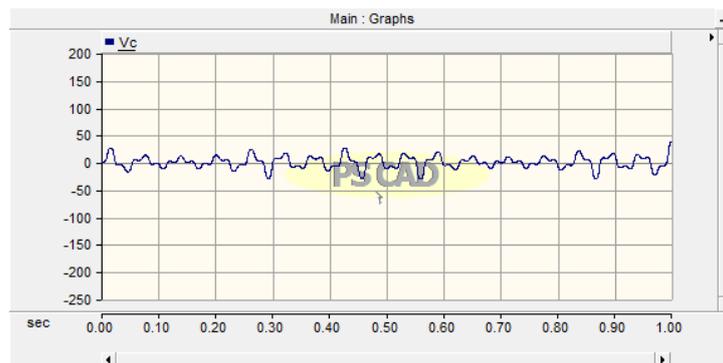


Figura 5.9: Tensão sobre o capacitor em condições estáveis de funcionamento.

As formas de onda mostradas anteriormente foram obtidas com a fonte de tensão senoidal programada para aplicar um sinal de 34,1 V (RMS) a uma frequência de 48,8 Hz. As Figuras 29, 30 e 31 ilustram, respectivamente, a corrente, tensão no transformador e tensão no capacitor com a fonte senoidal aplicando uma tensão de 34,2 V (RMS) a 48,8 Hz.

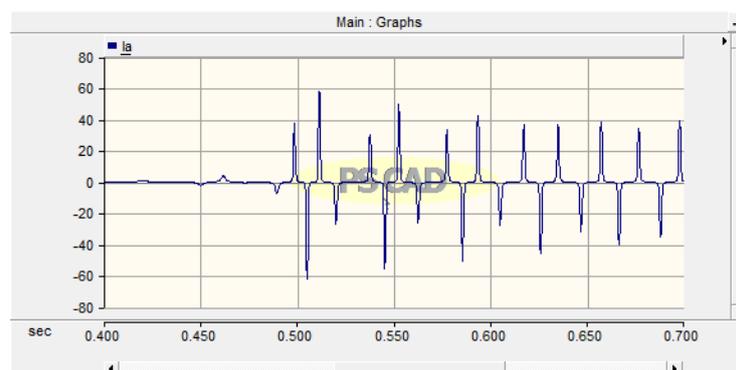


Figura 5.10: Corrente em condição de ferroressonância gerada pelo aumento da tensão da fonte.

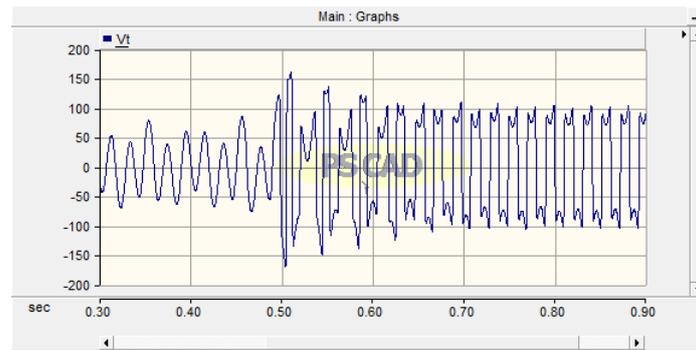


Figura 5.11: Tensão sobre o transformador em condição de ferroressonância gerada pelo aumento da tensão da fonte.

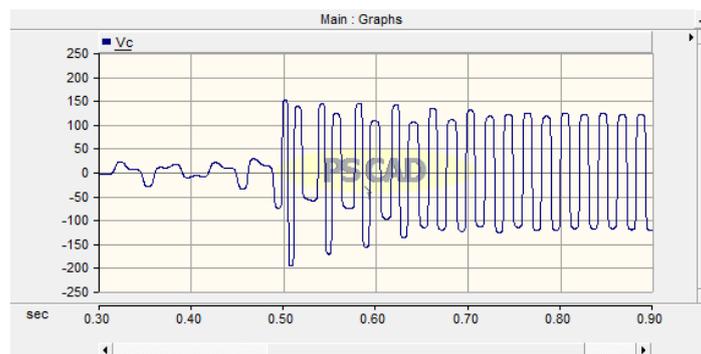


Figura 5.12: Tensão sobre o capacitor em condição de ferroressonância gerada pelo aumento da tensão da fonte.

Para avaliar também o efeito da redução da frequência, as Figuras 32, 33 e 34 ilustram, respectivamente, as formas de onda obtidas da corrente, tensão no transformador e tensão no capacitor para a fonte de tensão senoidal aplicando um sinal de 34,1 V(RMS) a uma frequência de 48,7 Hz.

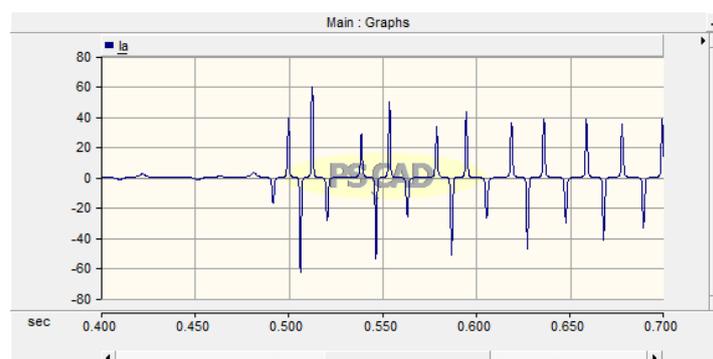


Figura 5.13: Corrente em condição de ferroressonância gerada pela diminuição da frequência da fonte.

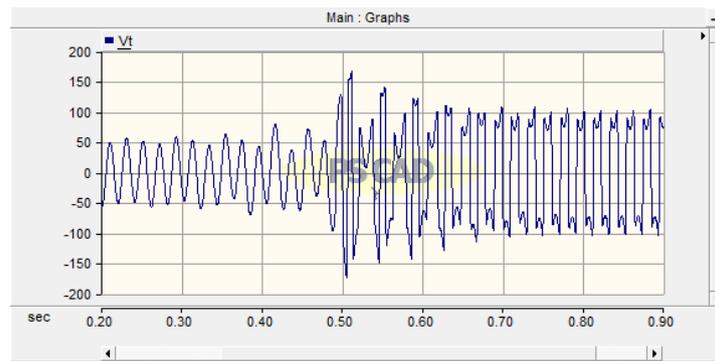


Figura 5.14: Tensão sobre o transformador em condição de ferroressonância gerada pela diminuição da frequência da fonte.

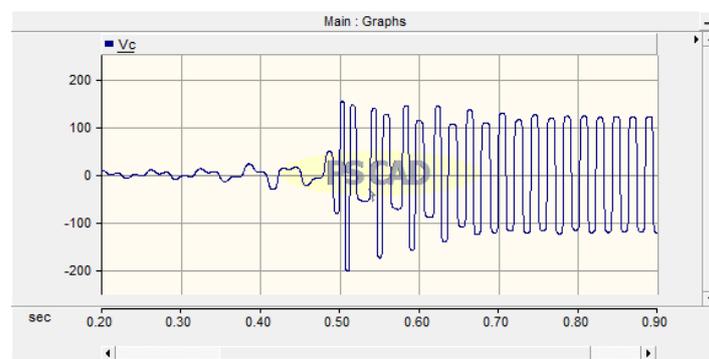


Figura 5.15: Tensão sobre o capacitor em condição de ferroressonância gerada pela diminuição da frequência da fonte.

Através desses resultados, é possível observar claramente o fenômeno de ferroressonância descrito na fundamentação teórica desta subseção. Fica claro também o quão rapidamente o circuito é capaz de mudar as suas condições de funcionamento, já que a mudança do ponto de operação ocorreu para uma variação de amplitude da tensão de apenas 0,1 V e também para uma variação da frequência de apenas 0,1 Hz.

Os picos de corrente causados pela mudança repentina do ponto de operação do circuito são altamente prejudiciais para os equipamentos. Nas simulações realizadas observa-se que, em condições de funcionamento estáveis, o valor máximo da corrente é de 1,7 A, enquanto que, durante a ferroressonância, a corrente passa a assumir valores de até 58 A.

6 REGIME TRANSITÓRIO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE

Os transformadores de corrente (TCs) são equipamentos utilizados para fins de medição, proteção ou controle em sistemas elétricos. Reproduzem a corrente do sistema de potência em um nível mais baixo que seja compatível com os instrumentos, de modo a manter uma relação fixa entre os valores instantâneos correspondentes das correntes nos enrolamentos primário e secundário, com diferenças mínimas de defasamento entre as mesmas. Além disso, os TCs proporcionam isolamento elétrico entre o sistema de potência e os instrumentos.

Os TCs são constituídos basicamente de um núcleo de material ferromagnético, geralmente produzidos em forma de toróide e constituídos de liga de ferro-silício, enrolamento primário de N_1 espiras ligado em série ao sistema de potência e enrolamento secundário de N_2 espiras alimentando o instrumento. Como normalmente o TC destina-se a reduzir a corrente, então $N_1 \leq N_2$.

Como qualquer outro equipamento que possui núcleo de material magnético, os TCs também podem se deparar com fenômenos de saturação. Para melhor descrever este fenômeno, utiliza-se o circuito equivalente simplificado de um TC mostrado na Figura 35, onde R_2 e L_2 são, respectivamente, a resistência e a reatância de dispersão do enrolamento secundário, e L_m representa a indutância de magnetização do núcleo.

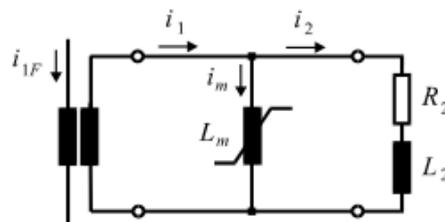


Figura 6.1: Circuito equivalente para análise de transitórios em TCs [2].

Os erros de relação e de fase de um TC estão diretamente relacionados com a corrente de excitação I_m . Como o enrolamento primário do TC é ligado em série ao sistema de potência, a corrente secundária I_{2total} depende apenas da corrente primária. E como $I_{2total} = I_2 + I_m$, o aumento da impedância de carga fará com que a componente I_m seja cada vez mais significativa na soma fasorial, elevando os erros de relação e de fase.

A Figura 36 ilustra o que acontece com a corrente de excitação, o fluxo e a tensão de excitação secundária à medida que a impedância de carga aumenta.

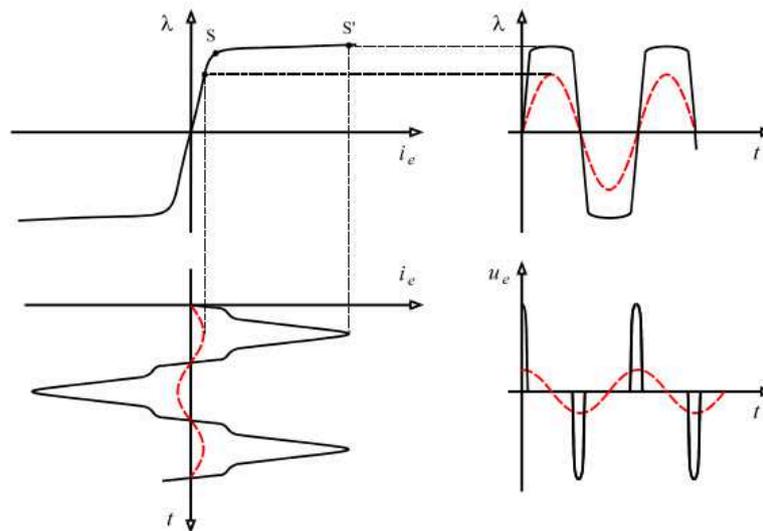


Figura 6.2: Representação da saturação do núcleo magnético [2].

As curvas tracejadas em vermelho indicam o comportamento dos diversos parâmetros com o circuito operando na região não saturada (até o ponto de joelho S). À medida que a carga do secundário aumenta, o núcleo passa a operar na região de saturação e as formas de onda que antes podiam ser consideradas como senóides puras, agora passam a ser distorcidas. A corrente de excitação passa a apresentar grandes picos de corrente, a forma de onda do fluxo começa a se aproximar de uma onda quadrada e a tensão de excitação secundária ($u_e = d\lambda/dt$) passa a apresentar picos de tensão alternados. A saturação de TCs traz consigo as seguintes consequências:

- Erros muito elevados;
- Aquecimento excessivo do núcleo, causado por perdas por efeito de histerese e correntes parasitas;
- Risco de destruição do isolamento devido às severas solicitações elétricas produzidas pelo surgimento dos impulsos de tensão.

Para analisar o comportamento de TCs em regimes transitórios deve-se primeiro conhecer o comportamento das correntes de falta que ocorrem nos sistemas de potência (Figura 37), que são as mesmas correntes que circulam nos enrolamentos primários dos TCs.

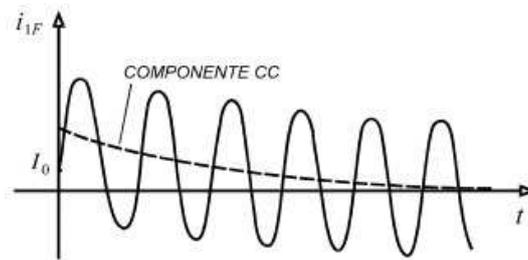


Figura 6.3: Comportamento típico de correntes de curto-circuito [2].

Observa-se que as correntes de falta apresentam uma componente alternada, senoidal, e uma componente contínua com decaimento exponencial. O grau de assimetria a corrente de curto-circuito está relacionada com o ângulo de incidência do defeito θ . Para $\theta = 90^\circ$ a assimetria é mínima, e para $\theta = 0^\circ$ a assimetria é máxima.

Podem ocorrer dois modos diferentes de saturação em TCs: saturação CA e saturação CC. A análise e descrição destes fenômenos são mostradas nas simulações descritas a seguir.

As simulações com o PSCAD dos fenômenos transitórios em TCs foram realizadas com o circuito mostrado na Figura 38. Nele são representadas as resistências e indutâncias equivalente série do sistema de potência e um componente de aplicação de faltas para estudar o comportamento do TC nessa situação. Utiliza-se também um canal de saída para plotar os gráficos da corrente real circulando no primário do TC e da corrente reproduzida no enrolamento secundário.

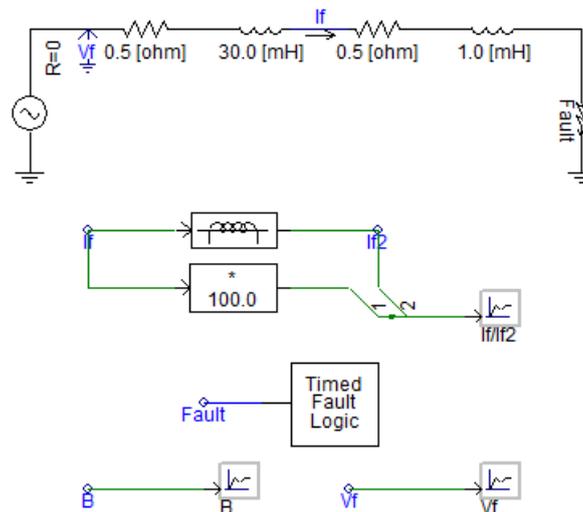


Figura 6.4: Circuito montado no PSCAD para simulação de transientes em TCs.

Como já foi mencionado anteriormente, o processo de saturação CC depende do ângulo de incidência da falha θ . A simulação mostrada na Figura 39 foi realizada com $\theta = 0^\circ$, com uma

resistência relativamente pequena ligada ao secundário do TC de $R_2 = 20 \Omega$ e uma indutância $L_2 = 0,2 \text{ mH}$.

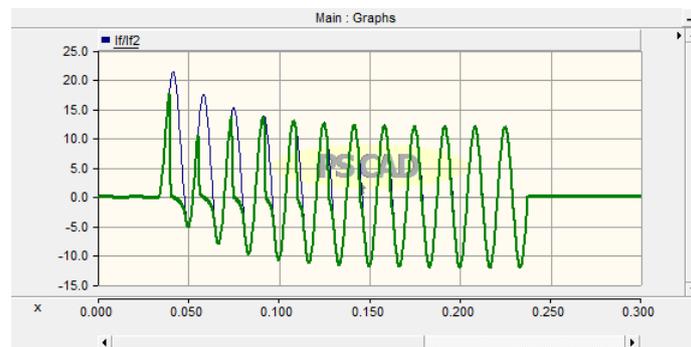


Figura 6.5: Corrente de um TC com saturação CC com baixa indutância no secundário.

O sinal em azul representa a corrente circulando no enrolamento primário e o sinal na cor verde destacado representa a corrente reproduzida no secundário do TC. É possível observar que o TC encontra-se dimensionado de modo adequado apenas para a componente alternada da corrente, pois à medida que o tempo aumenta, o sinal é atenuado e em poucos ciclos assume a forma de uma onda senoidal pura.

Outra análise interessante que pode ser feita é a da influência da indutância ligada ao secundário do TC na forma de onda da corrente que é reproduzida. Utilizando os mesmos parâmetros do circuito da simulação anterior e mudando apenas o valor da indutância L_2 para 40 mH foi possível obter o resultado mostrado na Figura 40.

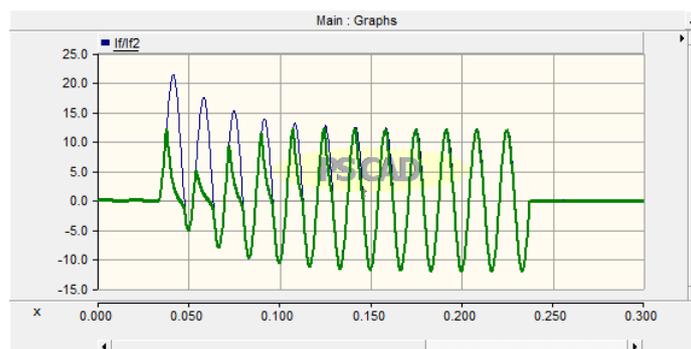


Figura 6.6: Corrente de um TC com saturação CC com alta indutância no secundário.

Observa-se que, diferentemente da simulação anterior, a corrente do secundário não cai repentinamente para zero nos períodos em que o núcleo passa a operar na região saturada. Isso ocorre porque o valor relativamente alto da indutância faz com que haja oposição a variações bruscas de corrente.

A Figura 41 ilustra uma simulação realizada com o objetivo de mostrar um processo de saturação puramente CA. Para isso, o ângulo de ocorrência da falta foi ajustado para $\theta = 90^\circ$, o que exclui a assimetria da corrente de curto-circuito, a resistência $R_2 = 50 \Omega$ e a indutância $L_2 = 0,2 \text{ mH}$.

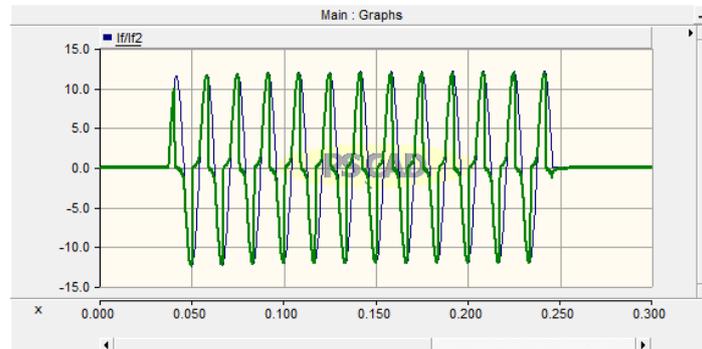


Figura 6.7: Corrente de um TC com saturação CA com carga de 50 ohms.

Tal efeito ocorre porque, com a presença de uma carga de alta impedância ligada ao secundário, praticamente toda a corrente passa pela indutância de magnetização do núcleo, levando-o a entrar na região de saturação.

Quanto maior a impedância da carga, mais pronunciado se torna este efeito, como pode ser visto no resultado obtido com $R_2 = 90 \Omega$ na Figura 42.

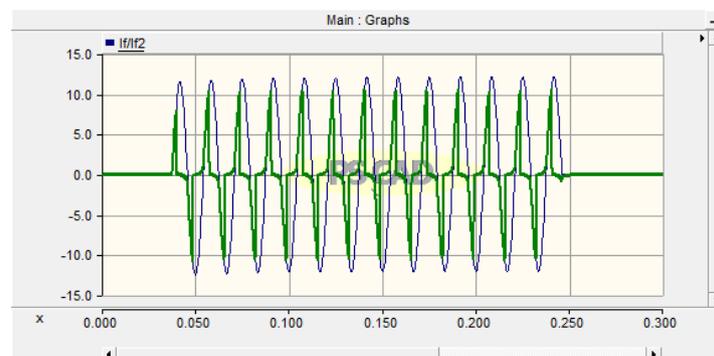


Figura 6.8: Corrente de um TC com Saturação CA com carga de 90 ohms.

Definindo o ângulo de incidência da falta para $\theta = 90^\circ$ e utilizando uma carga de alta impedância, com $R_2 = 70 \Omega$ e $L_2 = 0,2 \text{ mH}$, é possível observar a ocorrência de um modo simultâneo dos fenômenos de saturação CC e CA (Figura 43).

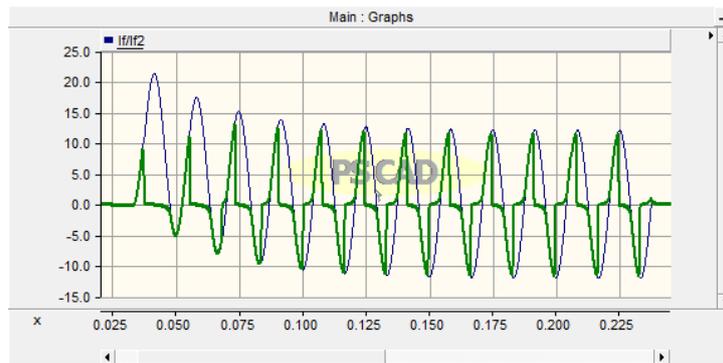


Figura 6.9: Corrente de um TC com saturação CC e CA.

Um dos fenômenos mais preocupantes que ocorrem em TCs é a presença do fluxo remanescente no núcleo. Ao se desenergizar um TC, um fluxo remanescente permanece no núcleo e quando o equipamento for reenergizado ele entrará muito mais rapidamente na região de saturação.

A densidade de fluxo remanescente B_{rem} depende principalmente do material do núcleo. Para núcleos de grãos orientados os valores máximos típicos de densidade de fluxo remanescente são de aproximadamente $B_{rem} = 0,9B_{max}$, sendo B_{max} a densidade de fluxo máxima no núcleo. Já para núcleos de grãos não orientados esse valor é de aproximadamente $B_{rem} = 0,7B_{max}$.

Para melhor observar este fenômeno deve-se primeiro visualizar o comportamento do fluxo em função do tempo (Figura 44) para efeito de comparação. Esse resultado foi obtido com os mesmos parâmetros definidos para a simulação anterior, ou seja, com fluxo remanescente igual a zero.

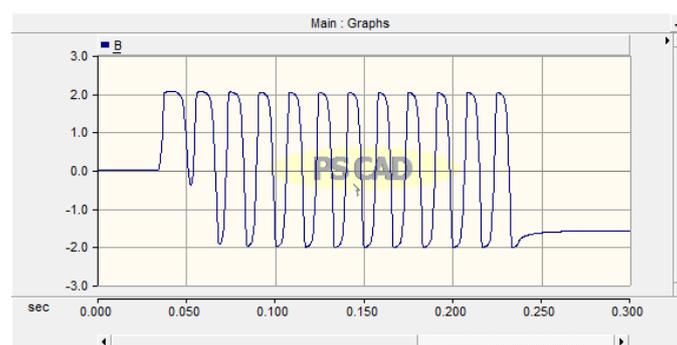


Figura 6.10: Fluxo magnético em um TC sem fluxo remanescente.

Através desse gráfico é possível visualizar que a densidade de fluxo máxima do núcleo simulado é de pouco mais que 2 Tesla. Para observar as consequências da presença de fluxo remanescente no núcleo, os parâmetros do TC foram redefinidos com uma densidade de fluxo

remanescente de 1,8 Tesla (aproximadamente 90% do valor máximo). As Figuras 45 e 46 ilustram, respectivamente, a densidade de fluxo no núcleo e a corrente no secundário do TC.

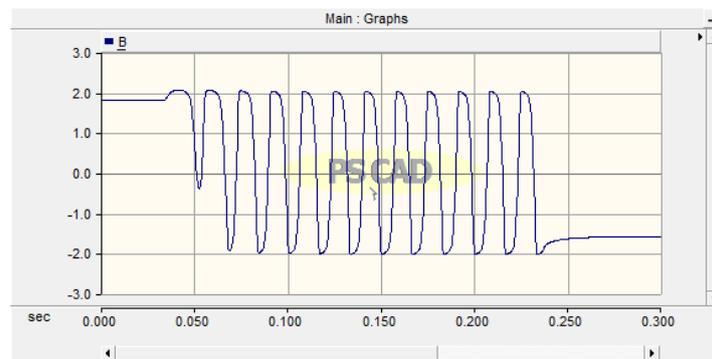


Figura 6.11: Fluxo magnético em um TC com fluxo remanescente.

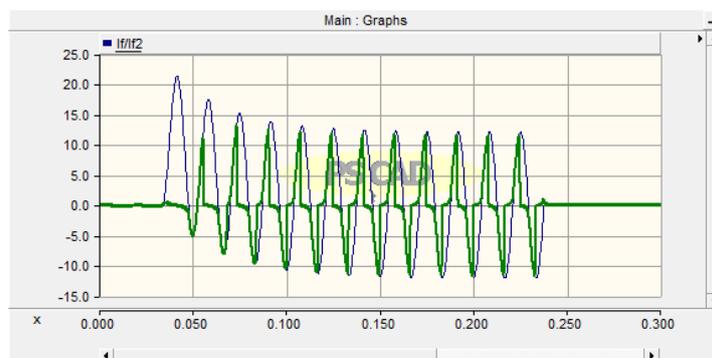


Figura 6.12: Corrente de um TC saturado com fluxo remanescente.

Fica claro que o TC passa a operar na região de saturação bem mais rápido que na simulação anterior. Observa-se também que, no primeiro semiciclo, a corrente do secundário não ultrapassa o valor de 1 A, o que significa que praticamente toda a corrente está passando pelo ramo de magnetização do núcleo. Isso pode gerar problemas graves como sobreaquecimento do núcleo ou destruição do isolamento.

7 ENERGIZAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES

Os bancos de capacitores são utilizados para fins de compensação de reativos de linhas e para manter a qualidade da energia em níveis aceitáveis, mediante a regulação do fator de potência. Durante a sua energização, ocorrem surtos de corrente de alta frequência (na ordem de kHz) que podem atingir valor de aproximadamente 15 vezes a corrente nominal do banco (pico).

As correntes de energização, também chamadas de *inrush*, são altamente prejudiciais para os equipamentos do sistema elétrico e trazem as seguintes consequências:

- Elevadas perdas ôhmicas nos condutores, com risco de danos nas linhas e equipamentos;
- Elevados esforços eletromecânicos;
- Possibilidade de formação de arcos elétricos de alto poder destrutivo.

7.1 ENERGIZAÇÃO DE BANCOS ISOLADOS

Para analisar este fenômeno considera-se o circuito equivalente mostrado na Figura 47, considerando que:

- As perdas no circuito são desprezadas;
- O banco está inicialmente carregado com uma tensão U_0 ;
- O banco é energizado no instante em que a tensão da fonte é máxima;
- Como a frequência do surto é muito maior que a frequência da fonte (60 Hz), supõe-se que no intervalo considerado $u \cong U_m$.

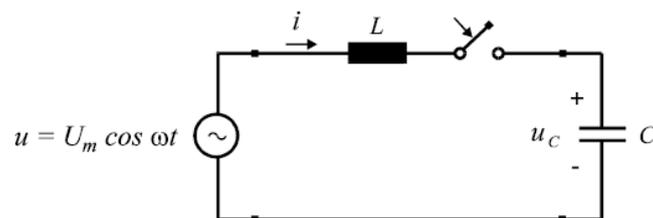


Figura 7.1: Circuito equivalente para análise de energização de bancos de capacitores isolados [2].

Para este circuito temos que:

$$L \frac{di(t)}{dt} + u_c(t) \cong U_m \quad (14)$$

A tensão no capacitor é dada por:

$$u_c(t) = U_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \quad (15)$$

Portanto, a equação diferencial que descreve o comportamento do circuito é dada por:

$$L \frac{di(t)}{dt} + U_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \cong U_m \quad (16)$$

Considerando como condição inicial $i(0) \cong 0$, a seguinte solução analítica é obtida:

$$i(t) = \frac{U_m - U_0}{Z_0} \text{sen} \omega_0 t \quad (17)$$

Onde ω_0 é a frequência natural de oscilação do circuito dada por $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ e Z_0 é a impedância característica do circuito dada por $Z_0 = \sqrt{L/C}$.

A duração desse fenômeno transitório depende das resistências inerentes ao circuito, que introduzem um amortecimento na corrente.

As simulações de correntes de energização de bancos de capacitores podem ser realizadas com o circuito mostrado na Figura 48, que foi montado no PSCAD.

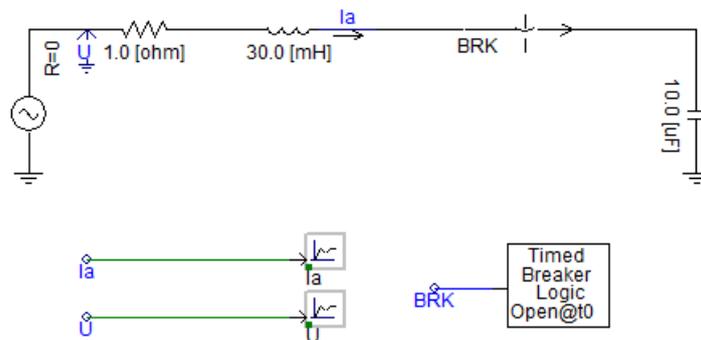


Figura 7.2: Circuito montado no PSCAD para simulação de energização de bancos de capacitores isolados.

Foi utilizada uma fonte de tensão alternada de 200 kV (RMS) e frequência 60 Hz. A impedância série equivalente da linha foi representada por um resistor 1 Ω e uma indutância de 30 mH, e o banco de capacitores foi representado por um capacitor de 10 μ F.

Para analisar a influência do instante de chaveamento na corrente de energização, primeiro foi feita uma simulação com chaveamento realizado no instante em que a tensão da fonte é mínima. O resultado obtido é mostrado na Figura 49.

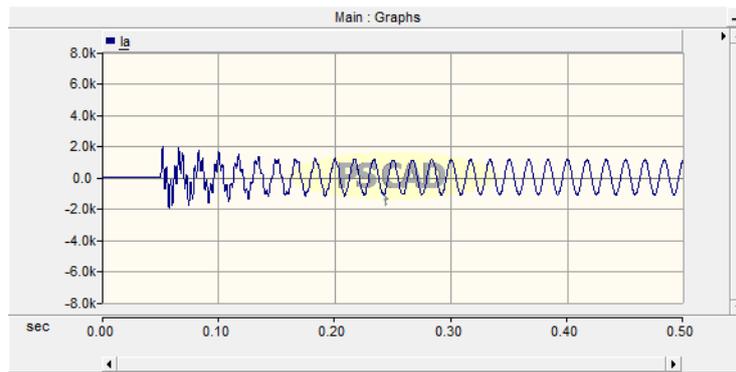


Figura 7.3: Corrente *inrush* para um banco de capacitores energizado no instante em que a tensão da fonte é mínima.

Observa-se que a intensidade da corrente de energização foi bastante pequena, atingindo valores pouco superiores da corrente nominal do banco de capacitores. Realizando esta mesma simulação mudando apenas o tempo de chaveamento para o instante em que a tensão da fonte é máxima obteve-se o resultado mostrado na Figura 50.

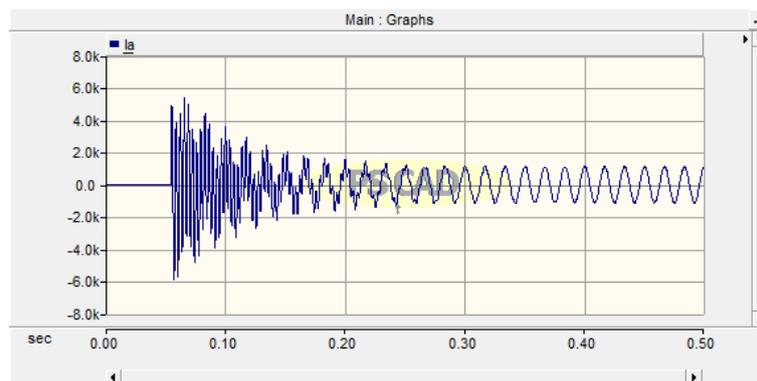


Figura 7.4: Corrente *inrush* para um banco de capacitores energizado no instante em que a tensão da fonte é máxima.

Neste caso a corrente de energização assumiu valores de aproximadamente 5 vezes a corrente nominal do banco de capacitores, com uma corrente de quase 6 kA que pode causar danos aos equipamentos. Reduzindo a resistência equivalente série do sistema pela metade ($R = 0,5 \Omega$) a duração da corrente de energização aumenta consideravelmente, como pode ser visto na Figura 51.

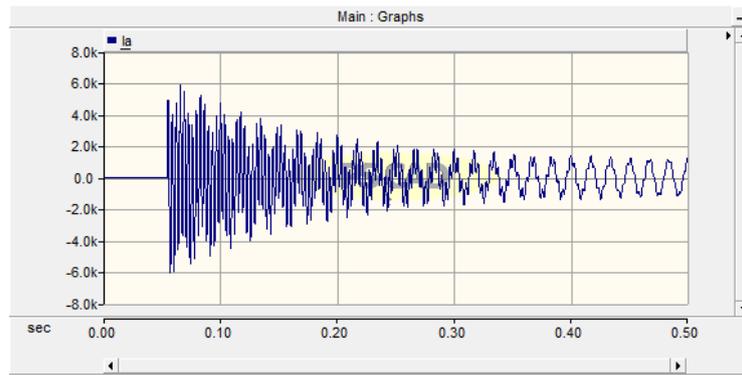


Figura 7.5: Corrente *inrush* Com a resistência equivalente do sistema reduzida.

7.2 ENERGIZAÇÃO DE UM BANCOS EM PARALELO

É comum em subestações a utilização de vários bancos de capacitores ligados em paralelo. Durante a operação desses bancos, é possível que um banco seja energizado enquanto outro já está energizado. Essa operação é conhecida como chaveamento *back to back*.

Neste caso as correntes de *inrush* podem ser ainda maiores, pois são limitadas apenas pela indutância equivalente entre os bancos L_2 , que é muito menor que a indutância equivalente da rede L_1 . Neste caso, como a contribuição do sistema é desprezível, o circuito equivalente simplificado mostrado na Figura 52 pode ser considerado para efeito de análise.

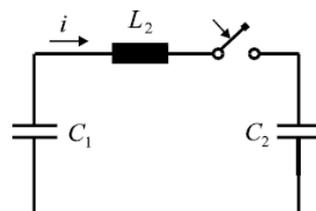


Figura 7.6: Circuito equivalente para análise de energização de bancos de capacitores em paralelo [2].

Considerando que $u_{C1}(0) = U_m$ e $u_{C2}(0) = 0$, temos:

$$L \frac{di(t)}{dt} + u_{C1}(t) + u_{C2}(t) = 0 \quad (18)$$

As tensões nos capacitores C_1 e C_2 são dadas por:

$$u_{C1}(t) = U_m + \frac{1}{C_1} \int_0^t i(t) dt \quad (19)$$

$$u_{C2}(t) = \frac{1}{C_2} \int_0^t i(t) dt \quad (20)$$

Resolvendo analiticamente estas equações obtém-se:

$$i(t) = \frac{-U_m}{\sqrt{L_2/C}} \text{sen}\omega_0 t \quad (21)$$

Onde $\omega_0 = 1/\sqrt{L_2 C}$ e $C = (C_1 C_2)/(C_1 + C_2)$

A simulação de chaveamentos *back to back* pode ser feita com o circuito mostrado na Figura 53, o qual foi implementado no PSCAD.

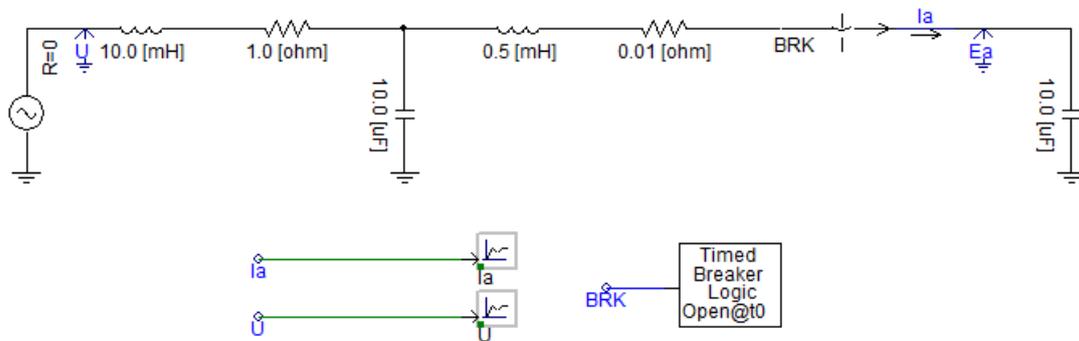


Figura 7.7: Circuito montado no PSCAD para simulação de energização de bancos de capacitores paralelos.

Foram utilizados valores de resistência e indutância equivalente série entre os bancos bem menores que os usados para representar a rede ($R = 0,01 \Omega$ e $L = 0,5 \text{ mH}$). O resultado obtido nesta simulação pode ser visto na Figura 54.

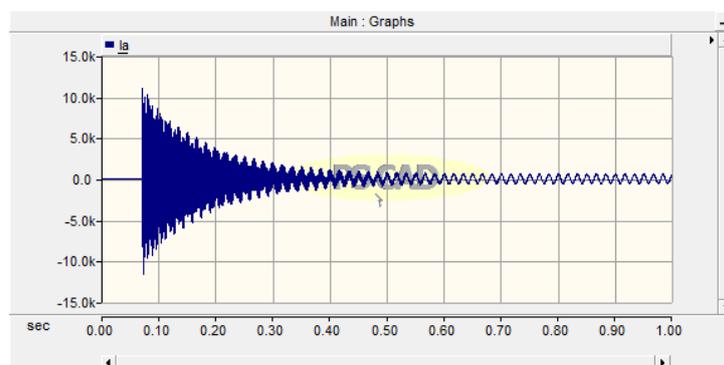


Figura 7.8: Corrente *inrush* em um chaveamento back to back.

Observa-se que a corrente de *inrush* alcançou valores de até aproximadamente 11 kA, enquanto que a corrente nominal do banco é de apenas 600 A, ou seja, a corrente de energização foi um pouco mais de 18 vezes maior que a corrente nominal do banco.

Para evitar que correntes de *inrush* danifiquem os equipamentos, algumas formas de mitigação são empregadas.

- Utilização de indutores de amortecimento em série com os bancos;
- Utilização de resistores de pré-inserção;
- Técnicas de chaveamento controlado.

8 ENERGIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES A VAZIO

As correntes de excitação de transformadores de potência, em regime permanente, são de aproximadamente 0,5% a 2% da corrente nominal. No entanto, durante o processo de energização, ocorre o surgimento de surtos de corrente (*inrush*), que apresentam altos valores de pico, duração de vários ciclos e amplo espectro de harmônicos. Correntes de *inrush* podem causar os seguintes efeitos:

- Atuação indevida de fusíveis e relés;
- Afundamentos temporários de tensão (*sags*);
- Redução da vida útil dos equipamentos devido à solicitações de natureza eletromecânica ou térmica;
- Ocorrência de fenômenos de ressonância harmônica em sistemas que contêm filtros elétricos.

Sendo assim, quanto maior for o tempo de duração das correntes de energização, maior será o risco de ocorrência de efeitos negativos para o sistema elétrico. A lista a seguir mostra alguns fatores que influenciam na duração e intensidade das correntes de *inrush*:

- Valor instantâneo da tensão aplicada no instante da energização;
- Magnitude e sinal do fluxo residual no núcleo magnético;
- Resistência e indutância equivalentes em série do circuito alimentador;
- Indutância de dispersão do enrolamento primário do transformador;
- Características magnéticas e geometria do núcleo do transformador;

- Valor da resistência de pré-inserção do disjuntor;
- Impedância da carga ligada ao secundário;
- Velocidade de fechamento dos contatos do disjuntor.

Para analisar o fenômeno transitório de energização de transformadores a vazio, utiliza-se o circuito equivalente simplificado mostrado na Figura 55, onde estão representados um transformador monofásico com o secundário em aberto, e a resistência equivalente em série da linha.

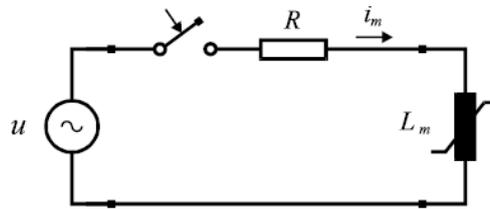


Figura 8.1: Circuito equivalente para análise de energização de transformadores a vazio [2].

Para este circuito, tem-se a seguinte equação:

$$\frac{d\lambda}{dt} + Ri_m = U_m \text{sen}\omega t \quad (22)$$

Supondo que a corrente i_m comporta-se como uma função linear até o ponto de Joelho da curva de magnetização, tem-se que $i_m = f(\lambda) = \lambda/L_m$, onde L_m é a indutância de magnetização do transformador. Desse modo, tem-se:

$$\frac{d\lambda}{dt} + \frac{R}{L_m}\lambda = U_m \text{sen}\omega t \quad (23)$$

Resolvendo analiticamente a equação diferencial, supondo a condição inicial $\lambda(0) = 0$, é possível obter a seguinte solução:

$$\lambda(t) = \frac{\omega L_m^2 U_m}{R^2 + (\omega L_m)^2} e^{-(R/L_m)t} + \frac{\omega L_m^2 U_m}{R^2 + (\omega L_m)^2} \left[\frac{R}{\omega L_m} \text{sen}\omega t - \text{cos}\omega t \right] \quad (24)$$

Considerando $R \ll \omega L_m$ e fazendo $\lambda_m = U_m/\omega$, temos:

$$\lambda(t) = \lambda_m [e^{-(R/L_m)t} - \text{cos}\omega t] \quad (25)$$

Observa-se que o fluxo possui uma componente com decaimento exponencial somada com uma componente senoidal. Na Figura 56 é mostrado o comportamento típico do fluxo em função do tempo durante a energização do transformador.

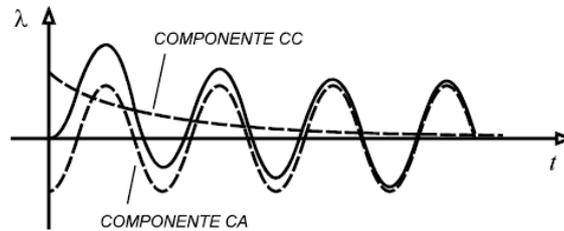


Figura 8.2: Comportamento do fluxo magnético na energização de um transformador a vazio [2].

A assimetria da onda de fluxo depende do valor da tensão da fonte no momento da energização do transformador. Sendo assim, o ângulo de chaveamento θ é um fator determinante para o sobrefluxo inicial. Sabendo que a tensão é da fonte dada pela equação $u = U_m \text{sen}(\omega t + \theta)$, então $u(0) = U_m \text{sen}\theta$. A assimetria do fluxo é máxima quando $\theta = 0$ e mínima quando $\theta = \pi/2$.

As elevadas correntes de energização surgem devido ao processo de saturação do núcleo do transformador, que por sua vez acontece devido ao sobrefluxo inicial. Quando o núcleo passa a operar na região de saturação, para pequenas variações do fluxo, tem-se uma grande variação de corrente, como é mostrado na Figura 57.

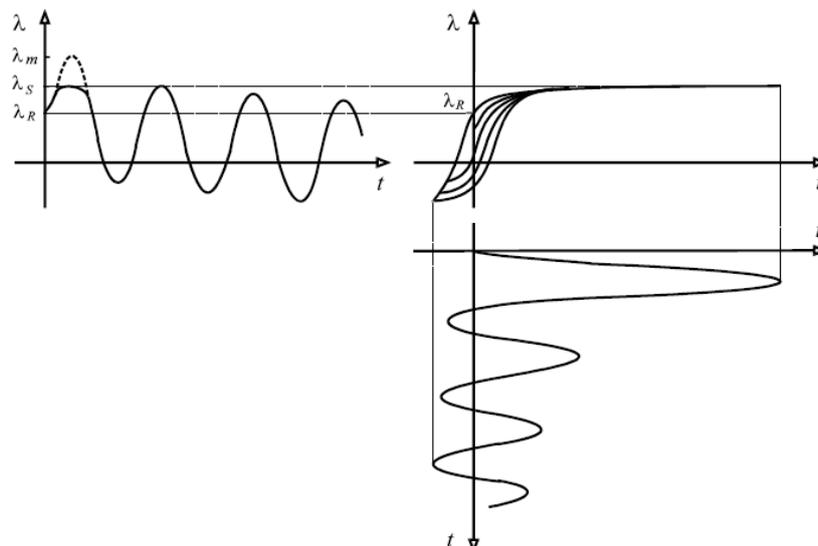


Figura 8.3: Representação da saturação devido à assimetria do fluxo magnético [2].

Observa-se que na Figura 57 também é possível analisar a influência do fluxo residual λ_R , que faz com que o núcleo entre mais rapidamente na região de saturação. Os valores de pico

de corrente mais altos ocorrem quando o fluxo imposto pela fonte é de mesmo sinal do fluxo residual, caso contrário, as correntes de *inrush* são atenuadas.

Como forma de mitigação das correntes de *inrush*, são utilizados resistores de pré-inserção nos disjuntores e técnicas de chaveamento controlado, que realizam a energização do transformador quando a tensão da fonte atinge seu valor de pico.

O circuito montado no PSCAD para simulações de correntes transitórias de energização de transformadores a vazio é mostrado na Figura 58. Foram utilizados um transformador saturável de 100 MVA com o secundário em aberto, uma fonte de tensão ideal de 200 kV (RMS) e um disjuntor ativado por um controlador lógico temporal.

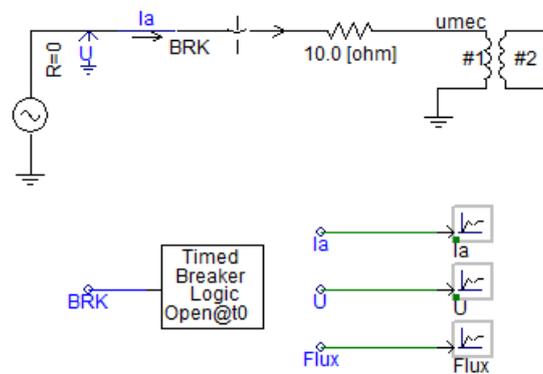


Figura 8.4: Circuito montado no PSCAD para simulação de energização de transformadores a vazio.

Ajustando o ângulo de chaveamento θ , de modo que o transformador seja energizado quando a tensão da fonte for zero, foram obtidos os resultados mostrados nas Figuras 59 e 60, que representam, respectivamente, a corrente de *inrush* e o fluxo no núcleo magnético.

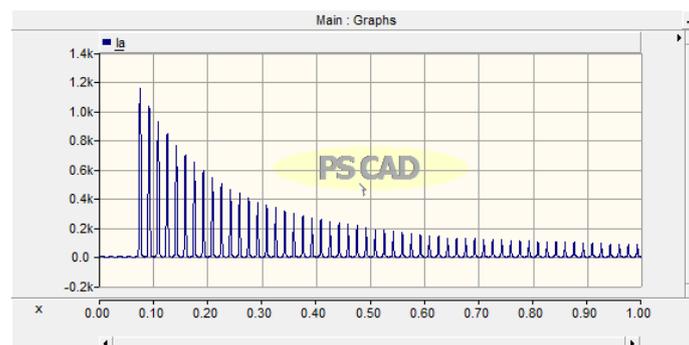


Figura 8.5: Corrente de *inrush* de energização de um transformador a vazio.

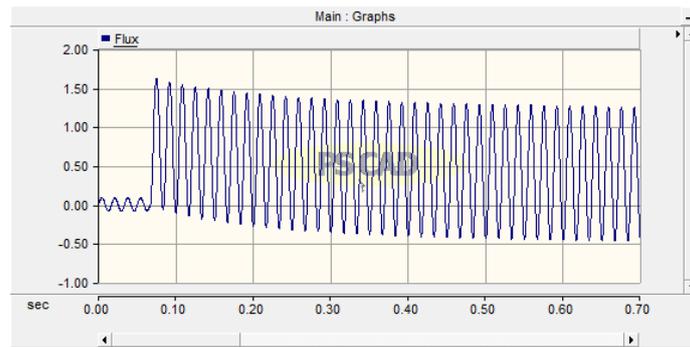


Figura 8.6: Fluxo de um transformador a vazio sendo energizado.

A corrente de energização, em seu primeiro pico, atingiu aproximadamente 1,16 kA, várias vezes maior que a corrente de excitação em regime permanente. Também foi evidenciado na Figura 60 a assimetria da onda do fluxo, que levou a saturação do núcleo.

De modo a simular a ação das técnicas de chaveamento controlado, o ângulo de chaveamento θ foi ajustado, de modo que o transformador seja energizado enquanto a tensão da fonte atingir seu valor de pico. Foram obtidos os resultados mostrados nas Figuras 61 e 62, que representam, respectivamente, a corrente de *inrush* e o fluxo no núcleo magnético.

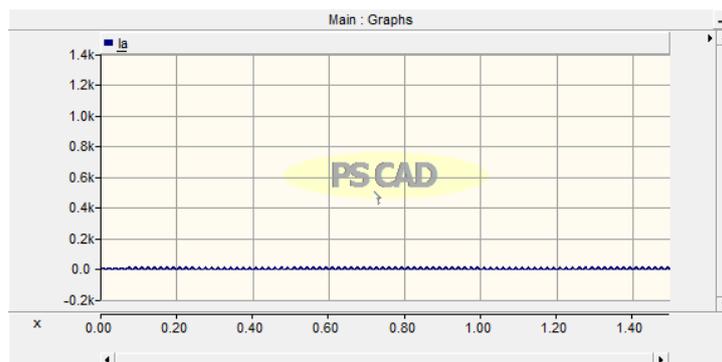


Figura 8.7: Corrente de *inrush* com chaveamento controlado.

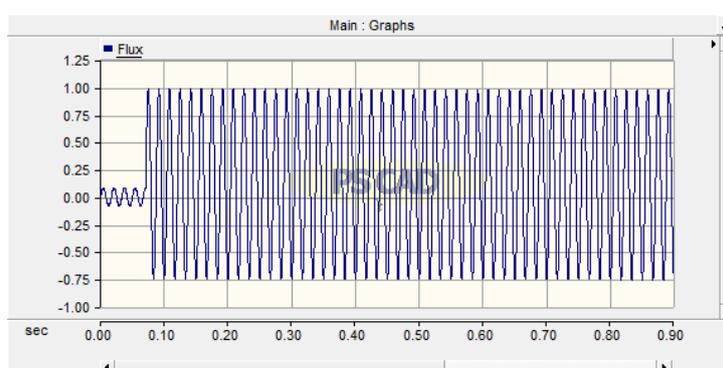


Figura 8.8: Fluxo magnético com chaveamento controlado.

Fica evidente que as técnicas de chaveamento controlado de transformadores são capazes de reduzir bastante as correntes de *inrush*. As Figuras 63 e 64 mostram, respectivamente, a corrente de *inrush* e o fluxo no núcleo, e foram obtidas utilizando um resistor de pré-inserção de $20\ \Omega$, que foi inserido no circuito durante 0,2 s. O chaveamento ocorreu no instante onde a tensão da fonte é zero.

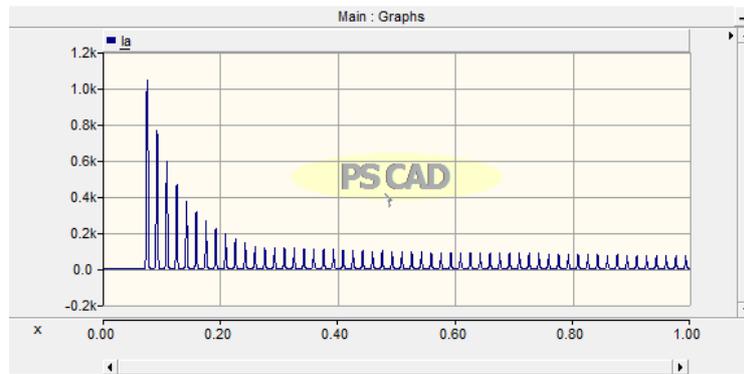


Figura 8.9: Corrente de *inrush* utilizando resistores de pré-inserção.

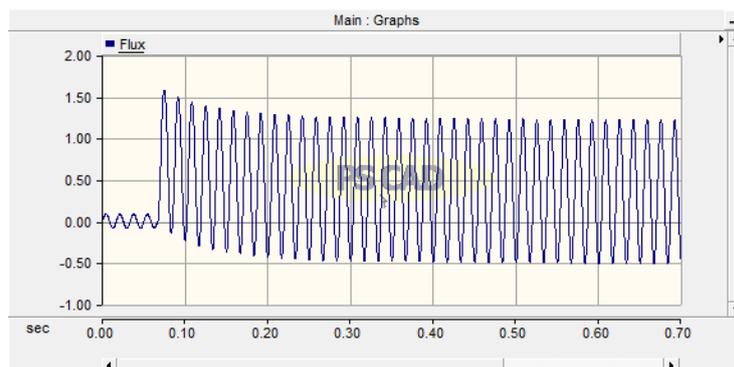


Figura 8.10: Fluxo magnético com a utilização de resistores de pré-inserção.

Houve uma redução do valor da corrente de *inrush*, que caiu de 1,16 kA para 1,04 kA durante o primeiro pico. Além disso, houve uma redução significativa do tempo de duração do fenômeno transitório, já que a corrente atingiu valores abaixo de 200 A em menos da metade do tempo que a corrente da simulação feita sem o resistor de pré-inserção. No entanto, fica evidente que o uso de técnicas de chaveamento controlado produz melhores resultados que o uso de resistores de pré-inserção.

Não foi possível simular o efeito do fluxo residual do núcleo nas correntes de *inrush*, pois o modelo de transformador utilizado no PSCAD não permite que esse parâmetro seja definido.

9 ENERGIZAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Energização e religamento de linhas de transmissão são manobras típicas que ocorrem nos sistemas elétricos. Durante essas operações, surgem sobretensões transitórias causadas devido aos efeitos das ondas viajantes associados a estes fenômenos, com duração de alguns milissegundos, dependendo das características da linha manobrada. Após esse período, a forma de onda da tensão pode apresentar distorções significativas por uma duração de até um segundo, com presença predominante de harmônicos de segunda e terceira ordem, e por fim alcançando o regime permanente.

A seguir estão listados os principais fatores que podem influenciar no comportamento das sobretensões resultantes de manobras em linhas de transmissão.

- Potência de curto-circuito do sistema alimentador;
- Instante de chaveamento;
- Grau de compensação da linha de transmissão;
- Comprimento da linha de transmissão;
- Perdas no condutor;
- Presença de equipamentos de proteção;
- Eficiência do aterramento do sistema;
- Tensão pré-manobra;
- Valor do resistor de pré-inserção;
- Valor da carga residual na linha para o caso de religamento.

Caso o sistema de proteção não atue corretamente, as sobretensões podem causar interrupções do fornecimento de energia, redução da vida útil dos equipamentos ou até mesmo a destruição dos mesmos. Sendo assim, softwares específicos para simulação de transitórios, como o PSCAD, são ferramentas úteis para prever a intensidade das solicitações geradas pelas manobras em linhas de transmissão.

O PSCAD proporciona dois métodos para modelar linhas de transmissão para simulações no domínio do tempo: Uso de modelos PI e uso de modelos distribuídos de linhas de transmissão.

Os modelos PI mostrados na Figura 65, podem ser do tipo nominal ou acoplado. Embora os estudos de linhas de transmissão modelados com modelos PI sejam bastante precisos no domínio da frequência, no domínio do tempo, principalmente para linhas mais longas (onde

o tempo de propagação das ondas leva vários ciclos), ocorre uma redução da precisão. Sendo assim, são indicados para simulações com linhas de transmissão de pequeno comprimento.

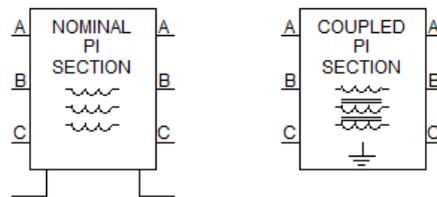


Figura 9.1: Modelos PI nominal e PI acoplado disponíveis no PSCAD.

O PSCAD fornece três modelos distribuídos diferentes de linhas de transmissão: modelo Bergeron, modelo dependente da frequência (módulo) e o modelo dependente da frequência (fase). Este último, consiste no modelo para domínio do tempo mais avançado entre os modelos disponibilizados por simuladores, no entanto, os modelos dependentes da frequência não estão disponíveis para a versão grátis do PSCAD.

Para simular os fenômenos transitórios que ocorrem em manobras de energização de linhas de transmissão, foi montado no PSCAD o circuito mostrado na Figura 66. As descrições de como acessar cada componente e de como editar os seus parâmetros estão disponíveis nos Apêndices B e C, respectivamente.

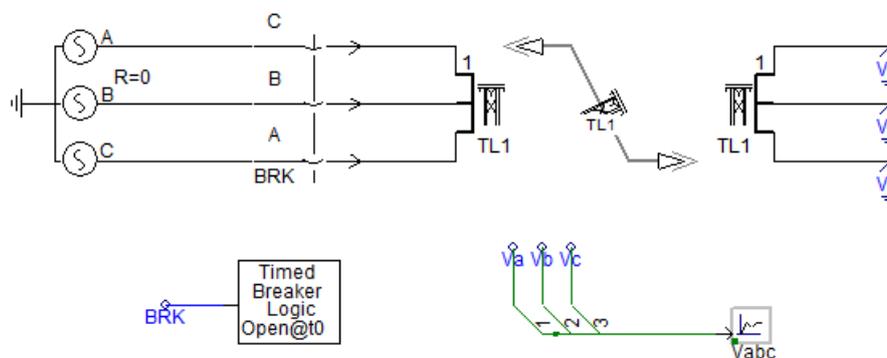


Figura 9.2: Circuito montado no PSCAD para simulação de energização de linhas de transmissão.

Foram utilizados: uma fonte trifásica de 100 kV (RMS), um disjuntor trifásico e um modelo Bergeron para a linha de transmissão.

Na Figura 67 esta mostrado o resultado obtido com uma simulação utilizando uma linha de transmissão de 100 km. A descrição de como obter os gráficos a seguir está disponibilizada no Apêndice D.

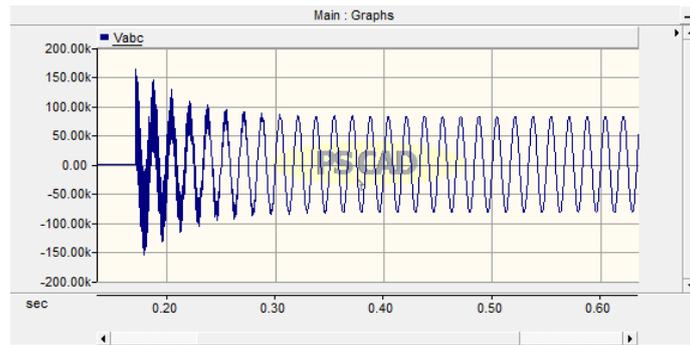


Figura 9.3: Tensão nos terminais de uma linha de transmissão de 100 km.

Observa-se claramente o surgimento de uma sobretensão transitória no fim da linha de transmissão, que assume valores praticamente duas vezes maiores que a tensão de regime permanente. A Figura 67 também evidencia o valor da tensão em regime permanente, de aproximadamente 82,4 kV, um pouco acima do valor da tensão fase-terra da fonte de 81,65 kV. Isto ocorre pois, linhas de transmissão abertas em uma de suas extremidades agem como uma capacitância à frequência fundamental, elevando a tensão ao longo do sistema. Este efeito se torna mais pronunciado para linhas de transmissão mais compridas. Para comprovar este resultado, na Figura 68 é mostrado resultado obtido para a mesma simulação anterior, no entanto utilizando uma linha de transmissão de 400 km.

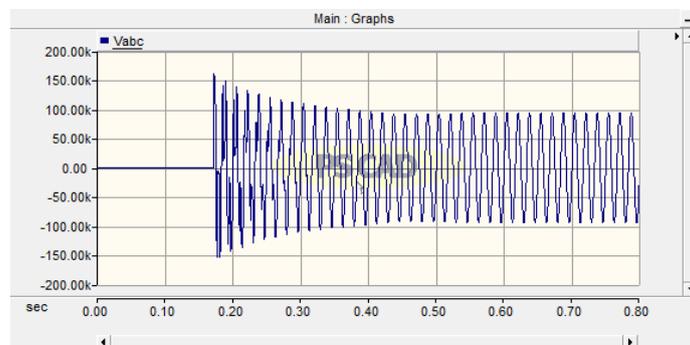


Figura 9.4: Tensão nos terminais de uma linha de transmissão de 400 km.

Observa-se que com uma linha de 400 km, a tensão em regime permanente assume o valor de 94 kV, 15% maior que a tensão da fonte. Além disso, fica evidente que o tempo de duração da sobretensão transitória também aumenta.

As principais técnicas empregadas com o intuito de reduzir os efeitos negativos causador por sobretensões de manobra em linhas de transmissão são: utilização de resistores de pré-inserção nos disjuntores e utilização de técnicas de chaveamento controlado.

Na Figura 69 é mostrado o resultado obtido utilizando uma linha de transmissão de 100 km e resistores de pré-inserção de 500 Ω nos disjuntores, inseridos por 80 ms.

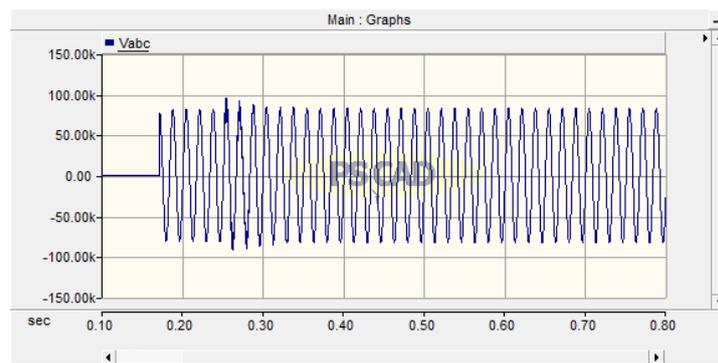


Figura 9.5: Tensão nos terminais de uma linha de transmissão utilizando resistores de pré-inserção.

Observa-se que a utilização de resistores de pré-inserção é um método eficiente para redução das sobretensões geradas nos terminais de linhas sendo energizadas. Na Figura 70 é mostrado o resultado obtido utilizando uma linha de transmissão de 100 km sem resistores de pré-inserção, porém controlando o chaveamento de modo a energizar a linha no instante em que a tensão da fonte de alimentação é zero.

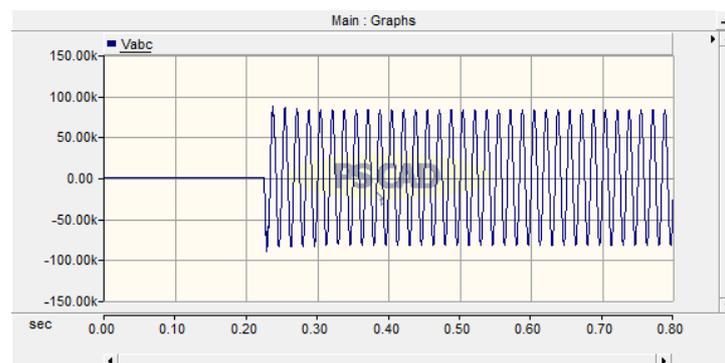


Figura 9.6: Tensão nos terminais de uma linha de transmissão utilizando chaveamento controlado.

Fica claro a redução da sobretensão durante a energização, comprovando a eficiência das técnicas de chaveamento controlado.

10 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As linhas de transmissão aéreas são os componentes do sistema elétrico mais vulneráveis a incidência de descargas atmosféricas, que se caracterizam pela injeção de correntes de até 200 kA, que geram ondas de tensão através da impedância característica do sistema, com caráter impulsivo (não oscilatório) de tempos de crescimento de 1 a 10 μ s. As ondas se propagam para os terminais da linha, com reflexões e refrações onde há mudança na impedância característica.

Caso a suportabilidade de tensão da linha for excedido, há formação de arcos elétricos através do ar ou de cadeias de isoladores. Já em outros equipamentos como transformadores e máquinas elétricas, a ruptura do isolamento pode acarretar em danos permanentes.

Para proteção contra sobretensões atmosféricas, são utilizados sistemas de aterramento associados com os seguintes elementos:

- Hastes captoras;
- Gaiola de Faraday;
- Cabos-guarda;
- Supressores de surto.

Para simulação de descargas atmosféricas no PSCAD, deve-se utilizar uma fonte de corrente com controle externo em conjunto com um sinal lógico, que pode ser aplicado por um gerador de surto (disponível na biblioteca "CSMF") ou por um somatório de funções exponenciais do tipo $[A]e^{[B]x}$.

O surto atmosférico utilizado na simulação a seguir possui tempos de frente e de cauda de 8 e 20 μ s, respectivamente. Para isso, somou-se uma exponencial com $A = 1$ e $B = -88600$ com uma exponencial com $A = -1$ e $B = -173200$. A amplitude da descarga simulada foi de 10 kA, obtida com o auxílio de um componente multiplicador (disponível na biblioteca "CSMF").

Na Figura 71 é mostrado o circuito montado no PSCAD para simular a incidência de uma descarga atmosférica em uma linha de transmissão. As descrições de como acessar cada componente e de como editar os seus parâmetros estão disponíveis nos Apêndices B e C, respectivamente.

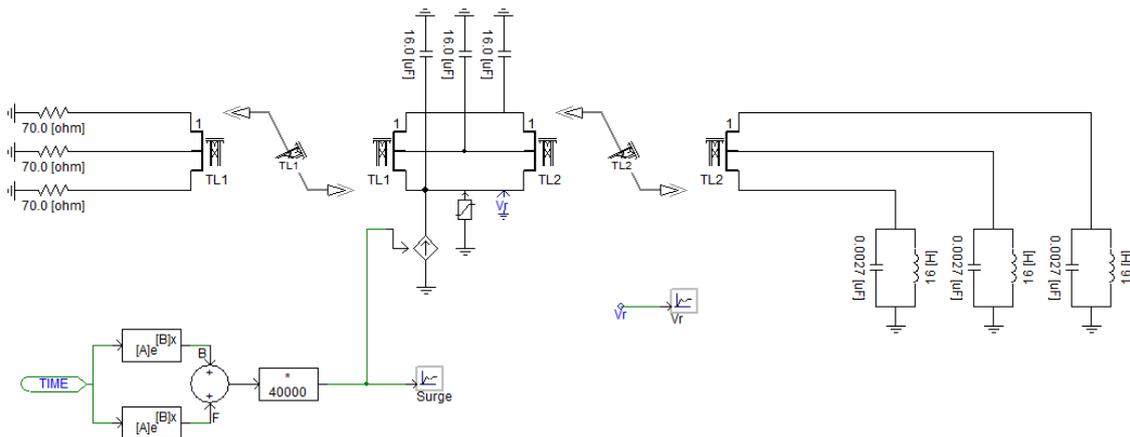


Figura 10.1: Circuito montado no PSCAD para simulação de incidência de descargas atmosféricas.

Na Figura 72 é mostrada a forma de onda obtida pelo gerador de surto, com 10 kA de amplitude e formato aproximado de 8/20 μ s. A sobretensão gerada na linha devido a incidência da descarga é mostrada na Figura 73.

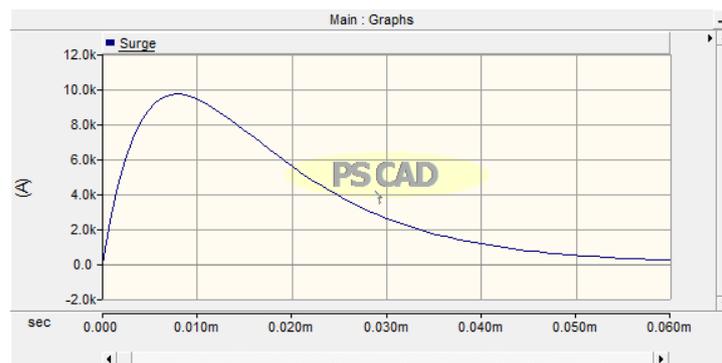


Figura 10.2: Impulso de corrente de uma descarga atmosférica de 8/20 μ s.

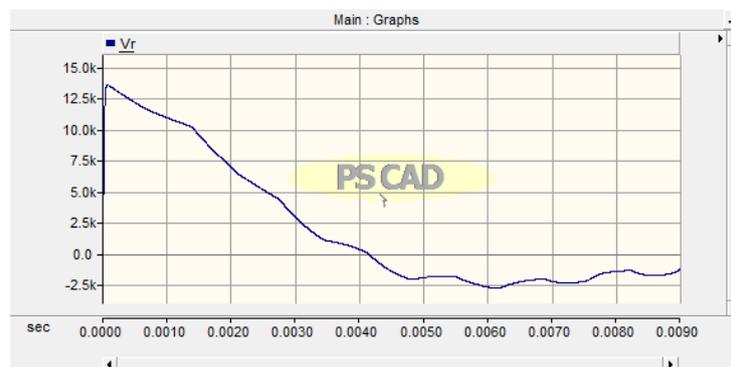


Figura 10.3: Sobretensão atmosférica gerada.

Para redução dos efeitos causados pela descarga atmosférica foi simulada a utilização de um para-raios de óxido de zinco, com a curva I-V padrão e alterando apenas a sua tensão nominal para 300 kV. Na Figura 74 é mostrada a tensão na linha com o uso do para-raios.

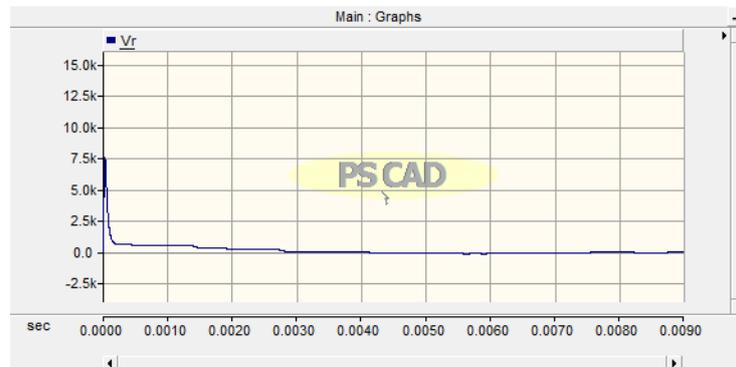


Figura 10.4: Sobretensão atmosférica utilizando um para-raios.

Observa-se claramente a redução significativa na sobretensão na linha devido a atuação do para-raios.

11 CONCLUSÃO

Neste trabalho, ficou evidenciado a eficiência do PSCAD para reproduzir fielmente o comportamento dos fenômenos transitórios que ocorrem nos sistemas de potência. O *software* inclui uma biblioteca muito ampla, disponibilizando diversos modelos, desde elementos mais básicos, como resistores, indutores e capacitores, até sistemas de controle e equipamentos mais complexos, que proporcionam inúmeras possibilidades de simulação. O PSCAD possui uma interface, descrita no Apêndice A, bastante simples e intuitiva, superando, neste quesito, os *softwares* concorrentes, como o ATPDraw, EMTP-RV e o Power System Blockset. Possui também meios para comunicação com outros *softwares*. No Apêndice E está disponibilizado um pequeno tutorial, descrevendo o procedimento realizado para exportar dados do PSCAD para o MATLAB.

De modo geral, todas as simulações apresentaram resultados dentro do esperado, de acordo com o que foi visto nas revisões bibliográficas feitas para cada fenômeno transitório. Nas simulações com circuitos RC e RL, verificou-se que as constantes de tempo foram iguais aos valores calculados. Nos circuitos RLC verificou-se a influência dos parâmetros dos componentes no tipo de amortecimento apresentado.

Foi verificado a eficiência dos métodos de redução de sobretensões ou sobrecorrentes transitórias, utilizando resistores de pré-inserção, nas simulações de tensão de restabelecimento transitória, de energização de transformadores à vazio e de linhas de transmissão.

As técnicas de chaveamento controlado, que buscam otimizar os tempos de abertura ou fechamento de circuitos, foram utilizadas nas simulações de transitórios em TCs, e de energização de bancos de capacitores, transformadores a vazio e linhas de transmissão. Verificou-se uma grande redução das sobretensões e sobrecorrentes transitórias.

Alguns fenômenos específicos de transitórios envolvendo TCs foram analisados, como os diferentes processos de saturação do núcleo (CC e CA) e a influência da existência de fluxos remanescentes. Também foi analisada a eficiência de supressores de surto (para-raios) para redução de sobretensões atmosféricas inseridas em um sistema simplificado.

Um dos aspectos não tão vantajosos do PSCAD é que as características das curvas de saturação dos elementos com núcleos magnéticos, fornecidas em dados de fluxo magnético em função da corrente de pico na maioria dos livros, são determinadas no PSCAD com valores de tensão em função da corrente.

12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ZANNETA JÚNIOR, Luiz Cera. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência Vol. 52*. São Paulo, 2003.
- [2] GUERRA, Francisco das Chagas Fernandes. *Proteção de Sistemas Elétricos*. Apostila com notas de aula.
- [3] PEREIRA, Priscila Dias; SOBREIRA, Priscilla Bandeira. *Introdução ao ATP: Simulação de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. Campina Grande, 2012.
- [4] VALERO, Patricia Mestas. *Análise Comparativa de Técnicas de Controle de Sobretensões Transitórias nas Manobras de Energização e Religamento de Linhas de Transmissão*. Dissertação de Mestrado na Universidade Estadual de Campinas, 2007.
- [5] DE SOUZA, Ronimack Trajano. Relatório de projeto de pesquisa de doutorado sobre disjuntores, 2012.
- [6] SOUZA, Eduardo da Costa. *Análise das Técnicas de Controle de Sobretensão Transitória Durante a Energização de Linhas de Transmissão*. Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
- [7] Manitoba HVDC Research Centre Inc. *Applications of PSCAD/EMTDC*. 2008.
- [8] RADHIKA, G.; SURYAKALAVATHI, M.; SOUJANYA, G.. *Effective Placement of Surge Arrester During Lightning*. IJCCIS 2010.
- [9] DE ARAÚJO, Antônio E. A.; NEVES, Washington L. A.. *Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia*. 2005.
- [10] DAS, J. C.. *Transients in Electrical Systems: Analysis, Recognition and Mitigation*, 2010

APÊNDICE A: INTERFACE

Na canto superior esquerdo da tela está disponível o botão "*PSCAD Button*", como mostra a Figura A.1. Ele contém as opções disponíveis para o aplicativo.

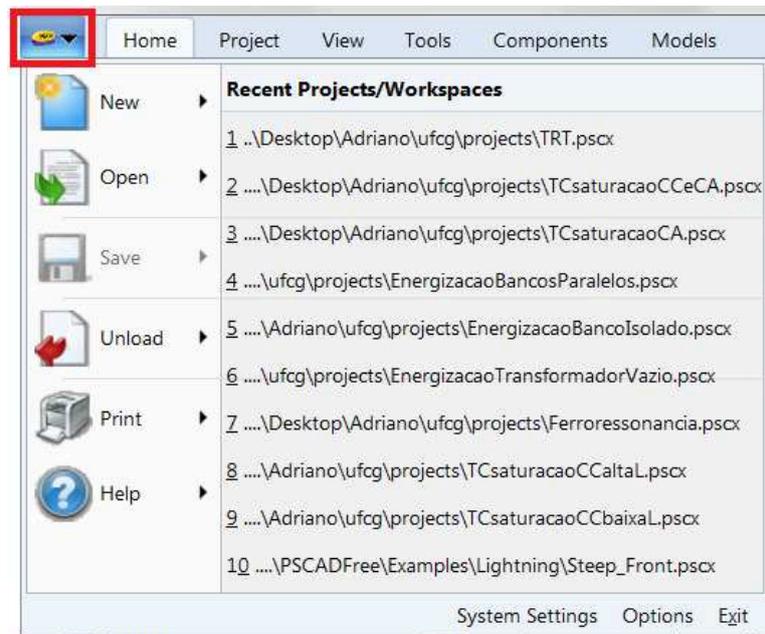


Figura A.1: "*PSCAD Button*".

Através desse botão é possível acessar as seguintes funções:

- *New*: Criação de novos projetos (*Ctrl + N*);
- *Open*: Abrir projetos salvos (*Ctrl + O*);
- *Save*: Salvar projetos;
- *Unload*: Descarregar projetos;
- *Print*: Imprimir projetos;
- *Help*: Acessar o menu de ajuda do software.

Ao lado do "*PSCAD Button*" encontram-se cinco abas:

- *Home*: Acesso as principais funções direcionadas a simulação, como iniciar, pausar e parar simulações, aplicar zoom, desfazer ações incorretas, etc;
- *Project*: Acesso as configurações gerais do projeto, como o tempo de simulação;
- *View*: Opções de visualização do projeto;

- *Tools*: Acesso à função "*Medic*" que pode corrigir erros de simulação;
- *Components*: Acesso aos componentes comumente utilizados em simulações, como medidores, dispositivos de entrada e saída, elementos passivos, etc;
- *Models*: Acesso as subseções da biblioteca principal de componentes.

APÊNDICE B: ACESSO AOS COMPONENTES

Para acessar a biblioteca principal do PSCAD deve-se clicar no botão "*master (Master Library)*" como mostra a Figura B.1.

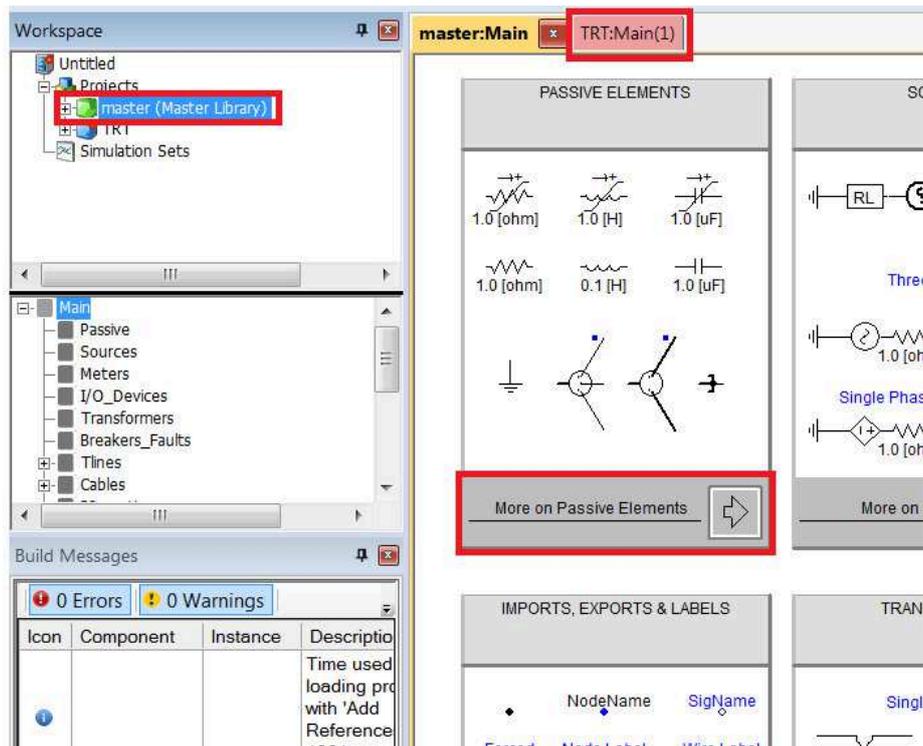


Figura B.1: Biblioteca principal e suas subseções.

Com isso, apareceram na tela principal todas as subseções da biblioteca principal. Esta divisão traz maior organização, facilitando o acesso aos componentes desejados. No entanto, para ter acesso a todos os componentes da subseção desejada deve-se dar um clique duplo na área em destaque da Figura B.1. Para utilizar o componente, basta copiá-lo e depois colá-lo na área do seu projeto, que pode ser acessada pela aba em destaque na Figura B.1.

A lista a seguir mostra todas as subseções da biblioteca e seus principais componentes, dando ênfase aos utilizados nas simulações realizadas.

- *Passive Elements*: Componentes RLC, cargas fixas, pára-raios, centelhadores, fios e barramentos;
- *Sources*: Fontes de tensão e de corrente CA e CC, trifásicas e monofásicas;
- *Meters*: Voltímetro, amperímetro e wattímetro;
- *I/O Devices*: Canal de saída, chave de dois estados, botão;

- *Transformers*: Modelos de transformadores trifásicos, dois diferentes modelos de transformadores monofásicos;
- *Breaker&Faults*: Disjuntores, simuladores de faltas e controladores temporais;
- *Imports, Exports&Labels*: Nós, importadores e exportadores utilizados para comunicação entre módulos;
- *Miscellaneous*: Aplicadores de sinais constantes, componentes para mixagem de dados;
- *Logical*: Portas lógicas, flip-flops, multiplexadores, buffers e inversores;
- *Protection*: TC's, TP's e relés;
- *HVDC, FACTS & Power Electronics*: Transistores, tiristores, diodos e pára-raios;
- *Transmission Lines*: Linhas de transmissão;
- *Cables*: Diferentes modelos de cabos condutores;
- *Machines*: Modelos de máquinas de indução e máquinas síncronas monofásicas e trifásicas, máquinas de ímã permanente e máquinas DC;
- *CSMF*: Blocos de controle analógicos e digitais;
- *Sequencers*: Blocos sequenciadores;
- *PI Sections*: Modelos de linha de transmissão PI nominal e PI acoplado;
- *External, Data Record&Readers*: Componentes que servem para memorizar sinais de uma simulação e usá-los como entrada em outras simulações.

APÊNDICE C: DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS E UTILIZAÇÃO DE COMPONENTES

A alteração dos parâmetros de todos os componentes do PSCAD pode ser feita através de um clique duplo sobre o componente.

Nas simulações realizadas nesse trabalho a maioria das alterações de parâmetros são muito simples de se fazer, no entanto, algumas observações devem ser feitas a respeito de certos componentes:

- Fontes

Todas as fontes utilizadas foram definidas como ideais, ou seja, com impedância interna nula, como pode ser visto na Figura C.1.

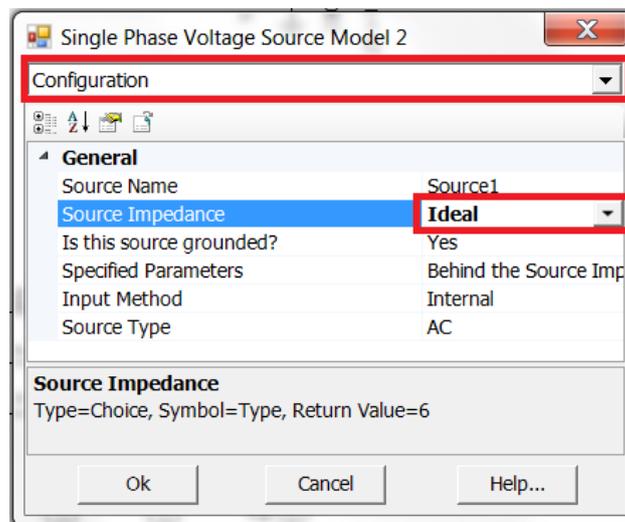


Figura C.1: Tela de configurações principais de fontes.

Além disso, o tempo que a fonte demora para atingir seu valor de pico foi definido como zero segundos. Isso pode ser feito na aba "*SignalParameters*", como mostra a Figura C.2.

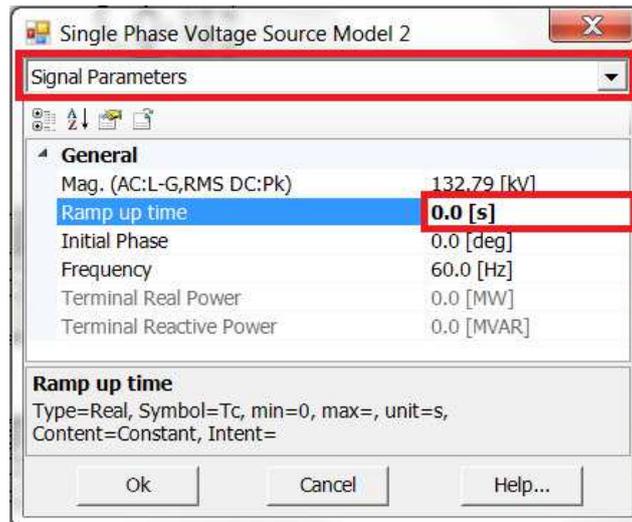


Figura C.2: Tela de configuração de parâmetros de fontes.

- Canais de Saída

Devido à própria configuração padrão do PSCAD os voltímetros e amperímetros medem os valores de tensão e corrente em kV e kA, respectivamente. Portanto, para que os sinais sejam plotados em Volts ou Amperes, o fator de escala dos canais de saída foram definidos como 1000, como mostra a Figura C.3.

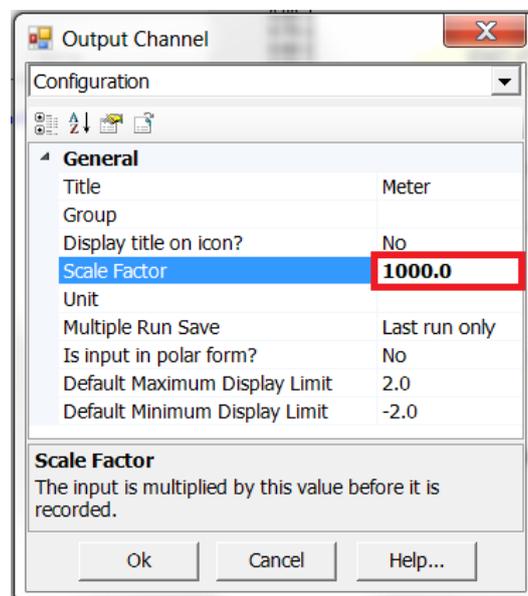


Figura C.3: Tela de configuração de canais de saída.

No entanto, algumas exceções foram feitas quando as simulações envolviam TCs, pois esses equipamentos consideram as correntes nos enrolamentos primário em kA, quando na

verdade são em A, então não é necessário corrigir a escala, ou seja, o fator de escala é definido como 1 (Um).

- Transformadores

O modelo de transformador utilizado nas simulações foi o que utiliza a abordagem UMEC, sigla em inglês para circuito magnético equivalente unificado, que se baseia principalmente na geometria do núcleo.

Para melhor representar o comportamento dos transformadores, os parâmetros foram definidos de modo a permitir a saturação, como pode ser visto na Figura C.4.

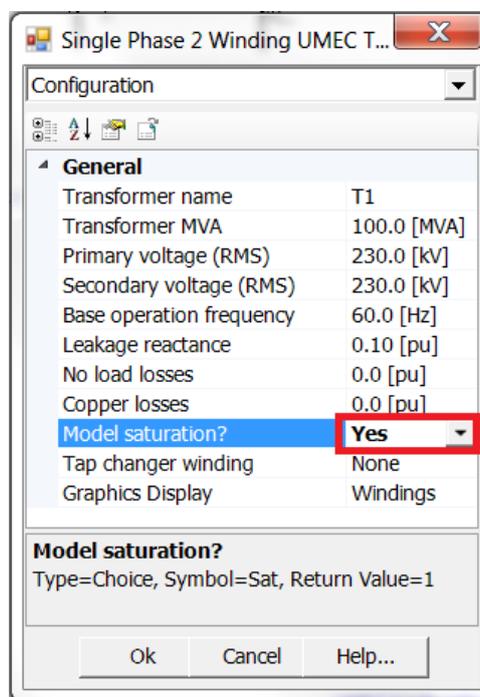


Figura C.4: Tela de configurações principais de transformadores.

Além disso, na aba "*Saturation Curve*", deve-se alterar o parâmetro "*EnableSaturation*" para 1 (Um) como mostra a Figura C.5. A curva de saturação pode ser definida ponto a ponto, porém algumas observações devem ser feitas: os pontos referem-se apenas ao primeiro quadrante e a partir desses pontos o próprio PSCAD irá definir o restante da curva por um processo de interpolação; O algoritmo requer que cada segmento subsequente apresente inclinação menor que o anterior, caso isso não ocorra o ponto será desconsiderado; Se o usuário entrar com o valor 0.0, o PSCAD entenderá que a curva de saturação está completa e irá desconsiderar os pontos seguintes.

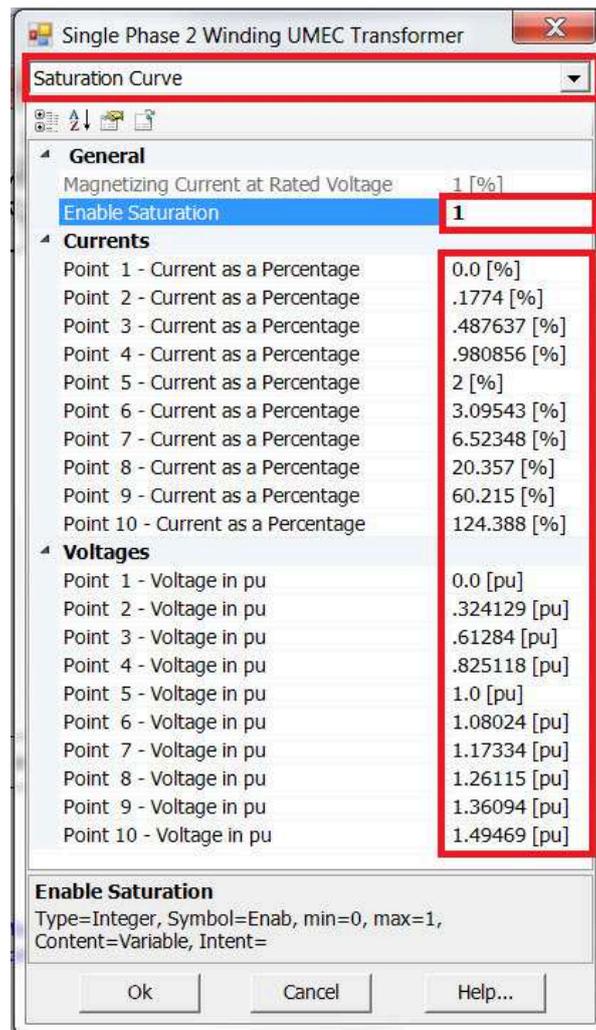


Figura C.5: Tela de definição da curva de saturação de transformadores.

- Disjuntores

De modo à obter um modelo de disjuntor o mais ideal possível, o valor da resistência entre os contatos (fechados e abertos) dos disjuntores foram definidos na aba "*Breaker Main Data*", de acordo com a Figura C.6.

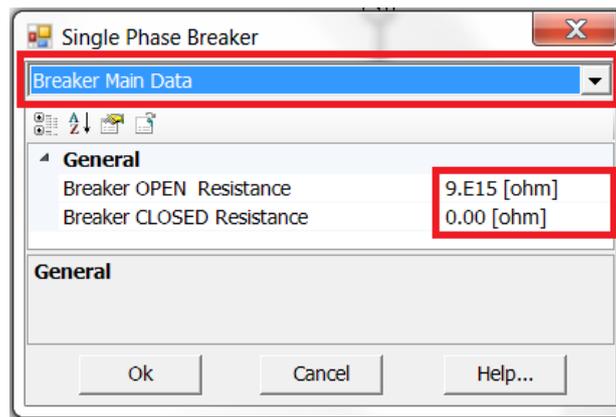


Figura C.6: Tela de configurações adicionais de disjuntores.

Para simular a utilização de um resistor de pré-inserção o parâmetro "*Use Pre-Insertion Resistance?*" deve ser definido como mostra a Figura C.7.

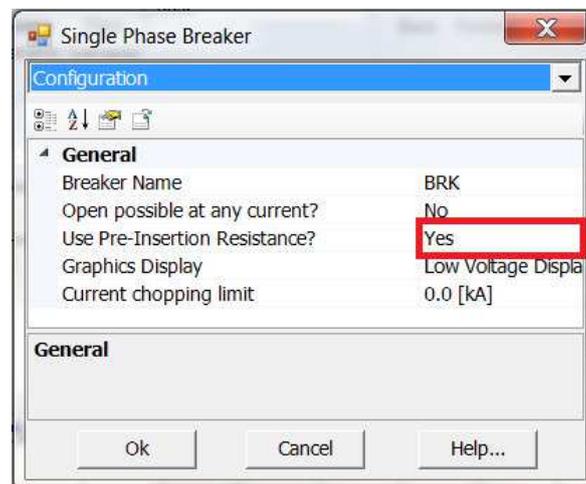


Figura C.7: Tela de configurações principais de disjuntores.

Os valores da resistência do resistor de pré-inserção e o tempo de inserção do mesmo podem ser alterados na aba "*Pre-Insertion Data*", como mostra a Figura C.8.

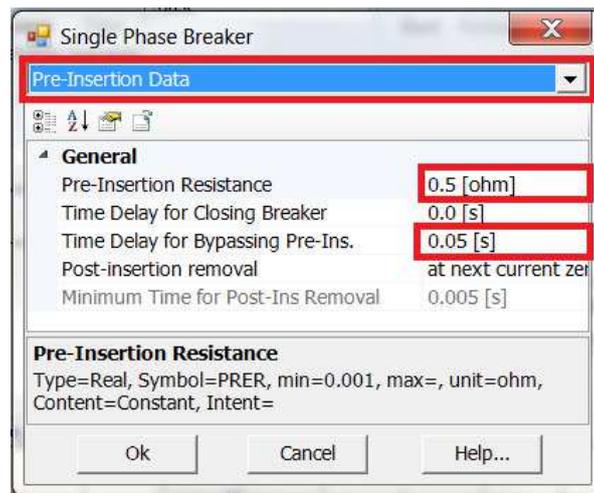


Figura C.8: Tela de configuração de resistores de pré-inserção de disjuntores.

Para realizar o controle de abertura e fechamento dos disjuntores foram utilizados controladores lógicos temporais, encontrados na mesma subseção da biblioteca principal que os disjuntores. Também é possível controlar disjuntores com o uso de sequenciadores.

O controlador é utilizado especificamente para controle de disjuntores monofásicos e trifásicos e sua saída deve ser conectada a um "data label", que por sua vez deve ter o mesmo nome que o disjuntor, como mostra o exemplo na Figura C.9.



Figura C.9: Disjuntores e seus controladores temporais disponíveis no PSCAD.

Com este controlador é possível realizar até duas operações durante a simulação. Além disso, pode-se determinar o estado inicial do disjuntor (fechado ou aberto), e o tempo em que serão realizadas as operações. A Figura C.10 ilustra um exemplo onde só é realizada uma operação de fechamento.

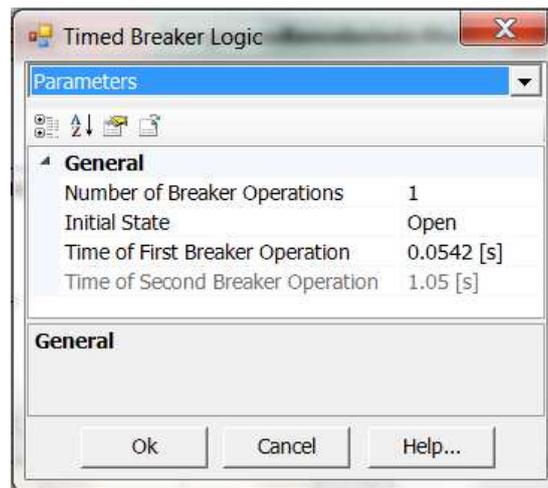


Figura C.10: Tela de configuração de Controladores temporais de disjuntores.

- Transformadores de Corrente (TCs)

Para realização das simulações neste trabalho foram utilizados modelos de TCs baseados na teoria Jiles-Atherton sobre histerese ferromagnética, que representa o comportamento do TC de acordo com as características físicas do material magnético do núcleo.

Na aba de configuração dos parâmetros principais do TC ("*MAIN DATA*") é possível determinar o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário, carga ligada ao secundário, área de secção transversal do núcleo, comprimento do núcleo, densidade de fluxo remanente e por ultimo o tipo de material magnético do núcleo, mostrado em destaque na Figura C.11.

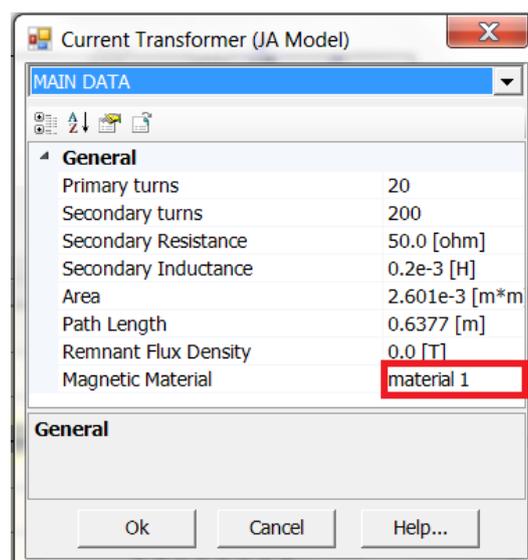


Figura C.11: Tela de configurações principais de TCs.

As características de saturação do material 1 mostrado na Figura C.11 já estão pré definidas. Se for necessário simular outro material deve-se alterar o parâmetro "*Magnetic Material*" para "*custom material*" e em seguida alterar os parâmetros da aba "*MAGNETIZATION Ch. OF THE MATERIAL*" de acordo com a curva B-H desejada, como mostra a Figura C.12. Caso haja alguma dificuldade em determinar esses parâmetros, o usuário deve entrar em contato com a equipe de suporte através do e-mail *support@pscad.com*.

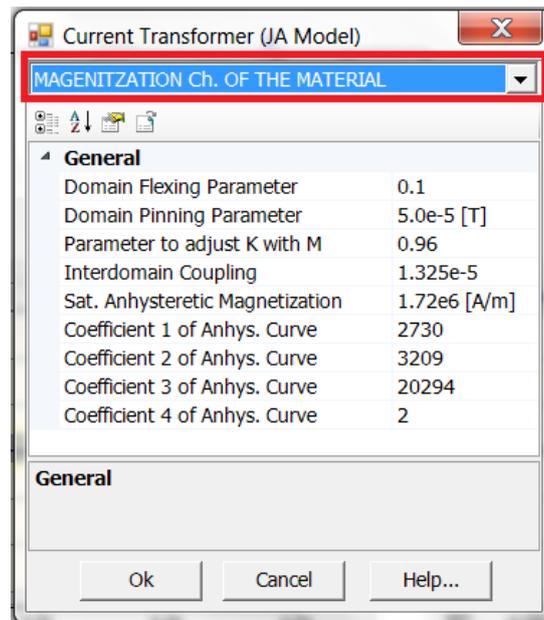


Figura C.12: Tela para configuração da curva B-H de TCs.

- Falhas

A simulação de falhas, assim como os disjuntores, pode ser controlada por um controlador lógico temporal ou por sequenciadores.

A saída do controlador deve ser conectada a um "*data label*" com o mesmo nome da falta a ser controlada, como mostra o exemplo na Figura C.13.



Figura C.13: Falhas e seus controladores temporais disponíveis no PSCAD.

No controlador é possível determinar o tempo de aplicação da falta e a duração da mesma, como mostra a Figura C.14.

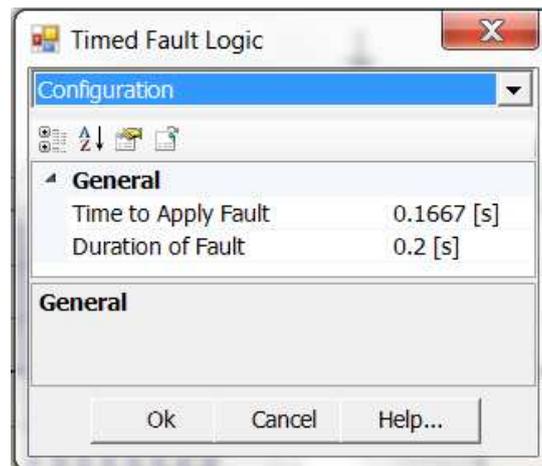


Figura C.14: Tela de configuração de controladores temporais para falhas.

Para simular aplicação de faltas em sistemas trifásicos deve-se utilizar o componente "*ThreePhaseFault*", que deve como entrada a saída do controlador lógico temporal, de acordo com a Figura C.15.

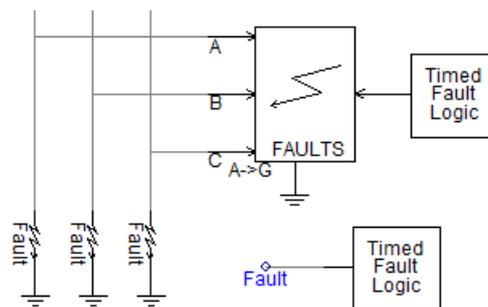


Figura C.15: Exemplo de aplicação de falhas no PSCAD.

Com este componente é possível determinar diversos parâmetros. A lista a seguir mostra os principais parâmetros a serem determinados em cada aba.

- "*Configuration*": Conexão do neutro, tipo de controle de falta;
 - "*Fault Resistances*": Resistências da falta;
 - "*FaultType*": Tipo de falta;
 - "*Fault Current Names*": Nome da falta de cada fase, caso deseje-se utilizar um "*data label*" para obter os sinais de fases específicas.
- Linhas de transmissão

Nas simulações de linhas de transmissão realizadas neste trabalho, foram utilizados os componentes "Tline", onde são definidas as características da linha, e "Transmission Line Interface", que fornece uma interface das extremidades da linha. Ambos disponíveis na biblioteca "Transmission Lines". Estes componentes devem ser renomeados com o mesmo nome, como é mostrado na Figura C.16.

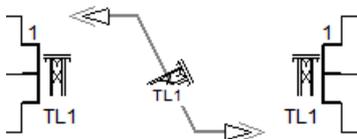


Figura C.16: Exemplo de utilização de linhas de transmissão no PSCAD

Primeiro deve-se configurar os parâmetros da linha de transmissão, clicando com o botão direito do *mouse* no componente, e acessando a opção "Edit Parameters". Na aba "Configuration" deve-se definir o nome da linha, o seu comprimento e o tipo de conexão, como está mostrado na Figura C.17.

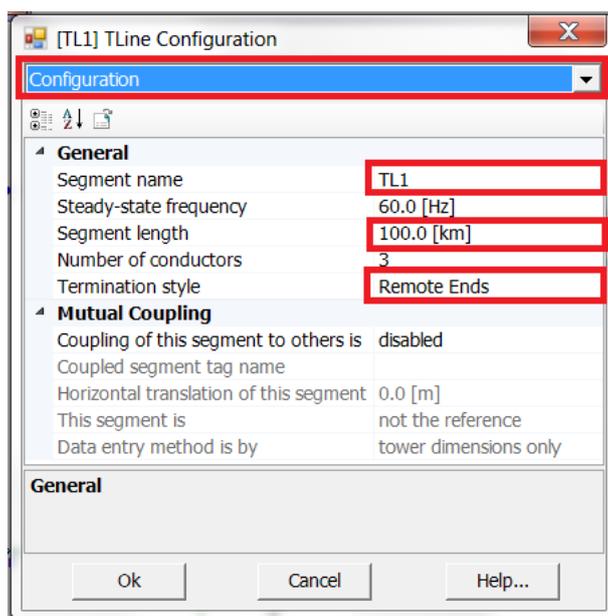


Figura C.17: Tela de configurações principais de uma linha de transmissão.

Em seguida deve-se dar um clique duplo no componente para editar as suas definições. Neste trabalho foram utilizados: Modelo Bergeron (único disponível para a versão grátis do *software*), a configuração padrão com três condutores com alinhamento horizontal e dois cabos guarda, e um solo com resistividade de $300 \Omega \cdot m$, como está mostrado na Figura C.18.

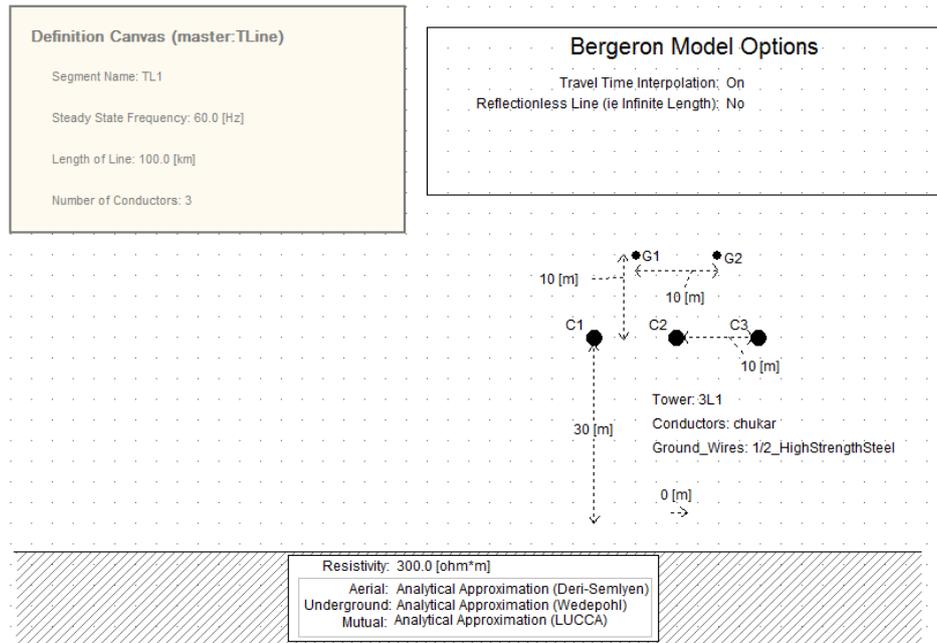


Figura C.18: Tela para configuração das definições de linhas de transmissão.

APÊNDICE D: EXIBIÇÃO DE GRÁFICOS

Para exibição de gráficos no PSCAD utiliza-se o componente "*Output Channel*", que é capaz de registrar os sinais que são ligados a ele. É possível fazer conexões diretas entre o "*Output Channel*" e sinais de controle, no entanto, quando se deseja que este equipamento registre sinais elétricos como corrente ou tensão, a conexão deve ser feita com o auxílio do componente "*Data Label*", que é capaz de reproduzir sinais de dados em outros pontos na página do projeto. O "*Data Label*" deve ter o mesmo nome do sinal que se deseja reproduzir.

Com um clique duplo sobre o "*Output Channel*" pode-se determinar parâmetros como o nome do sinal a ser medido, os limites máximo e mínimo do display e o fator de escala. Na Figura D.1 é mostrada a tela de configuração deste componente.

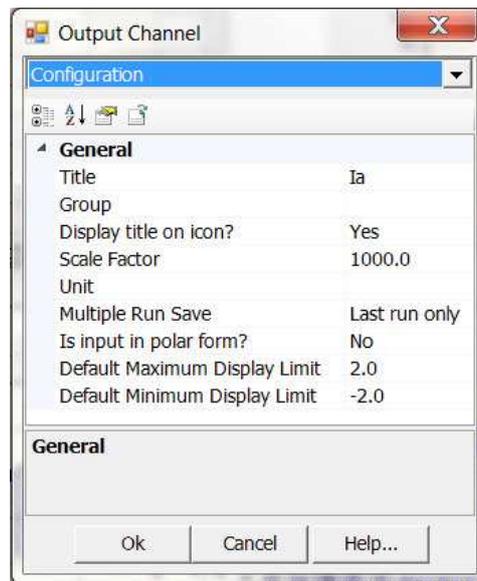


Figura D.1: Tela para configuração dos parâmetros de canais de saída.

Caso seja necessário alterar o tempo de simulação padrão de 0,5 segundos deve-se acessar a aba "*Project*" do menu principal do PSCAD e entrar com o tempo de simulação desejado no parâmetro "*Duration of Run (s)*", como mostra a Figura D.2.



Figura D.2: Exemplo de definição do período de duração de simulações.

Com as devidas configurações feitas deve-se dar um clique com o botão direito do mouse no "Output Channel", em seguida clicar em "Graphs/Meters/Controls" e depois em "Add Overlay GraphwithSignal", como mostra a Figura D.3.

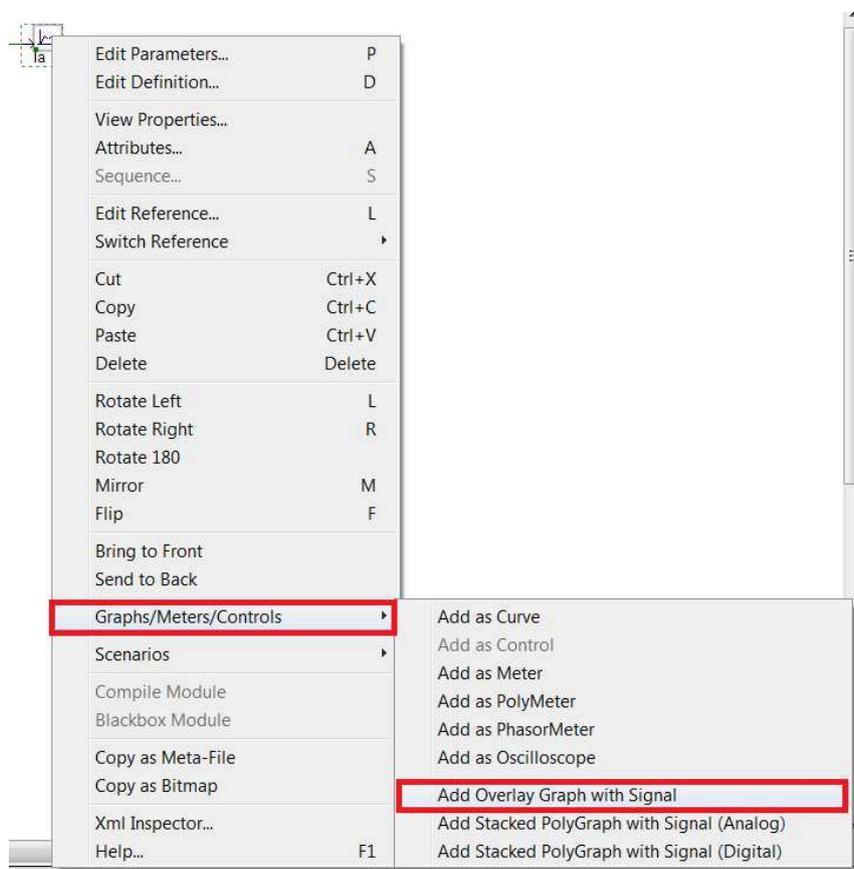


Figura D.3: Opção utilizada para exibição de gráficos.

A lista a seguir mostra os principais comandos utilizados nas simulações deste trabalho para ajustar a visualização dos gráficos e a descrição do que cada um deles fazem:

- "+": Aumentar o zoom;
- "-": Diminuir o zoom;

- "y": Ajusta o gráfico de modo a enquadrar no display os valores mínimo e máximo do sinal;
- "x": Ajusta o gráfico de modo a enquadrar no display todo o sinal durante o tempo de simulação;

Caso se deseje dar um zoom em uma área específica do sinal, deve-se clicar em um ponto do gráfico, segurar o botão e arrastar o mouse até cobrir a área em questão, de acordo com a Figura D.4.

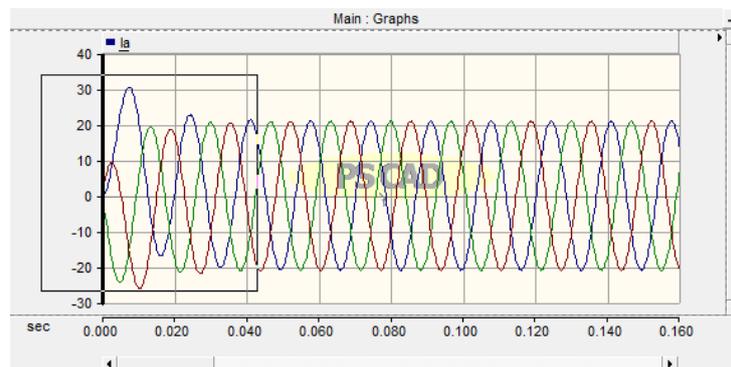


Figura D.4: Exemplo de aplicação de zoom em gráficos.

Em casos onde é necessário plotar mais de um sinal em um mesmo gráfico, o componente "Data Merge", disponível na biblioteca "Miscellaneous", deve ser utilizado, como está mostrado na Figura D.5.

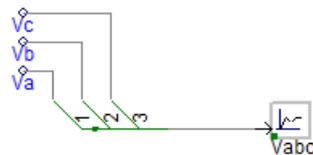


Figura D.5: Exemplo de utilização de "Data Merge".

APÊNDICE E: COMUNICAÇÃO COM O MATLAB

A comunicação entre o PSCAD com outros *softwares* é algo essencial quando se deseja realizar um tratamento diferenciado dos dados, principalmente quando é necessário o uso de ferramentas não disponibilizadas pelo PSCAD.

A seguir encontra-se uma lista contendo todas as etapas de um dos procedimentos realizados para exportar dados das simulações do PSCAD para o MATLAB, que é uma ferramenta computacional amplamente utilizada por engenheiros e é capaz de implementar algoritmos complexos.

- Execute a simulação no PSCAD marcando a opção "*saving output channels to disk*" na aba "*Project*" do menu principal, como está mostrado na Figura E.1;

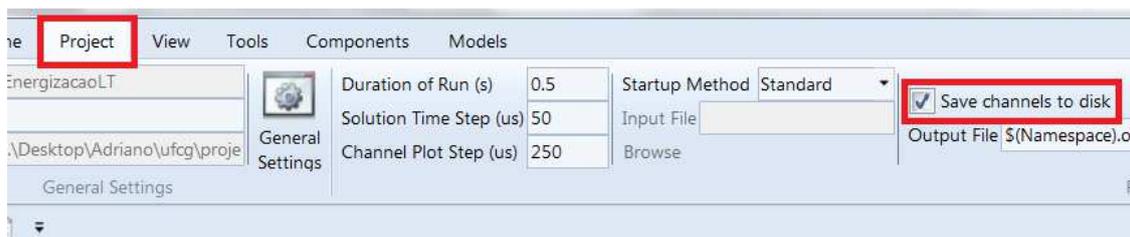


Figura E.1: Opção a ser selecionada para exportar dados para o MATLAB.

- Clique com o botão direito do mouse sobre o gráfico desejado, selecione a opção "*Copy Data To Clipboard*" e em seguida escolha umas das três opções, como está mostrado na Figura E.2;

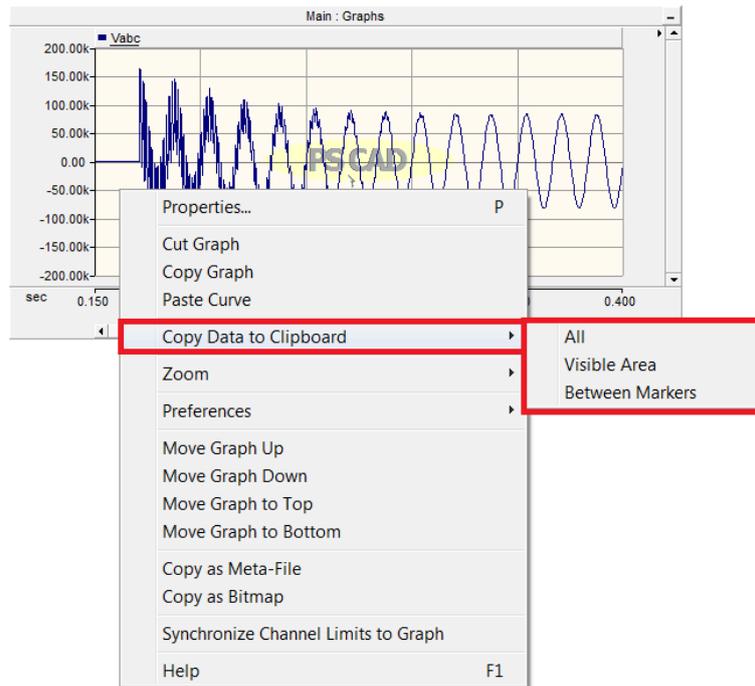


Figura E.2: Cópia de dados para exportar para o MATLAB.

- Abra o MATLAB e, no menu principal, acesse "Edit", e em seguida "Paste to workspace";
- Clique em "Next" e em seguida em "Finish";
- Na aba "Workspace" dê um clique duplo sobre a variável "data". Com isso aparecerá uma tabela, como está mostrado na Figura E.3, com todos os dados importados, disponíveis para serem manipulados da maneira como se desejar.

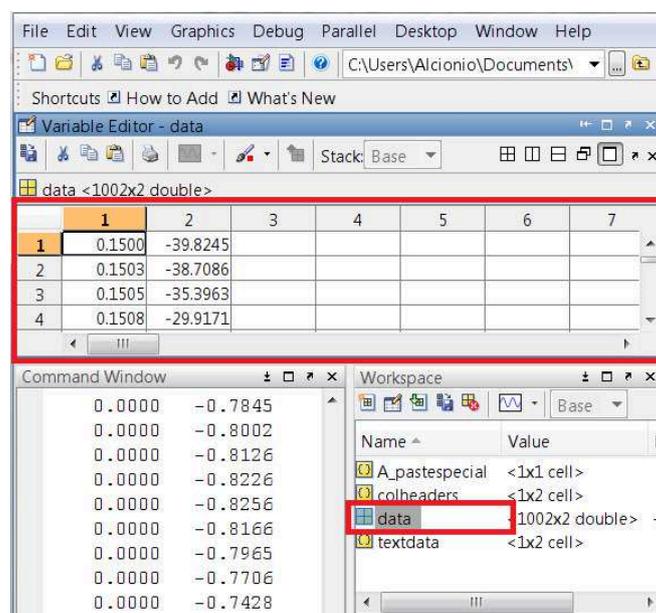


Figura E.3: Exibição dos dados importados no MATLAB.