



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MARIANA RIBEIRO BARROS DE ALENCAR

**ANÁLISE DA RESPOSTA TRANSITÓRIA DOS**  
**TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVOS**  
**VIA SOFTWARE ATPDRAW**

Campina Grande, Paraíba  
Maio de 2016

MARIANA RIBEIRO BARROS DE ALENCAR

ANÁLISE DA RESPOSTA TRANSITÓRIA DOS  
TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVOS  
VIA SOFTWARE ATPDRAW

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande,  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Professor Célio Anésio da Silva, D.Sc.

Orientador

Campina Grande, Paraíba  
Maio de 2016

MARIANA RIBEIRO BARROS DE ALENCAR

ANÁLISE DA RESPOSTA TRANSITÓRIA DOS  
TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVOS  
VIA SOFTWARE ATPDRAW

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande,  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Célio Anésio da Silva, D.Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais que sempre me apoiaram durante toda a caminhada da formação acadêmica.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela proteção e alicerce nos momentos de fraqueza.

A minha família, pelo apoio e incentivo, em especial à minha mãe que sempre me apoiou em minhas decisões e me proporcionou uma vida tranquila para que eu conseguisse êxito em meus estudos.

Ao meu pai, meu maior professor, aquele que me inspirou a seguir esta nobre profissão e que sempre procurou me orientar em minha vida da melhor forma possível.

Aos amigos do tempo de escola, Daniela, Débora, Izadora, João, Mariana, Mário e Nayara, que me acompanharam também durante a vida acadêmica e que me proporcionaram diversos momentos de alegria ao longo de todos esses anos de amizade.

A meu orientador, Célio Anésio, por toda a paciência e ensinamentos que me foram transmitidos ao longo deste trabalho.

A meus amigos de graduação, André, Bianca, Elton, Ezequiel, Mikhail, Rafael, Snadgyell e Victor, que me ajudaram em inúmeros momentos durante o curso e que me proporcionaram momentos inesquecíveis regados a muito café e boas risadas.

Por fim agradeço a todos que de maneira direta ou indireta me influenciaram e me deram suporte durante o curso de graduação.

“A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez”.  
George Bernard Shaw

## RESUMO

O Transformador de Potencial Capacitivo (TPC) fornece informações do sinal de tensão do sistema elétrico de potência para controle, proteção e medição. Falhas em um TPC podem acarretar saídas abruptas de linhas de transmissão que resultam em graves punições estabelecidas pela regulamentação do setor elétrico. Por este motivo, é necessária agilidade na manutenção para recompor o sistema no menor tempo possível, bem como medidas preventivas no sentido de reduzir os desligamentos não programados. Nesta conjuntura, estudos têm sido feitos para modelar os TPC para análises de transitórios eletromagnéticos. Diante do exposto, o trabalho mostra através de algumas simulações, que a ferroressonância é um dos fenômenos que devem ser evitados em um TPC, uma vez que a tensão secundária do transformador se torna destrutiva para os equipamentos elétricos. Outro aspecto analisado neste trabalho é a manobra de disjuntores e seus efeitos sobre a tensão secundária de um TPC. Todas as simulações foram realizadas, tanto no ATPDraw quanto no PSpice, para um Transformador de Potencial Capacitivo de 138 kV.

**Palavras-chave:** Sistemas elétricos de potência, transitórios eletromagnéticos, transformadores de potencial capacitivos, ATP Draw, PSpice.

## ABSTRACT

The Coupling Capacitor Voltage Transformer (CCVT) provides voltage signal information from the electrical power system for control, protection and measurement. Failures in a CCVT can provoke abrupt output transmission lines that result in severe penalties established by the regulation of the electricity sector. For this reason, it is necessary to maintain agility to restore the system as quickly as possible, as well as preventive measurements to reduce unplanned power failure. Thus, studies have been done to model the TPC for electromagnetic transient analysis. Given the above, the work shows over some simulations, the ferroresonance is one of the phenomena that should be avoided on a TPC, since the secondary voltage of the transformer becomes destructive to electrical equipment. Another aspect analyzed in this work is the operation of circuit breakers and their effects on the secondary voltage of a TPC. All simulations were performed both in ATPDraw as in PSpice for a Coupling Capacitive Voltage Transformer of 138 kV.

**Keywords:** Power electric system, electromagnetic transients, coupling capacitor voltage transformer, ATPDraw, PSpice.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - (a) Esquema de transformador de potencial do tipo indutivo; (b) Esquema de um transformador do tipo capacitivo (Carvalho Jr., 2008). .....	18
Figura 2 - Diagrama de TPC (Lachman, 2007). .....	19
Figura 3 - Modelo de TPC adotado para estudos de transitórios eletromagnéticos. ....	21
Figura 4 - Modelo de TPC de 138 kV (Kezunovic et al, 1992). ....	28
Figura 5 - Modelo de TPC referenciado ao primário no ambiente ATPDraw. ....	29
Figura 6 - Modelo de TPC referenciado ao primário no ambiente PSpice. ....	29
Figura 7 - Tensão no secundário do TPC: ATPDraw. ....	30
Figura 8 - Tensão no secundário do TPC: Pspice. ....	30
Figura 9 - Esquema utilizado para ensaio de ferroressonância no TPC. ....	31
Figura 10 - Circuito representativo do TPC para ensaio de ferroressonância com CSF: ATPDraw. ....	32
Figura 11 - Circuito representativo do TPC para ensaio de ferroressonância sem CSF: ATPDraw. ....	32
Figura 12 - Tensão secundária do TPC com CSF: ATPDraw. ....	32
Figura 13 - Tensão secundária do TPC sem CSF: ATPDraw. ....	33
Figura 14 - Circuito representativo do TPC para ensaio de ferroressonância com CSF: PSpice. ....	33
Figura 15 - Circuito representativo do TPC para ensaio de ferroressonância sem CSF: PSpice. ....	34
Figura 16 - Tensão secundária do TPC com CSF: PSpice. ....	34
Figura 17 - Tensão secundária do TPC sem CSF: PSpice. ....	35
Figura 18 - Esquema utilizado para medição da tensão transitória do TPC devido a operação de fechamento seguida de abertura de um disjuntor conectado no lado da tensão intermediária. ....	35
Figura 19 - Esquema utilizado para medição da tensão transitória do TPC devido a operação de fechamento seguida de abertura de um disjuntor conectado no lado da tensão intermediária. ....	36
Figura 20 - Circuito utilizado para medir tensão transitória do TPC devido a manobra em um disjuntor conectado ao lado da tensão intermediária: ATPDraw. ....	36
Figura 21 - Tensão secundária em TPC após manobra em disjuntor conectado ao lado da tensão intermediária: ATPDraw. ....	37
Figura 22 - Circuito utilizado para medir tensão transitória do TPC devido a manobra em um disjuntor conectado ao lado da tensão intermediária: PSpice. ....	37
Figura 23 - Tensão secundária em TPC após manobra em disjuntor conectado ao lado da tensão intermediária: PSpice. ....	38

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP	– <i>Alternative Transient Program</i>
C	– Capacitor
CCVT	– <i>Coupling Capacitor Voltage Transformer</i>
CSF	– Circuito Supressor de Ferroressonância
EMTP	– <i>Electromagnetic Transient Program</i>
F	– Faraday
FCR	– Fator de Correção de Relação
FCT	– Fator de Correção de Transformação
FDR	– Filtro Digital Recursivo
H	– henry
Hz	– hertz
IEC	– <i>International Electrotechnical Commission</i>
N	– Relação de espiras do transformador
L	– Indutância
OrCAD	– <i>Oregon Computer Aided Design</i>
PSPICE	– <i>Personal Computer Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis</i>
RTP	– Relação de Transformação de Potencial nominal
RTR	– Relação de Transformação de potencial Real
TOP	– <i>The Output Processor</i>
TP	– Transformador de Potencial
TPC	– Transformador de Potencial Capacitivo
TPI	– Transformador de Potencial Indutivo
TPR	– Transformador de Potencial Resistivo
V	– volt
$V_p$	– Tensão aplicada ao primário do Transformador de Potencial
$V_s$	– Tensão de saída do Transformador de Potencial

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\emptyset$	– Fluxo magnético
$\varepsilon$	– Erro de relação
$\gamma$	– Erro de ângulo de fase
$\omega$	– Frequência angular
$\Omega$	– ohm

# SUMÁRIO

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract .....	viii
Lista de Ilustrações.....	ix
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	x
Lista de Símbolos .....	xi
Sumário .....	xii
1 Introdução.....	13
1.1 Objetivos.....	13
1.2 Estrutura do Trabalho .....	14
2 Fundamentação Teórica.....	15
2.1 Transformadores de Potencial.....	15
2.1.1 Erros dos Transformadores de Potencial .....	16
2.1.2 Classe de Exatidão.....	16
2.1.3 Classificação dos Transformadores de Potencial.....	17
2.2 Histórico dos Transformadores de Potencial Capacitivos.....	18
2.3 Elementos dos Transformadores de Potencial Capacitivos.....	19
2.3.1 Divisor de Tensão Capacitivo.....	19
2.3.2 Reator de Compensação e Transformador de Potencial Indutivo .....	20
2.3.3 Circuito Supressor de Ferroressonância (CSF).....	20
2.4 Modelo de TPC para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos .....	21
3 Revisão bibliográfica.....	22
4 Ferramentas de simulação .....	24
4.1 ATPDraw .....	24
4.2 PSpice .....	25
5 Simulações e Resultados .....	28
5.1 Modelagem do TPC de 138 kV.....	28
5.2 Ensaio de Ferroressonância.....	31
5.2.1 Resultados utilizando ATPDraw .....	31
5.2.2 Resultados Utilizando o Pspice .....	33
5.2.3 Análise dos Resultados .....	35
5.3 Manobra no Lado da Tensão Intermediária do TPC .....	35
5.3.1 Resultados Utilizando ATPDraw .....	36
5.3.2 Resultados utilizando Pspice .....	37
5.3.3 Análise dos Resultados .....	38
6 Conclusão .....	39
7 Referências Bibliográficas.....	40

# 1 INTRODUÇÃO

Os transformadores de potencial capacitivos (TPC) são utilizados com bastante sucesso em sistemas de potência, como uma forma apropriada e econômica de transformar tensões de transmissão em tensões toleráveis pelos instrumentos de proteção e medição. No entanto, a relação de transformação entre o primário e o secundário é ajustada pelo fabricante do TPC somente para a frequência fundamental do sistema. Sendo assim, os sinais medidos no terminal secundário têm precisão apenas para uma faixa de frequência próxima à fundamental.

Dessa forma, os TPC podem apresentar erros na presença de distúrbios no sistema elétrico, como manobras de linhas e curtos-circuitos, o que pode comprometer as medições de tensão. Este é um problema comum enfrentado por grande parte de empresas nacionais e internacionais do setor de geração e transmissão de energia elétrica.

Em regime transitório, os TPC geram certos problemas para os relés de distância. Durante uma falta na linha de transmissão, quando a tensão primária entra em colapso e a energia armazenada nos capacitores e indutores precisa ser dissipada, o TPC gera transitórios severos que possuem amplitude e duração significantes que afetam o desempenho dos relés de proteção (KASZTENNY et al., 2000).

Na prática, sabe-se que a resposta transitória dos TPC inclui componentes de frequência não presentes no sinal de tensão a ser medido, podendo, por consequência, levar o relé a operar de forma inadequada (PAJUELO, 2006).

Portanto, estudos relacionados à correção dinâmica da tensão secundária do TPC com o intuito de torná-la uma réplica perfeita de sua tensão primária são de extrema relevância para o setor elétrico.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo avaliar a resposta transitória dos transformadores de potencial capacitivos a partir de estudos e simulações de manobra e ferroressonância.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além deste capítulo introdutório, este trabalho está organizado de acordo com a seguinte estrutura:

- No capítulo 2, apresenta-se uma breve introdução sobre os transformadores de potencial, em especial sobre os TPC, principal foco deste trabalho.
- No capítulo 3 encontra-se uma revisão bibliográfica sobre os principais trabalhos que abordam o tema TPC.
- No capítulo 4 apresenta-se a fundamentação sobre os métodos de análises utilizados. Um breve histórico sobre cada um dos softwares é mostrado, bem como uma breve introdução sobre cada uma das ferramentas utilizadas.
- No capítulo 5 são apresentadas as simulações realizadas e os resultados encontrados.
- Por fim, no capítulo 6, é apresentada a conclusão referente ao trabalho e as possíveis melhorias que podem ser implementadas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais sobre os transformadores de potencial, especialmente sobre os do tipo capacitivos, mostrando a funcionalidade de cada elemento que os constituem, breve histórico e sua modelagem para estudos sobre transitórios eletromagnéticos.

### 2.1 TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

Os transformadores de potencial normalmente são constituídos de dois enrolamentos elétricos, circuito primário e secundário, ambos sobre um núcleo magnético. Esses transformadores operam com o mesmo princípio de funcionamento dos transformadores de força, baseado na indução eletromagnética que ocorre entre os dois circuitos por meio de um fluxo magnético mútuo.

A lei de indução de Faraday é a base do princípio de operação dos transformadores de potencial. De acordo com esta lei, quando o enrolamento primário é conectado em paralelo com a alta tensão a ser medida, é gerado um fluxo magnético no núcleo  $\Phi_c(t)$ , fazendo com que uma força eletromotriz auto induzida apareça no primário conforme equação abaixo (HAYT JR; BUCK 2001):

$$u_1(t) = N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} = N_1 \cdot \frac{d\Phi_c(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Este fluxo magnético é guiado através do núcleo magnético, havendo interação entre o circuito primário e secundário, resulta na indução de uma tensão no secundário, conforme equação (2.2).

$$u_2(t) = N_2 \cdot \frac{d\phi_c(t)}{dt} \quad (2.2)$$

Assim, é possível medir alta tensão no primário por meio da tensão secundária, esta é proporcionalmente reduzida e galvanicamente isolada da alta tensão. A tensão primária se relaciona com a tensão induzida no secundário pela relação expressa na equação (2.3).

$$u_2(t) = u_1(t) \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (2.3)$$

Os transformadores de potencial são fabricados de acordo com o grupo de ligação requerido, com as tensões primárias e secundárias necessárias e com o tipo de instalação.

#### 2.1.1 ERROS DOS TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

Ao reproduzirem a tensão submetida ao primário no secundário, dois tipos de erros são passíveis de ocorrer em transformadores de potencial: erro de relação de transformação e erro de ângulo de fase entre tensões do primário e secundário.

O erro de relação de transformação ocorre na utilização de TP para medição de tensão, quando a tensão primária não corresponde exatamente ao produto da tensão secundária pela relação de transformação de potencial nominal. Este erro pode ser corrigido por meio do fator de correção de relação.

#### 2.1.2 CLASSE DE EXATIDÃO

A classe de exatidão de um transformador de potencial é o erro máximo que pode surgir em sua saída, considerando o erro de relação e o erro de defasamento angular entre as tensões primária e secundária. Este erro é determinado pelo fator de correção de transformação (FCT).

Considera-se que um TP está dentro de sua classe de exatidão, quando os pontos determinados pelos fatores de correção de relação (FCR) e pelos ângulos de fase  $\gamma$  estão dentro do paralelogramo de exatidão.



São realizados ensaios em vazio e em carga, com valores determinados por norma, para se determinar a classe de exatidão de TP. Cada ensaio feito em cada carga padronizada é realizado para as seguintes condições: ensaio sob tensão nominal, ensaio a 90% da tensão nominal e ensaio a 110% da tensão nominal.

Os TP com classe de exatidão 0,1 são usados nas medições em laboratório onde é essencial uma exatidão elevada. Os TP com classe de exatidão 0,3 são utilizados em medições de energia elétrica com fins de faturamento, enquanto os TP das classes 0,6 e 1,2 são usados em proteção e medição de energia elétrica sem fins de faturamento.

### 2.1.3 CLASSIFICAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

Os transformadores de potencial são classificados em: transformadores de potencial do tipo indutivo (TPI); transformadores de potencial do tipo capacitivo (TPC); transformadores de potencial do tipo resistivo (TPR); transformadores de potencial do tipo misto.

Os transformadores de potencial do tipo misto e os TPR têm aplicações restritas em laboratórios para medição de impulsos ou tensão contínua. Os TPI são utilizados em sistemas com tensões compreendidas entre 600 V e 69 kV. Já os TPC são amplamente usados em sistemas com tensões superiores a 138 kV, por serem mais economicamente viáveis que os TPI. Na Figura 1 são mostrados os esquemas de um TPI e um TPC.

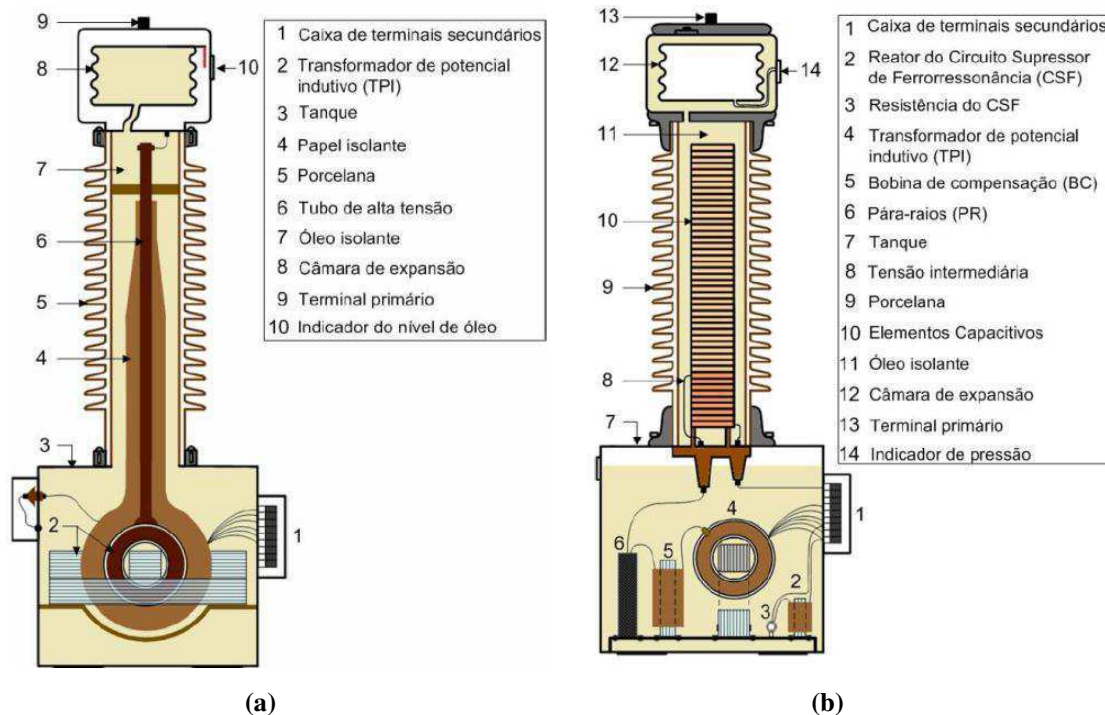


Figura 1 - (a) Esquema de transformador de potencial do tipo indutivo; (b) Esquema de um transformador do tipo capacitivo (Carvalho Jr., 2008).

## 2.2 HISTÓRICO DOS TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVOS

Na década de 1930, utilizavam-se os divisores de potencial capacitivos em sistemas de potência para alimentar instrumentos indicadores e dispositivos de proteção. Todavia, esses equipamentos eram inconvenientes do ponto de vista do limite de potência para a carga a ser alimentada (SWEETANA & FLUGUM, 1966). Posteriormente, passou-se a usar os divisores de capacitivos acoplados a um transformador com o intuito de aumentar a variedade de cargas possíveis de serem alimentadas.

Apesar da inclusão do transformador ter permitido a elevação da tensão intermediária do divisor, ainda havia restrição do equipamento para medição por não proporcionar o ajuste necessário para amortizar significativamente o efeito da coluna capacitiva. Esse problema foi solucionado com o advento da transmissão de grandes quantidades de energia elétrica em níveis de tensão acima de 138 kV, fazendo com que os fabricantes produzissem TPC para medição, que foi conseguido com modificações

internas no equipamento, de forma a assegurar que a tensão no secundário fosse uma réplica da tensão no primário (SWEETANA & FLUGUM, 1966).

Essa mudança permitiu a utilização dos TPC em detrimento dos transformadores de potencial indutivo (TPI) em sistemas de potência que operam em níveis de tensão iguais ou superiores a 138 kV, visto que a partir deste nível de tensão a utilização dos TPI torna-se inviável devido ao seu alto custo e grandes dimensões (SWEETANA & FLUGUM, 1966; D'AJUZ et al., 1985).

## 2.3 ELEMENTOS DOS TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVOS

A figura abaixo mostra o diagrama esquemático do TPC, neste esquema são representados os seguintes componentes que constituem o equipamento:

- Divisor de tensão capacitivo;
- Reator de compensação;
- Transformador de potencial indutivo;
- Circuito supressor de ferroressonância.

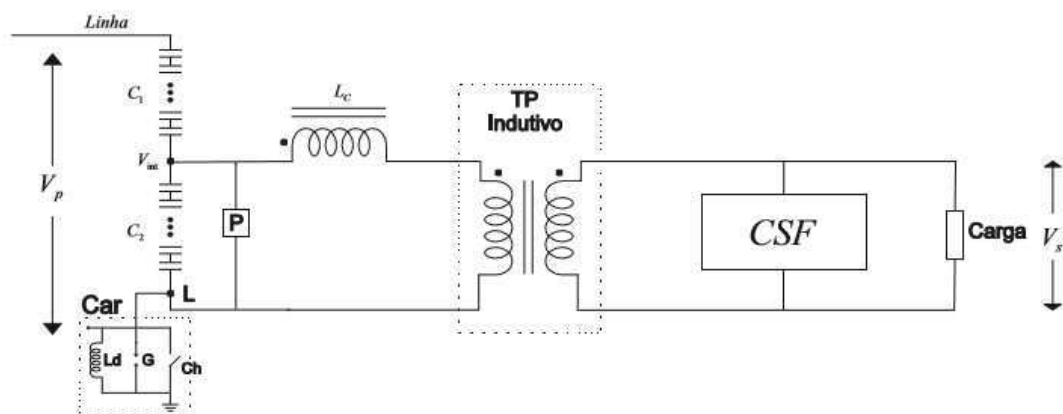


Figura 2 - Diagrama de TPC (Lachman, 2007).

### 2.3.1 DIVISOR DE TENSÃO CAPACITIVO

O divisor de tensão capacitivo tem como função reduzir a tensão do sistema para uma tensão intermediária na faixa entre 5 e 20 kV. O divisor é constituído por dois conjuntos de elementos capacitivos,  $C_1$  e  $C_2$  ligados em série, com derivação intermediária  $b$  correspondente a uma tensão que alimenta o primário de um TPI e este

fornecerá uma tensão secundária aos instrumentos de medição e proteção inseridos no circuito.

### 2.3.2 REATOR DE COMPENSAÇÃO E TRANSFORMADOR DE POTENCIAL INDUTIVO

O reator de compensação é uma reatância ajustável e tem por objetivo manter a tensão no secundário em fase com a tensão do sistema. Esse reator é colocado em série com o primário do TPI, de modo que o conjunto tenha uma reatância  $\omega L_C$  que satisfaça a seguinte igualdade:

$$\omega L_C = \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)} \quad (2.8)$$

Em geral os TPC são construídos com derivações acessíveis para realização de pequenos ajustes. Os ajustes de ângulo de fase e de amplitude são realizados no reator de compensação e nos TAP do transformador indutivo, respectivamente.

O reator de compensação e o transformador intermediário possuem núcleo de ferro. Sendo assim, além de introduzirem perdas, estes dispositivos podem produzir o fenômeno de ferroressonância devido a não linearidade dos núcleos de ferro.

### 2.3.3 CIRCUITO SUPRESSOR DE FERRORESSONÂNCIA (CSF)

Em certas situações, como em um religamento sem sucesso de uma linha de transmissão ou após a eliminação de um curto circuito no secundário de um TPC, o fenômeno de ferroressonância pode surgir. Esse fenômeno deve ser evitado em um TPC, pois informações falsas poderiam ser transferidas aos instrumentos de medição, proteção ou controle, assim como sobretensões e sobrecorrentes destrutivas.

Para evitar tal problema, geralmente utiliza-se um circuito supressor de ferroressonância (CSF) nos enrolamentos secundários do TPI. Os CSF são classificados em ativos e passivos. São denominados passivos quando constituídos por resistores, indutores ou capacitores. Já os ativos são constituídos por dispositivos semicondutores.

## 2.4 MODELO DE TPC PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Em KEZUNOVIC *et al.* (1992) foi elaborado um modelo de TPC a partir de técnicas experimentais para medição dos parâmetros do TPC em laboratório e foram realizados estudos de sensibilidade para identificação da influência dos vários parâmetros na curva de resposta em frequência do equipamento.

O circuito equivalente simplificado, após a análise de sensibilidade da curva de resposta em frequência aos parâmetros do TPC, proposto por KEZUNOVIC *et al.* (1992) está mostrado na figura abaixo.

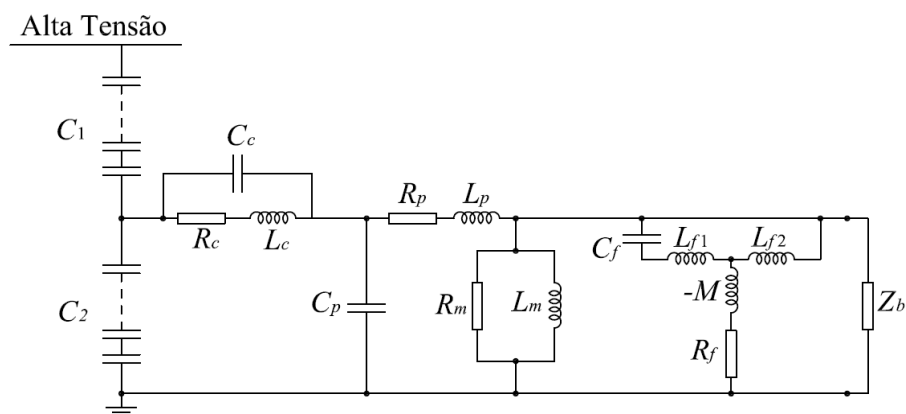


Figura 3 - Modelo de TPC adotado para estudos de transitórios eletromagnéticos.

Em regime permanente a tensão secundária do TPC é uma réplica de sua tensão primária. Porém, na ocorrência de distúrbios severos no primário do TPC, o sistema de proteção pode ser induzido a atuar de forma inadequada. Assim, tensões transitórias originadas no TPC podem afetar o tempo de atuação da proteção, causando sérios riscos à segurança do sistema.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Alguns modelos de TPC para estudos de transitórios eletromagnéticos são encontrados na literatura, porém, estes não são completamente adequados. Os estudos realizados até agora mostram a complexidade decorrente da dificuldade de obtenção dos parâmetros do modelo, principalmente em elevadas frequências, o que torna necessária a realização de medições em laboratório de resposta em frequência e de sobretensões transitórias para a validação dos resultados (KOJOVIC et al., 1994; IRAVANI et al., 1998; TZIOUVARAS et al., 2000; FERNANDES JR., 2003).

Um dos primeiros trabalhos que propôs um circuito equivalente para representar o TPC em estudos de transitórios foi desenvolvido por SWETANA (1971). Nesse trabalho, o circuito equivalente do TPC apresenta como vantagem sua validação em ensaios de laboratório, permitindo a identificação de alguns parâmetros que afetam a resposta transitória do equipamento. Entretanto, o trabalho apresenta uma limitação relacionada ao fato de o circuito equivalente do TPC ser válido somente para análise de transitório em situações onde não ocorra saturação dos componentes que contêm núcleo de ferro.

LUCAS et al. (1992) propuseram modelos de transformadores para instrumentos que foram levados em conta o comportamento não linear do núcleo magnético desses equipamentos. Porém o estudo não atribui igual importância aos demais componentes do conjunto completo do TPC quando comparado com o núcleo magnético do TP indutivo.

A partir da necessidade de um melhor entendimento da influência dos TPC em relação ao comportamento da proteção, KEZUNOVIC et al. (1992) usaram técnicas experimentais para medir os parâmetros lineares do TPC. Eles mostraram, através da análise de sensibilidade, que o número de parâmetros do modelo pode ser reduzido. Entretanto é preciso desmontar o TPC para fazer a medições. Dois anos depois, o mesmo grupo de pesquisa, coordenado por Kojovic, desenvolveu um método de medição de resposta em frequência no lado secundário do TPC para estimar os parâmetros de seu circuito equivalente sem precisar desmontar o equipamento. Todavia, a metodologia foi validada somente para frequência até 1 kHz (KOJOVIC et al., 1994). A limitação de ambos os trabalhos consiste na pouca importância dada aos modos ressonantes da curva

de resposta em frequência do TPC e a não inclusão dos efeitos de saturação do núcleo magnético do TPC.

IRAVANI et al. (1998) investigaram a sensibilidade da resposta transitória do TPC a alguns parâmetros a partir de simulações digitais. Porém tais resultados não são comparados com medições em laboratório. Além disso, não é apresentada uma metodologia para estimação dos parâmetros lineares do TPC.

TZIOUVARAS et al. (2000) analisaram a sensibilidade para mostrar a influência de alguns parâmetros de TPC na sua curva de resposta em frequência e os resultados confirmaram a importância da inclusão de capacitâncias parasitas no modelo do TPC. Todavia, a falta de resultados de medições de tensões transitórias para uma avaliação mais precisa do modelo do TPC consiste numa limitação do trabalho.

Em SILVA (2014) foi apresentado um novo método para projeto de filtros digitais recursivos para reduzir o impacto da resposta transitória do TPC. O método é baseado apenas nos dados de resposta em frequência do equipamento objeto de estudo e na função de transferência de um modelo de TPC consolidado para estudos de transitórios eletromagnéticos. O método proposto possibilita realizar estudos mais exatos em sistemas elétricos de potência e tem maior aplicabilidade do que alguns trabalhos reportados na literatura, isto porque a largura de banda de atuação dos FDR é de até 10 kHz e por ser uma técnica generalista.

## 4 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

As ferramentas de simulação utilizadas neste trabalho foram os softwares ATPDraw e o PSpice. Neste capítulo é feita uma breve introdução de ambas as ferramentas computacionais.

### 4.1 ATPDRAW

O programa de transitórios eletromagnéticos da Bonneville Power Administration (BPA), denominado de EMTP (*Electromagnetic Transients Program*), foi desenvolvido por Herman W. Dommel na década de 1960, com base no trabalho de Frey e Althammer (Brown Boveri, Switzerland), em Munique, Alemanha.

O programa inicial só permitia a modelagem de circuitos monofásicos através de modelos de indutâncias, resistências, capacitâncias e linhas sem perdas, incluindo uma chave e uma fonte de excitação.

ATPDraw™ é uma marca registrada pela Norwegian University of Science and Technology, sediada na Noruega. O desenvolvedor do software é Dr. Hans Kristian Høidalen da cidade de Trondheim, Noruega. O desenvolvimento do programa vem sendo financiado principalmente pela Bonneville Power Administration em Portland, Oregon, EUA, com a *Pacific Engineering Corporation* atuando na coordenação de projeto.

O ATPDraw é um software livre, derivado do ATP, possuindo uma série de aplicações e vantagens. É possível modelar adequadamente os sistemas elétricos, reproduzindo o mais fielmente possível a configuração real das redes, além de apresentar o diagrama unifilar em um ambiente gráfico. O software possui recursos para modelar tanto os sistemas de transmissão como os de distribuição em uma mesma plataforma, permitindo as análises de transitórios eletromagnéticos para diferentes configurações operacionais.

O ATP permite a simulação para rede polifásicas, utilizando a matriz de admitância de barras. A formulação matemática que constitui o programa se baseia, para elementos com parâmetros distribuídos, no método das características (método de Bergeron) e para parâmetros concentrados na regra de integração trapezoidal. Durante a



solução são usadas técnicas de esparsidade e de fatoração triangular otimizada de matrizes.

Ao longo dos anos o programa sofreu inúmeras evoluções, dentre elas destacam-se as facilidades gráficas como o pré processador gráfico e o gráfico PLOTXY, os quais permitem trabalhar utilizando somente o ambiente Windows. Este programa é uma ferramenta de grande importância na realização de estudos em regime permanente e, principalmente, regime transitório em sistemas de potência.

A diversidade de opções de modelagem que o ATPDraw oferece e a extensa variedade de estudos que permite realizar, fazem com que o usuário seja responsável por uma série de decisões, que vão desde a escolha do passo de integração mais adequado até a análise dos resultados obtidos.

O intervalo de integração deve ser selecionado de acordo com o fenômeno que está sendo investigado. Para simulações envolvendo altas frequências, o passo de integração deve ser pequeno, enquanto que fenômenos de baixas frequências podem ser investigados com passo de integração maiores. Outro parâmetro que depende do fenômeno em análise é o tempo máximo de simulação.

O estudo dos impactos sofridos pelo sistema quando submetido a uma manobra é um dos mais importantes objetivos da análise transitória. Estes fenômenos causam distúrbios de grande magnitude, acarretando a geração e propagação de surtos no sistema. A utilização do ATPDraw na simulação destes efeitos de transitórios eletromagnéticos mostra-se muito eficiente e relevante no conhecimento do comportamento do circuito estudado.

## 4.2 PSPICE

O programa SPICE foi desenvolvido por Laurence W. Nagel na Universidade da Califórnia e teve sua primeira versão concluída em 1972. Mais de cem cópias do programa foram fornecidas gratuitamente a outras universidades e a diversas indústrias eletrônicas. Após acompanhamento do autor junto a esses usuários percebeu-se a necessidade de aperfeiçoamentos no programa, o que culminou na segunda versão do programa, o SPICE 2.

O programa SPICE foi originalmente feito em linguagem FORTRAN IV, contando com quase 10000 comandos. A Universidade da Califórnia disponibilizou, a partir de 1980, a versão SPICE3, cujo programa-fonte pode ser fornecido em linguagem

“C” para universidades e centros de pesquisa. Este programa foi extensivamente utilizado desde então e é a base de diversos programas comerciais.

O simulador PSpice fundamenta-se no programa Spice para análise de circuitos eletrônicos, o que não impede de usá-lo para analisar fenômenos do sistema elétrico de potência, como propõe este trabalho.

A versão utilizada funciona num ambiente chamado OrCAD (*Oregon Computer Aided Design* – Projeto Assistido por Computador) desenvolvido no Oregon. Neste ambiente, além do simulador PSpice, funcionam também o *Schematics* e o *Probe*.

O *Schematics* permite desenhar o esquema do circuito a ser simulado, ao invés da tradicional entrada de dados no Spice através de um ficheiro de texto “\*.cir” com a descrição do circuito ou rede elétrica. Neste arquivo “\*.cir” criado após o desenho do esquema do circuito, constam as especificações de todos os ramos bem como a forma que estão interligados.

O *Probe* permite criar gráficos a partir de dados obtidos dos ficheiros de saída do PSpice (\*.dat). Este programa já estava disponível, juntamente com o PSpice antes de existir a interface gráfica (*Schematics*).

Muitas são as possibilidades de simulação disponíveis no PSpice, dentre elas estão:

- Análise em corrente contínua: é possível realizar uma varredura do valor de uma fonte (de tensão ou de corrente) numa faixa de temperatura, do parâmetro de um modelo, ou parâmetro global. Os capacitores são considerados como circuitos abertos e os indutores como curtos-circuitos. É possível também verificar as análises de pequenos sinais de operação do circuito.
- Análise em corrente alternada: permite calcular a resposta em frequência de um circuito para pequenos sinais em uma determinada faixa de frequências. É possível verificar as características de ruído e de distorção de um circuito eletrônico.
- Análise transitória: permite obter a resposta de um circuito em função do tempo e equivale à análise feita com um osciloscópio, por isso é a mais utilizada, com o objetivo de obter a resposta de circuitos para sinais alternados ou pulsos e a análise de Fourier.

O intervalo de tempo entre cálculos do circuito é determinado pelo algoritmo de análise e não é constante. Por isso, define-se um intervalo máximo permitido. No entanto,

o intervalo de tempo entre o armazenamento de dados é constante. Desse modo, o PSpice faz a interpolação entre os valores calculados para obter os valores a serem armazenados.

Para os propósitos do presente trabalho, utilizou-se a análise transitória com tempo máximo de simulação e passo de integração iguais aos usados nas simulações feitas com o ATPDraw.

## 5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo serão mostradas as atividades desenvolvidas em ambos os softwares e os resultados alcançados. Para a apresentação dos resultados referentes ao ATP utilizou-se o software TOP, desenvolvido pela ElectrotekConcepts®, para leitura dos dados de simulação e visualização em forma de gráficos de alta resolução.

### 5.1 MODELAGEM DO TPC DE 138 kV

O circuito representativo do transformador de potencial capacitivo utilizado foi reportado em KEZUNOVIC et al (1992) e está mostrado na figura abaixo.

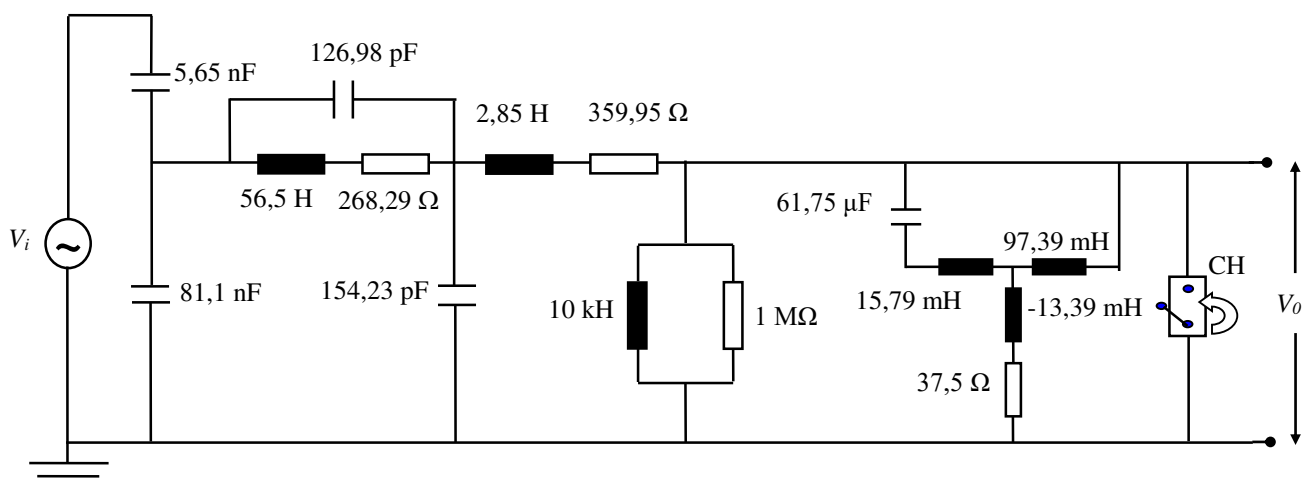


Figura 4 - Modelo de TPC de 138 kV (Kezunovic et al, 1992).

Considerando que a relação de espiras do transformador estudado é  $N = 41,7$ , o circuito equivalente acima mostrado foi referenciado ao primário e simulado em ambos os softwares. Os circuitos em seus respectivos ambientes são mostrados abaixo.

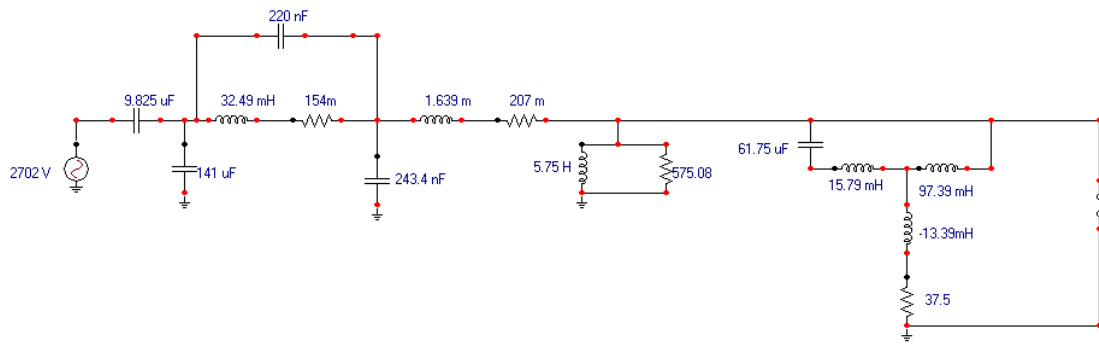


Figura 5 - Modelo de TPC referenciado ao primário no ambiente ATPDraw.

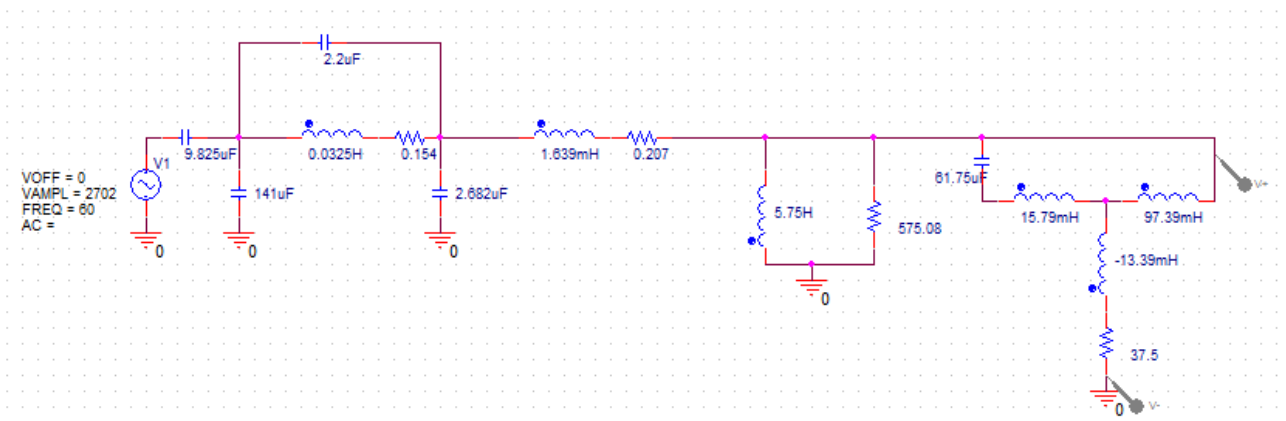


Figura 6 - Modelo de TPC referenciado ao primário no ambiente PSpice.

A tensão no secundário foi medida para avaliação da confiabilidade do circuito e os resultados são mostrados abaixo.

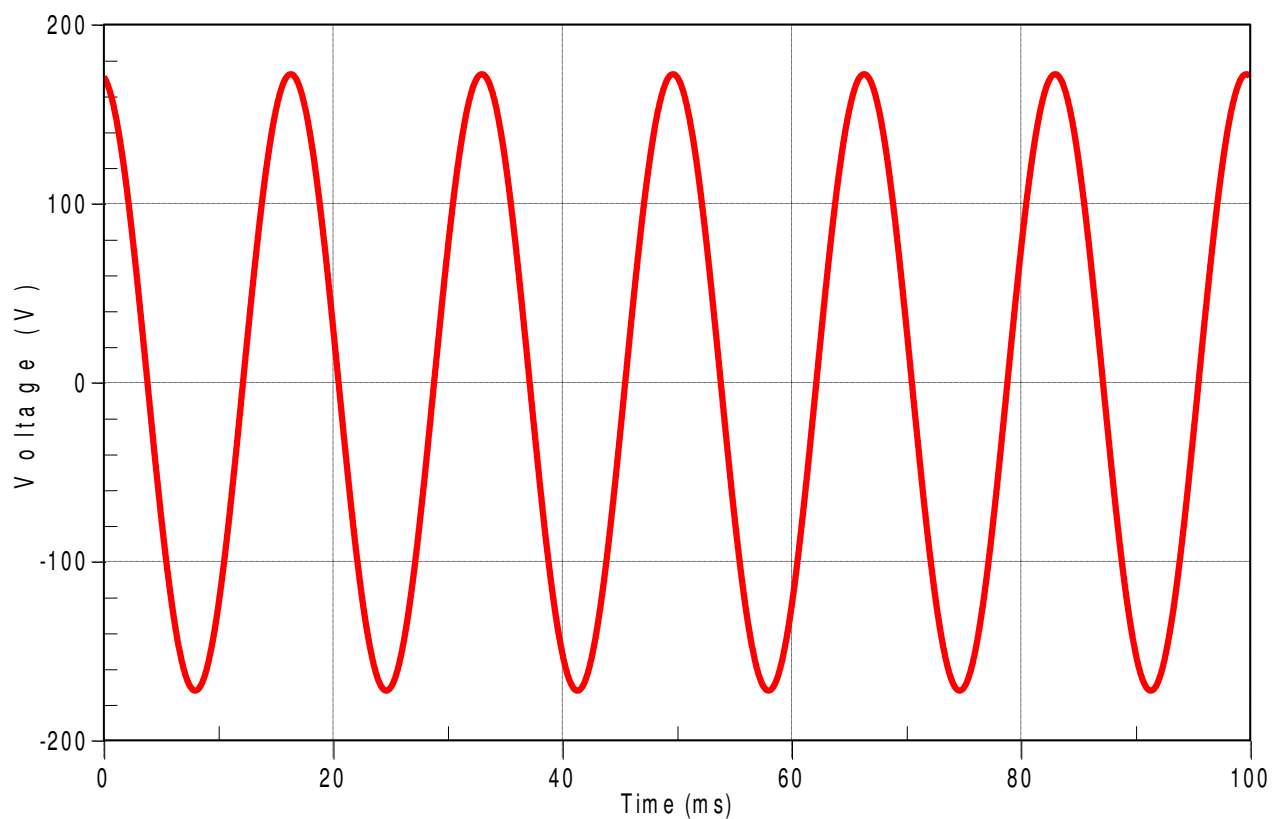


Figura 7 - Tensão no secundário do TPC: ATPDraw.

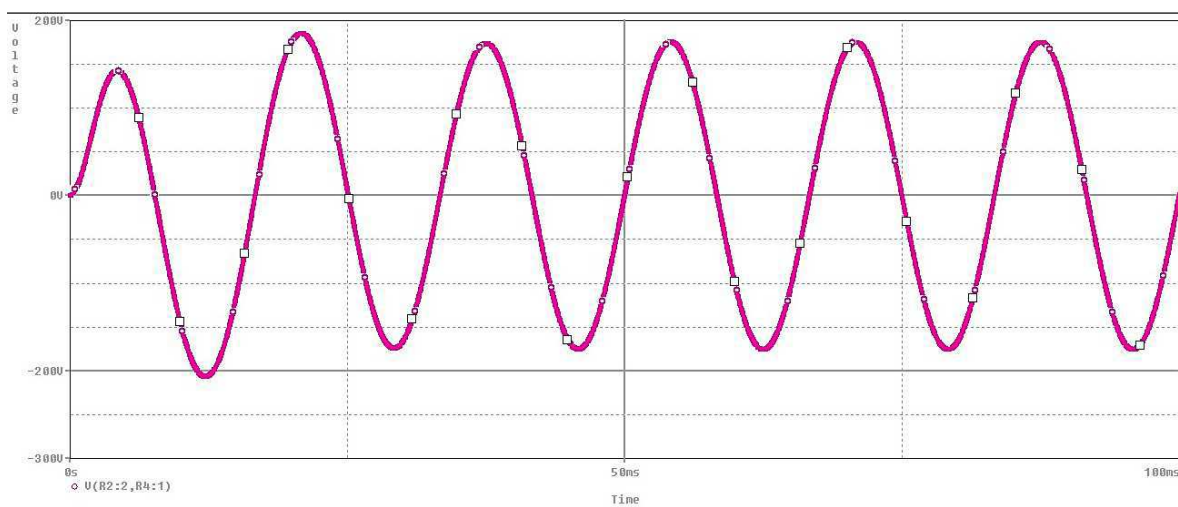


Figura 8 - Tensão no secundário do TPC:Pspice.

Estando ambas as simulações em concordância com a tensão esperada em um secundário de um TPC de 138 kV.

## 5.2 ENSAIO DE FERRORESSONÂNCIA

O ensaio de ferroressonância deve ser realizado tomando-se como base a Norma IEC 186 (IEC 186, 1969). Segundo a norma, o primeiro ensaio de ferroressonância em transformadores de potencial capacitivos estabelece que o equipamento deve ser energizado a 120% de sua tensão nominal em regime permanente, com carga nula no enrolamento secundário a ser curto-circuitado. O curto-circuito deve ser mantido por um tempo mínimo de 3 ciclos (60 Hz).

Esse ensaio consiste da operação de fechamento e abertura de uma chave CH conectada a um dos terminais secundário do TPC, conforme é mostrado na figura abaixo.

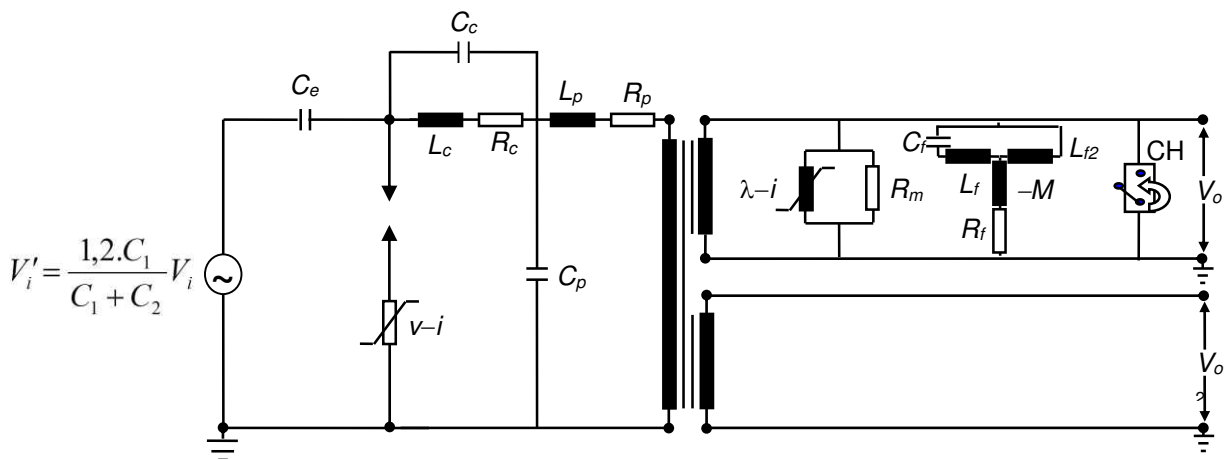


Figura 9 - Esquema utilizado para ensaio de ferroressonância no TPC.

Os dados desse circuito caracterizam-se por ter o curto-circuito, no secundário do TPC, iniciando no instante de 20 ms e mantido por um período de 70 ms, quando então o disjuntor será aberto para eliminar o curto. A fim de evidenciar visualmente a importância do circuito supressor de ferroressonância, as simulações foram realizadas com e sem o CSF.

### 5.2.1 RESULTADOS UTILIZANDO ATPDRAW

A representação do ensaio desenhada no ATPDraw é mostrada abaixo, para os casos com e sem circuito supressor de ferroressonância.

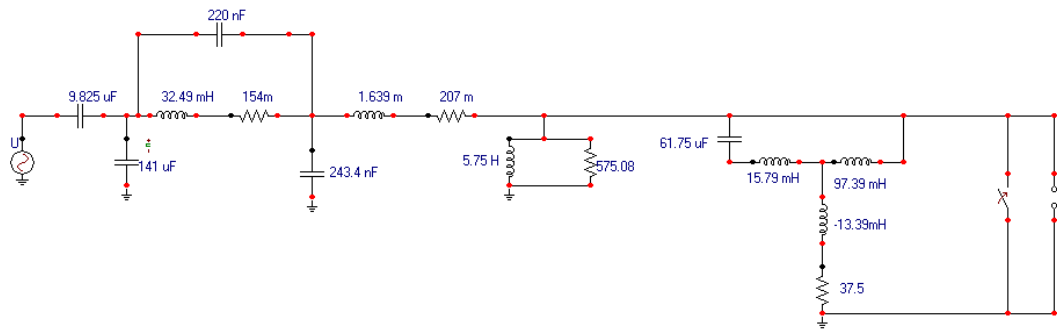


Figura 10 - Circuito representativo do TPC para ensaio de ferroressonância com CSF: ATPDraw.

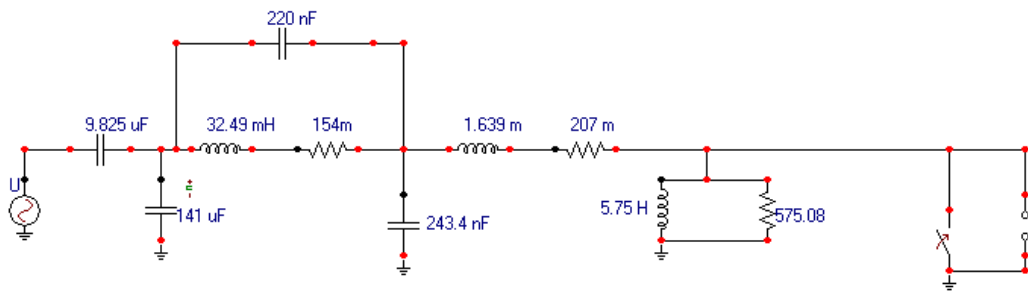


Figura 11 - Circuito representativo do TPC para ensaio de ferroressonância sem CSF: ATPDraw.

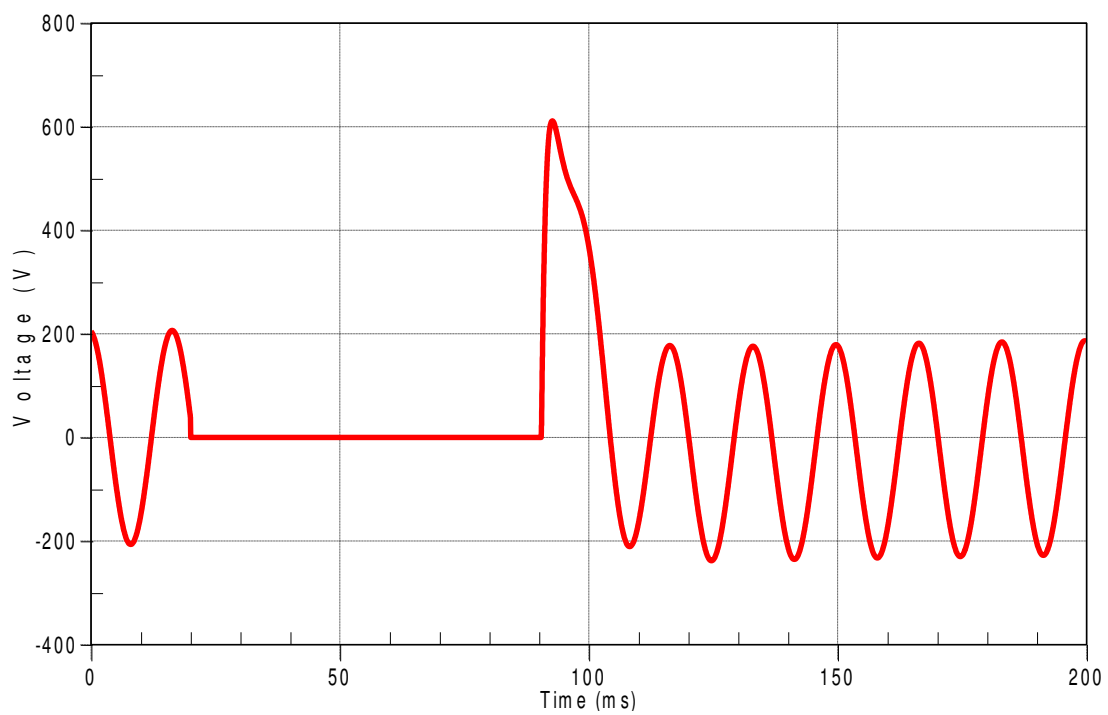


Figura 12 - Tensão secundária do TPC com CSF: ATPDraw.



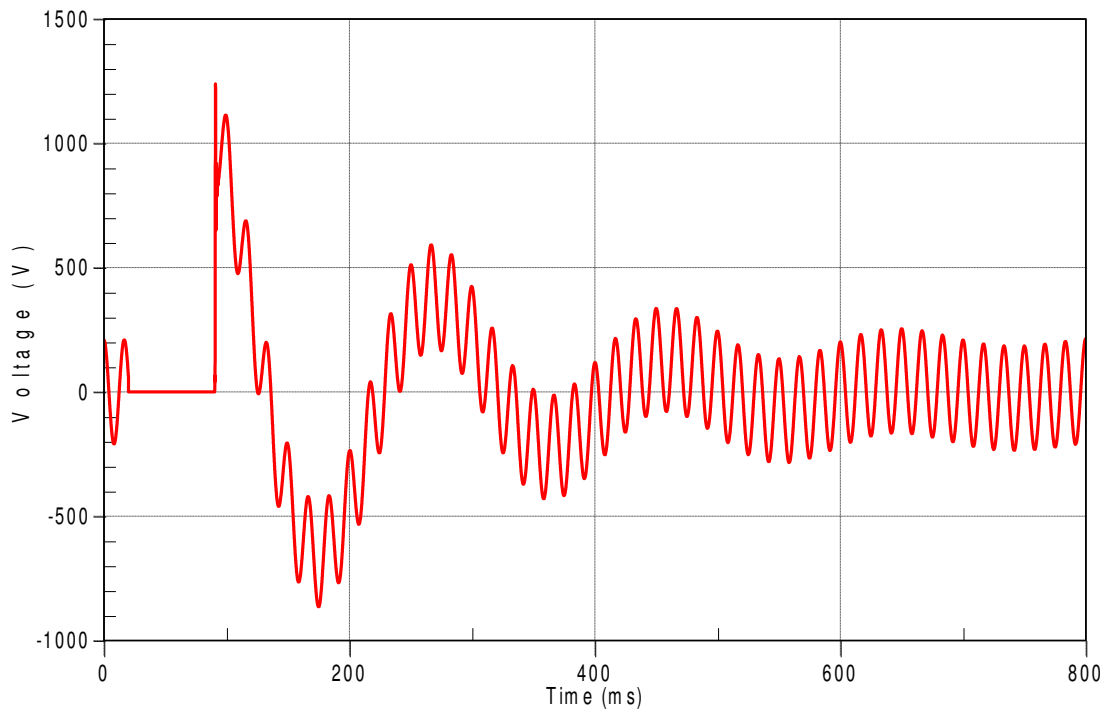


Figura 13 - Tensão secundária do TPC sem CSF: ATPDraw.

## 5.2.2 RESULTADOS UTILIZANDO O PSpICE

De forma semelhante ao uso do ATP, a representação do referido ensaio foi desenhada no ambiente do OrCAD Capture e está mostrada abaixo.

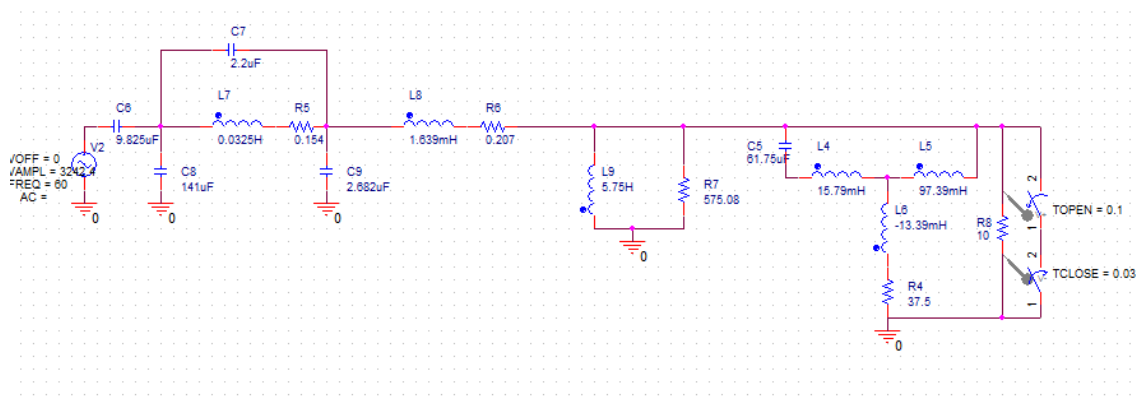


Figura 14 - Circuito representativo do TPC para ensaio de ferroressonância com CSF:PSpice.

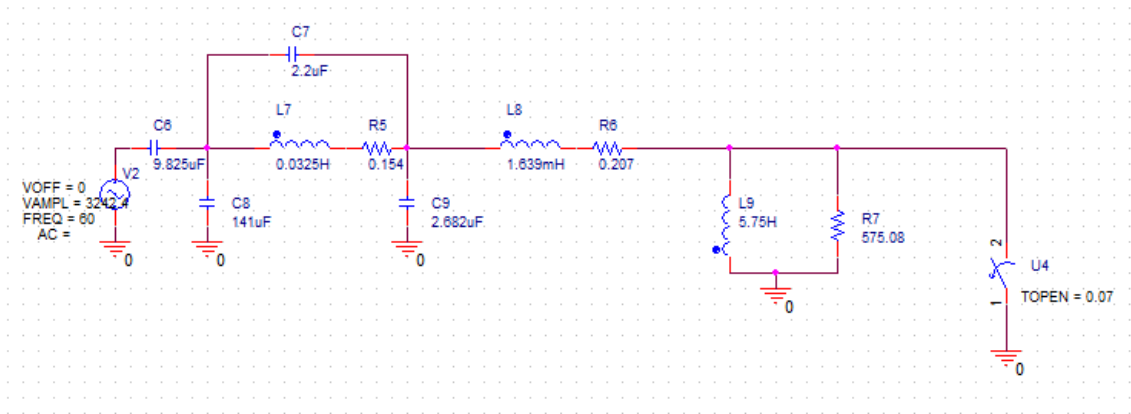


Figura 15 - Circuito representativo do TPC para ensaio de ferroressonância sem CSF:PSpice.

Por uma limitação do software, não foi possível reproduzir fielmente o ensaio para o caso sem o CSF, sendo assim, assumiu-se que o curto-circuito ocorreu no instante inicial de simulação. Os resultados são mostrados abaixo.

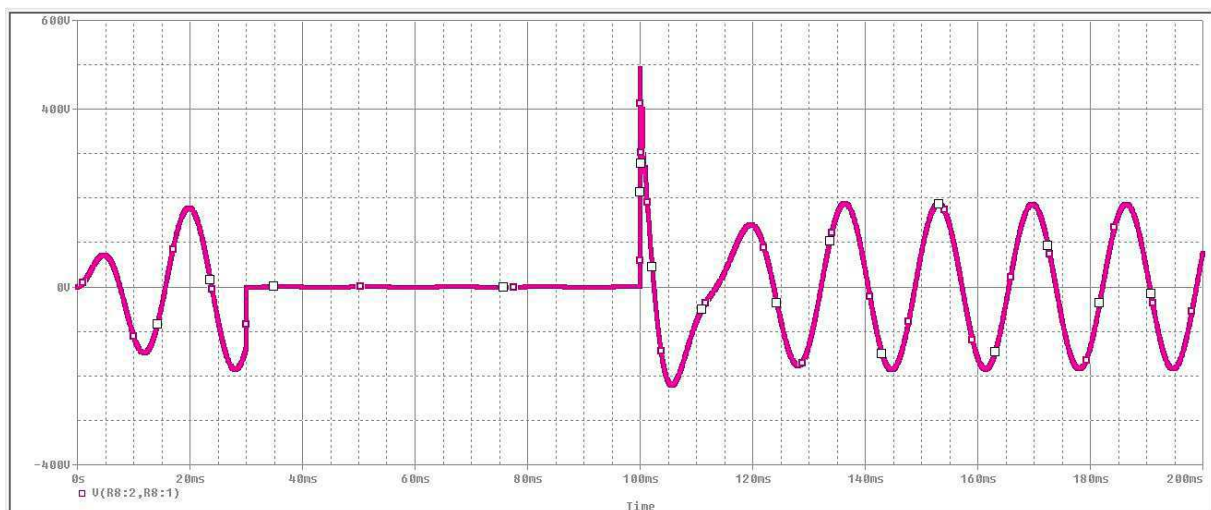


Figura 16 - Tensão secundária do TPC com CSF:PSpice.

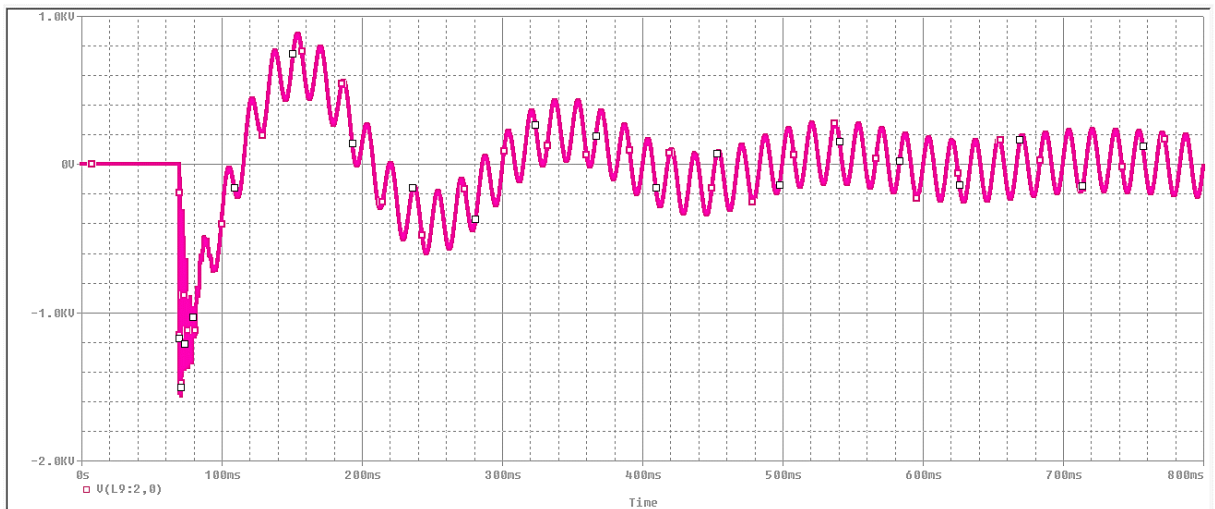


Figura 17 - Tensão secundária do TPC sem CSF:PSpice.

### 5.2.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando os resultados de ambos os softwares, é notório que após a eliminação do curto circuito no secundário do TPC com o circuito supressor de ferroressonância, a tensão passa por um breve período transitório e logo atinge o regime permanente. O mesmo não ocorre com o TPC sem o CSF, uma vez que a tensão passa por um longo período de transitório, atingindo o regime em um tempo muito longo de aproximadamente 800 ms.

### 5.3 MANOBRA NO LADO DA TENSÃO INTERMEDIÁRIA DO TPC

Para obter a tensão no secundário do TPC devido à manobra de um disjuntor conectado no lado da tensão intermediária, uma tensão de 17,4 kV rms foi aplicada ao disjuntor. Este, por sua vez, foi conectado à ligação em paralelo dos capacitores  $C_1$  e  $C_2$  da coluna capacitiva do TPC, de forma a obter uma tensão intermediária, conforme mostrado na figura abaixo. A resposta transitória no secundário do TPC foi medida durante a manobra de fechamento seguida de abertura do disjuntor. Nesta operação de manobra, o tempo em que o disjuntor permanece fechado é de aproximadamente 60 ms.

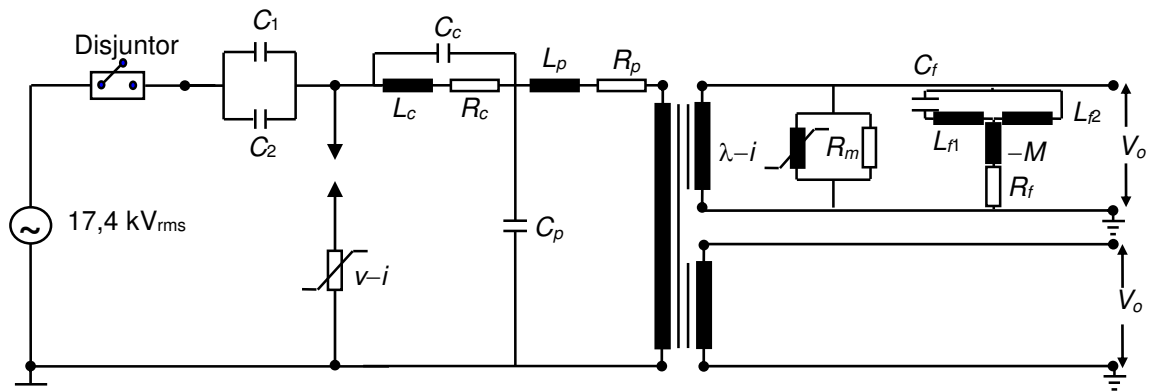


Figura 19 - Esquema utilizado para medição da tensão transitória do TPC devido a operação de fechamento seguida de abertura de um disjuntor conectado no lado da tensão intermediária

### 5.3.1 RESULTADOS UTILIZANDO ATPDRAW

O circuito modelado usando o ATPDraw é mostrado abaixo.

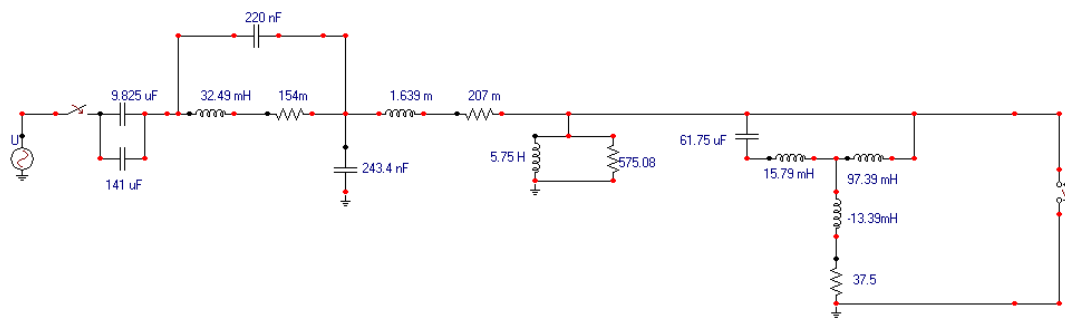


Figura 20 - Circuito utilizado para medir tensão transitória do TPC devido a manobra em um disjuntor conectado ao lado da tensão intermediária: ATPDraw.

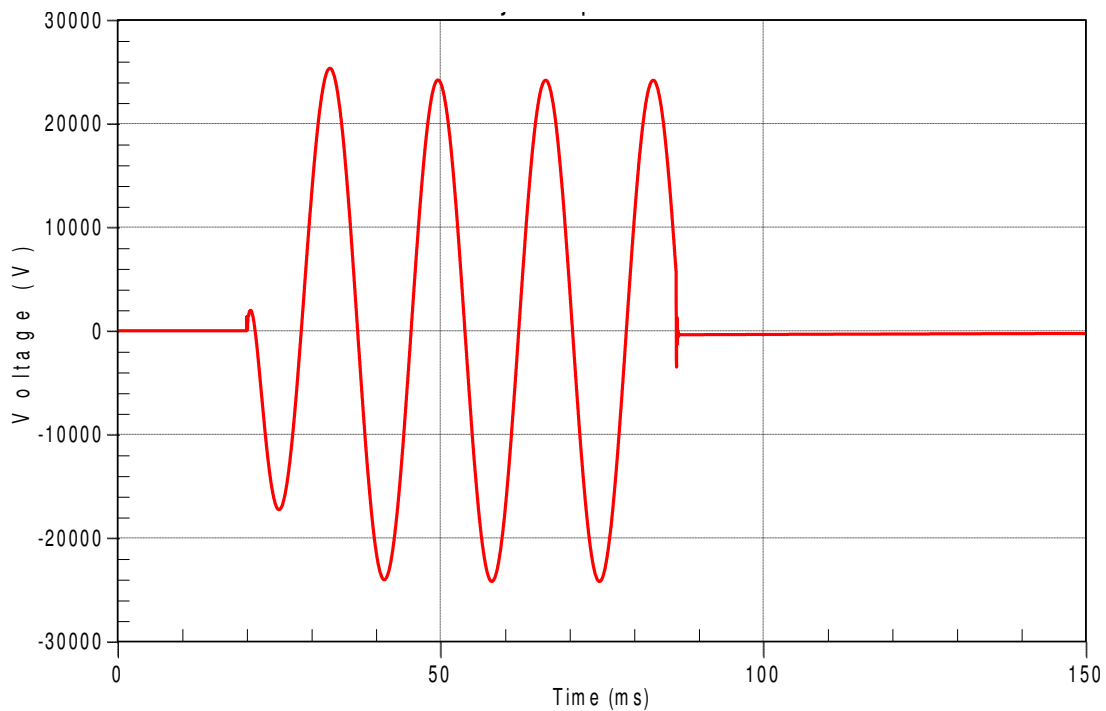


Figura 21 - Tensão secundária em TPC após manobra em disjuntor conectado ao lado da tensão intermediária: ATPDraw.

### 5.3.2 RESULTADOS UTILIZANDO PSPICE

O circuito modelado no Capture do OrCAD Pspice é mostrado abaixo.

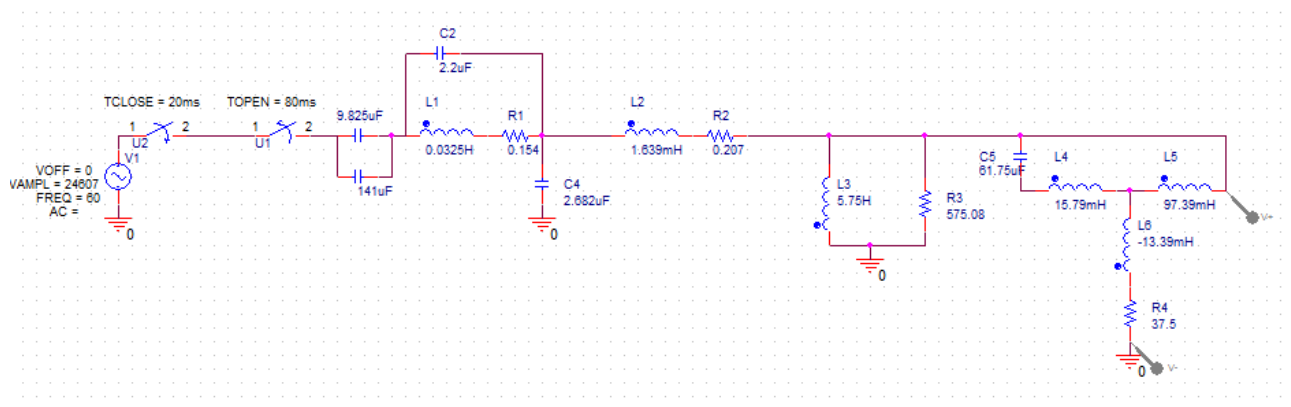


Figura 22 - Circuito utilizado para medir tensão transitória do TPC devido a manobra em um disjuntor conectado ao lado da tensão intermediária: PSpice.

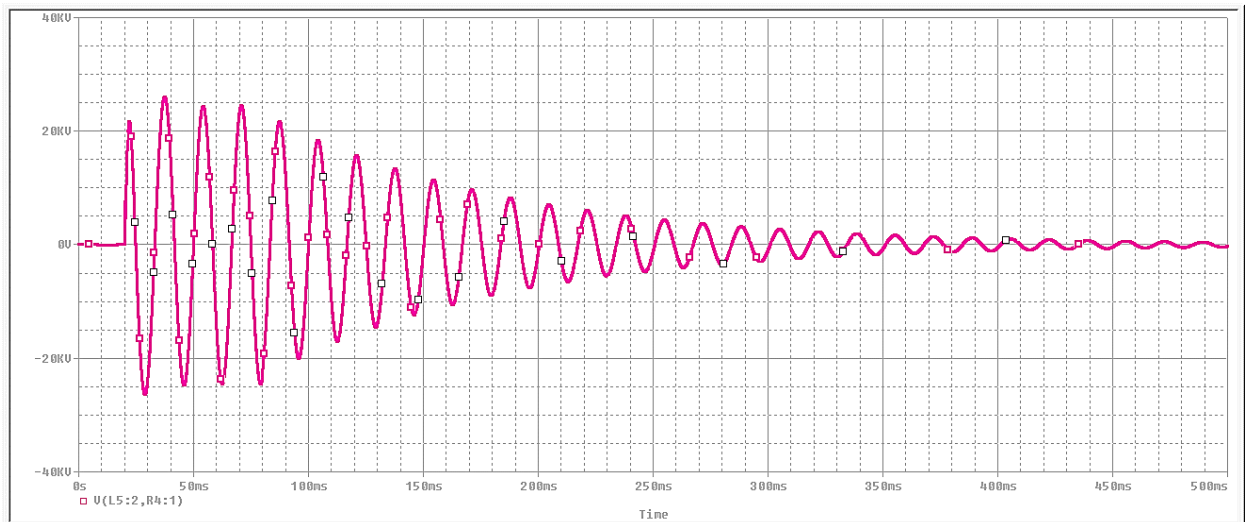


Figura 23 - Tensão secundária em TPC após manobra em disjuntor conectado ao lado da tensão intermediária: PSpice.

### 5.3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com esta configuração do circuito é perceptível como as ferramentas de análises podem fornecer resultados aparentemente distintos, porém ambos corretos. É notório que a tensão secundária passa por um regime transitório quando os contatos do disjuntor são fechados no instante de 20 ms e, após a abertura automática do disjuntor, a tensão tende a zero. A visualização deste fenômeno é bem mais clara analisando a resposta através do ATPDraw, pois a tensão tende a zero bem mais lentamente ao se analisar o gráfico gerado no PSpice.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou algumas simulações para estudo de transitórios eletromagnéticos em transformadores de potencial capacitivos.

O objetivo do trabalho foi demonstrar a importância do conhecimento prévio sobre o comportamento dos equipamentos elétricos inseridos no sistema de potência, em especial os TPC, frente à distúrbios que acontecem rotineiramente, estes podendo influenciar o sistema elétrico como um todo, caso a proteção não atue rapidamente.

Demonstrou-se que é possível o estudo de transitórios eletromagnéticos utilizando tanto o ATPDraw, programa apropriado para tais análises, quanto o PSpice, software largamente usado nos cursos de graduação em engenharia elétrica, principalmente para estudos de circuito eletrônicos.

A partir das simulações realizadas evidenciou-se a importância do circuito supressor de ferroressonância em transformadores de potencial capacitivos, visto que na ocorrência de uma falta no secundário do TPC, o CSF é necessário para restabelecer a tensão secundária nominal rapidamente.

Comprovou-se, a partir das simulações realizadas, que a ação de abertura e fechamento de disjuntores pode desencadear transitório eletromagnético nos TPC, sendo assim, deve ser executada de forma adequada.

Por questões operacionais não foi possível realizar a análise do TPC inserido em um sistema elétrico de potência para avaliação de seu desempenho na ocorrência de faltas. Esta é uma proposta para aperfeiçoar este trabalho.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATPDRAW version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista Users' Manual. Disponível em: <http://www.elkraft.ntnu.no/atpdraw/ATPDMan56.pdf>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2016.

CARVALHO Jr., A. V. *Interação Transitória entre Transformadores de Potencial Capacitivos e Linhas de Transmissão: Uma Contribuição para Minimizar Falhas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Agosto 2008.

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

FERNANDES Jr., D. *Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, dezembro 2003.

FILHO, J. A.; PEREIRA, M. P.; *Curso básico sobre a utilização do ATP*. 1996.

HAYT JR., W. H.; BUCK, J. A. *Engineering Electromagnetics*. 6. ed. [S.l.]:McGraw-Hill Companies, 2001.

KEZUNOVIC, M. et al. *Digital models of coupling capacitor voltage transformers for protective relay transient studies*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 7, n. 4, p. 1927–1935, 1992.

KOJOVIC, L.; KEZUNOVIC, M.; NILSSON, S. L. *Computer simulation of a ferroresonance suppression circuit for digital modeling of coupling capacitor voltage transformers*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE. Orlando, Florida, 1992.

KOJOVIC, L. et al. *A new method for the CCVT performance analysis using field measurements, signal processing and emtp modeling*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 9, n. 4, p. 1907–1915, 1994.

LACHMAN M., *Sistema de Monitoração Remota e Avaliação do Estado Operativo de Transformadores de Potencial Capacitivo (TPCs) Instalados em Subestações em*



*Operação*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2007.

LUCAS, J. et al. *Improved simulation models for current and voltage transformers in relay studies*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 7, n. 1, p. 152–159, 1992.

MAMEDE FILHO, J. *Manual de Equipamentos Elétricos*. 3. ed. [S.l.]: LTC, 2005.

PAJUELO, E.; RAMAKRISHNA, G.; SACHDEV, M. “*Strengths and Limitations of a New Phasor Estimation Technique to Reduce the CCVT Impact in Distance Protection*”. Electric Power Systems Research, 2009.

PROGRAMA OrCAD/PSPICE: Instruções Básicas. Disponível em: <http://www.nebm.ist.utl.pt/repositorio/download/2710/1>. Acesso em: 8 de abril de 2016.

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

Simulação de circuito eletrônicos em computadores. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/simulacao.pdf>. Acesso em: 7 de abril de 2016.

SWEETANA, A. and FLUGUM, R. W. “*A New Metering Accuracy Capacitive Potential Device*”. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-85, No. 5, pp. 499-510, May 1966.

TZIOUVARAS, D. A. et al. *Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 15, n. 1, p. 62–72, 2000.