



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

THAÍS ITALIANO DIAS NAQUE

ANÁLISE DE TPC's EM REGIME TRANSITÓRIO, SOB O PONTO DE VISTA DE PROTEÇÃO

CAMPINA GRANDE

2009



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

THAÍS ITALIANO DIAS NAQUE

ANÁLISE DE TPC's EM REGIME TRANSITÓRIO, SOB O PONTO DE VISTA DE PROTEÇÃO

Relatório de estágio apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Genoilton João de Carvalho Almeida

CAMPINA GRANDE

2009

THAÍS ITALIANO DIAS NAQUE

ANÁLISE DE TPC's EM REGIME TRANSITÓRIO, SOB O PONTO DE VISTA DE PROTEÇÃO

Relatório de estágio apresentada ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica, UFCG - Universidade Federal de Campina Grande, na área de Eletrotécnica, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

COMISSÃO EXAMINADORA

Orientador: Genoilton João de Carvalho Almeida

Leimar de Oliveira

Campina Grande, setembro de 2009.

*A Deus, primeiramente, por sempre me servir de
conforto nos momentos difíceis.*

*Ao professor orientador, Genoilton João de Carvalho Almeida,
pela compreensão e auxílio em momentos de dificuldades.*

Ao meu esposo, Denner Naque, pela paciência, amor e encorajamento.

*A toda a minha família e em especial aos meus pais,
pelo amor, exemplo, apoio, dedicação e investimento.*

AGRADECIMENTO

Ao meu esposo Denner, por nunca ter me deixado desistir.

Aos meus pais, Abmael e Luzimar Dias, aos irmãos Tammy e Ricardo, Abmael Filho e Fabiana e aos sobrinhos agradeço por sempre acreditarem nessa caminhada.

Meus sinceros agradecimentos a todos os amigos, colegas de faculdade e colaboradores que, de alguma forma doaram um pouco de si para que a conclusão, não só deste trabalho mas desse curso se tornasse possível. Não convém citar os nomes, pois são incontáveis, mas a estes, toda a minha gratidão e certeza de que as conquistas também são um pouco de cada um de vocês.

*É certo que irás encontrar situações
tempestuosas novamente,
mas haverá de ver sempre
o lado bom da chuva que cai
e não a faceta do raio que destrói.*

(...)

*Não faças do amanhã
o sinônimo de nunca,
nem o ontem te seja o mesmo
que nunca mais.*

Teus passos ficaram.

*Olhes para trás... mas vá em frente
pois há muitos que precisam
que chegues para poderem seguir-te.”*

Charles Chaplin

RESUMO

O objetivo deste trabalho é analisar o transitório dos TPC's em situação de ocorrência de uma falta. E verificar de que maneira o fator de potência e a conexão da carga influenciam a resposta transitória do TPC. A ferramenta para simulação empregada será o programa SPICE (*Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*), utilizando a captura esquemática (*Schematics*). Como vivência de estágio acadêmico, expressa o amadurecimento na utilização de mais um software de análise, assim como possibilita o estudo mais detalhado de um aspecto importantíssimo nos Sistemas Elétricos de Potência – a proteção, que, de maneira adequada, corrobora com a garantia dos requisitos para o sistema de potência obter um correto desempenho: seletividade, sensibilidade, rapidez e confiabilidade.

Palavras-chaves: Transformador de potencial capacitivo, simulação de transitórios, modelo de TPC, Proteção de sistemas elétricos de potência

ABSTRACT

The objective of this paper is to transient analyze of TPC's in a situation of occurrence of a fault. And see how the power factor of load influence the transient response of the CPC. The tool will be used for simulation program SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), using the schematic capture (Schematics). As academic internship experience, the maturity expressed in the use of more analysis software, as well as enable a more detailed study of an important aspect in Electrical Power Systems - the protection, which, appropriately, is concurrent with the security requirements to the power system to obtain a correct performance: selectivity, sensitivity, speed and reliability.

Keywords: capacitive voltage transformer, transient simulation model of TPC, Protection of power systems.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONCEITOS E FINALIDADES	2
1.2. FALTAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	4
2. TRANSFORMADOR DE POTENCIAL	6
2.1. INTRODUÇÃO TEÓRICA.....	7
2.2. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS	7
2.3. ESCOLHA DO TIPO DE TRANSFORMADOR	10
3. TRANSFORMADOR DE POTENCIAL CAPACITIVO	11
3.1. COMPOSIÇÃO DE UM TRANSFORMADOR DE POTENCIAL CAPACITIVO	12
3.2. CLASSE DE EXATIDÃO DO TPC	16
3.3. RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO DO TPC	17
4. A RESPOSTA TRANSITÓRIA	20
4.1. CARACTERÍSTICA DA RESPOSTA TRANSITÓRIA DOS TPC's	21
4.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A RESPOSTA TRANSITÓRIA DOS TPC'S	21
4.2.1.O PONTO DA LINHA DE TRANSMISSÃO ONDE HÁ A OCORRÊNCIA DA FALTA..	21
4.2.2.A MAGNITUDE DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO DO TRANSFORMADOR	
INTERMEDIÁRIO	22
4.2.3.RELAÇÃO DE ESPIRAS DO TP INTERMEDIÁRIO	22
4.2.4.O TIPO DE CIRCUITO SUPRESSOR DE FERRO-RESSONÂNCIA	23
4.2.5.A COMPOSIÇÃO E CONEXÃO DA CARGA	23
4.2.6.A MAGNITUDE E O FATOR DE POTENCIA DA CARGA	24
5. O PROGRAMA PSPICE UTILIZANDO A CAPTURA ESQUEMÁTICA	25
5.1.INTRODUÇÃO	26
5.2. ETAPAS DE CONSTRUÇÃO DA ANÁLISE DE CIRCUITOS UTILIZANDO	
O SCHEMATICS.....	26

5.3. ANÁLISE TRANSIENTE	29
6. A SIMULAÇÃO	31
7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO SIMPLIFICADO DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO	03
FIGURA 2: DIAGRAMA INTERNO DE UM TRANSFORMADORES DE POTENCIAL	08
FIGURA 3: TRANSFORMADOR DE POTENCIAL	09
FIGURA 4: TRANSFORMADOR DE POTENCIAL INDUTIVO	09
FIGURA 5: CUSTO DO TP EM RELAÇÃO A TENSÃO NOMINAL	10
FIGURA 6: CIRCUITO SUPRESSOR DE FERRORESONÂNCIA	13
FIGURA 7: DIAGRAMA DE UM TPC COM ACESSÓRIOS PARA EQUIPAMENTOS DE ONDA PORTADORA .	15
FIGURA 8: ESQUEMA ELÉTRICO <u>BÁSICO</u> DE UM TPC A 60 HZ (SEM CARRIER)	15
FIGURA 9: ESQUEMA ELÉTRICO BÁSICO DE UM TPC A 60 HZ	17
FIGURA 10: COMPOSIÇÃO DE UM TPC	19
FIGURA 11: PORCENTAGEM DA TENSÃO RESIDUAL VERSUS O TEMPO, EM ms, POSTERIOR A FALTA (SEM CSF)	22
FIGURA 12: EFEITO DA TENSÃO RESIDUAL EM CARGAS RL SÉRIE (LINHA CONTÍNUA) E EM PARALELO (LINHA TRACEJADA)	23
FIGURA 13: CIRCUITO EQUIVALENTE REFERIDO AO PRIMÁRIO	24
FIGURA 14: EDITOR DO SCHEMATICS	28
FIGURA 15: JANELA DE OPÇÕES DE ANÁLISES A SEREM FEITAS NO SCHEMATICS	28
FIGURA 16: MENU PRINCIPAL DO SCHEMATICS	29

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 1: DISTRIBUIÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE 500kv, EM UM PERÍODO DE DEZ ANOS, COM A OCORRÊNCIA DE NOVENTA E NOVE FALTAS.....	05
TABELA 2: APLICAÇÃO DOS TP'S QUANTO A EXATIDÃO	16
TABELA 3: PARÂMETROS DO TPC SIMULADO, PARA 230 kV	32
QUADRO 1: FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO COM CINCO ETAPAS PARA A SIMULAÇÃO COM O PROGRAMA SPICE	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PLC - Power Line Carrier

TP – Transformador de Potencial

TPI - Transformador de Potencial Indutivo

TPC - Transformador de Potencial Capacitivo

CAPÍTULO 1

**INTRODUÇÃO:
PROTEÇÃO DE SISTEMAS
ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

1. INTRODUÇÃO: PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

1.1. Conceito e finalidades

Sistemas elétricos de potência são conjuntos de equipamentos destinados a gerar, transmitir e distribuir a energia elétrica. Nestes sistemas existem redes que interconectam as fontes de energia elétrica com os usuários, cobrindo grandes áreas. As principais funções em um sistema de potência são: transformar energia de diferentes fontes para a forma elétrica, transportar a energia elétrica para diferentes localizações e distribuir a energia para os usuários finais.

O sistema de potência é constituído de vários componentes a fim de realizar suas diferentes funções, entre eles destacam-se:

- Geradores: Convertem energia para a forma elétrica;
- Linhas de Transmissão: Transportam a energia elétrica em longas distâncias;
- Transformadores de Potência: Reduzem ou elevam o nível de tensão, para ser transmitida ou reduzida, para os usuários finais;
- Cargas: Convertem a energia para diferentes formas de trabalho conforme a necessidade.

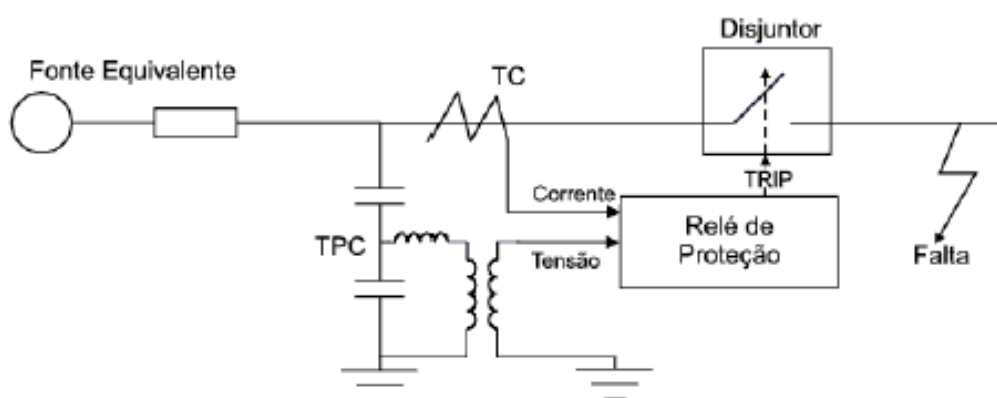
Os sistemas de proteção têm como finalidade proteger os equipamentos que constituem o sistema elétrico de potência, tais como, transformadores, linhas de transmissão ou geradores, mantendo a continuidade do serviço de energia e evitando danos a estes equipamentos. Se uma falta atingir algum dos componentes do sistema, e este não for isolado rapidamente através da proteção, isto pode ocasionar uma instabilidade ou desligamento de uma área maior do que a mínima necessária para isolar o defeito. O sistema de proteção deve satisfazer os seguintes requisitos para o sistema de potência obter um correto desempenho (MASON, 1956):

- **Seletividade:** Seletividade é a capacidade da proteção em distinguir aquelas condições para as quais uma imediata operação é requerida daquelas para as quais nenhuma operação ou um retardo de atuação é exigido. Esta exigência é importante para assegurar que somente se isole a parte defeituosa do sistema, mantendo em serviço as demais partes;

- **Sensibilidade:** Sensibilidade é a capacidade da proteção responder às anormalidades nas condições de operação e aos curtos-circuitos para os quais foi projetada;
- **Velocidade:** As sobrecorrentes geradas pela falta devem ser extintas no menor tempo possível, de modo a evitar que o defeito interfira em outras partes do sistema. Esta exigência é importante para minimizar os impactos de uma falta nos equipamentos do sistema de potência;
- **Confiabilidade:** A confiabilidade de um sistema de proteção é a probabilidade de um componente ou de um sistema satisfazer a função prevista, sob determinadas situações. Assim, a proteção não deve atuar de forma errônea em casos onde não houver falta e também não deixar de atuar na existência de uma falta.

Embora o sistema de proteção seja entendido como conjuntos de relés, na verdade este sistema consiste de vários subsistemas que contribuem para o processo de remoção de faltas (PHADKE; THORP, 1988). Os subsistemas podem ser identificados na Figura 1. Os disjuntores têm a função de isolar o circuito com problemas ou parte dele, pela interrupção da corrente e são comandados por sinais apropriados provenientes dos relés (*tripping*).

FIGURA 1: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO SIMPLIFICADO DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO



FONTE: (PHADKE; THORP, 1988)

Os transformadores para instrumentos tais como: transformadores de corrente (TCs), transformadores de potencial (TPs) e os transformadores de potencial capacitivo (TPCs) constituem equipamentos fundamentais no sistema de proteção e medição. Estes

equipamentos são utilizados para reduzir os altos níveis de correntes e tensões do sistema de transmissão para níveis adequados aos dispositivos de proteção e medição. Os relés de proteção respondem a partir das condições do sistema elétrico, através das entradas de tensões e correntes, fornecidas pelos transformadores para instrumentos (TIs).

1.2. Faltas em sistemas elétricos de potência

A ocorrência de uma situação inesperada em um sistema de transmissão de energia elétrica pode causar a interrupção no fornecimento de energia. Esta ocorrência aleatória e imprevisível, na maioria das vezes, é conhecida como falta. A interrupção do fornecimento é realizada por equipamentos de proteção, visando resguardar a estabilidade do sistema e os equipamentos envolvidos na transmissão da energia. O rápido restabelecimento do fornecimento de energia depende da localização do ponto onde ocorreu a falta no sistema e a realização dos reparos necessários.

As linhas de transmissão de energia elétrica compõem a maior parte, em extensão, do sistema de transmissão de energia. Devido a este fato, a maioria das faltas que ocorre no sistema elétrico de potência envolve as linhas de transmissão. As faltas em linhas de transmissão podem ocorrer devido a diversos fatores, tais como: problemas na isolação, “queimadas” próximas a linha de transmissão, contatos entre os cabos da linha de transmissão (devido ao envolvimento de agentes externos), entre outros. As linhas de transmissão trifásicas compõem a maior parte do sistema de transmissão de energia no Brasil e a maioria das faltas que ocorrem nestas linhas de transmissão são as que envolvem o contato de uma das fases com a terra (fase-terra).

Na tabela 1 pode-se ver um retrospecto das ocorrências de faltas componentes do sistema de potência em um período de dez anos.

Observe que os equipamentos que compõem o sistema de proteção e medição não estão imunes a defeitos e falhas. Considerando a grande importância dos transformadores de potencial capacitivos tentar-se-á verificar o comportamento da resposta transitória em situações de faltas em algumas circunstâncias, a fim de detectar alterações nas suas características para o correto funcionamento dos sistemas de proteção e medição.

TABELA 1: DISTRIBUIÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE 500kv, EM UM PERÍODO DE DEZ ANOS, COM A OCORRÊNCIA DE NOVENTA E NOVE FALTAS

EQUIPAMENTOS FALTOSOS	NÚMEROS DE FALTAS
<i>Linhas de transmissão</i>	82
<i>Circuitos disjuntores</i>	4
<i>Autotransformadores</i>	6
<i>Barramentos</i>	1
<i>Geradores</i>	1
<i>Erros humanos</i>	5

CAPÍTULO 2

TRANSFORMADOR DE POTENCIAL

2. TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

2.1. Introdução teórica

Os transformadores de potencial são equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionarem adequadamente sem que seja necessário possuir tensão de isolamento de acordo com a rede à qual estão ligados.

Na sua forma mais simples, os transformadores de potencial possuem um enrolamento primário de muitas espiras e um enrolamento secundário através do qual se obtém a tensão desejada, normalmente padronizada em 115 ou $115\sqrt{3}$. Desta forma, os instrumentos de proteção e medição são dimensionados em tamanhos reduzidos com bobinas e demais componentes de baixa isolação.

Os transformadores de potencial são equipamentos utilizados para suprir aparelhos que apresentam elevada impedância, tais como voltímetros, relés de tensão, bobinas de tensão de medidores de energia, etc.

2.2. Características construtivas

Os transformadores de potencial são fabricados em conformidade com o grupo requerido, com as tensões nominais primárias e secundárias necessárias e com o tipo de instalação desejada.

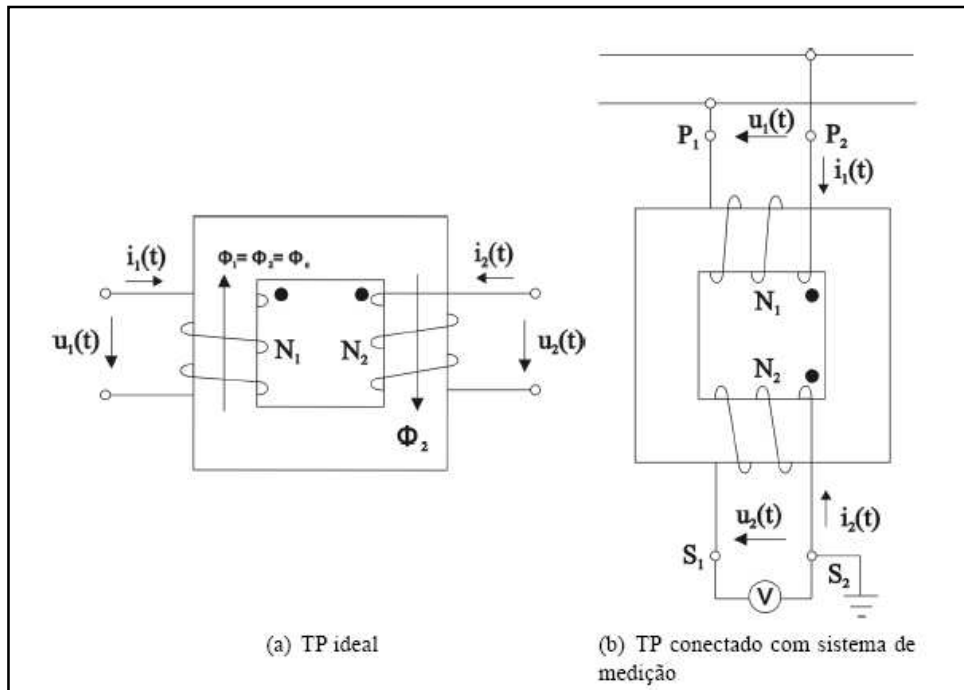
O enrolamento primário é constituído de uma bobina de várias camadas de fio, submetido a uma esmaltação, em geral dupla, enrolado em um núcleo ferromagnético sobre o qual também se envolve o enrolamento secundário.

Já o enrolamento secundário ou terciário é de fio de cobre duplamente esmaltado e isolado do núcleo e do enrolamento primário por meio de fitas de papel especial.

Se o transformador for construído em epóxi, o núcleo com as respectivas bobinas são encapsuladas através de processos especiais de modo a evitar a formação de bolhas no seu interior, o que, para tensões elevadas, se constitui num fator de defeito grave. Nestas condições, esse transformador torna-se compacto, de peso relativamente pequeno, porém descartável ao ser danificado.

Se o transformador for de construção em óleo, o núcleo com as respectivas bobinas são secos sob vácuo e calor. O transformador, ao ser completamente montado, é tratado a vácuo para ser preenchida com óleo isolante.

FIGURA 2: DIAGRAMA INTERNO DE UM TRANSFORMADORES DE POTENCIAL



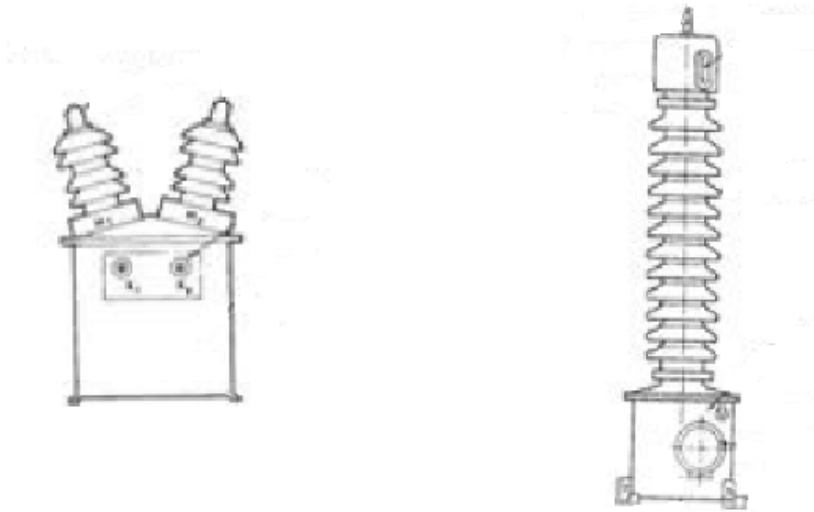
FONTE: <http://www.tede.ufsc.br>

O tanque, dentro do qual é acomodado o núcleo juntamente com os enrolamentos, é construído com chapa de ferro penteada e galvanizada a fogo. Na parte superior são fixados os isolamentos de porcelana vitrificada, dois para TP's do grupo¹ 1 e somente um para os TP's dos grupos 2 e 3. Alguns transformadores possuem tanque de expansão de óleo, localizado na parte superior da porcelana. Na parte inferior do TP está localizado o tanque com os elementos ativos, onde se acha a caixa de ligação dos terminais secundários. O tanque também dispõe de um terminal de aterramento do tipo parafuso de aperto.

¹ Como o enrolamento primário é ligado em derivação, deve atender a um dos seguintes grupos de ligação:

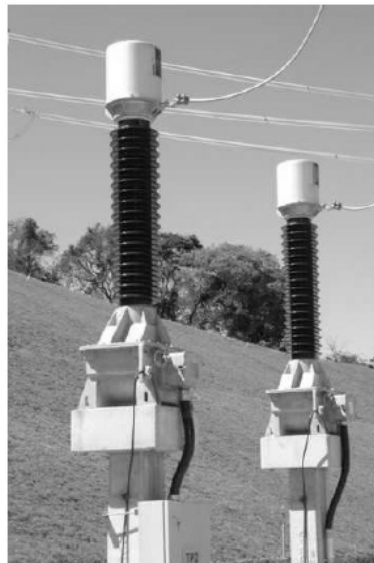
- **Grupo 1:** Conectado entre fases;
- **Grupo 2:** Conectado entre fase e neutro em um sistema solidamente aterrado;
- **Grupo 3:** Conectado entre fase e neutro.

FIGURA 3: TRANSFORMADOR DE POTENCIAL



Os transformadores de potencial podem ser construídos de dois tipos básicos: TP's indutivos (TPI) e TP's capacitivos (TPC).

FIGURA 4: TRANSFORMADOR DE POTENCIAL INDUTIVO



FONTE: AREVA, 2000

Para tensões compreendidas entre 600 V e 69 kV os transformadores indutivos são dominantes. Para tensões acima de 69 kV a 138 kV, não existe preferência na utilização, sendo que em sistemas onde se utiliza PLC (Power Line Carrier) a utilização do TPC torna-se necessária. Para tensões superiores a 138 kV os transformadores capacitivos são dominantes. As análises desse trabalho serão restritas a este último tipo – os TPC's.

2.3. Escolha do tipo de transformador

Para a escolha do tipo de transformador a ser usado deve-se levar em consideração três fatores:

- Nível de tensão
- Necessidade de utilização da Carrier
- Preço

Normalmente para tensões inferiores a 69 kV, não se utiliza Carrier e o custo do transformador indutivo é inferior ao capacitivo, acarretando assim maior preferência do TPI para essa faixa de tensão.

Para tensões compreendidas entre 69 kV e 138 kV, o fator predominante é a utilização do PLC.

Para tensões acima de 138 kV, opta-se pelo TPC, uma vez que os dois fatores mencionados anteriormente são favorecidos por este equipamento.

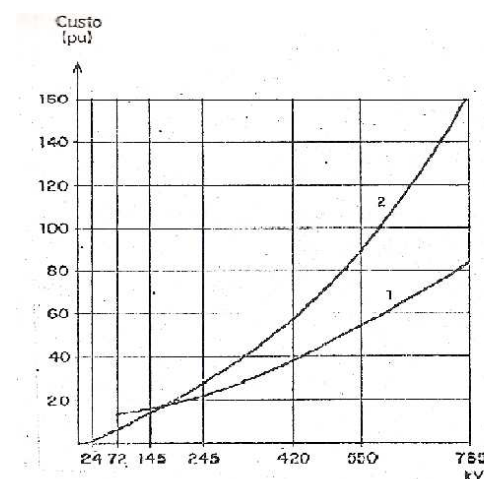
A figura 5 abaixo mostra como varia o preço do TPI e TPC em função do nível de tensão:

1 – TP capacitivo

2 – TP indutivo

Observe que acima de 245 kV o TPI é bem mais caro que o TPC e isto se deve principalmente porque o número de espiras no primário para tensões superiores a este valor é muito grande.

FIGURA 5: CUSTO DO TP EM RELAÇÃO A TENSÃO NOMINAL



FONTE: ASEA

CAPÍTULO 3

TRANSFORMADOR DE POTENCIAL CAPACITIVO

3. TRANSFORMADOR DE POTENCIAL CAPACITIVO

3.1. Composição de um transformador de potencial capacitivo (TPC)

Em circuitos de alta tensão e extra alta tensão, é mais conveniente e econômico o emprego dos TP's tipo capacitivo em lugar dos TP's tipo indução.

Os principais elementos do TPC são:

- **Divisor de tensão capacitivo composto por C_1 e C_2 :**

A função do divisor de tensão capacitivo é reduzir a tensão do sistema para uma tensão intermediária (V_B) na faixa de 5 kV até 20 kV. O divisor capacitivo é representado por dois valores de capacitância: uma capacitância equivalente (C_1) acima do ponto de tensão intermediária e outra capacitância equivalente (C_2), abaixo do ponto de tensão intermediária. A tensão intermediária é obtida através da Equação 3.1.

$$V_B = \frac{V_i \cdot C_1}{C_1 + C_2} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Cada capacitância é formada por elementos capacitivos conectados em série. O número de unidades capacitivas depende do nível de tensão primária.

- **Reator de Compensação L_C :**

O reator de compensação (L_C) é uma reatância X_L ajustável, com o objetivo de manter a tensão no secundário (V_O) em fase com a tensão do sistema. Geralmente, os TPCs apresentam no reator de compensação e no transformador indutivo, derivações acessíveis para pequenos ajustes.

Através do reator de compensação são realizados os ajustes de ângulo de fase e através dos taps do transformador indutivo são realizados os ajustes de amplitude.

O reator de compensação e o transformador intermediário possuem núcleo de ferro. Além de introduzirem perdas, estes dispositivos também podem produzir ferro-ressonância devido a não linearidade dos núcleos de ferro (indutância não linear).

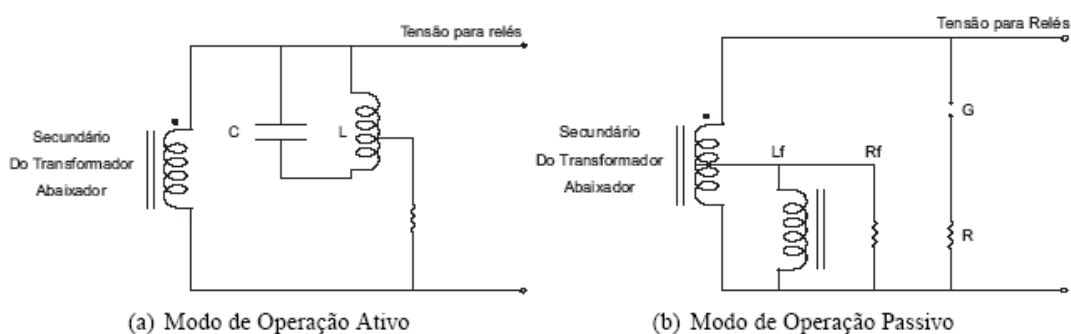
- **Transformador de tensão intermediária (TP intermediário):**

Funciona como isolante elétrico e abaixador de tensão. A tensão no secundário, independente do modelo é 66,4 V e 115 V.

- **Circuito supressor de ferro-ressonância (CSF):**

Todo TPC necessita incorporar algum tipo de amortecimento de ferro-ressonância. A capacitância do divisor de tensão está em série com a indutância do transformador indutivo e do reator de compensação, constituindo um circuito ressonante sintonizado em 60 Hz. Este circuito pode entrar em ressonância podendo saturar o núcleo de ferro do transformador indutivo por vários distúrbios na rede. Este circuito é necessário para evitar sobretensões perigosas que podem sobreaquecer a unidade eletromagnética, romper sua isolamento e até mesmo destruir o equipamento (TZIOUVARAS et al., 2000). O circuito supressor de ferro-ressonância é conectado no secundário do transformador indutivo e possui dois modos de operação, ativo e passivo conforme ilustra a Figura 6 (TZIOUVARAS et al., 2000)

FIGURA 6: CIRCUITO SUPRESSOR DE FERRORESSONÂNCIA



- **CSF com modo de operação ativo**

O CSF em modo de operação ativo consiste em um filtro composto por uma capacitância (C) e por um indutor com núcleo de ferro (L) conectados em paralelo e sintonizado na frequência fundamental. Na frequência fundamental, o filtro está em ressonância paralela apresentando uma alta impedância. Quando ocorre um transitório, este filtro apresenta uma baixa impedância amortecendo os sinais indesejáveis através da resistência conectada em série. Estes dispositivos são permanentemente conectados no

lado secundário do TPC conforme ilustra a Figura 6(a) e, afetam a resposta transitória devido à energia armazenada em seus elementos capacitivos e indutivos (TZIOUVARAS et al., 2000).

- **CSF com modo de operação passivo**

Na Figura 6(b) é ilustrada também a configuração de um circuito supressor de ferro-ressonância com modo de operação passivo. Este dispositivo consiste em um resistor permanentemente conectado no lado secundário (R_f), um reator saturável (L_f) e uma resistência em série com um *gap* ou um dispositivo eletrônico, que é ativado quando uma sobretensão ocorre.

Quando ocorre uma sobretensão advinda de oscilações ferro-ressonantes ou de outro fenômeno transitório, o circuito eletrônico ou o *gap* é disparado inserindo a resistência (R) no secundário atenuando assim a energia de oscilação. Em paralelo ao resistor (R_f) imerso em óleo refrigerante o reator com núcleo de ferro (L_f) é projetado para saturar em aproximadamente 150% da tensão nominal com o objetivo de evitar ferro-ressonância sustentada (ABB, 2005).

- **Acessórios para conexão de equipamentos de onda portadora (CARRIER):**

As linhas de transmissão também são usadas para transmissão de sinais de onda portadora entre 30 kHz e 500 kHz, para telecontrole, telefonia, teleproteção, telemedição, etc., comumente chamado de sistema de onda portadora. A bobina de drenagem (L_d), o centelhador (G) e a chave de aterramento (Ch) apresentados na Figura 7, são componentes auxiliares que permitem que o TPC opere ou não como capacitor de acoplamento para transmissão de sinais de onda portadora. A bobina de bloqueio L_d tem a função de permitir a passagem da corrente em 60 Hz e impedir que os sinais de alta frequência sejam aterrados. O centelhador (G) é um dispositivo de proteção que atua caso uma sobretensão ocorra e a chave de aterramento (Ch), é utilizada quando houver a necessidade de isolar a parte indutiva do TPC.

Os transformadores deste tipo são construídos basicamente com a utilização de dois conjuntos de capacitores que servem para fornecer um divisor de tensão e permitir a comunicação através do sistema *Carrier*. São construídos normalmente para tensões iguais ou superiores a 138 kV e apresentam como esquema básico a figura.

FIGURA 7: DIAGRAMA DE UM TPC COM ACESSÓRIOS PARA EQUIPAMENTOS DE ONDA PORTADORA

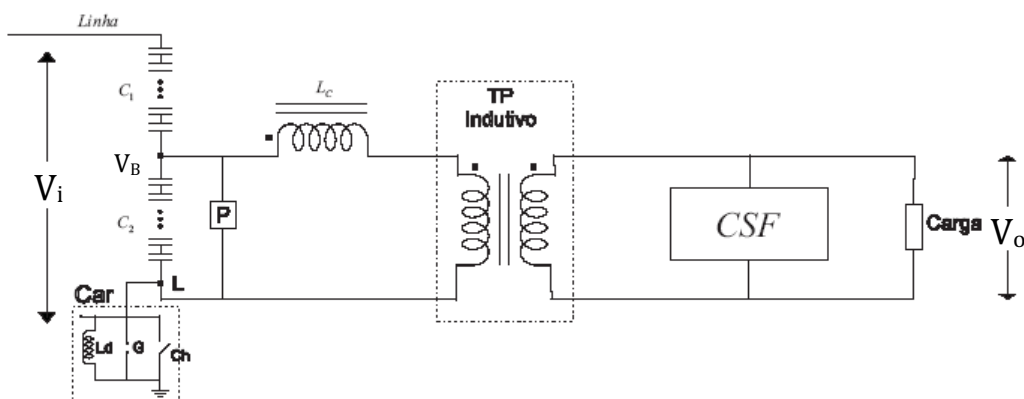
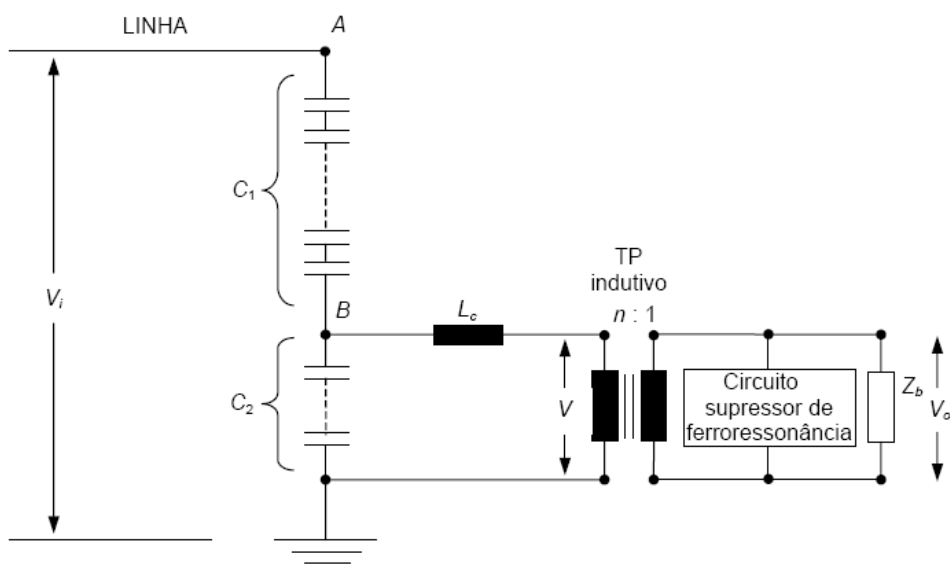


FIGURA 8: ESQUEMA ELÉTRICO BÁSICO DE UM TPC A 60 HZ (SEM CARRIER)



O reator do TPC é projetado e construído de modo que o conjunto tenha uma reatância ωL que satisfaça a seguinte igualdade:

$$\omega L = \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)} \quad \text{Eq. 3.2}$$

O transformador de potencial capacitivo é constituído de um divisor capacitivo, cujas células que formam o condensador são ligadas em série e o conjunto fica imerso no interior de um invólucro de porcelana. O divisor capacitivo é ligado entre fase e terra. Uma derivação intermediária (T) alimenta um grupo de medida de média de tensão que compreende, basicamente, os seguintes elementos:

- Um transformador de potencial ligado na derivação intermediária, através da tomada (T) e fornecendo as tensões secundárias desejadas;
- Um reator de compensação ajustável para controlar as quedas de tensão e a defasagem no divisor capacitivo, na frequência nominal, independentemente da carga, porém nos limites previstos pela classe de exatidão considerada;
- Um dispositivo de amortecimento dos fenômenos de ferro-ressonância.

A não ser pela classe de exatidão, os transformadores de potencial não se diferenciam entre aqueles destinados à medição e à proteção. Contudo, são classificados de acordo com o erro que introduzem nos valores medidos secundários.

3.2. Classe de exatidão do TPC

Os TPC's são enquadrados em uma das três classes de exatidão abaixo:

- Classe de exatidão 0.3
- Classe de exatidão 0.6
- Classe de exatidão 1.2

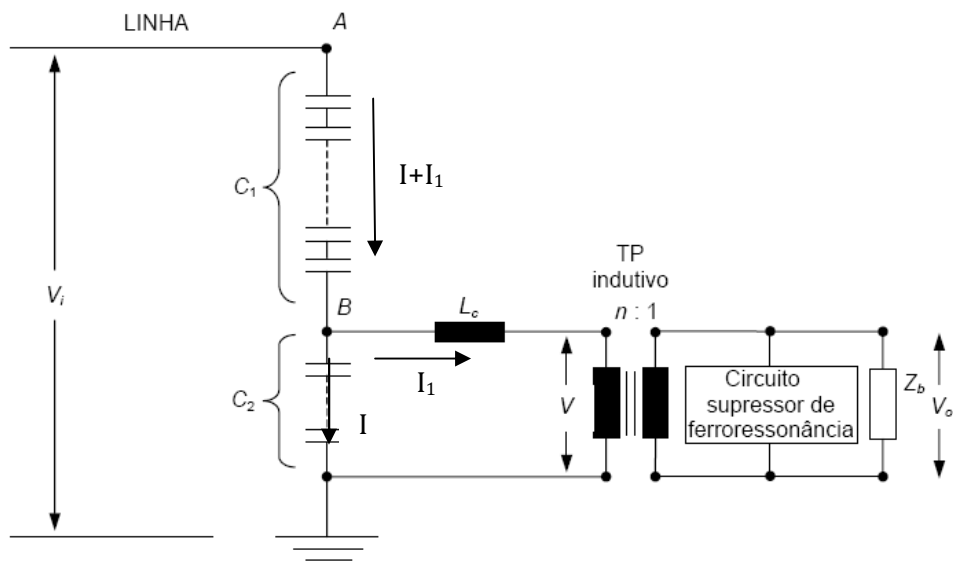
E, devido a essa classificação, eles podem ter aplicações diferenciadas em cada classe de exatidão, como mostra o quadro abaixo:

TABELA 2: APLICAÇÃO DOS TP'S QUANTO A EXATIDÃO

Classe de exatidão	Aplicações
Menor que 0.3	<ul style="list-style-type: none"> • TP padrão • Medições em laboratórios • Medições especiais
0.3	<ul style="list-style-type: none"> • Medições de energia elétrica para faturamento a consumidor
0.6 ou 1.2	<ul style="list-style-type: none"> • Medição de energia elétrica sem finalidade de faturamento • Alimentação de instrumentos de controle

3.3. Relação de transformação do TPC

FIGURA 9: ESQUEMA ELÉTRICO BÁSICO DE UM TPC A 60 HZ



FONTE: Fernandes Jr., D. - Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Aplicação em Sistemas de Energia Elétrica

Aplicando a lei de kirchoff no circuito da figura 2, tem-se:

$$V_i = XC_1(I + I_1) + XC_2 \cdot I$$

onde: XC_1 e XC_2 são reatâncias capacitivas

$$V_i = -\frac{j \cdot (I_1 + I)}{\omega \cdot C_1} - \frac{j \cdot I}{\omega \cdot C_2} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Em outro ramo:

$$I_1 \cdot XL + V - XC_2 \cdot I = 0$$

$$V = -I_1 \cdot XL + XC_2 \cdot I$$

onde XL é a reatância indutiva

$$V = -I_1 \cdot j\omega L - \frac{jI}{\omega C_2} \quad \text{Eq. 3.4}$$

Substituindo a Eq. 3.2 na Eq. 3.4, temos:

$$V = \frac{-jI_1}{\omega \cdot (C_1 + C_2)} - \frac{jI}{\omega \cdot C_2} \quad \text{Eq. 3.5}$$

Dividindo Eq. 3.3 por Eq. 3.5, temos:

$$\frac{V_i}{V} = \frac{\frac{-j \cdot (I_1 + I)}{\omega \cdot C_1} - \frac{jI}{\omega \cdot C_2}}{\frac{-jI_1}{\omega \cdot (C_1 + C_2)} - \frac{jI}{\omega \cdot C_2}}$$

Colocando $\frac{-jC_2}{\omega}$ em evidência

$$\frac{V_i}{V} = \frac{\frac{(I_1 + I)}{C_1} + \frac{I}{C_2}}{\frac{I_1}{(C_1 + C_2)} + \frac{I}{C_2}}$$

Encontrando o mínimo denominador e numerador:

$$\frac{V_i}{V} = \frac{\frac{C_2 \cdot (I_1 + I) + C_1 \cdot I}{C_1 \cdot C_2}}{\frac{C_2 \cdot I_1 + (C_1 + C_2) \cdot I}{(C_1 + C_2) \cdot C_2}}$$

Colocando I em evidência no numerador

$$\frac{V_i}{V} = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$$

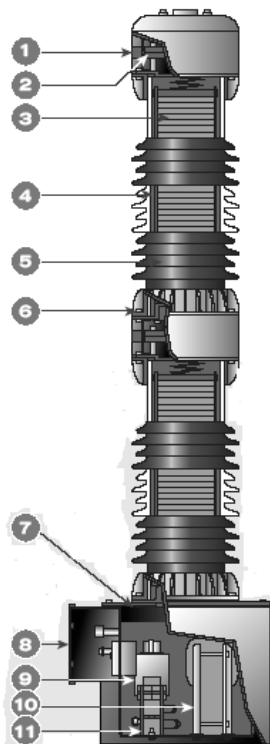
Supondo que a relação de transformação do transformador de tensão intermediária seja igual a k, tem-se que:

$$V = k \cdot V_o$$

Onde $k = \frac{n^\circ \text{ de espiras do primário}}{n^\circ \text{ de espiras do secundário}}$

$$\frac{V_i}{V_o} = \frac{k \cdot (C_1 + C_2)}{C_1}$$

FIGURA 10: COMPOSIÇÃO DE UM TPC



FONTE: TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVOS - AREVA

ONDE:

- 1 - Manômetro da pressão do óleo (opcional)
- 2 - Câmara de expansão
- 3 - Unidades capacitivas
- 4 - Óleo isolante
- 5 - Isolador de porcelana
- 6 - Vedação
- 7 - Cuba
- 8 - Caixa de terminais secundários / terminais HF (Alta Frequência)
- 9 - Reator de Compensação
- 10 - Transformador de média tensão
- 11 - Circuito de amortecimento contra efeitos de ferro-ressonância

CAPÍTULO 4

A RESPOSTA TRANSITÓRIA

4. A resposta transitória

4.1. Característica da resposta transitória em TPC's

A resposta temporal de um sistema é em geral dividida em duas partes:

- *resposta transitória*
- *resposta em regime permanente*

Aqui, será analisada apenas a resposta transitória.

Seja $c(t)$ uma resposta temporal qualquer; então em geral, ela pode ser escrita como:

$$c(t) = c_t(t) + c_{ss}(t) \begin{cases} c_t(t) = \text{resposta transitória} \\ c_{ss}(t) = \text{resposta em regime permanente} \end{cases}$$

Assim, a resposta transitória é definida como a parte da resposta que vai para zero quando o tempo se torna grande. Portanto, $c_t(t)$ tem a propriedade:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c_t(t) = 0$$

Deseja-se estudar a resposta transitória dos equipamentos de proteção, e em especial a dos transformadores de potencial capacitivos, com o objetivo de analisar a atuação da proteção em situações incomuns, ou seja, em ocorrência de faltas, observando de que forma se comportam e quais os efeitos do desligamento desses equipamentos no sistema elétrico.

4.2. Fatores que influenciam a resposta transitória

4.2.1. O ponto da linha de transmissão onde há a ocorrência da falta

4.2.2. A magnitude da corrente de excitação do transformador intermediário

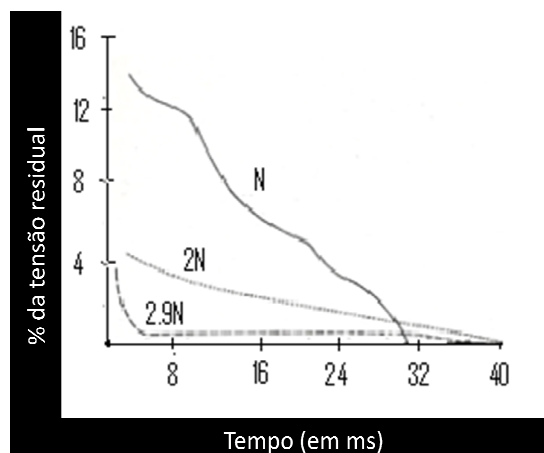
Sob condições de carga zero, há apenas os fluxos de corrente de excitação no primário, carregando o capacitor. Quanto maior a corrente de excitação, maior energia e, conseqüentemente, uma maior a resposta transitória. Assim, a corrente de excitação nos

transformadores é proposadamente mantida baixa, da ordem oh 2-3 mA e não afete a resposta. Se este fator não for considerado, os transformadores podem fornecer correntes elevadas, o que implica em aumento da amplitude das oscilações da tensão residual.

4.2.3. Relação de espiras do TP intermediário.

O aumento na relação de espiras do transformador reduz a corrente que chega na carga dada. Essa corrente menor implica numa menor tensão no capacitor que, conseqüentemente, implica em menor energia armazenada. Isto também pode ser analisado do ponto de vista da reatância capacitiva e indutiva refletida ao secundário do transformador, que é inversamente proporcional ao quadrado da relação de espiras. Pela figura 11, observa-se que se aumentando a relação de espiras, e mantendo todos os outros parâmetros fixos há redução na dimensão do transitório.

FIGURA 11: PORCENTAGEM DA TENSÃO RESIDUAL VERSUS O TEMPO, EM ms, POSTERIOR A FALTA (SEM CSF)



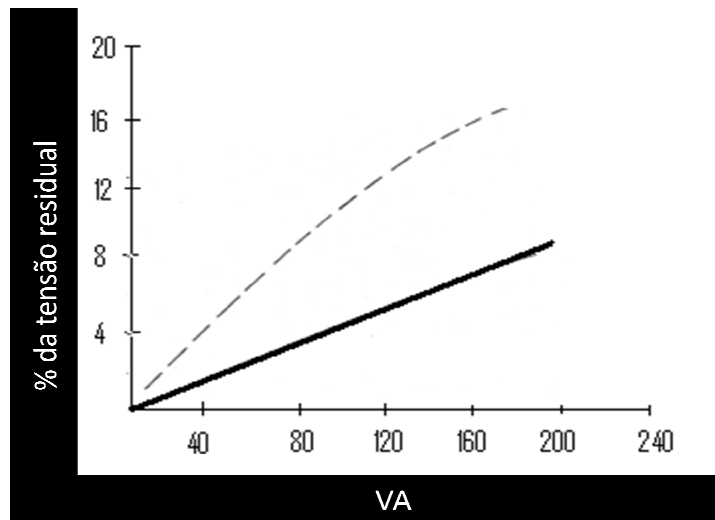
4.2.4. O tipo de circuito supressor de ferro-ressonância

A análise dos fatores que afetam a resposta transitória, até agora tem ignorado os circuito supressor de ferro-ressonância. Todo TPC apresenta um circuito supressor de ferro-ressonância “ativo” ou “passivo”, como descrito na seção 3.1 do Capítulo 3. Esse CSF pode afetar consideravelmente a resposta transitória, pois contém capacitores e indutores que, ao armazenarem uma elevada quantidade de energia, influenciam a resposta transitória.

4.2.5. A composição e conexão da carga.

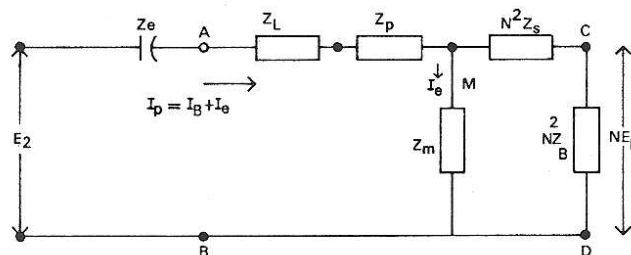
Uma carga reativa pode ser composta por uma por resistência e indutância em série ou paralelo. A diferença na resposta transitória, porém, pode ser enorme e crucial, e é explicado pelo fato de que, em ligações paralelas, caminhos de descarga adicionais são fornecidas por vezes, sem muita resistência para amortecer a oscilação. Melhores resultados do ponto de vista resposta transitória são obtidos quando a carga é composta de componentes de série.

FIGURA 12: EFEITO DA TENSÃO RESIDUAL EM CARGAS RL SÉRIE (LINHA CONTÍNUA) E EM PARALELO (LINHA TRACEJADA)



A figura 12 mostra o comportamento para cargas com conexão em série e paralelo, cuja potência é de 200 VA e fator de potência 0,85.

FIGURA 13: CIRCUITO EQUIVALENTE REFERIDO AO PRIMÁRIO



4.2.6. A magnitude e o fator de potencia da carga

Para carga zero, ou seja, abrindo-se o secundário, toda a corrente que circular pelo circuito passará pelo TP intermediário, como corrente de excitação. Normalmente, este valor é pequeno, de aproximadamente 2 mA, como citado anteriormente. Conseqüentemente, a energia armazenada na capacitância equivalente e no reator de compensação é muito pequena. A natureza da carga, o seu fator de potência, influencia no caráter superamortecido ou oscilatório.

Para uma carga puramente resistiva, ou seja, fator de potencia unitário dissipa-se e não armazena energia. A contribuição de uma carga resistiva é um fator de descarga constante, para determinar se o circuito será superamortecidos ou oscilatório.

CAPÍTULO 5

**O PROGRAMA SPICE
UTILIZANDO A CAPTURA
ESQUEMÁTICA**

5. O SOFTWARE

5.1. Introdução

A versão original do SPICE (simulation Program with Integrad Circuit Emphasis) foi desenvolvido pela Universidade da Califórnia em Berkeley. Ela se tornou rapidamente um padrão industrial para simulação de sistemas integrados.

O simulador de circuitos PSpice foi criado pela empresa Microsim, e em poucos anos já era o simulador de circuitos eletrônicos mais utilizado do mundo. Cada ano que passava, uma nova versão era desenvolvida. A Microsim desenvolveu seu software até a versão 8.0, com o nome de Microsim PSpice. O software PSpice foi vendido para a empresa Cadence Design Systems, que por sua vez queria mudar a "cara" deste software. Não mudou só a "cara", mas também o nome para OrCAD.

O software PSpice, responsável pelos cálculos matemáticos do simulador continuou o mesmo, mas o Layout de desenho mudou-se e o ambiente onde são mostrados os gráficos (Probe) teve uma leve mudança com a adição de muitas ferramentas úteis.

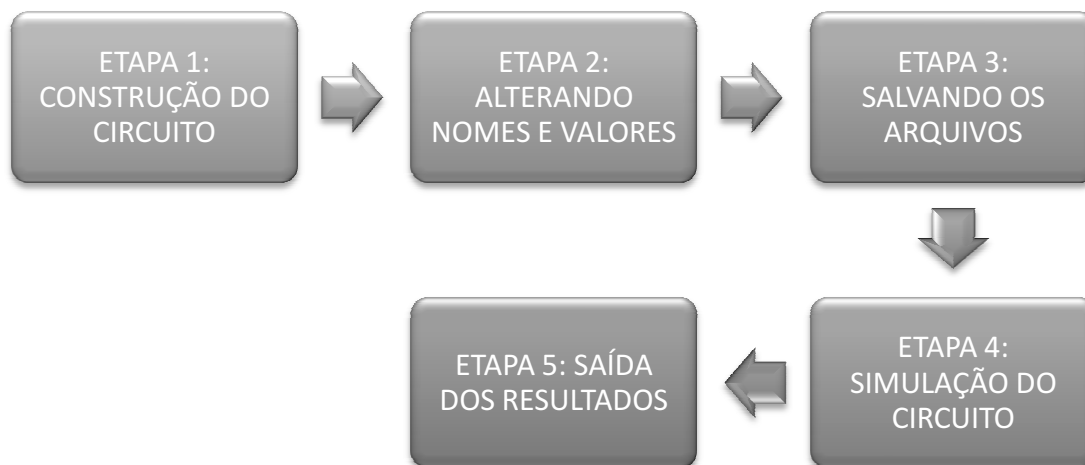
No SPICE, as informações do circuito, como os nomes e os valores dos resistores e das fontes, bem como a forma como estão interconectados, é reconhecida pelo programa através de comandos de formato específico.

O programa PSPICE, assim como outros simuladores baseados no programa SPICE, possuem, atualmente, uma característica conhecida com esquema de captura. Utilizando um editor, elimina-se a necessidade de uma formatação ordenada dos dados e simplesmente desenha-se o diagrama do circuito, atribuindo-se valores aos elementos através de caixas de diálogo. O editor, então, converte o diagrama do circuito para o formato original do SPICE, para que este proceda a simulação real. Na versão utilizada nesse trabalho, a versão 9.2 dedicada ao estudante, existem dois editores – o CAPTURE e o SCHEMATICS. O CAPTURE é utilizado em projetos de circuitos integrados (PCI), enquanto que o SCHEMATICS é o mais genérico e por isso, este foi o editor utilizado na análise da proposta do estágio acadêmico aqui relatado.

5.2. Etapas de construção da análise de circuitos utilizando o Schematics

O fluxograma abaixo descreve as etapas coerentes adotadas como procedimento na simulação de circuitos utilizando este software.

QUADRO 1: FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO COM CINCO ETAPAS PARA A SIMULAÇÃO COM O PROGRAMA SPICE



FONTE: CIRCUITOS ELÉTRICOS.

A **ETAPA 1**, referente a construção do circuito no editor do Schematics, como mostra a figura 14, compreende as seguintes ações:

- Colocação dos elementos
- Organização dos elementos na ordem desejada
- Conexão dos componentes, através dos elementos condutores
- Inclusão de elementos auxiliares, como os definidos pelo comando VIEWPOINT (que permite a visualização de tensões nodais específicas).

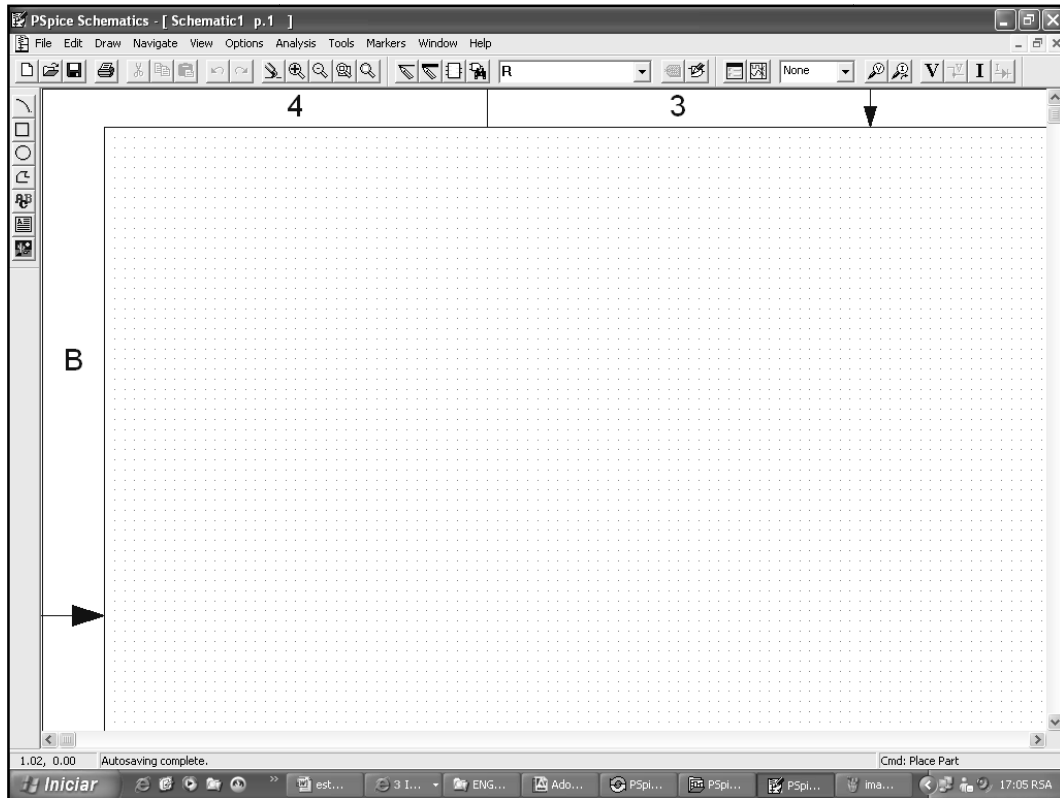
A **ETAPA 2**, referente a alteração dos nomes e valores dos elementos são designadas pelas ações abaixo:

- Definição dos nomes dos elementos, de acordo com o projeto a ser simulado, para que não haja interpretação errônea dos dados e variáveis;
- Atribuição dos valores aos elementos;
- Atribuição de nomes aos nós.

A **ETAPA 3**, referente a ação de salvar o arquivo, é comum.

Para a **ETAPA 4**, de simulação do circuito, deve-se escolher o tipo de análise a ser feita, e este apresenta uma versatilidade muito grande quanto às opções de análise, como mostra a figura 15, que é gerada diretamente selecionando-se o menu Analysis.

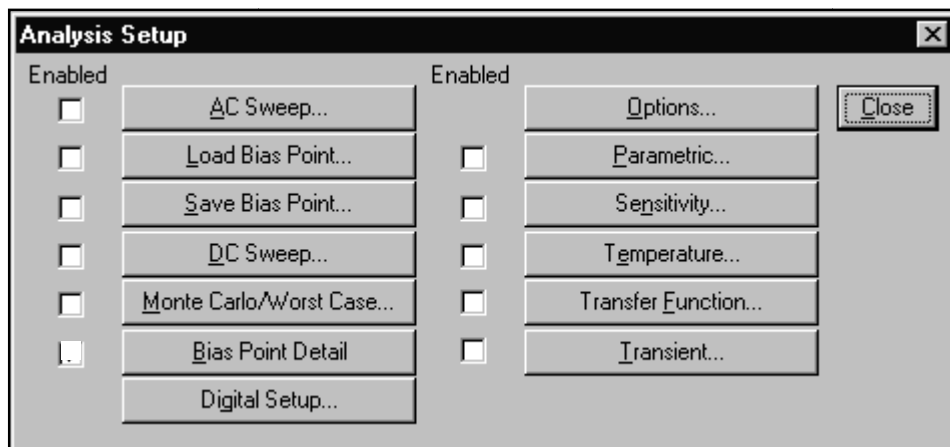
FIGURA 14: EDITOR DO SCHEMATICS



E por fim, na **ETAPA 5**, designada como saída dos resultados, pode-se:

- Visualizar, editar e imprimir arquivos de saída;
- Imprimir o diagrama esquemático
- Copiar o diagrama esquemático para outros programas.

FIGURA 15: JANELA DE OPÇÕES DE ANÁLISES A SEREM FEITAS NO SCHEMATICS



5.3. Análise transiente

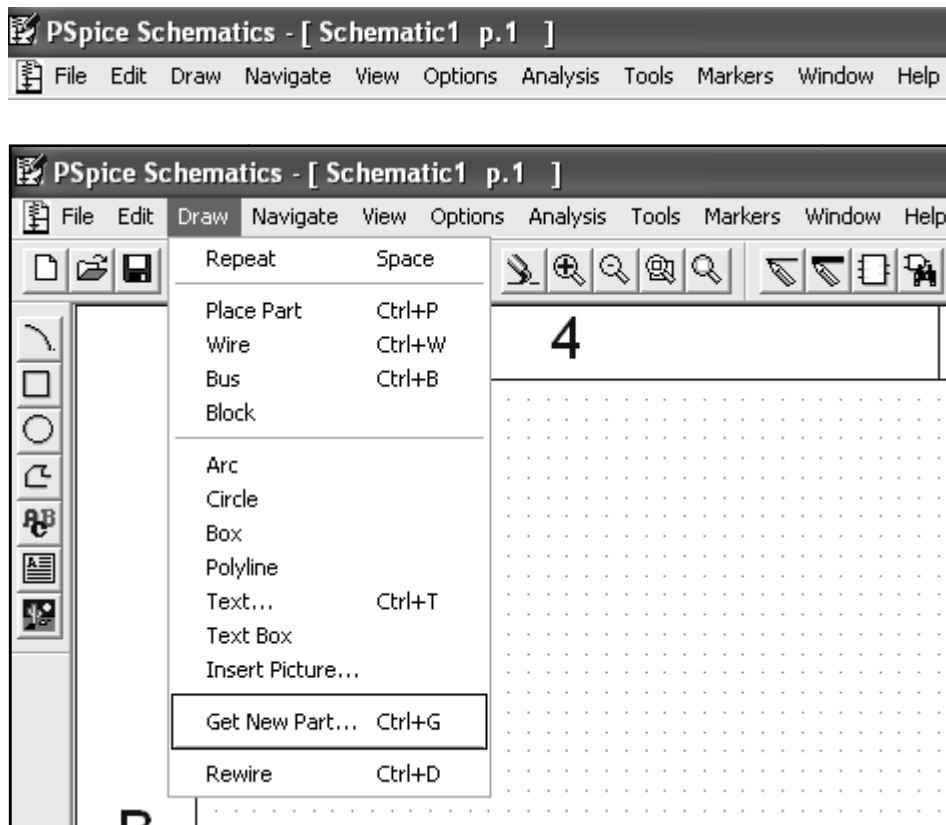
Haverá uma maior ênfase na análise transiente, por se adequar aos estudo de caso deste trabalho, que aborda a o comportamento do transformador de potencial capacitivo na ocorrência de faltas.

Nas análises transientes, determinaram-se as tensões a as correntes em função do tempo. Tipicamente, a dependência do tempo é demonstrada ao traçar-se o gráfico da forma de onda utilizando o tempo como variável independente. Este programa pode realizar esse tipo de análise, chamada simulação transiente, em que todos as tensões e correntes são determinadas para um período de tempo especificado.

Os elementos da construção do circuitos são inseridos através de suas respectivas bibliotecas. Os elementos R (resistores), C (capacitores) e I (indutores) estão localizados na biblioteca ANALOG (analog.slb), que é acionada através da sequencia:

- Draw (no menu principal, como mostra a figura 16)
- Get New Part

FIGURA 16: MENU PRINCIPAL DO SCHEMATICS



As chaves (SW_TCLOSE, que modela o fechamento do circuito e a SW_TOPEN, que modela a abertura da chave), elementos fundamentais na configuração da ocorrência no circuito para este tipo de análise é encontrada na biblioteca EVAL. Sua inserção, assim como a de outros elementos, seguem as etapas descritas na seção 6.2. deste trabalho.

Ao utilizar os elementos SW_TCLOSE e SW_TOPEN para simular as chaves reais, deve-se assegurar que os valores de **ttran** (tempo requerido para a chave ficar completamente fechada), **Rclosed e Ropen** (resistências da chave nas posições fechada e aberta, respectivamente) são apropriados para que os resultados simulados sejam válidos.

Os valores utilizados nas simulações são:

$$R_{closed} = 0.01\Omega$$

$$R_{open} = 1M\Omega$$

$$t_{tran} = 5\mu s$$

CAPÍTULO 6

A SIMULAÇÃO

1. IMPLEMENTAÇÃO DO TPC PARA SIMULAÇÕES

Os dados utilizados na implementação do TPC utilizado no estudo seguem na tabela abaixo e foram propostos pelo professor da UFCG, que é um TPC existente no LAT – Laboratório de Alta Tensão.

TABELA 3: PARÂMETROS DO TPC SIMULADO, PARA 230 kV

$R_c = 9,1 \text{ k}\Omega$	$L_p = 114,7 \text{ H}$	$L_{f2} = 47,39 \text{ mH}$
$L_c = 86,3 \text{ H}$	$R_m = 50,6 \text{ }\Omega$	$R_f = 4,99 \text{ }\Omega$
$C_c = 493,2 \text{ nF}$	$L_m = 700 \text{ mH}$	$M = 9,31 \text{ mH}$
$C_p = 9,3 \text{ pF}$	$L_{f1} = 10,87 \text{ mH}$	–
$R_p = 920 \text{ }\Omega$	$C_f = 166,39 \text{ }\mu\text{F}$	–

A análise transitória foi realizada pelo editor Schematics, utilizando a análise transiente, e as chaves SW_TOPEN e SW_TCLOSE, como caracterizados no capítulo anterior.

Os gráficos e circuitos simulados não estão presentes nesse trabalho, devido a problemas no licenciamento do software utilizado, não havendo tempo hábil para a solução a tempo da entrega desse relatório. No entanto as conclusões estão apresentadas acima.

Não foi possível a apresentação do resultado das outras simulações, pois não houve êxito no manuseio da ferramenta para verificar os outros fatores.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os propósitos das simulações

A simulação computacional de sistemas físicos está presente tanto na área científica acadêmica (desenvolvimento de tecnologia nas áreas da medicina, física, química e engenharia) quanto na otimização de sistemas logísticos e de produção, por exemplo. Ela é uma ferramenta importante, pois permite confrontar a teoria, baseada em conceitos e modelos matemáticos, com a parte experimental, estabelecendo com isso uma relação de compromisso entre estas duas vertentes (teoria/prática). Desta forma, é possível orientar o processo de tomada de decisão, analisar e avaliar sistemas físicos e propor soluções para a melhoria do projeto, possibilitando com isso a previsão de alguns resultados experimentais ou mesmo a realização de experiências que possam comprometer a integridade física do ser humano.

Com os avanços da tecnologia, especialmente na área da informática, modernos equipamentos (*hardware*), novas linguagens de programação (*software*) e sofisticados programas de simulação têm permitido a utilização da simulação computacional em diversas áreas do conhecimento humano, tais como:

- projetar e analisar sistemas industriais automatizados;
- avaliar o desempenho de sistemas computacionais;
- analisar o comportamento de sistemas físicos (elétricos, eletromagnéticos, mecânicos, pneumáticos e hidráulicos);
- analisar o comportamento de circuitos eletroeletrônicos e de seus componentes;
- projetar e desenvolver sistemas utilizados na área militar;
- estabelecer rotas de atendimento (sistemas logísticos);
- simular células de produção (processos e operações);
- planejar recursos materiais e de manufatura na indústria.

Em particular, na área de engenharia, a técnica de simulação é muito utilizada para investigar resultados a partir de um modelo matemático que represente um fenômeno ou um comportamento físico, para reduzir riscos na tomada de decisão, identificar problemas antes de suas ocorrências, excluir processos que não agregam valor na produção, bem como investigar a viabilidade técnica e econômica de um projeto.

No cenário deste trabalho, o editor Schematics constitui-se como uma poderosa ferramenta de projeto e estudo na mão de profissionais, em estágio inicial, que desejam analisar e validar suas análises na área de circuitos elétricos. Possibilita várias opções de análise, apresentando resultados precisos quando os modelos matemáticos são válidos.

No âmbito do estudo da proteção de sistemas elétricos de potência, a simulação é uma oportunidade de assimilar a teoria e a prática, aprender as peculiaridades, numa área que é de vital importância para o crescimento econômico de uma nação: a geração de energia, primando pelos quatro requisitos citados inicialmente: seletividade, sensibilidade, rapidez e confiabilidade.

CAPÍTULO 8

**REFERÊNCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Calhau, D. J., Coury, D. V., Carvalho, A. *Localização de Falhas em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica Utilizando Reconhecimento de Padrões.*
2. *Pereira, C. Transformadores de Potencial*
3. Fernandes Jr., D. *Estimação de Parâmetros para Transformadores de Potencial Capacitivo*, Dissertação de Mestrado, UFPB, setembro 1999.
4. Lachman, M. *Sistema de Monitoração Remota e Avaliação do Estado Operativo de Transformadores de Potencial Capacitivo (TPCs) Instalados em Subestações em Operação.* Tese de doutorado, 2007.
5. Fernandes Jr., D. *Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos*, Tese de Doutorado, UFCG, dezembro 2003.
6. Sweetana, A. *Transient Response Characteristcs of Capacitive Devices*, Indiana.
7. Fernandes Jr., D. Neves, W. L. A. *UMA TÉCNICA PARA COMPENSAÇÃO DINÂMICA DE TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVOS.* Comité de Estudio C4 - Desempeño Técnico del Sistema