



Universidade Federal  
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Igor Monteiro Bezerra Ulisses

**Análise do Conteúdo Harmônico dos Transformadores de  
Potencial Capacitivos (TPC) e a Influência Destes  
Equipamentos em Algoritmos de Estimação Fasorial**

Campina Grande, Paraíba  
Outubro de 2016

Igor Monteiro Bezerra Ulisses

**Análise do Conteúdo Harmônico dos Transformadores de  
Potencial Capacitivos (TPC) e a Influência Destes  
Equipamentos em Algoritmos de Estimação Fasorial**

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 : Processamento de Energia

Orientador: Prof. Dr. Washington Araújo Neves

Campina Grande, Paraíba

Outubro de 2016

Igor Monteiro Bezerra Ulisses

# **Análise do Conteúdo Harmônico dos Transformadores de Potencial Capacitivos (TPC) e a Influência Destes Equipamentos em Algoritmos de Estimação Fasorial**

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 : Processamento de Energia

Aprovado em:    /    /

---

**Professor Avaliador**  
Avaliador

---

**Prof. Dr. Washington Araújo Neves**  
Orientador, UFCG

Campina Grande, Paraíba  
Outubro de 2016

*Este trabalho é dedicado à minha família e meus amigos que sempre acreditaram no meu sucesso.*

# AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, essa força maior que nos impulsiona e nos guia pelos caminhos da vida até nossos objetivos.

Agradeço minha mãe ,Teresa Dalva, por sempre comprar meus sonhos junto comigo e fazer deles realidade. Sempre ao meu lado, nunca estive sozinho um só minuto mesmo com toda a distância.

Agradeço minha irmã ,Fernanda, pelo companheirismo e cumplicidade de uma vida toda. O amor mútuo e incondicional que sentimos um pelo outro é uma das minhas forças para seguir em frente sempre.

Agradeço ao meu pai ,Fernando, (*in memoriam*) que mesmo tendo nos deixado cedo, construiu uma base sólida para que nós continuássemos trilhando o caminho do bem e das vitórias. Uma pessoa batalhadora que enquanto esteve aqui conosco dedicou sua vida à sua família.

Agradeço minha avó ,Iraci, uma mulher forte e uma base firme de apoio para mim. Sempre perto e ajudando nos bons e principalmente nos momentos ruins.

Agradeço meu avô ,B. Costa, que é um grande amigo e apoiador que tenho nessa vida. Sempre acreditou no meu sucesso e investiu para que chegasse até aqui.

Agradeço a minha tia ,Tata, por todo o investimento, amor e bolos que dedicou a mim durante todos esses anos.

Agradeço à minha prima Karol, seu marido Thiago, seus filhos João Pedro, Mariana e Maria Lídia. Agradeço minha minha tia Gardênia, minha tia Ana, minha afilhada linda Ana Luíza e ao meu afilhado Artur.

Agradeço à minha namorada, Viviane, por todo companheirismo, amor e dedicação dispensados a mim neste último ano.

Agradeço à minha avó Zezé e ao meu avô Adail (*in memoriam*) por todo amor e carinho dispensados a mim.

Agradeço aos meus amigos do Buriti, aos meus amigos do Jack Daniel's, aos meus amigos da capoeira de Campina Grande e aos meus amigos da capoeira de Teresina.

Agradeço ao professor Washington e seu aluno Raphael Leite pela confiança depositada em mim e toda ajuda oferecida durante o desenvolvimento deste trabalho.

Se fosse fácil  
achar o caminho  
das pedras,  
tantas pedras  
no caminho  
não seria ruim  
(Humberto Gessinger)

# RESUMO

O transformador de potencial capacitivo (TPC), devido a questões econômicas, é o equipamento usado em sistemas elétricos de potência (SEP) com tensão nominal acima de 138 kV. Esses dispositivos são usados, dentre outras aplicações, para fornecer dados de tensão do sistema aos relés de proteção de distância. Em regime permanente, o TPC consegue reproduzir o sinal de tensão do SEP no seus enrolamentos secundários. No entanto, quando uma falta acontece, a tensão na saída desse tipo de transformador não é um cópia da tensão de entrada. Dessa forma, os dados fornecidos pelo TPC aos relés induzem esses dispositivos a fazerem uma estimativa errônea dos fasores representativos do sistema. Por fim, isso pode levar a falhas no processo de identificação de faltas. Esse trabalho, em um primeiro momento, se propõe a investigar como um sinal, distorcido por componentes harmônicas de alta frequência devido a uma falta, será reproduzido nos terminais secundários dos TPCs. Logo após essa primeira análise, será investigado como os transformadores avaliados influenciam nos algoritmos utilizados para que os fasores fundamentais do sistema sejam estimados.

**Palavras-chave:** transformador de potencial capacitivo, distorção harmônica, estimação fasorial, FCDFT, HCDFT, característica mho auto polarizado.

# ABSTRACT

The coupling capacitor voltage transformer (CCVT), due to economic issues, it is applied in power electric systems (PES) with rated voltage above 138 kV. These devices are used, among other applications, for providing voltage data from the PES to protection distance relays. During the steady state, the CCVT is able to reproduce the voltage signal of the PES in their secondary windings. However, when a fault happens, the voltage at the output of this type of transformer is not a replica of the input signal. Therefore, the data provided from the CCVT to the relay drive this device to make a wrong estimation of the phasors which represents the system. At last, this could lead to error on the process of fault identification. This work, in a first moment, propose to investigate how a signal, distorted by high frequencies harmonic components due a fault, will be reproduced at the secondaries windings. After this analysis, it will be investigated how the transformers evaluated have influence on the algorithms used in order to estimate the fundamental phasors of the system.

**Keywords:** coupling capacitor voltage transformer, harmonic distortion, phasor estimation, FCDFE, self polarized mho characteristic.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Circuito básico de um TPC . . . . .	17
Figura 2 – Resposta em Frequência dos algoritmos de estimação de fasores (Fonte: (LOPES et al., 2015)) . . . . .	24
Figura 3 – Esquema de proteção de distância . . . . .	25
Figura 4 – Característica mho com no diagrama R-X . . . . .	26
Figura 5 – Resposta em Frequência TPC A . . . . .	28
Figura 6 – Resposta em Frequência TPC B . . . . .	28
Figura 7 – Resposta em Frequência TPC C . . . . .	29
Figura 8 – Resposta em Frequência TPC D . . . . .	29
Figura 9 – Sistema Elétrico simulado . . . . .	30
Figura 10 – Tensão nos Terminais do TPC A . . . . .	31
Figura 11 – Tensão nos Terminais do TPC B . . . . .	32
Figura 12 – Tensão nos Terminais do TPC C . . . . .	32
Figura 13 – Tensão nos Terminais do TPC D . . . . .	32
Figura 14 – Espectro de frequência dos sinais de tensão da entrada e saída do TPC A . . . . .	33
Figura 15 – Espectro de frequência dos sinais de tensão da entrada e saída do TPC B . . . . .	34
Figura 16 – Espectro de frequência dos sinais de tensão da entrada e saída do TPC C . . . . .	34
Figura 17 – Espectro de frequência dos sinais de tensão da entrada e saída do TPC D . . . . .	34
Figura 18 – Sistema Elétrico simulado . . . . .	36
Figura 19 – estimação de fasores utilizando FCDFT através de dados do TPC A . . . . .	37
Figura 20 – estimação de fasores utilizando FCDFT através de dados do TPC B . . . . .	38
Figura 21 – estimação de fasores utilizando FCDFT através de dados do TPC C . . . . .	38
Figura 22 – estimação de fasores utilizando FCDFT através de dados do TPC D . . . . .	38
Figura 23 – Comparador de fase da característica mho auto-polarizada (TPC A) . . . . .	39
Figura 24 – Comparador de fase da característica mho auto-polarizada (TPC B) . . . . .	39
Figura 25 – Comparador de fase da característica mho auto-polarizada (TPC C) . . . . .	40
Figura 26 – Característica mho auto polarizada (TPC D) . . . . .	40
Figura 27 – estimação de fasores utilizando HCDFT através de dados do TPC A . . . . .	41
Figura 28 – estimação de fasores utilizando HCDFT através de dados do TPC B . . . . .	42
Figura 29 – estimação de fasores utilizando HCDFT através de dados do TPC C . . . . .	42
Figura 30 – estimação de fasores utilizando HCDFT através de dados do TPC D . . . . .	42
Figura 31 – Característica mho auto polarizada (TPC A) . . . . .	43
Figura 32 – Característica mho auto polarizada (TPC B) . . . . .	44
Figura 33 – Característica mho auto polarizada (TPC C) . . . . .	44
Figura 34 – Característica mho auto polarizada (TPC D) . . . . .	44

Figura 35 – Topologia TPC A . . . . .	50
Figura 36 – Topologia TPC B . . . . .	51
Figura 37 – Topologia TPC B . . . . .	52
Figura 38 – Topologia TPC D . . . . .	54

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – parâmetros de sequência da linha de transmissão . . . . .	30
Tabela 2 – parâmetros do equivalente Thévenin das fontes . . . . .	30
Tabela 3 – Índice THD do sinal primário e secundários dos TPCs . . . . .	35
Tabela 4 – Erro entre os fasores referência e os fasores estimados com dados dos transformadores . . . . .	43
Tabela 5 – parâmetros do TPC A . . . . .	50
Tabela 6 – parâmetros do TPC B . . . . .	51
Tabela 7 – parâmetros do TPC C . . . . .	53
Tabela 8 – parâmetros do TPC D . . . . .	54

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEP	Sistema Elétrico de Potência
LT	Linha de Transmissão
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo
TPR	Transformador de Potencial Resistivo
TPI	Transformador de Potencial Indutivo
TC	Transformador de Corrente
FCDF	<i>Full Cycle Discrete Fourier Transform</i>
HCDF	<i>Half Cycle Discrete Fourier Transform</i>
TI	Transformadores para instrumento
CSF	Circuito Supressor de Ferroressonância

# LISTA DE SÍMBOLOS

$\delta$	Delta minúsculo
$\Delta$	Delta maiúsculo
$Hz$	Hertz
$\omega$	Ômega
$\mu$	Micro
$mH$	milihenry
$nF$	nanoFarad
$kV$	Kilovolt
$f$	frequência
$T$	período
$j$	unidade imaginária
$\pi$	número irracional pi
$\Omega$	Ômega maiúsculo/Ohm
$\mathcal{U}$	Mho
$e$	Número de Euler

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Transformadores de Potencial Capacitivos</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Série e Transformada de Fourier</b>	<b>18</b>
2.2.1	Série de Fourier	18
2.2.2	Transformada de Fourier	21
<b>2.3</b>	<b>Algoritmos de Estimação Fasorial</b>	<b>22</b>
2.3.1	Fourier de 1 Ciclo (FCDFT)	23
2.3.2	Fourier de Meio Ciclo (HCDFT)	23
2.3.3	Resposta em Frequência dos Algoritmos de Estimação Fasorial	24
<b>2.4</b>	<b>Proteção de Distância e a Característica Mho Auto-Polarizado</b>	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVOS AVALIADOS</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Resposta em Frequência dos TPCs</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISES E RESULTADOS</b>	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise da Distorção Harmônica dos TPCs</b>	<b>30</b>
<b>4.2</b>	<b>Influência dos TPCs nos Algoritmos de Estimação Fasorial</b>	<b>36</b>
4.2.1	Testes com o algoritmo FCDFT	37
4.2.2	Testes com o algoritmo HCDFT	41
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>47</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>49</b>
	<b>ANEXO A – TOPOLOGIA E PARÂMETROS DOS TPCS AVALIADOS</b>	<b>50</b>
<b>A.1</b>	<b>TPC A</b>	<b>50</b>
<b>A.2</b>	<b>TPC B</b>	<b>51</b>
<b>A.3</b>	<b>TPC C</b>	<b>52</b>
<b>A.4</b>	<b>TPC D</b>	<b>54</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da demanda de energia elétrica, o qual é inerente ao desenvolvimento da sociedade, os sistemas elétricos de potência (SEP) estão ficando cada vez maiores e mais complexos para que a necessidade imposta seja suprida. Dessa forma, as linhas de transmissão (LT) se tornam mais extensas para que o consumidor final seja atendido. Quanto maior for a LT, mais esta é susceptível a problemas de natureza mecânica, elétrica ou térmica, por exemplo: curto circuitos. (REIS, 2015)

Diante do problemas exposto, companhias dos ramos de geração, transmissão e distribuição juntamente com pesquisadores tem concentrado esforços para o desenvolvimento de técnicas e equipamentos que minimizem os danos ao sistema elétrico quando este é submetido a um problema de qualquer natureza. Os relés desempenham um papel importante no esquema de proteção dos SEP. Estes dispositivos são os responsáveis pela identificação de qualquer anomalia no sistema e rapidamente tomar decisões para que os danos sejam os menores possíveis.

Existe uma certa variedade de relés como: relé de sobre corrente, relé de distância dentre outros. No entanto, alguns apresentam algumas vantagens que facilitam o esquema de proteção. Esse é o caso dos relés micro processados que são amplamente utilizados. Em (SILVA, 2015) algumas vantagens desse tipo de dispositivos são apresentadas:

- Por conta das reduzidas dimensões, estes relés ocupam menos espaço;
- Redução do número de componentes;
- Implementação e projeto são mais simples;
- Redução dos testes de instalação e manutenção.

Devido aos sistemas elétricos de potência trabalharem com altos níveis de tensão, não é possível que os valores de tensão e corrente sejam fornecidos diretamente aos relés. Isso causaria severos danos ao equipamento. Dessa forma, transformadores para instrumento (TI) são responsáveis pela interface entre os sistema elétrico e os dispositivos de medição. Os transformadores de corrente (TC) fornecem valores de corrente enquanto os transformadores de potencial (TP) são os responsáveis pela informação dos valores de tensão.

Nos SEP que trabalham com tensões acima de 138 kV, por questões econômicas, emprega-se transformadores de potencial capacitivos (TPC) como o transformador para instrumento que irá fornecer dados ao dispositivo de proteção (D'AJUZ, 1985). Na

frequência fundamental ( $f = 60$  Hz) a atuação do TPC é muito eficiente, fornecendo ao dispositivo de proteção um réplica muito próxima da real da tensão do sistema (PAJUELO; RAMAKRISHNA; SACHDEV, 2008). Todavia, quando componentes de alta frequência são introduzidas no sinal de tensão do enrolamento primário, por motivos de falta ou alguma manobra no SEP, o transformador não tem um bom desempenho e isso pode levar ao fornecimento de informações erradas aos relés. Essa mudança de comportamento se deve a energia armazenada em capacitores e indutores que compõem o transformador (FERNANDES., 2003). O campo elétrico dos capacitores e o fluxo elétrico dos indutores não admitem mudanças abruptas. Dessa forma quando há o colapso da tensão do sistema, a energia armazenada nos elementos citados causam severos transitórios que acabam por comprometer a atuação dos relés de proteção. (KASZTENNY VINCE ASARO, 2000)

Em (FERNANDES., 2003) um exemplo de má atuação de relés devido a transitórios no TPC é reportado. A CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco) observou que em algumas ações de rotina de manobras com chaves seccionadoras provocaram a atuação de um relé de sobretensões. Este mesmo dispositivo era alimentado por um transformador de potencial capacitivo.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho possui 2 objetivos principais. O primeiro consiste na investigação de como será a distorção do sinal de saída do TPC em relação ao sinal de entrada sob circunstâncias de falta. Por meio da resposta em frequência dos transformadores será analisado como se dá a atenuação ou amplificação das componentes harmônicas incluídas no sinal. Em um segundo momento será analisada a influência de alguns tipos de transformadores de potencial capacitivos de 230 kV em métodos de estimação fasorial. Estes fasores estimados pelos algoritmos são os usados como base pelo relé para avaliar o funcionamento do sistema.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Transformadores de Potencial Capacitivos

Transformadores de potencial (TP) são dispositivos que seus enrolamentos primário são acoplados em derivação com sistemas elétricos de potência. Esses equipamentos tem como finalidade reduzir a tensão de alimentação a níveis capazes de fornecer dados do sistema a dispositivos de medição, controle e proteção sem danificá-los.

Atualmente os três tipos de TPs mais difundidos são os transformadores de potencial indutivo (TPI), transformadores de potencial resistivo (TPR), bem como os transformadores de potencial capacitivos (TPC). Em sistemas elétricos de potência (SEP) com tensão nominal entre 600 V e 69 kV o TPI é o dispositivo mais utilizado. Entre 69 kV até a tensão de 138 kV qualquer um dos tipos supracitados pode ser usado, salvo o caso onde o sistema utiliza PLC (Power Line Carrier). Nessa situação em específico o TPC é o equipamento que deve ser usado. Acima de 138 kV, o uso de transformadores de potencial capacitivos é imposto pelo fato de esses equipamentos possuírem menor custo de produção do que os TPIs. (SILVA, 2015)

A figura 1 abaixo representa o circuito de um TPC com seus elementos básicos. A coluna de capacitores formada por  $C_1$  e  $C_2$  é um divisor de tensão capacitivo. O ponto central entre os dois capacitores tem um nível de tensão de 10 a 20 kV. Dessa forma é possível usar um transformador de potencial indutivo de menores dimensões e com menor isolamento. Esse TPI, então, reduz a tensão dos enrolamentos primários para que os dispositivos de proteção, medição ou controle possam ser alimentados.

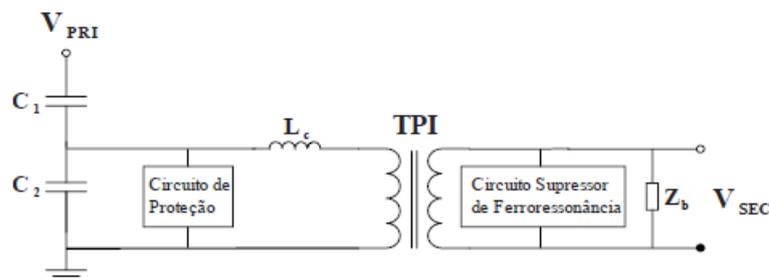


Figura 1 – Circuito básico de um TPC

Fonte: (REIS, 2015)

O reator de compensação  $L_c$  mostrado na figura acima, é projetado pelo fabricante para controlar a defasagem imposta pela coluna capacitiva do primário do transformador.

Para que esse efeito seja atenuado a seguinte equação deve ser satisfeita:

$$\omega L_c = \frac{1}{\omega(C_1 + C_2)} \quad (2.1)$$

Em algumas situações, como após a eliminação de um curto circuito no secundário de um TPC, sobretensões ou até mesmo tensões com frequência abaixo da fundamental podem surgir no capacitor  $C_2$ . Essas tensões podem levar a ocorrência do fenômeno da ferroressonância (SILVA, 2015). Tal fenômeno consiste na ressonância da capacitância com algum valor de indutância não linear dos componentes que possuem núcleo de ferro. (FERNANDES., 2003)

Fenômenos como a ferroressonância não podem ser admitidos nos transformadores, caso contrário, informações erradas, como correntes destrutivas poderiam ser transmitidas aos dispositivos ligados ao secundário do TPC. O circuito de supressão de ferroressonância (CSF) é o responsável por abrandar esse fenômeno. Esse circuito na figura 1 está acoplado ao enrolamento secundário do TPI mas em alguns casos também podem ser acoplados ao enrolamento primário (FERNANDES., 2003). O CSF pode ser classificado como ativo quando é constituído por dispositivos semicondutores. No caso desse circuito supressor ser formado apenas por resistores, capacitores e indutores, então, este é dito passivo.

Na frequência fundamental ( $f = 60$  Hz), os transformadores de potencial capacitivos conseguem reproduzir no seu enrolamento secundário uma réplica próxima da real da tensão do SEP. No entanto, sob a condição de falta onde componentes de alta frequências são introduzidas, o equipamento não possui o mesmo desempenho. Esse comportamento anômalo do TPC em condições de falta pode prejudicar os algoritmos de estimação dos fasores de tensão do relés. (SILVA et al., 2012)

## 2.2 Série e Transformada de Fourier

### 2.2.1 Série de Fourier

A série de Fourier permite que sinais periódicos sejam representados em função de uma soma de funções trigonométricas, sendo estas, senos e cossenos. (LOPES et al., 2015)

Em (OPPENHEIM, 1983) é afirmado que um sinal é periódico se, para algum valor positivo de  $T$ , a igualdade a seguir deve ser respeitada:

$$x(t) = x(t + T) \quad (2.2)$$

O período fundamental de  $x(t)$  é representado pelo menor valor positivo e não zero de  $T$  para o qual a equação (2.2) é satisfeita. Portanto a frequência fundamental do sinal será dada por  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ .

O sinal  $e^{j\omega_0 t}$  é um exemplo de sinal periódico com período fundamental  $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ . De acordo com o a equação (2.2) é possível se criar um grupo de exponenciais, harmonicamente relacionadas, da seguinte forma:

$$\phi(t) = e^{jk\omega_0 t} = e^{jk(\frac{2\pi}{T})t} \quad (2.3)$$

Onde  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Cada um dos sinais expressados em (2.3) são periódicos com período  $T$  e tem suas frequências fundamentais múltiplos de  $\omega_0$ . Dessa forma, a combinação linear das exponenciais complexas relacionadas harmonicamente na forma:

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} = \sum_{-\infty}^{+\infty} a_k e^{jk(\frac{2\pi}{T})t} \quad (2.4)$$

também é periódica com período  $T$ .

Para  $k = \pm 1$  a função possui a frequência fundamental  $\omega_0$  e é chamada de componente fundamental ou componente de primeira harmônica. Genericamente falando, para  $k = \pm N$  a componente é denominada componente de  $N$ th harmônica.

De acordo com (OPPENHEIM, 1983) para se obter a representação de um sinal periódico em função da soma de senos e cossenos devemos fazer algumas considerações. Primeiramente supõe-se que  $x(t)$  é real e pode ser representado como a equação (2.4). Dessa forma, considerando  $x(t) = x^*(t)$  (conjugado complexo), temos:

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} a_k^* e^{-jk\omega_0 t} \quad (2.5)$$

Substituindo  $k$  por  $-k$ :

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} a_{-k}^* e^{jk\omega_0 t} \quad (2.6)$$

Comparando as equações (2.4) e (2.6), para que a igualdade seja satisfeita é necessário que  $a_k = a_{-k}^*$ . Rearranjando, tem-se:

$$a_k^* = a_{-k} \quad (2.7)$$

A equação (2.4) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{+\infty} [a_k e^{jk\omega_0 t} + a_{-k} e^{-jk\omega_0 t}] \quad (2.8)$$

De acordo com a equação (2.7), substitui-se  $a_{-k}$  por  $a_k^*$ . Então:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{+\infty} [a_k e^{kj\omega t} + a_k^* e^{-jk\omega t}] \quad (2.9)$$

Como os termos que estão se somando são o conjugado um do outro, então a equação (2.9) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{+\infty} 2\Re[a_k e^{jk\omega t}] \quad (2.10)$$

fazendo  $a_k = B_k + jC_k$  e aplicando a identidade de Euler  $e^{ix} = \cos x + j \sin x$ , tem-se:

$$x(t) = a_0 + 2 \sum_{k=1}^{+\infty} [B_k \cos k\omega_0 t - C_k \sin k\omega_0 t] \quad (2.11)$$

Analisando a equação (2.11) é possível ver que um sinal periódico qualquer  $x(t)$  pode ser representado em termos de senos e cossenos.

Os coeficientes da série ( $B_k$  e  $C_k$ ) podem ser encontradas de acordo com as equações a seguir:

$$B_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \cos(2\pi k f_0 t) dt \quad (2.12)$$

$$C_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \sin(2\pi k f_0 t) dt \quad (2.13)$$

Uma outra representação possível desse sinal pode ser obtida se na equação (2.10)  $a_k$  for expressado na forma polar como  $a_k = A_k e^{j\theta_k}$ . Fazendo a manipulação matemática necessária, o resultado será:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{+\infty} A_k \cos(k\omega_0 t + \theta_k) \quad (2.14)$$

Onde,

$$A_k = \sqrt{B_k^2 + C_k^2} \quad (2.15)$$

e

$$\theta_k = \arctan\left(\frac{-C_k}{B_k}\right) \quad (2.16)$$

A equação (2.14), mais adiante, será utilizada como a base para a explicação das técnicas de estimação fasorial que serão avaliadas neste trabalho.

## 2.2.2 Transformada de Fourier

A transformada de Fourier é uma adaptação da série de Fourier para sinais não periódicos. Neste caso, deve-se fazer a suposição de que sinais não periódicos possuem um período infinito. Dessa forma, como período é o inverso da frequência, quanto mais as componentes de um sinal estão separados no domínio no tempo, mais estas estarão próximas no domínio da frequência. Portanto, como período é infinito, a combinação linear usando o somatório da série de Fourier, agora, tende para uma integral. A transformada pode ser definida como se segue:

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.17)$$

A inversa da transformada de Fourier pode ser calculada de acordo com a equação (2.18). (OPPENHEIM, 1983)

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(j\omega)e^{j\omega t} dt \quad (2.18)$$

A transformada de Fourier também pode ser aplicada a sinais periódicos para se observar o espectro desses sinais no domínio da frequência. A seguir tem-se a demonstração da representação de um sinal  $\cos \omega_0 t$  no domínio da frequência.

Considere a seguinte função impulso:

$$F(\omega) = 2\pi\delta(\omega - \omega_0) \quad (2.19)$$

Aplicando-se a transformada inversa, tem-se:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} 2\pi\delta(\omega - \omega_0)e^{-j\omega t} dt$$

$$f(t) = e^{-j\omega_0 t} \quad (2.20)$$

A partir de (2.15) e (2.16), pode-se afirmar que:

$$F(e^{-j\omega_0 t}) = 2\pi\delta(\omega - \omega_0) \quad (2.21)$$

A função  $\cos \omega_0 t$ , pode ser escrita em função de componentes exponenciais da seguinte forma:

$$\cos \omega_0 t = \frac{e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t}}{2} \quad (2.22)$$

Agora, aplica-se a transformada de Fourier nessa nova forma de  $\cos \omega_0 t$  apresentada por (2.18):

$$\begin{aligned} F[\cos \omega_0 t] &= \frac{1}{2}(F[e^{j\omega_0 t}] + F[e^{-j\omega_0 t}]) \\ F[\cos \omega_0 t] &= \frac{1}{2}[2\pi\delta(\omega - \omega_0) + 2\pi\delta(\omega + \omega_0)] \\ F[\cos \omega_0 t] &= \pi[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)] \end{aligned} \quad (2.23)$$

De acordo com (2.19) é possível ver que a representação de um sinal  $\cos \omega_0 t$  no domínio da frequência corresponde a um impulso situado na frequência  $\omega_0$ . Então, um sinal, no tempo, composto por várias componentes do tipo cosseno, no domínio da frequência é representado por um trem de impulsos. Dessa forma é possível analisar o espectro harmônico do sinal pois, cada componente harmônica possui uma frequência que é um múltiplo da frequência fundamental.

## 2.3 Algoritmos de Estimação Fasorial

Algoritmos de estimação fasorial são rotinas implementadas em relés micro-processados que se baseiam na análise das grandezas elétricas fundamentais dos sistemas elétricos de potência (LOPES et al., 2012).

Após o processo de estimação fasorial o que se obtém é um fasor composto por módulo e ângulo. É muito comum a aplicação da teoria dos fasores para a resolução de circuitos de corrente alternada. Atualmente, essa teoria tem se expandido para o monitoramento dos sistemas elétricos em tempo real. Nesses casos o algoritmo de estimação deve ser capaz de eliminar ruídos ou perturbações de frequências diferentes da nominal do SEP que por ventura se somem ao sinal de tensão. (LOPES et al., 2015)

No seção 2.2.1 foi demonstrada que um sinal periódico pode ser decomposto pela série de Fourier da seguinte forma:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{+\infty} A_k \cos(k\omega_0 t + \theta_k)$$

De forma que  $A_k = \sqrt{B_k^2 + C_k^2}$  e  $\theta_k = \arctan\left(\frac{-C_k}{B_k}\right)$ .  $B_k$  e  $C_k$  são os coeficientes da série de Fourier que podem ser determinados através das equações (2.12) e (2.13), respectivamente.

Através dessas equações apresentadas acima, um fasor fundamental pode ser calculado:

$$X_n = \frac{A_k}{\sqrt{2}} \angle \theta_k = \frac{1}{\sqrt{2}}(B_k - jC_k) \quad (2.24)$$

Nos algoritmos de estimação em geral  $B_k$  e  $C_k$  são associados com a parte real e parte imaginária, respectivamente, do sinal em estudo. Embora diferentes algoritmos possuam suas peculiaridades, no geral as equações (2.15) e (2.16) são as usadas para se calcular o fasor fundamental representativas do SEP. (LOPES et al., 2012)

Nas seções subseqüentes serão apresentados os algoritmos de estimação fasorial que serão avaliados neste trabalho: FCDFE, do inglês *Full Cycle Discrete Fourier Transform* ou Fourier de 1 ciclo e HCDFT, do inglês *Half Cycle Discrete Fourier Transform* ou Fourier de meio ciclo.

### 2.3.1 Fourier de 1 Ciclo (FCDFE)

Esse algoritmo, decorre do desenvolvimento da série de fourrier para um sinal digitalizado com N amostras. No caso desse trabalho N será igual a 16 amostras. As componentes reais e imaginárias desse método são as seguintes:

$$X_{re}(k) = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(k - N + m) \cos\left(\frac{2\pi}{N}m\right) \quad (2.25)$$

$$X_{im}(k) = -\frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(k - N + m) \sin\left(\frac{2\pi}{N}m\right) \quad (2.26)$$

(THORP, 2009)

Nas equações (2.25) e (2.26)  $x(k - N + m)$  é um janela que dados que contém N amostras, correspondentes a 1 ciclo completo do sinal estudado. A janela desliza sobre o sinal e todas as vezes que uma nova iteração se inicia a janela se desloca, avançando. Dessa forma, os valores das componentes reais e imaginárias são recalculados para estimar o fasor. (LOPES et al., 2012)

### 2.3.2 Fourier de Meio Ciclo (HCDFT)

O desenvolvimento desse algoritmo HCDFT é muito similar ao que foi feito no FCDFE. No entanto, no algoritmo de Fourier de meio ciclo o período de observação do sinal é apenas metade do período. Então, nesse trabalho o número de amostras N, para este método, é igual a oito. As componentes real e imaginárias são estimadas como se segue:

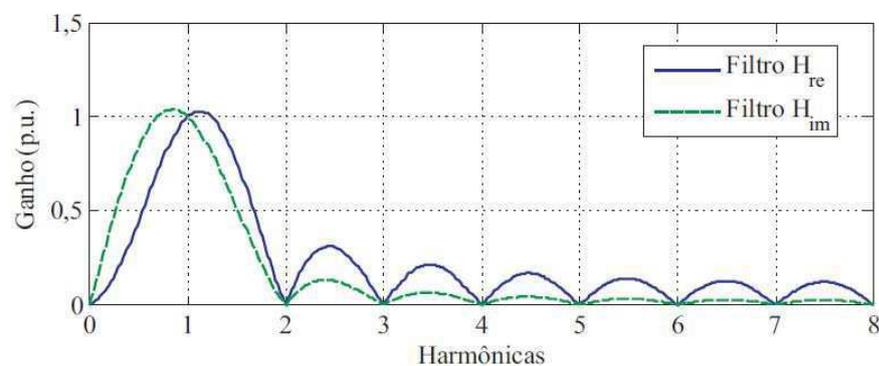
$$X_{re}(k) = \frac{4}{N} \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x(k - N + m) \cos\left(\frac{2\pi}{N}m\right) \quad (2.27)$$

$$X_{im}(k) = -\frac{4}{N} \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x(k - N + m) \sin\left(\frac{2\pi}{N}m\right) \quad (2.28)$$

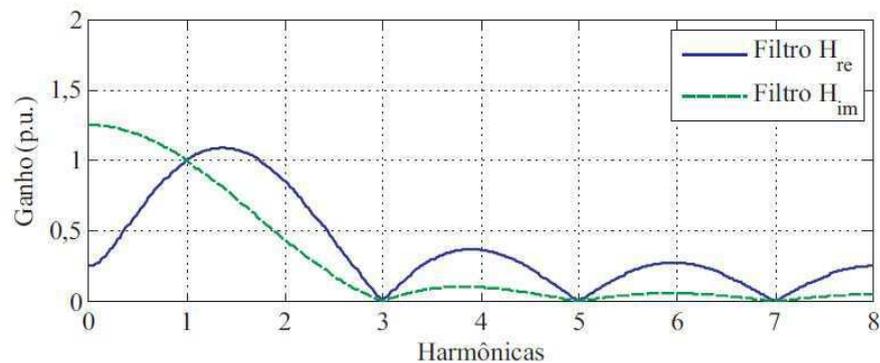
### 2.3.3 Resposta em Frequência dos Algoritmos de Estimação Fasorial

Os algoritmos de estimação devem ser capazes de estimar o fasor da frequência fundamental, desprezando as componentes harmônicas que existirem no sinal. Outro fator que influencia diretamente no desempenho dos algoritmos é a componente DC de decaimento exponencial que uma corrente de falta apresenta. Essa componente tem impacto significativo em algoritmos baseados na série de Fourier. (MUSA; AKSAMOVIC, 2012)

Para avaliar o desempenho dos métodos em (LOPES et al., 2015) a resposta em frequência de uma série de algoritmos, dentre eles FCDFT e HCDFT, foi analisada. As figuras 2(a) e 2(b) mostram os resultados.



(a) Resposta em Frequência do algoritmo FCDFT



(b) Resposta em Frequência do algoritmo HCDFT

Figura 2 – Resposta em Frequência dos algoritmos de estimação de fasores (Fonte: (LOPES et al., 2015))

As respostas dos algoritmos foram avaliadas até a oitava harmônica como mostrado nas figuras. Foi possível concluir que apenas o método FCDFT é capaz de eliminar todas as componentes harmônicas analisadas. Ainda no mesmo trabalho foi observado que o método HCDFT não é capaz de suprimir totalmente a componente DC de decaimento exponencial. Diante do exposto é esperado que o algoritmo de Fourier de 1 ciclo tenha um desempenho superior ao algoritmo de meio ciclo.

## 2.4 Proteção de Distância e a Característica Mho Auto-Polarizado

Proteção de distância é denominada assim porque seu princípio de operação é a medição da impedância de sequência positiva da LT entre o relé e o ponto onde a falta ocorre. Neste processo, a impedância calculada pelo relé é comparada com a impedância do trecho que está sendo protegido. Caso aquela seja menor que esta, então um sinal de *trip* deve ser enviado ao disjuntor local para que este possa atuar (SILVA et al., 2012). A figura 3 a seguir representa o cenário da proteção à distância.

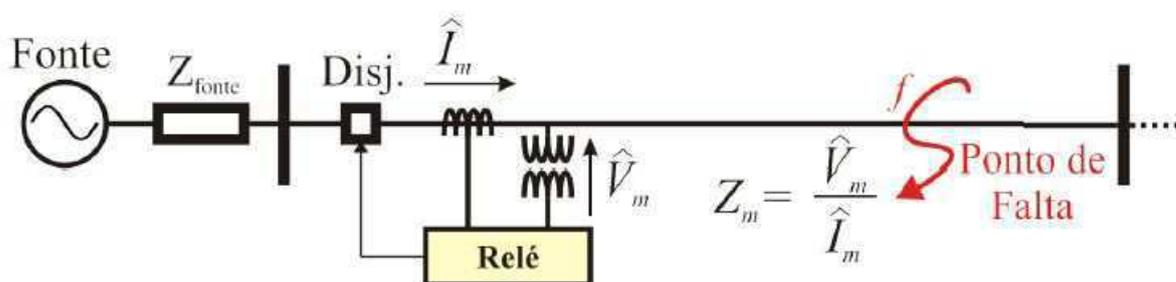


Figura 3 – Esquema de proteção de distância

Fonte: (SILVA et al., 2012)

Esse esquema de proteção é dividido em zonas. Como a LT é muito extensa, é inviável proteger todo o seu comprimento sem que imprecisões na estimação do ponto de falta aconteçam. Dessa forma a primeira zona é ajustada para cobrir 85% da linha. O restante da linha de transmissão deve ser coberto pela zona segunda zona de proteção. Esta deve cobrir, no mínimo 120% da LT, ou seja, sua zona de proteção se estende ao trecho do alimentador subsequente. Geralmente, relés digitais podem possuir até cinco zonas de proteção. (ALSTOM, 2011)

Algumas técnicas são implementadas nos relés de proteção de distância para se diferenciar uma condição de falta de operação normal do SEP. Muitas delas são caracterizadas pela comparação de magnitude e fase. Essas técnicas determinam forma, tamanho e posição das características de operação do relé no diagrama R-X (Resistência-reatância). (SILVA et al., 2012)

Uma das características amplamente utilizadas é definido como característica mho auto-polarizada. Quando esta é plotada no diagram R-X ( $Z^2 = R^2 + X^2$ ) se configura uma circunferência passando pela origem, como mostrado na figura 4. Isto mostra que esse esquema de proteção é direcional e apenas atuará para faltas no sentido AB mostrado na figura 4.

A característica mho pode ser obtida usando um circuito comparador de fase. Esse circuito recebe dois sinais  $S_1$  e  $S_2$ , e a proteção deve atuar todas as vezes que o sinal  $S_2$  estiver atrasado de  $S_1$  na faixa  $90 < \phi < 270$ . O ângulo  $\varphi$  mostrado na figura 4 entre  $Z_n$  e o eixo  $R$  é conhecido como RCA do inglês *Relay Characteristic Angle*

$$\begin{aligned} S_2 &= V - IZ_n \\ S_1 &= V \end{aligned}$$

- $V$  é a tensão de falta obtida através do TPC;
- $I$  é a corrente de falta obtida através do transformador de corrente (TC);
- $Z_n$  é a impedância da LT dentro da zona protegida pelo relé. Esse é o parâmetro usado para ajustar o alcance da proteção. (ALSTOM, 2011)

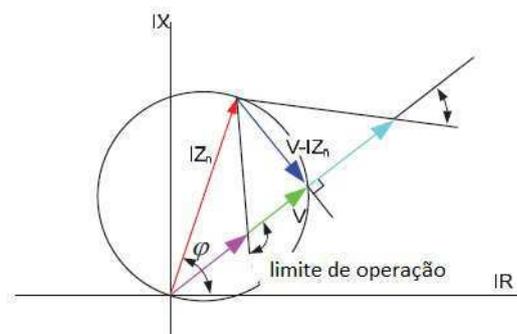


Figura 4 – Característica mho com no diagrama R-X

Fonte: (ALSTOM, 2011)

## 3 TRANSFORMADORES DE POTENCIAL CAPACITIVOS AVALIADOS

Nesse capítulo será detalhado algumas características dos transformadores avaliados para servir de base ao capítulo subsequente. Primeiramente, os modelos de TPCs estudados serão apresentados e suas respostas em frequência serão analisadas para ver como esses equipamentos se comportam quando a tensão do sistema entra em colapso e componentes de alta frequências são adicionadas ao sinal.

Quatro TPCs de 230 kV foram estudados. Com o intuito de simplificar o trabalho os transformadores serão denominados TPC A , TPC B, TPC C, TPC D.

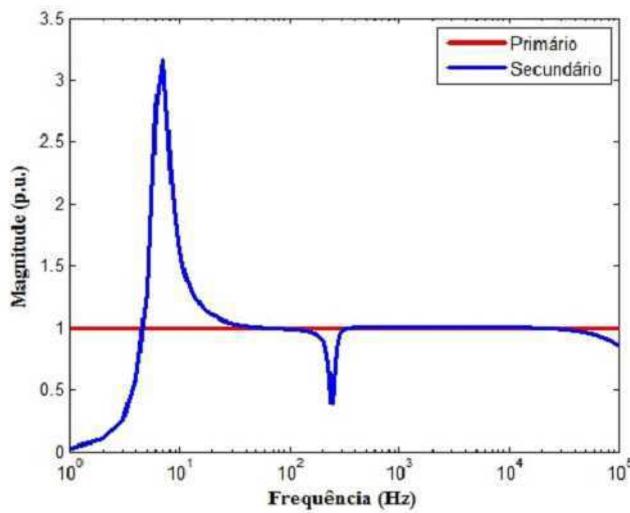
As características, topologia e parâmetros dos TPC A, TPC B, TPC C e TPC D estão disponíveis em (FERNANDES., 2003), (COMMITTEE, 2004) e (CARVALHO, 2008), respectivamente. Os TPCs C e D estão ambos em (CARVALHO, 2008). Todos esses dados sobre os transformadores analisados também podem ser encontrados no anexo A no final deste documento.

### 3.1 Resposta em Frequência dos TPCs

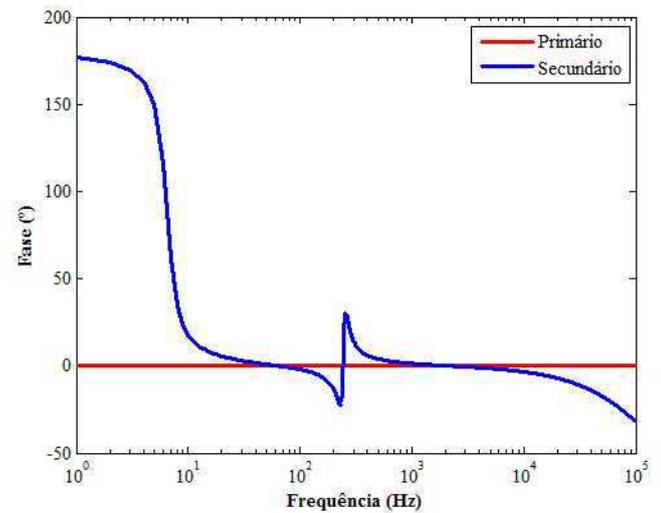
Para se obter a resposta em frequência dos transformadores, módulo e fase, foi utilizado a rotina frequency scan do software ATP (Alternative Transient Program). A faixa de frequência analisada foi de 1 Hz até 100 kHz.

Para facilitar a análise das curvas de resposta em frequência dos equipamentos o módulo da tensão nos enrolamentos primário e secundário será apresentado em por unidade (p.u.). A referência será a tensão de entrada do transformador. Já a fase da resposta em frequência será apresentada em graus elétricos.

As figuras 5, 6, 7 e 8 representam as curvas de resposta em frequência dos TPC A, TPC B, TPC C e TPC D nesta ordem:

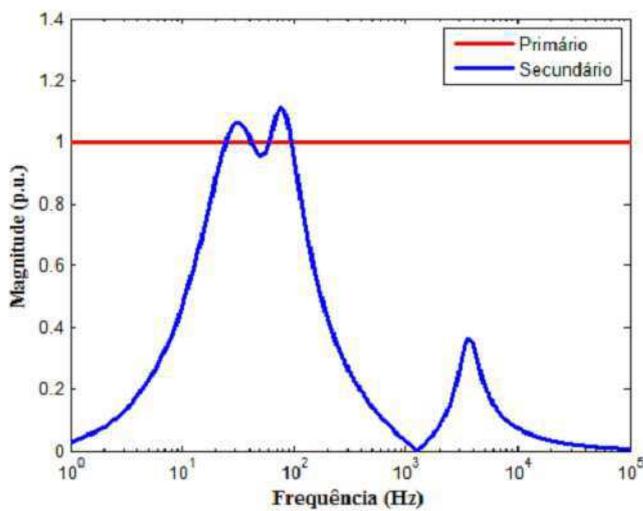


(a) Módulo

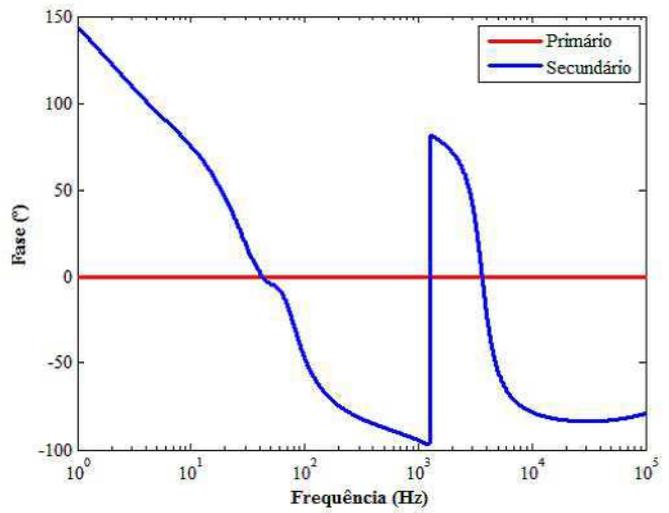


(b) Fase

Figura 5 – Resposta em Frequência TPC A



(a) Módulo



(b) Fase

Figura 6 – Resposta em Frequência TPC B

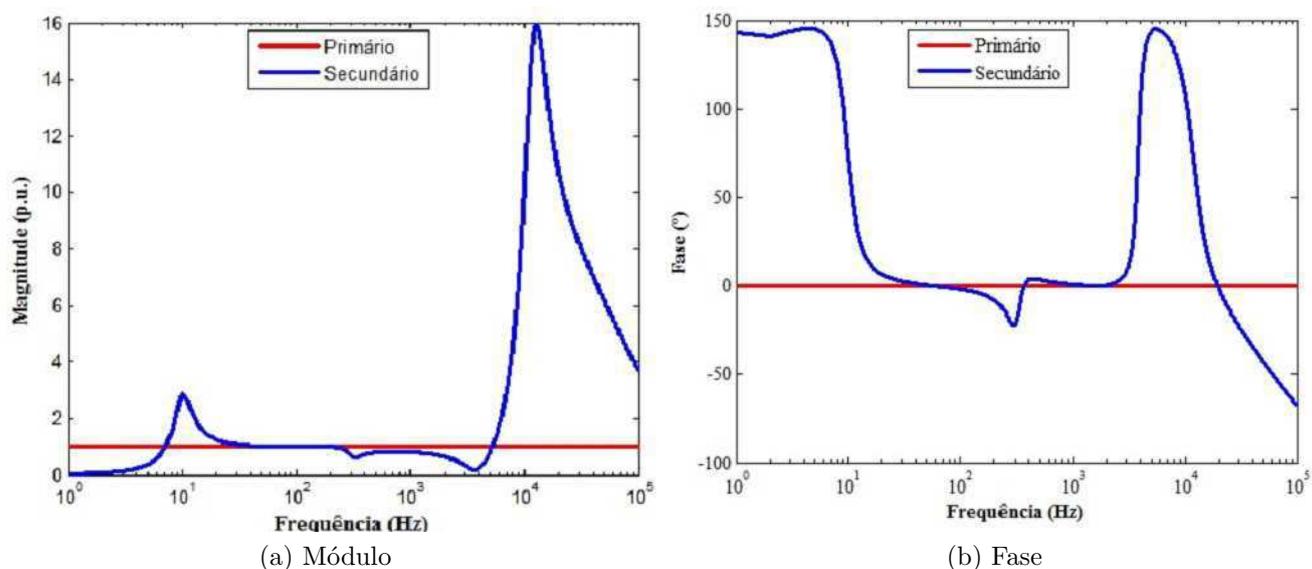


Figura 7 – Resposta em Frequência TPC C

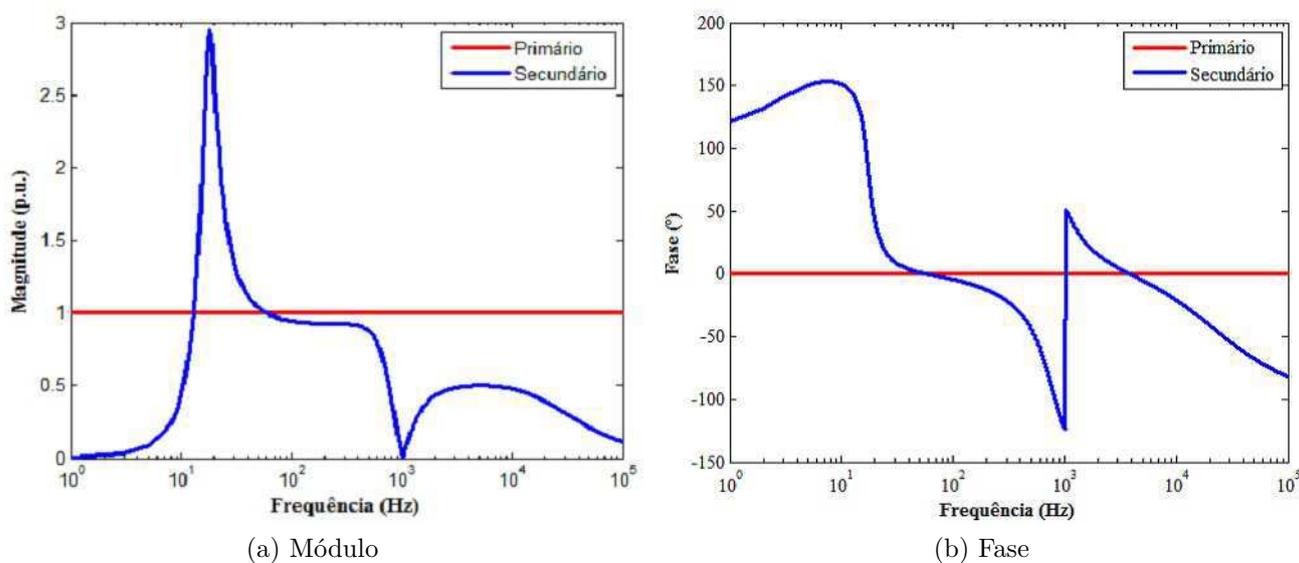


Figura 8 – Resposta em Frequência TPC D

A partir das figuras expostas é possível observar que na frequência fundamental de 60 Hz o módulo da tensão do secundário segue o comportamento do módulo da tensão no lado primário. No entanto para altas frequências, o comportamento da tensão do secundário destoa do comportamento da tensão nos enrolamentos do primário. Em alguns casos há uma tendência à atenuação do módulo da tensão como nos TPCs A, C e D. Por outro lado, no caso do TPC B essa tendência é de amplificação do módulo.

## 4 ANÁLISES E RESULTADOS

Nesse capítulo do trabalho será exposto como os testes aconteceram e os resultados dos processos experimentais realizados. Primeiramente será feita uma análise da distorção harmônica dos transformadores de potencial capacitivos. Na seção seguinte será a vez dos resultados dos testes para a verificação da influência dos transformadores para instrumento estudados com relação aos algoritmos de estimação fasorial.

### 4.1 Análise da Distorção Harmônica dos TPCs

Para se realizar os testes de distorção harmônica com cada transformador um cenário foi criado usando o software ATP. Nesse cenário um SEP de 230 kV como o da figura 9 foi simulado à parâmetros reais. A linha de transmissão tem um extensão  $l = 200km$ . Os parâmetros do sistema elétrico podem ser encontrados na tabela 1 e 2 abaixo:

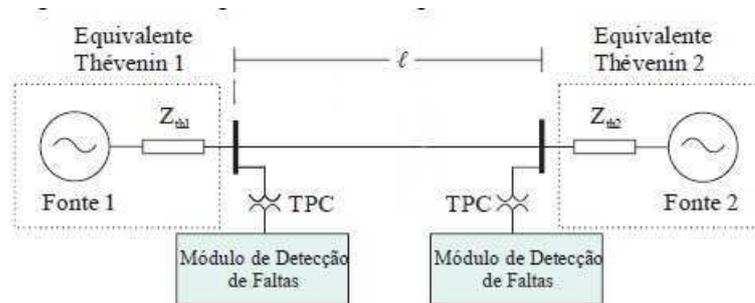


Figura 9 – Sistema Elétrico simulado

(REIS, 2015)

Tabela 1 – parâmetros de sequência da linha de transmissão

Tensão	Sequência	$R(\Omega/km)$	$X(\Omega/km)$	$\omega C(\mu S/km)$
230kV	Positiva	0,098	0,510	3,252
230kV	Zero	0,532	1,541	2,293

Tabela 2 – parâmetros do equivalente Thévenin das fontes

Tensão	Fonte	$V_{th}(p.u.)$	$R_1(\Omega)$	$X(\Omega)$	$R_0(\Omega)$	$X_0(\Omega)$
230kV	1	1,02∠0	0,8713	25,661	1,0141	16,754
230kV	2	0,98∠-10	0,9681	28,513	1,1268	20,838

Para se analisar todas as informações conseguidas através das simulações, uma rotina no matlab foi criada. Nessa rotina foi possível ler os dados advindos do ATP e assim plotar as imagens referentes à tensão do SEP bem como à tensão no lado secundário dos transformadores avaliados. Nessa mesma rotina a transformada de fourrier foi aplicada nos sinais de tensão de entrada e saída dos transformadores para ser possível analisar a distorção harmônica dos mesmos. Com o objetivo de ter um noção numérica da distorção procurada foi necessário fazer o cálculo do THD que vem da sigla em inglês *Total Harmonic Distortion*. Em (BAGGINI, 2008) THD é definido como a razão dos valores eficazes das componentes harmônicas e o valor eficaz da componente fundamental. O Cálculo desse indicador de distorção harmônica pode ser feito como se segue:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (4.1)$$

Neste experimento, adicionalmente às fontes 1 e 2 foram mostradas na tabela 2, foram acrescentadas outras fontes também do tipo cosseno, com os mesmos parâmetros, no intuito de simular componentes de frequências diferentes da fundamental de 60 Hz. As fontes adicionadas tem frequências de 180 Hz, 300 Hz, 420 Hz, 540 Hz, 660 Hz, 780 Hz e 900 Hz. Com essa configuração foi possível simular a presença das componentes harmônicas ímpares desde a terceira até a décima quinta ordem.

A seguir as figuras 10, 11, 12 e 13 mostram como se comportaram as tensões no primário e no secundário dos TPCs A, B, C e D, nesta ordem.

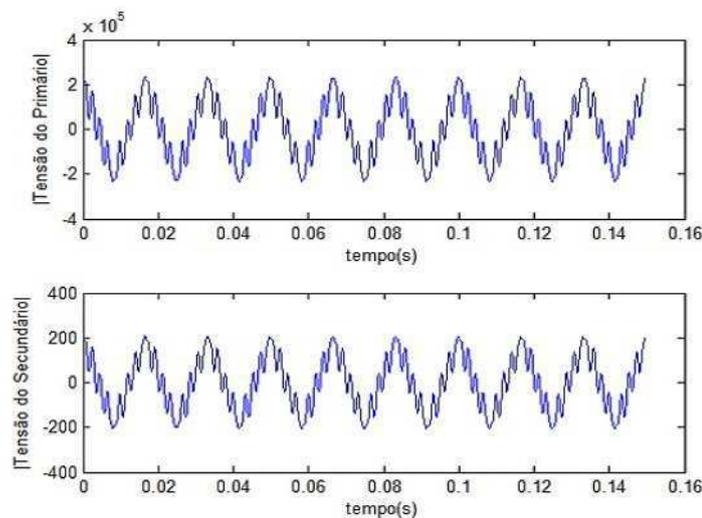


Figura 10 – Tensão nos Terminais do TPC A

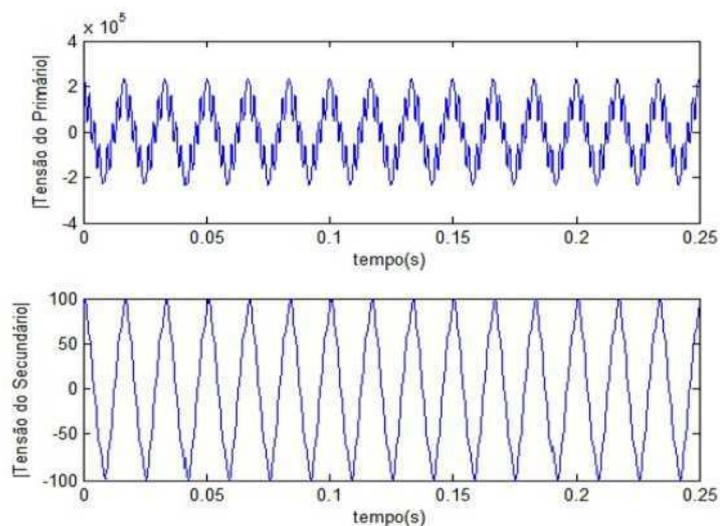


Figura 11 – Tensão nos Terminais do TPC B

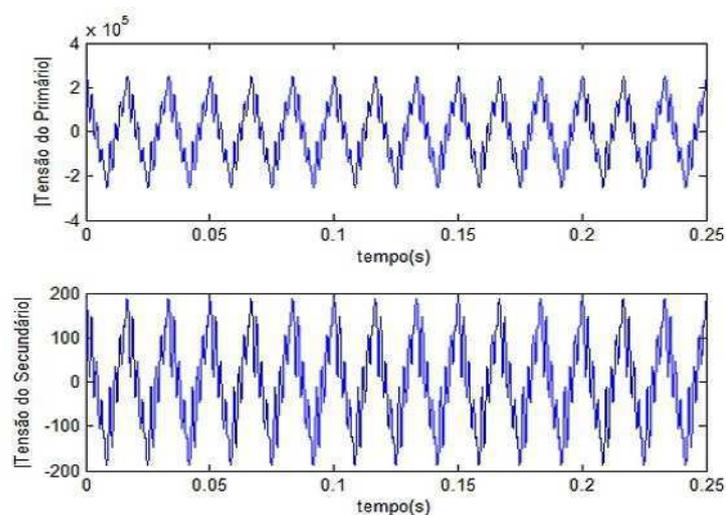


Figura 12 – Tensão nos Terminais do TPC C

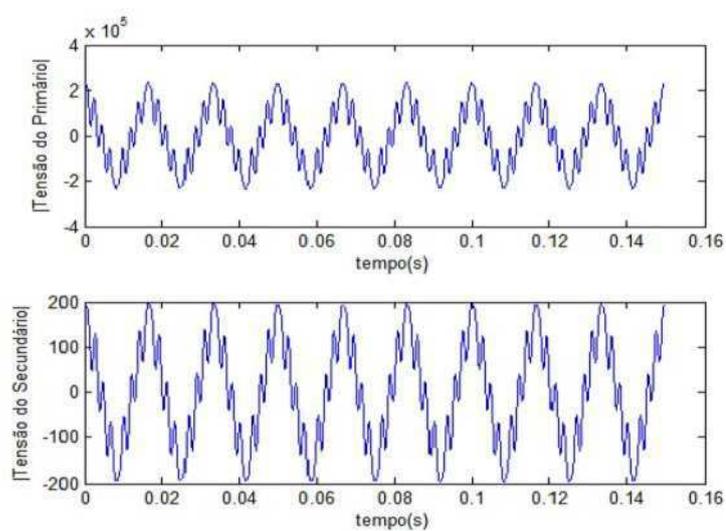


Figura 13 – Tensão nos Terminais do TPC D

Pelo o que foi exposto nas imagens pode-se comprovar o que foi dito anteriormente na introdução deste trabalho. Ao se introduzir no sinal de entrada do TPC componentes diferentes de 60 Hz, o comportamento do sinal no enrolamento secundário não segue o sinal de entrada. Em alguns casos essa mudança é mais clara do que em outras. No TPC B a tensão do secundário se aproxima muito de uma onda com apenas a componente fundamental. Isso é o oposto do sinal distorcido de entrada do mesmo equipamento. Já no caso do TPC A essa mudança quase não é visível. Isso acontece devido às diferentes respostas em frequência dos equipamentos. Dessa forma, as componentes harmônicas são amplificadas ou atenuadas de forma diferente de acordo com o transformador aplicado. Isso se tornará mais claro adiante assim que forem apresentados as figuras referentes ao conteúdo harmônico do sinal de entrada e saída de cada transformador.

No ambiente do matlab, a transformada de Fourier foi aplicada aos sinais nos enrolamentos primário e secundário dos TPCs para que a distorção harmônica do lado de baixa tensão com relação ao lado de alta tensão pudesse ser avaliada. As figuras 14, 15, 16 e 17 representam o espectro de frequência de entrada e saída dos transformadores após a transformada ser aplicada:

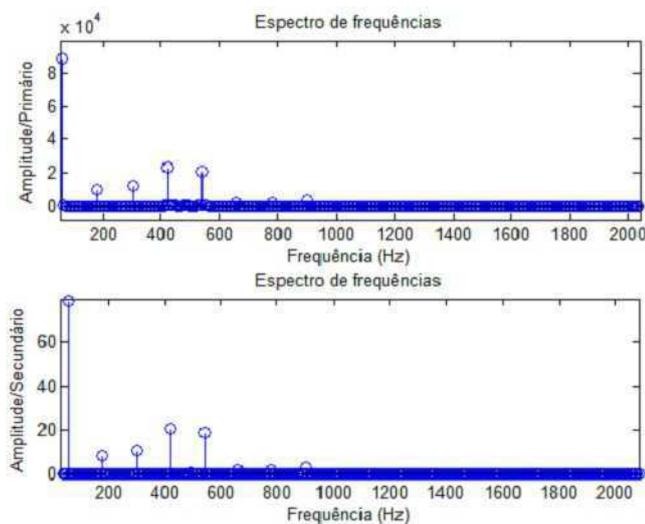


Figura 14 – Espectro de frequência dos sinais de tensão da entrada e saída do TPC A

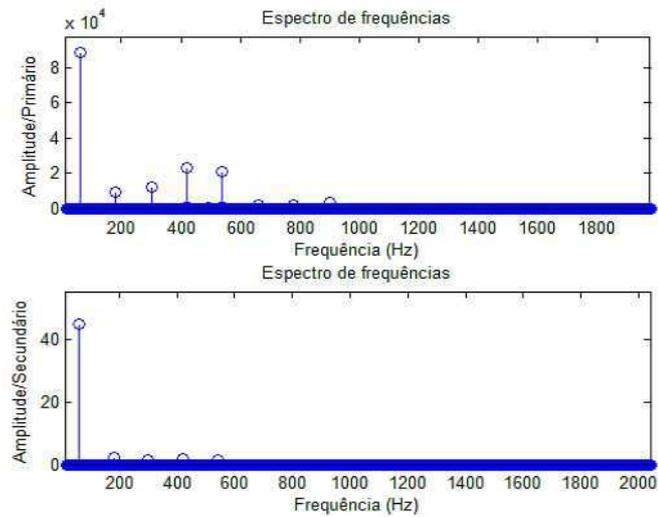


Figura 15 – Espectro de frequência dos sinais de tensão da entrada e saída do TPC B

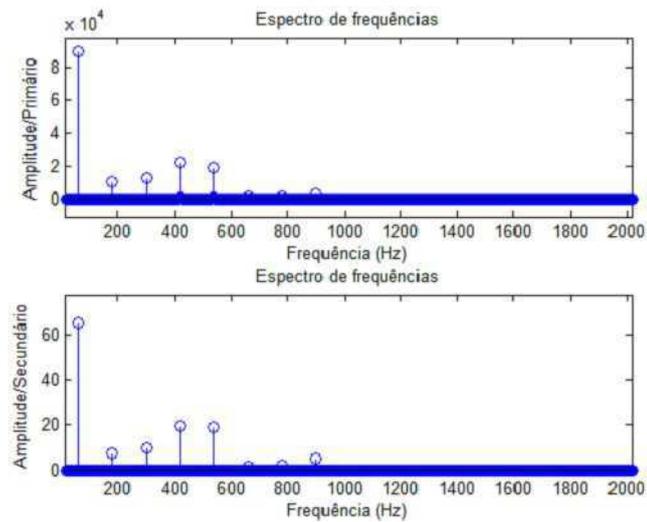


Figura 16 – Espectro de frequência dos sinais de tensão da entrada e saída do TPC C

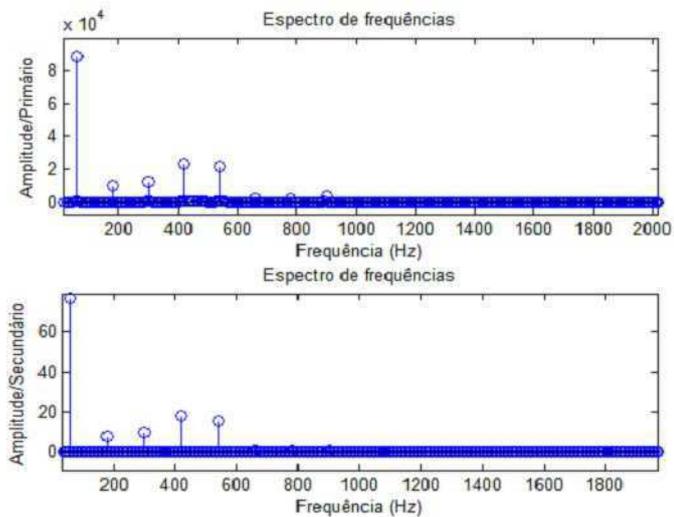


Figura 17 – Espectro de frequência dos sinais de tensão da entrada e saída do TPC D

Associando as figuras expostas com aquelas que representam a resposta em frequência dos TPCs pode ser entendido o porque da tensão do secundário do transformador não seguir a do primário quando esta entra em colapso.

É sabido que quando uma falta ocorre, por exemplo, componentes de alta frequência são adicionadas ao sinal de entrada do TPC, a qual corresponde à tensão do SEP. Essas componentes adicionadas tem seus módulos atenuados ou amplificadas pelo equipamento. Contudo o módulo da componente fundamental permanece o mesmo, apenas rebaixado de acordo com a relação de espiras do transformador.

Um exemplo bem claro disso que está sendo explicado pode ser visto na figura 15 (TPC B). Na faixa de frequência que varia de 200 a 600 Hz existem quatro componentes harmônicas no sinal de entrada do transformador. Ao se analisar o sinal de saída é possível notar uma forte atenuação do módulo dessas componentes em relação ao módulo da componente fundamental. Se a figura 6, a qual representa a resposta em frequência do TPC B, for analisada pode-se constatar que exatamente nessa faixa de frequência aqui exemplificada o módulo do sinal do secundário é atenuado com relação ao primário.

No caso do TPC C, estudando sua resposta em frequência (figura 7), pode-se perceber que para altas frequências, o módulo da tensão secundária é amplificada com relação ao primário. No entanto, a figura 16, que contém o espectro de frequência do equipamento não mostra tal amplificação do módulo das componentes harmônicas. Isso acontece porque as componentes que estão presente no sinal do lado de alta tensão estão situadas numa faixa de frequência onde amplificação é quase nula. Apenas a componente de 900 Hz é levemente amplificada.

Tendo em vista o exposto acima, podemos concluir que não se pode prever como o sinal do secundário do transformador vai se comportar quando o sinal do primário entrar em colapso. Isso acontece porque a amplificação ou atenuação do sinal vai depender de quais componentes de alta frequência foram adicionadas ao sinal de entrada durante uma falta ou uma manobra de chaveamento no SEP, por exemplo.

Para poder quantificar a distorção harmônica de cada TPC, o índice THD foi calculado. Este cálculo foi feito através do matlab usando o mesmo princípio da equação (4.1). Os resultados estão na tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – Índice THD do sinal primário e secundários dos TPCs

TPC	THD	
	Enrolamento Primário	Enrolamento Secundário
A	0,156	0,154
B	0,156	$7,47 \times 10^{-3}$
C	0,156	0,213
D	0,156	0,123

Os valores do índice THD confirmam o que foi visto nas figuras 14, 15, 16 e 17. A maior distorção aconteceu no TPC B que possuía um THD de 0,156 no sinal de tensão de entrada e foi atenuada para um THD de  $7,47 \times 10^{-3}$ . Isso pode ser visualmente confirmado pelas imagens.

## 4.2 Influência dos TPCs nos Algoritmos de Estimação Fasorial

Na seção anterior foi feita uma análise da distorção harmônica da tensão do secundário dos transformadores de potencial capacitivos em relação à tensão no primário. Viu-se que se o sinal de entrada do equipamento possuir componentes de alta frequência, a tensão de saída não será uma cópia da entrada.

A tensão de saída de um TPC fornece os dados referentes à tensão do SEP para o relés. Estes, por sua vez, usam estas informações como base de cálculo na investigação de algum possível problema no sistema para, se necessário, atuar e causar o menor dano possível ao SEP. Se os dados que foram entregues ao dispositivo de proteção são mal estimados, isso pode causar dois possíveis problemas. O primeiro é: os dispositivos de proteção atuarem causando uma interrupção desnecessária no fornecimento de energia elétrica. O segundo acontece no caso em que o sistema é submetido a uma falta e os dispositivos de proteção ou não atuam, ou o fazem com atraso, o que seria bastante danoso.

Tendo em vista o que foi exposto acima, nesta parte do trabalho será investigada a interferência dos transformadores de potencial capacitivos nos algoritmos de estimação fasorial. Estes algoritmos são os implementados nos relés para que estes possam analisar a sanidade do SEP.

Para se realizar o procedimento experimental foi simulado o mesmo sistema elétrico mostrado na figura 9. No entanto, nesta seção uma falta foi aplicada ao longo da linha como mostrado na figura 18. Todos os parâmetros deste SEP podem ser encontrados na tabelas 1 e 2.

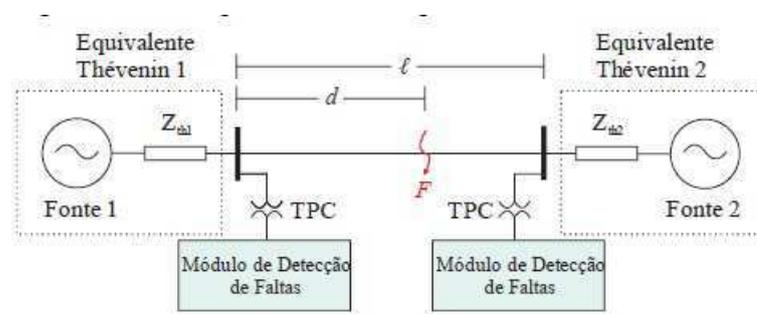


Figura 18 – Sistema Elétrico simulado

Fonte: (REIS, 2015)

Utilizando o software ATP, uma falta foi aplicada na distância  $d = 172$  km. Este ponto foi escolhido pois fica a apenas 2 km do limite de proteção de primeira zona do relé de proteção, a qual cobre 85% da LT. A rotina do ATP gera um arquivo de dados com as informações de tensão e corrente do sistema ao longo da simulação. Para se avaliar os algoritmos de estimação um relé foi implementado usando Matlab. Nessa implementação os dados eram carregados em uma variável e logo em seguida eram filtrados por um filtro Butterworth de 3 ordem. Esse procedimento é necessário para evitar o efeito de aliasing ou sobreposição de espectro quando o sinal for amostrado (REIS et al., 2015).

Após o tratamento dos dados os fasores foram estimados utilizando tanto os dados do SEP diretamente, que foram tomados como referência, como também usando os dados fornecidos pelos TPCs. Os algoritmos de estimação aqui testados são: Fourier de 1 ciclo ou FCDFT e Fourier de meio ciclo ou HCDFT.

#### 4.2.1 Testes com o algoritmo FCDFT

As figuras 19, 20, 21 e 22 mostram o resultado da comparação entre os fasores estimados com os dados do sistema elétrico (em verde) e com os dados fornecidos pelos TPCs A, B, C e D, respectivamente (em vermelho). O sinal senoidal do azul representa a tensão do SEP. O algoritmo de estimação aplicado nesse caso é o fourier de 1 ciclo. Ao lado de cada simulação completa há uma figura onde é possível analisar o período transitório após a aplicação da falta na LT.

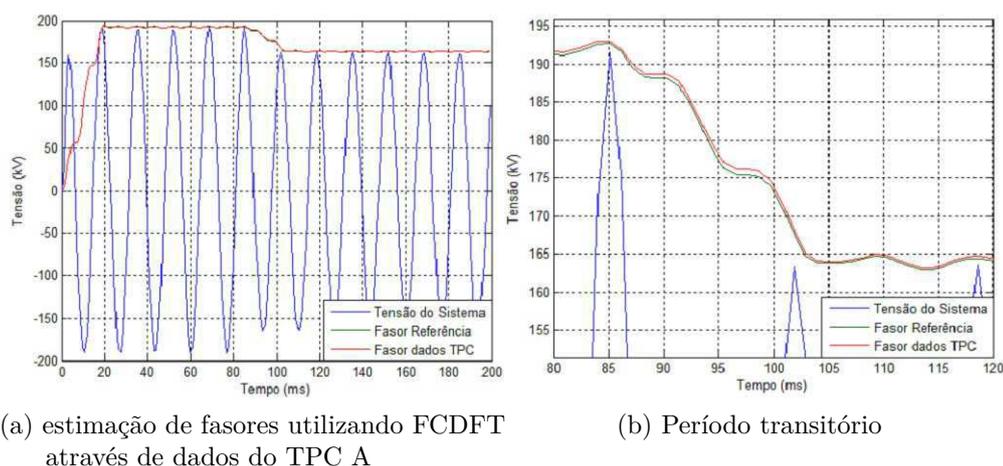


Figura 19 – estimação de fasores utilizando FCDFT através de dados do TPC A

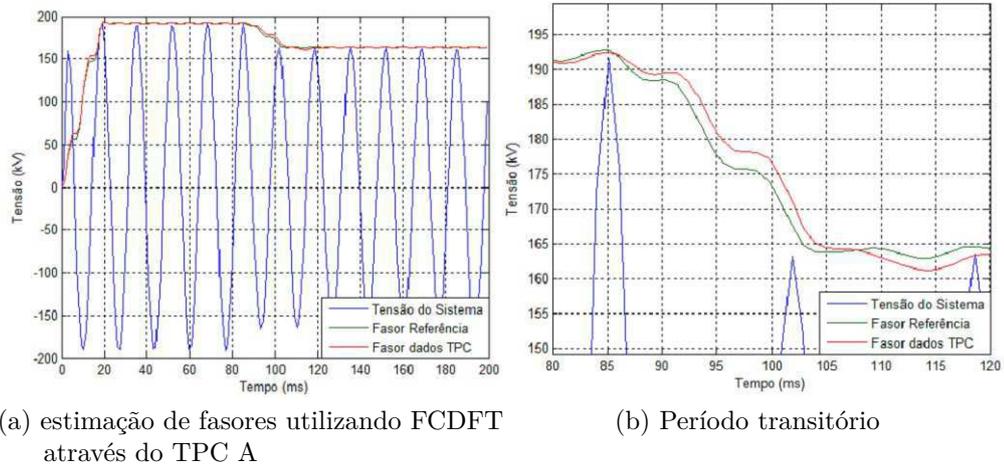


Figura 20 – estimação de fasores utilizando FCDFT através de dados do TPC B

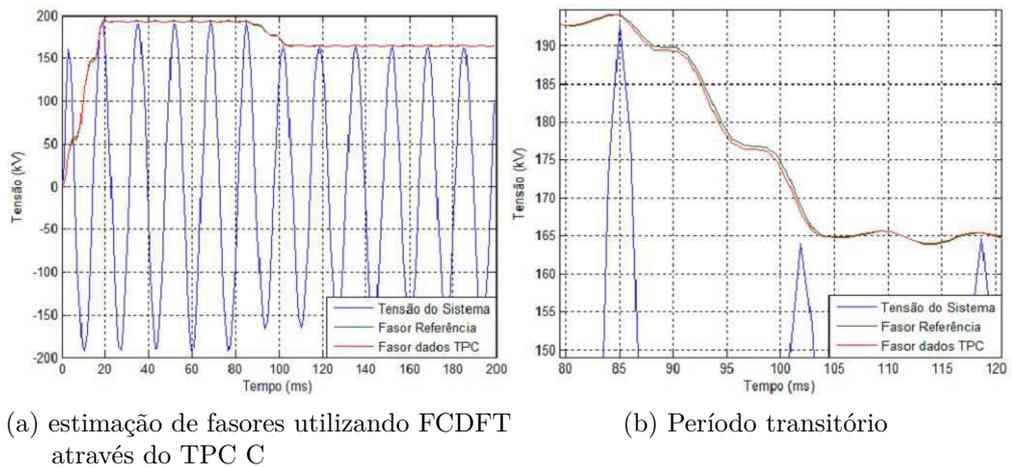


Figura 21 – estimação de fasores utilizando FCDFT através de dados do TPC C

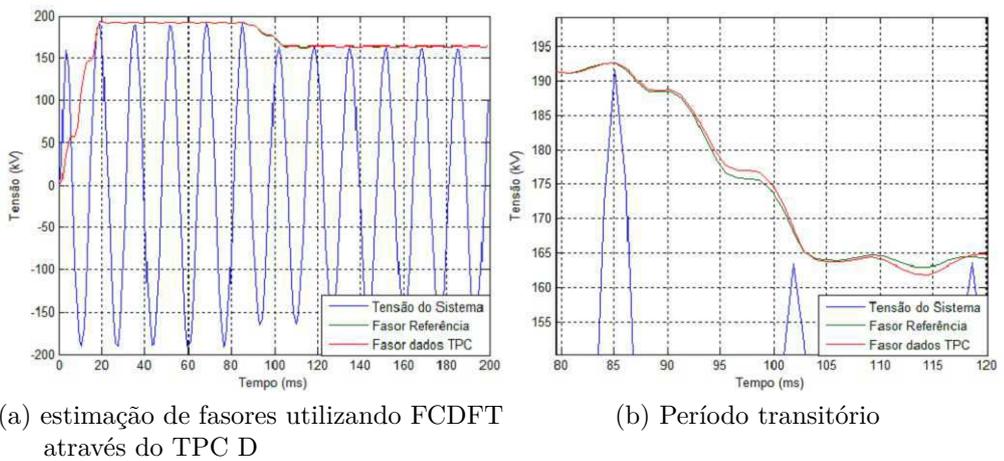


Figura 22 – estimação de fasores utilizando FCDFT através de dados do TPC D

Das figuras expostas acima fica claro que durante o período transitório o comportamento do fasor estimado de forma indireta através dos transformadores de potencial capacitivo não segue o fasor estimado com dados do sistema. Relacionando isso com a seção de distorção harmônica, pode-se dizer que esse é o comportamento esperado. Isso acontece porque os fasores foram calculados através de dados distorcidos pelos TPCs.

As figuras 23, 24, 25 e 26 representam o comportamento do comparador de fase da característica mho auto-polarizada do relé para cada transformador.

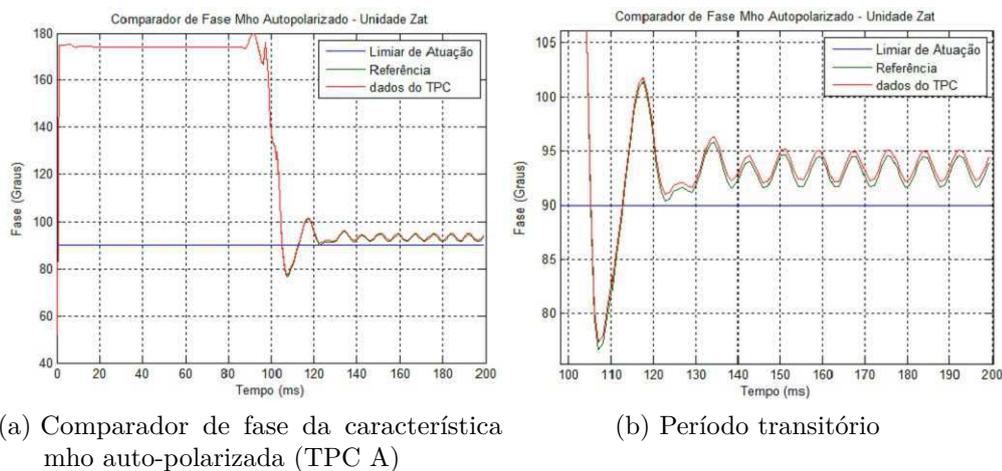


Figura 23 – Comparador de fase da característica mho auto-polarizada (TPC A)

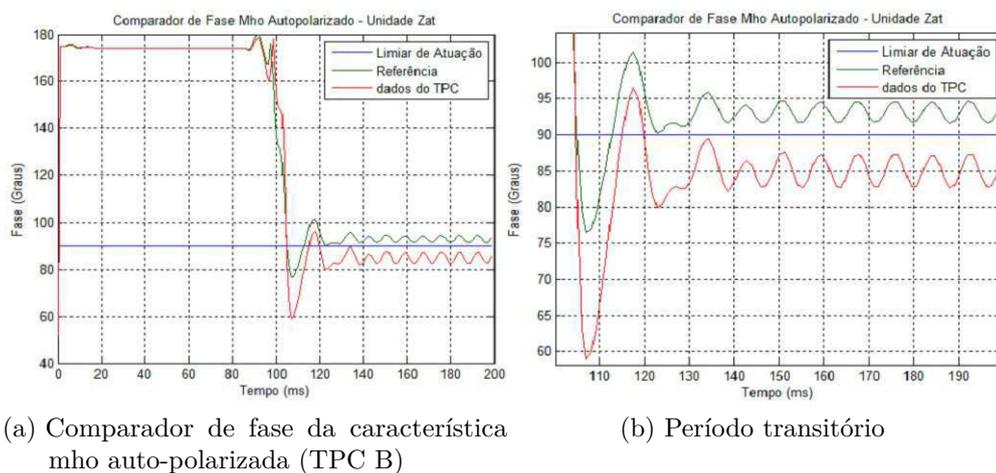


Figura 24 – Comparador de fase da característica mho auto-polarizada (TPC B)

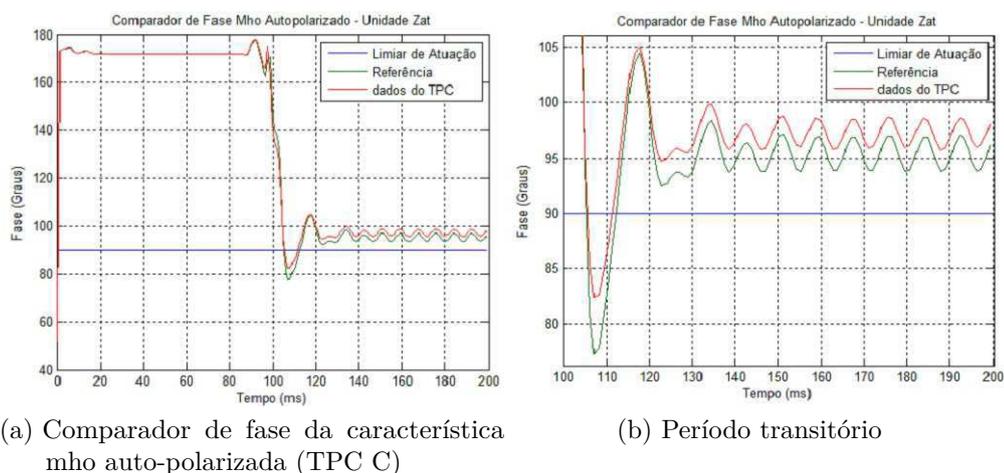


Figura 25 – Comparador de fase da característica mho auto-polarizada (TPC C)

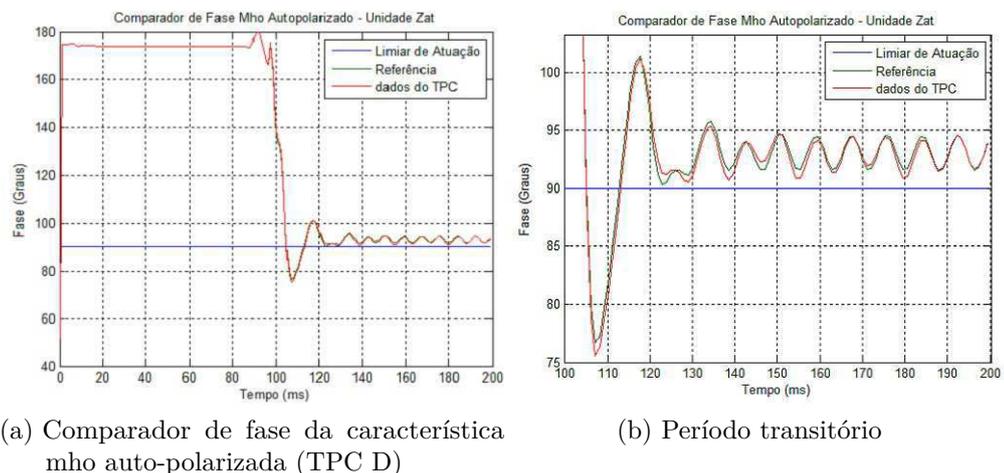


Figura 26 – Característica mho auto polarizada (TPC D)

O comparador usou como base de cálculo os fasores, distorcidos pelos transformadores, calculados usando o algoritmo FCDFT. Portanto, a estimação da fase em vermelho para cada transformador nas figuras acima durante o período transitório destoa da referência.

A falta simulada nesse caso foi aplicada a 172 km do alimentador, o que, de acordo com a configuração do relé simulado, é fora da zona coberta por esse dispositivo de proteção. Portanto, o relé não deve enviar o sinal para que a proteção atue. Em todos os casos analisados, durante o primeiro ciclo após a aplicação da falta, a fase estimada ultrapassa o limite de atuação. Isso pode estar relacionado com o janelamento dos dados que leva um 1 ciclo do sinal para obter o novo valor do fasor de tensão. Sendo assim, visando evitar atuações indesejadas é necessário que os relés sejam configurados com um tempo de atraso antes de atuarem.

Após a estabilização da curva do comparador de fase, vê-se nas figuras 23, 25 e 26 que a fase referente aos TPCs segue a referência com alguma imprecisão mas sempre

fora da zona de atuação dos relés. Todavia, a figura 23 caracteriza uma atuação indevida da proteção. Pode-se notar que a curva em vermelho segue sempre abaixo do limiar dos 90 graus, enquanto que a referência segue logo acima mas fora da zona. Portanto o transformador nesse caso foi crucial para que uma falha ocorresse no sistema.

Para os TPCs A, C e D o limiar da detecção de falta não foi ultrapassado para a falta que foi simulada. No entanto, isso não significa que o SEP está livre de falhas. É possível que para faltas ainda mais próximas do limite da zona de proteção aconteça o mesmo erro na detecção de distúrbio que houve com o TPC B.

#### 4.2.2 Testes com o algoritmo HCDFE

Os mesmos testes realizados na seção anterior foram repetidos nesta seção. No entanto, agora o algoritmo utilizado pelo relé para estimar os fasores é o Fourier de meio ciclo.

As figuras 27, 28, 29 e 30 a seguir, mostram os fasores calculados através de dados de tensão fornecidos pelos TPCs A, B, C e D, respectivamente e também o fasor referência.

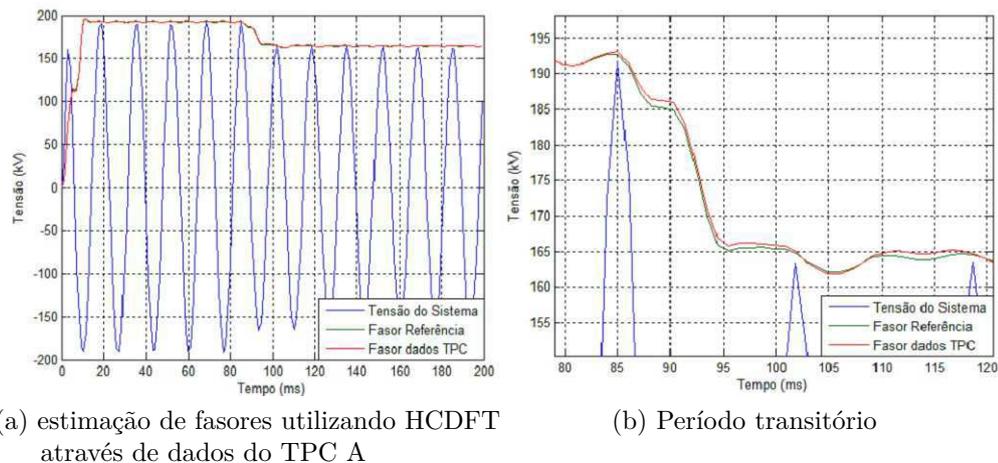


Figura 27 – estimação de fasores utilizando HCDFE através de dados do TPC A

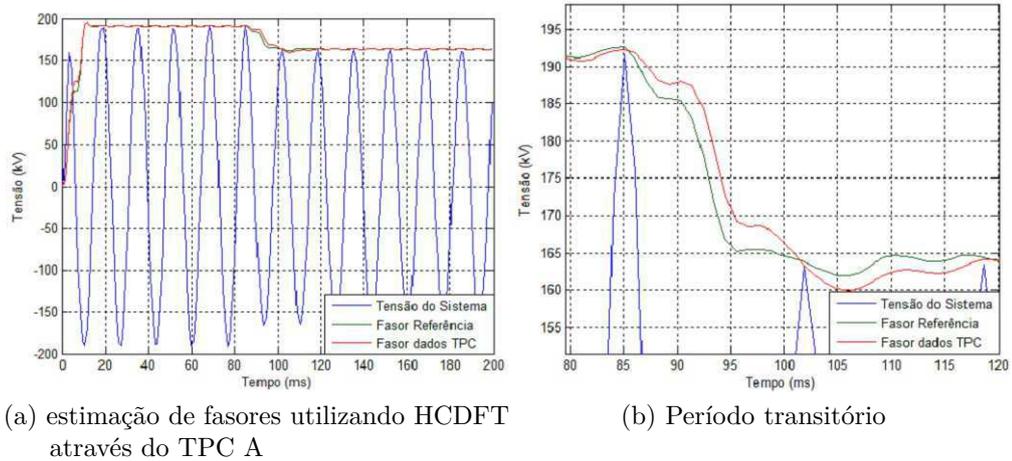


Figura 28 – estimação de fasores utilizando HCDFT através de dados do TPC B

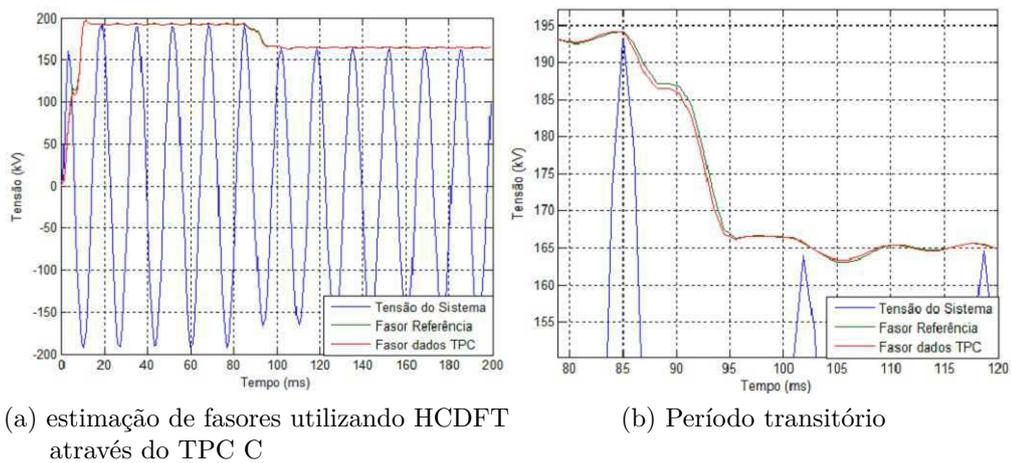


Figura 29 – estimação de fasores utilizando HCDFT através de dados do TPC C

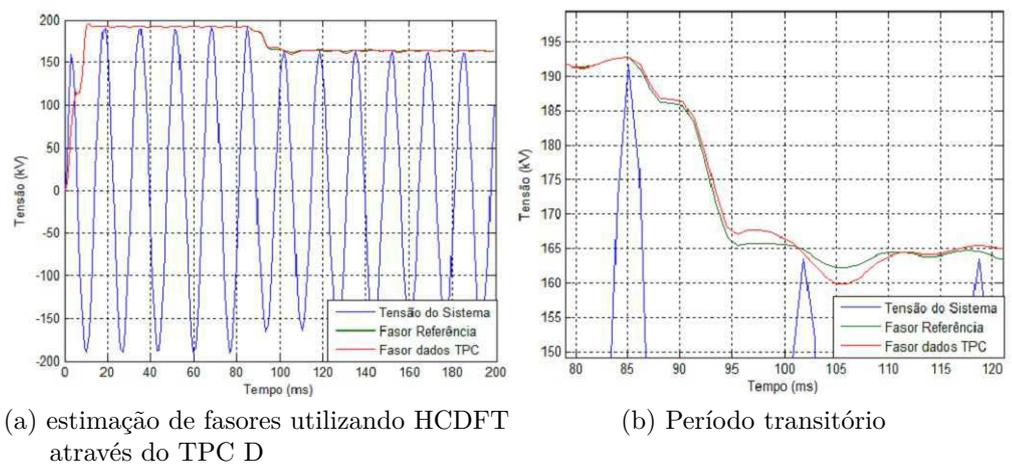


Figura 30 – estimação de fasores utilizando HCDFT através de dados do TPC D

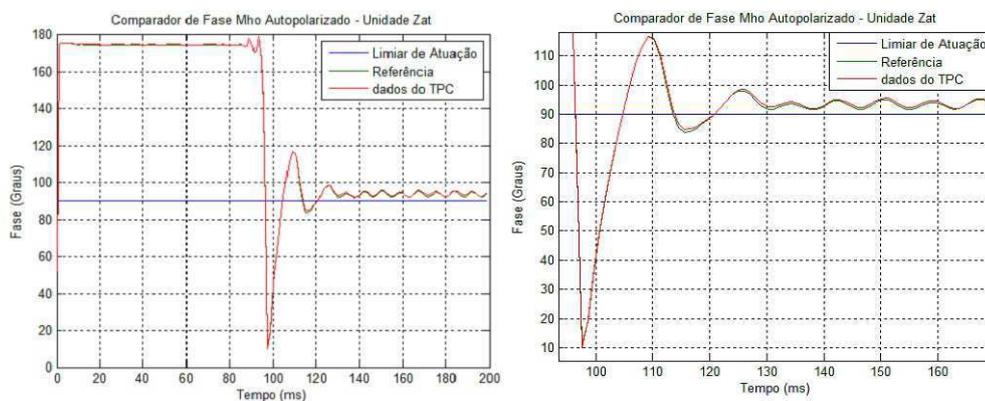
O mesmo comportamento verificado para o algoritmo FCDFT também é observado quando se aplica Fourier de meio ciclo. Durante os primeiros ciclos após a falta o fasor calculado pelos dados fornecidos pelos transformadores para instrumentos se afastam da referência. No entanto, é necessário destacar que a discrepância entre o valor calculado e o valor de referência nesse caso é maior. Para que esse análise se torne mais clara, o erro entre o fasor referência e os fasores calculados através dos transformadores foi calculado. Dessa forma é possível se ter uma ideia da eficiência de cada algoritmo e de como os TPCs influem na estimação. A tabela 4 a seguir apresenta os resultados:

Tabela 4 – Erro entre os fasores referência e os fasores estimados com dados dos transformadores

TPC	Erro(%)	
	FCDFT	HCDFT
A	0,67	0,87
B	13,31	14,3
C	5,235	5,52
D	1,09	0,1,94

A tabela mostra que dentre todos os equipamentos, o TPC B é o que mais influi na estimação de fasores. Isso decorre do fato de sua resposta em frequência não ser tão plana quanto às demais. Esse fato pode ser observado olhando as imagens da seção 3.1. Outro fato interessante é que o erro atribuído ao algoritmo de meio ciclo é sempre maior do que o algoritmo de 1 ciclo. Mais detalhes referentes a esse quesito serão discutidos mais a frente neste trabalho.

Agora, com os fasores estimados pelo algoritmo de Fourier de meio ciclo, o comparador de fase da característica mho auto-polarizada foi calculada. O Resultado se encontra nas figuras 31, 32, 33 e 34 expostas abaixo:



(a) Característica mho auto polarizada (TPC A)

(b) Período transitório

Figura 31 – Característica mho auto polarizada (TPC A)

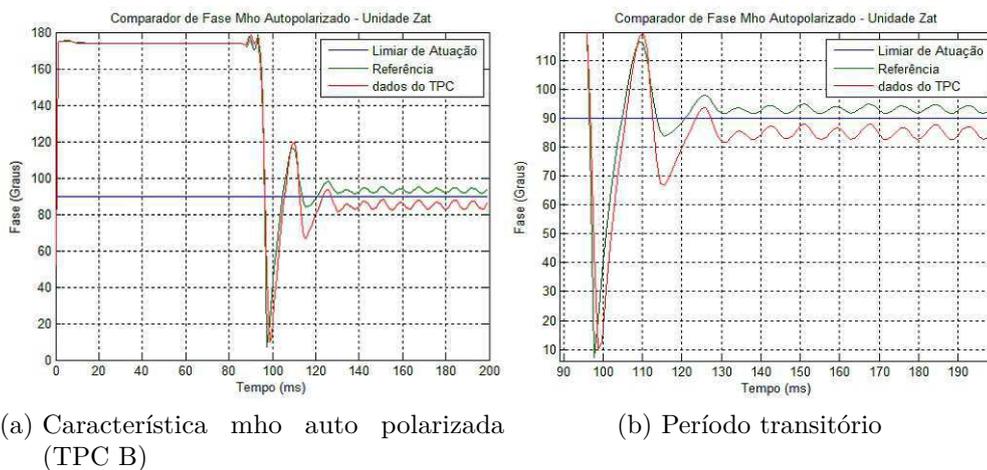


Figura 32 – Característica mho auto polarizada (TPC B)

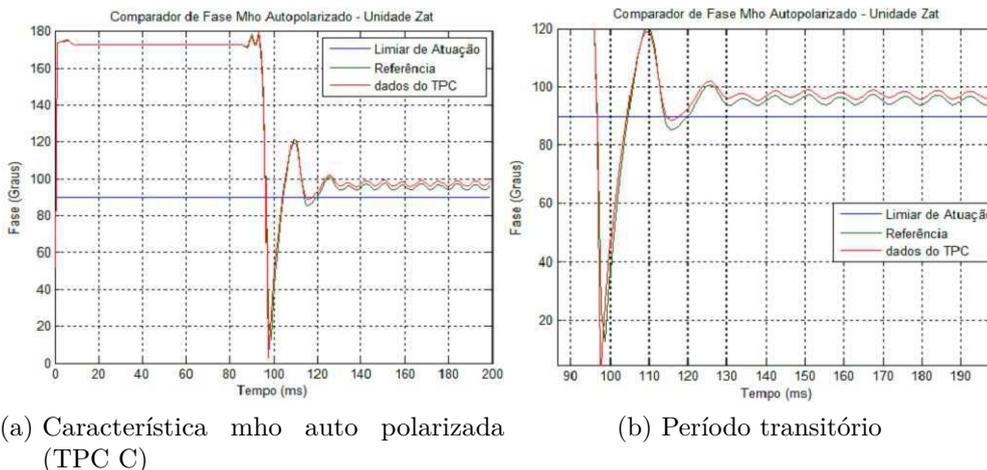


Figura 33 – Característica mho auto polarizada (TPC C)

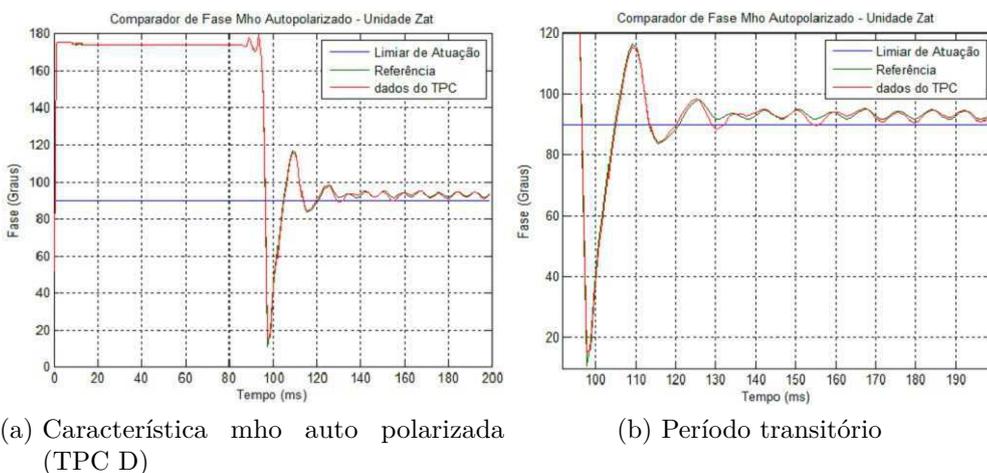


Figura 34 – Característica mho auto polarizada (TPC D)

Como pode-se ver, logo após a ocorrência da falta a fase calculada (em vermelho) se distancia da fase referência (em verde). Essa diferença de comportamento, como já foi dito, é o que pode gerar falhas na proteção. Nas figuras acima em todos os casos analisados haveria atuação indevida da proteção se os relés não fossem ajustados com atraso de acionamento. Novamente o comparador que utiliza dados fornecidos pelo TPC B estabilizou dentro da zona de proteção. Somado a isso, nesses testes utilizando o algoritmo de meio ciclo o TPC D também é provável de causar falhas. A figura 34 mostra que após a curva atingir regime, em alguns instantes a fase ultrapassa o limite de 90 graus. Todavia, neste caso, o TPC não foi o único responsável.

O desempenho do algoritmo usado para estimar os fasores é baixo. Foi dito na seção 2.3.3 que o método HCDFE não é capaz de eliminar todas as componente harmônicas de um sinal e nem suprimir por completo a componente DC de decaimento exponencial. Portanto o cálculo do fasor fundamental de tensão fica bastante prejudicado. Como a falta foi próxima da zona limite de atuação do relé, uma estimativa de baixa qualidade dos fasores pode levar ao comparador de fase usado a identificar o distúrbio como dentro da área protegida. Dessa forma, há uma atuação indevida.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal fazer duas análises em transformadores de potencial capacitivos disponíveis na literatura. Primeiro foi feita a análise da distorção harmônica do sinal de tensão no enrolamento secundário do TPC com relação à tensão no primário. Após a base obtida com o primeiro estudo foi avaliado como esses transformadores podem influenciar nos algoritmos que são usados para estimar fasores de tensão.

Para se analisar a distorção harmônica nos TPCs duas rotinas foram criadas no software ATP. Uma identificou a resposta em frequência do equipamentos estudados e outra simulou o funcionamento do SEP com componentes de alta frequência no sinal de tensão do sistema. De posse dos dados fornecidos pelos ATP, o matlab foi usado para aplicar a transformada de Fourier nos sinais de entrada e saída do TPC. Dessa forma foi possível concluir que, de acordo com suas resposta em frequência os TPCs amplificavam ou atenuavam as componentes de alta frequência. Ao alterar essas componentes, o transformador faz com que o sinal de tensão do seu secundário, não seja uma cópia do sinal primário. Devido a esse comportamento anômalo, falhas podem acontecer na estimação do fasor de tensão do sistema.

Na segunda parte do trabalho foi analisado como a distorção harmônica nos transformadores analisados podem afetar a estimação do fasor de tensão do SEP. Dois algoritmos baseados na série de Fourier foram utilizados: FCDFT e HCDFT. As simulações foram feitas aplicando faltas em no sistema elétrico modelado à parâmetros reais. Um relé implementado por uma rotina do matlab recebia os dados diretamente do sistema e também através do TPC. Primeiramente, o método de Fourier de um ciclo foi o escolhido para fazer estimar os fasores de tensão e então gerar a característica mho auto-polarizado. O mesmo foi feito para o algoritmo de Fourier de meio ciclo. Concluiu-se que a estimação através de TPCs utilizando ambos os métodos são falhas e podiam levar a erros do sistema de proteção do SEP. No entanto, ao se avaliar o desempenho de cada algoritmo individualmente, o método FCDFT foi o que obteve melhor resposta.

Esse problema da interferência dos TPCs na estimação fasorial é uma questão amplamente estudada e, portanto algumas soluções já existem. Em (SILVA et al., 2012) um filtro digital recursivo é proposto para a correção do sinal secundário dos transformadores para que estes deixem de interferir no processo de estimação de fasores.

Para trabalhos futuros seria interessantes estender essa análise para transformadores de potencial capacitivos de 500 kV. Também poderia ser aplicado o filtro recursivo comentado acima para mostrar seu efeito no sinal de tensão de saída dos transformadores.

# REFERÊNCIAS

- ALSTOM. *Network Protection and Automation Guide: Protective Relays, Measurement Control*. [S.l.]: Alstom Grid, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- BAGGINI, A. *Handbook of Power Quality*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England: Wiley and Sons, Ltd, 2008. Citado na página 31.
- CARVALHO, A. V. *Interação Transitória entre Transformadores de Potencial Capacitivo e Linhas de Transmissão: Uma Contribuição para minimizar falhas*. Dissertação — Universidade Federal de Pernambuco, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 27, 52 e 54.
- COMMITTEE, I. P. S. R. Reference models for transmission line relay testing. 2004. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 51.
- D'AJUZ, F. M. R. e. F. M. S. F. A. *Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão*. [S.l.]: Furnas, 1985. Citado na página 15.
- FERNANDES. *Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivo para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos*. Tese — Universidade Federal de Campina Grande, 2003. Citado 4 vezes nas páginas 16, 18, 27 e 50.
- KASZTENNY VINCE ASARO, D. S. e. M. P. B. Distance relay and capacitive voltage transformers - balancing speed and transient overreach. *53rd Annual Conference for Protective Relay Engineers*, 2000. Citado na página 16.
- LOPES, F.; BARROS, D.; REIS, R.; NASCIMENTO, J.; BRITO, N.; NEVES, W.; SOARES, S. Influência de modelos de transformadores de potencial capacitivo sobre a estimação de fasores de tensão. *SBSE*, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- LOPES, F.; BARROS, D.; REIS, R.; NASCIMENTO, J.; BRITO, N.; NEVES, W.; SOARES, S. Influência de métodos de estimação fasorial no processo de análise de faltas no sistema chesf. *CBQEE*, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 9, 18, 22 e 24.
- LOPES, F.; SILVA, C.; JR, D. F.; NEVES, W.; CARDOSO, L.; PRESENTE, J.; OTTO, R. Redução de erros na estimação fasorial de tensão via correção dos sinais secundários dos transformadores de potencial capacitivo. *SBSE*, 2012. Citado na página 23.
- MUSA, O.; AKSAMOVIC, A. Comparative analysis of algorithms for elimination of exponentially decaying dc component. *IWSSIP*, 2012. Citado na página 24.
- OPPENHEIM, A. S. W. e. S. H. N. A. V. *Signals and Systems*. Second. [S.l.]: Prentice Hall, 1983. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 21.
- PAJUELO, E.; RAMAKRISHNA, G.; SACHDEV, M. Phasor estimation technique to reduce the impact of coupling voltage transformer transients. *IET Generation, Transmission and Distribution*, v. 2, n. 4, p. 588–599, Fevereiro 2008. Citado na página 16.

REIS, R. L. A.; NEVES, W. L. A.; JR., D. F.; LOPES, F. V. Influência de transformadores para instrumento e filtros anti-aliasing sobre localizadores de faltas baseados na teoria de ondas viajantes. In: *Anais do VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página 37.

REIS, R. L. de A. *Influência do Transformadores de Potencial Capacitivo e Filtros Anti-Aliasing Sobre Métodos de Localização de Faltas Baseados na Teoria das Ondas Viajantes*. Dissertação — Universidade Federal de Campina Grande, Julho 2015. Citado 4 vezes nas páginas 15, 17, 30 e 36.

SILVA, C. A. da. *Filtros Digitais Recursivos para Redução do Impacto da Resposta Transitória do TPC*. Tese — Universidade Federal de Campina Grande, Julho 2015. Citado 3 vezes nas páginas 15, 17 e 18.

SILVA, K. M.; SILVA, C. A.; LOPES, F. V.; JR., D. F.; NEVES, W. L. A.; COUTINHO, P. R. L. N.; DANTAS, B. A. S. K. M.; PRESENTE, J. R.; BAINY, R. G.; CARDOSO, L. F.; OTTO, R. B. Avaliação do impacto da correção da tensão secundária de transformadores de potencial capacitivo sobre a proteção de distância. In: *Anais do CBA*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 3 vezes nas páginas 18, 25 e 46.

THORP, A. G. P. e J. S. *Computing Relaying for Power Systems*. Second. [S.l.]: John Wiley and Sons Ltd, 2009. Citado na página 23.

# Anexos

# ANEXO A – TOPOLOGIA E PARÂMETROS DOS TPCS AVALIADOS

## A.1 TPC A

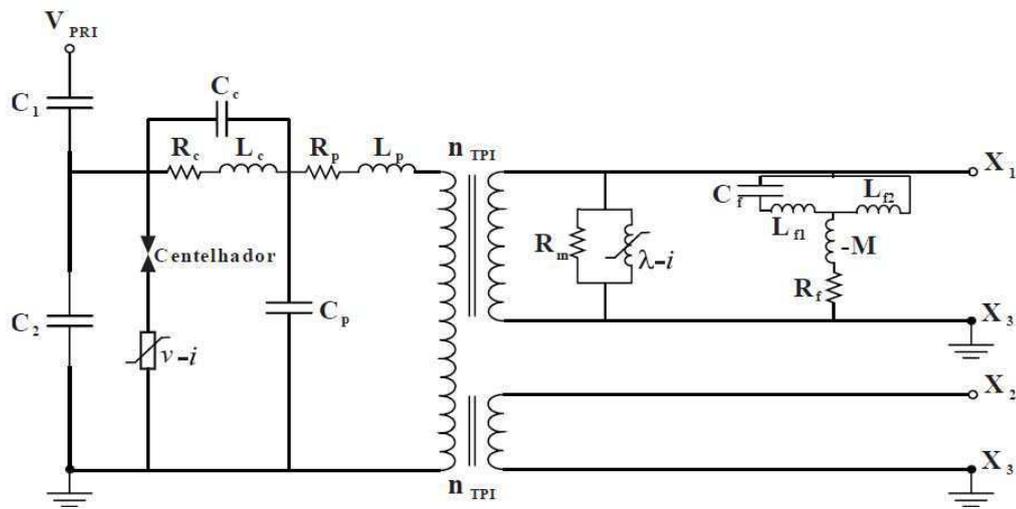


Figura 35 – Topologia TPC A

Fonte: (FERNANDES., 2003)

Tabela 5 – parâmetros do TPC A

Parâmetro	Valor
$C_1(nF)$	10,4
$C_2(nF)$	65,4
$C_c(nF)$	493,2
$C_p(pF)$	9,3
$C_f(\mu F)$	166,39
$L_c(H)$	86,3
$L_p(H)$	114,7
$L_{f1}(mH)$	10,87
$L_{f2}(mH)$	47,39
$M(mH)$	-9,31
$R_c(k\Omega)$	9,1
$R_p(\Omega)$	920
$R_m(\Omega)$	50,6
$R_f(\Omega)$	4,99
$\eta_{TPI}(X1 - X3)$	152,6
$\eta_{TPI}(X2 - X3)$	152,6

## A.2 TPC B

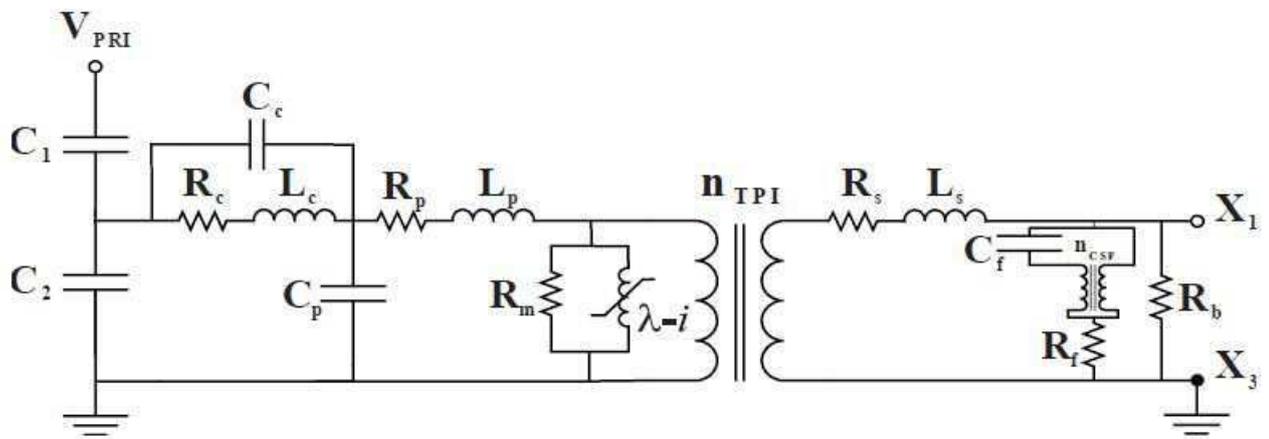


Figura 36 – Topologia TPC B

Fonte: (COMMITTEE, 2004)

Tabela 6 – parâmetros do TPC B

Parâmetro	Valor
$C_1(nF)$	2,43
$C_2(nF)$	82
$C_c(pF)$	100
$C_p(pF)$	150
$C_f(\mu F)$	9,6
$L_c(H)$	153,85
$L_p(H)$	7,95
$L_s(\mu H)$	2,653
$R_c(\Omega)$	228
$R_p(\Omega)$	400
$R_s(\Omega)$	0,001
$R_f(\Omega)$	40
$R_b(\Omega)$	100
$\eta_{CSF}$	1,98
$\eta_{TPI}(X1 - X3)$	57,25

### A.3 TPC C

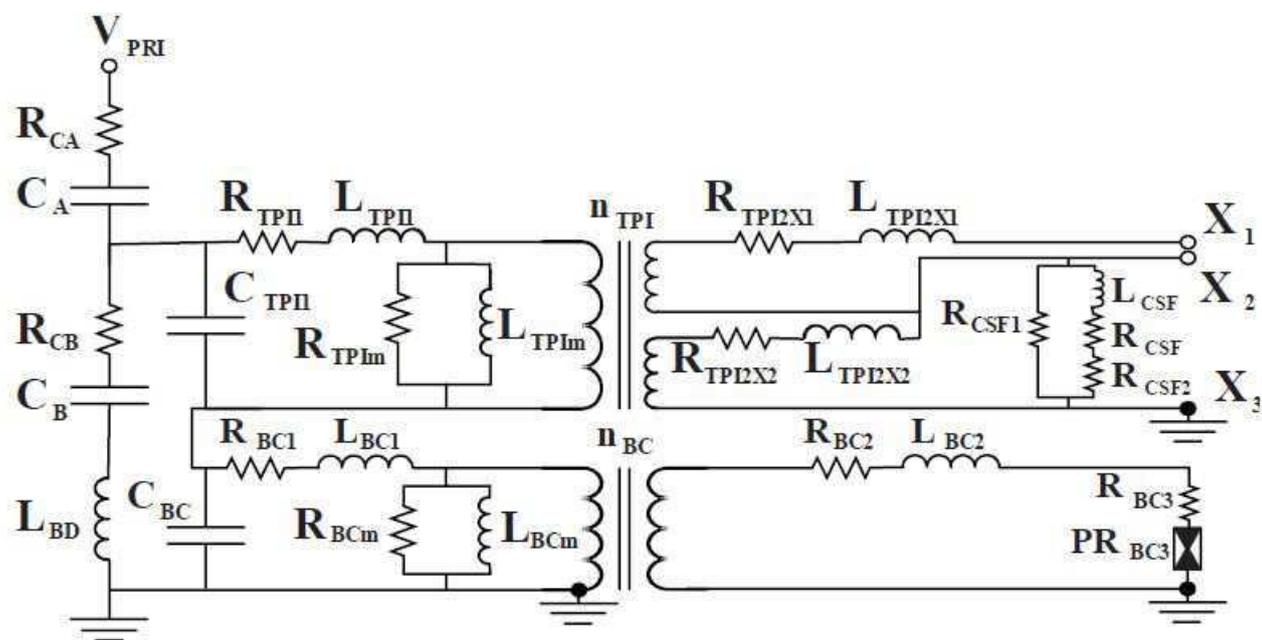


Figura 37 – Topologia TPC B

Fonte: (CARVALHO, 2008)

Tabela 7 – parâmetros do TPC C

Parâmetro	Valor
$C_A(pF)$	4321
$C_B(pF)$	38820
$C_{TP\eta}(pF)$	200
$C_B C(pF)$	1500
$L_{TP\eta}(H)$	6,93
$L_{TPI2X1}(mH)$	0,0268
$L_{TPI2X2}(mH)$	0,0368
$L_{BC1}(H)$	1,32
$L_{BC2}(mH)$	3,56
$L_{BD}(mH)$	45
$R_{CA}(\Omega)$	1565
$R_{CB}(\Omega)$	177,6
$R_{TP\eta}(\Omega)$	343
$R_{TPI2X1}(m\Omega)$	8,6
$R_{TPI2X2}(m\Omega)$	11,8
$R_{BC1}(\Omega)$	382
$R_{BC2}(\Omega)$	5,64
$R_{BC3}(\Omega)$	24,8
$R_{CSF}(\Omega)$	1,33
$R_{CSF1}(\Omega)$	74,6
$R_{CSF2}(\Omega)$	2,1
$R_{TPI_m}(M\Omega)$	11,2
$R_{BC}(M\Omega)$	1,26
$\eta_{TPI}(X1 - X3)$	201,1
$\eta_{TPI}(X2 - X3)$	19,23

## A.4 TPC D

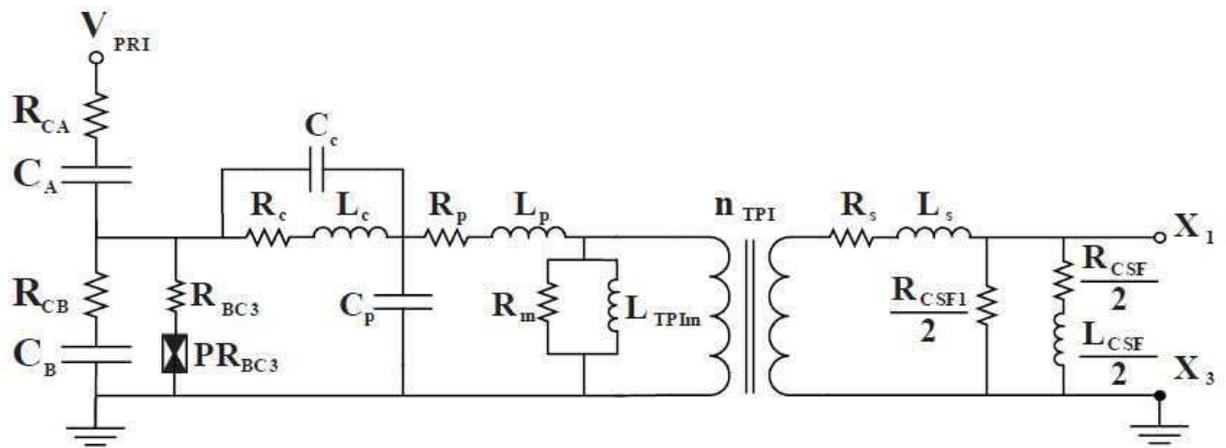


Figura 38 – Topologia TPC D

Fonte: (CARVALHO, 2008)

Tabela 8 – parâmetros do TPC D

Parâmetro	Valor
$C_A(pF)$	4050
$C_B(pF)$	42138
$C_P(pF)$	149,7
$C_C(pF)$	144,78
$L_P(H)$	4,68
$L_S(mH)$	0,143
$L_C(H)$	159,57
$L_{CSF}(H)$	0,354
$R_{CA}(\Omega)$	2469
$R_{CB}(\Omega)$	243,6
$R_P(\Omega)$	446
$R_S(m\Omega)$	48,5
$R_C(\Omega)$	608
$R_{CSF}(\Omega)$	5,56
$R_{CSF1}(\Omega)$	186
$\eta_{TPI}(X1 - X3)$	100,5