

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

ADRIANA SIQUEIRA E SILVA

Linhas de Transmissão não Compensadas: Manobra  
Controlada Considerando a Correção da Resposta do TPC

Campina Grande, Paraíba

Outubro de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

## Linhas de Transmissão não Compensadas: Manobra Controlada Considerando a Correção da Resposta do TPC

ADRIANA SIQUEIRA E SILVA

*Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Sistemas de Energia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.

Orientador

Karcus Marcelus Colaço Dantas, D.Sc.

Orientador

Campina Grande – PB

Outubro - 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586l Silva, Adriana Siqueira e.  
Linhas de transmissão não compensadas: manobra controlada considerando a correção da resposta do TPC / Adriana Siqueira e Silva. – Campina Grande, 2014.  
51 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2014.

"Orientação: Prof. Ph.D. Washington Luiz Araújo Neves, Prof. Dr. Karcius Marcelus Colaço Dantas".  
Referências.


1. Linhas de Transmissão. 2. Sobretensões de Manobra. 3. Chaveamento Controlado. 4. Filtro Digital Recursivo. 5. Transitórios Eletromagnéticos. I. Neves, Washington Luiz Araújo. II. Dantas, Karcius Marcelus Colaço. III. Título.

CDU 621.372.2(043)

**"LINHAS DE TRANSMISSÃO NÃO COMPENSADAS: MANOBRA CONTROLADA  
CONSIDERANDO A CORREÇÃO DA RESPOSTA DO TPC"**


**ADRIANA SIQUEIRA E SILVA**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 17/10/2014**

  
**WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG**  
Orientador(a)

  
**KARCIUS MARCELLUS COLAÇO DANTAS, D.Sc., UFCG**  
Orientador(a)

  
**DAMÁSIO FERNANDES JUNIOR, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)

  
**GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)

**CAMPINA GRANDE - PB**

*Aos meus filhos Pedro e João.*

# Agradecimentos

Meu maior agradecimento é dirigido aos meus pais e minha irmã, por terem na sua simplicidade e bondade me permitido estudar e me apoiar em todos estes anos, ensinando-me principalmente, a importância da perseverança para alcançar meus objetivos.

Aos meus filhos João e Pedro, pelos momentos de descontração, pelo entendimento, pelo apoio, carinho e por nunca permitirem que minha vida seja monótona.

Ao meu companheiro Fabio, pelo incentivo, pela participação e tempo dedicado a me auxiliar, sem sua intervenção não seria possível este trabalho.

Aos professores Washington e Karcius pela consideração em aceitar a orientação, amizade, incentivo, paciência e confiança.

Aos professores Benemar Alencar, Edson Guedes, Francisco Marcos e Damásio Fernandes pelas relevantes contribuições, seriedade, competência e simpatia nas suas aulas.

Aos amigos do Mestrado pela amizade e auxílio nos trabalhos. Especialmente a Cinthia, Messias, Evandro, Leoncio e Robson, por sua companhia nas viagens a Campina Grande e em dividir os momentos mais difíceis.

O meu mais forte agradecimento a Methodio Varejão de Godoy pela confiança, apoio e luta, pois sem sua intervenção não teria iniciado o Mestrado. Com certeza sua passagem em minha vida é engrandecedora e inesquecível.

Aos amigos especiais, Heldemarcio, Finizola, Cristiano e Sampson, pela gentileza, amizade e ensinamentos.

A Chesf por permitir e custear minha participação no Mestrado Profissionalizante, principalmente a Aline e José Roberto por todo apoio e atenção.

Ao Eng. Luiz Fonseca, pela simpatia e boa vontade em disponibilizar materiais para a realização da pesquisa.

Aos meus amigos da DOMM e DEPL que contribuíram com sua amizade e torcida para a realização deste trabalho, minha mais sincera gratidão.

A meu amigo Valdemir pela gentileza que sempre nos recebeu no Laboratório de Alta Tensão (LAT).

Mas nada disso seria factível se não existisse uma força maior, Deus. Obrigada.

*Adriana Siqueira e Silva*

# Resumo

Este trabalho mostra a utilização de um filtro recursivo para corrigir a tensão secundária do transformador de potencial capacitivo (TPC), com a finalidade de estimar corretamente a polaridade da carga residual em linhas de transmissão sem compensação e possibilitar a aplicação de técnicas de chaveamento controlado. As sobretensões em um sistema de transmissão não podem ser totalmente evitadas, mas seus efeitos podem ser minimizados. A análise das técnicas disponíveis para mitigação dessas sobretensões é de suma importância para promover a qualidade da energia. O Chaveamento Controlado em linhas de transmissão elimina a necessidade de utilizar resistores de pré-inserção. Enquanto o desempenho das duas soluções é similar, o chaveamento controlado tem se tornado uma solução econômica pelos custos iniciais mais baixos e aumento de confiabilidade do disjuntor devido à redução do número de partes móveis. A aplicação do chaveamento controlado em linhas de transmissão requer medições das tensões nos circuitos primários da linha. Essas tensões são obtidas dos transformadores de potencial capacitivos (TPC) existentes no barramento. Em regime permanente, a tensão obtida no secundário de um TPC é uma réplica da tensão aplicada ao seu primário. No entanto, o desempenho desse equipamento não é ideal quando submetido a situações transitórias ou para medições de tensões DC. Estas imprecisões podem fazer com que o chaveamento controlado ocasione uma manobra de religamento em que o fechamento dos contatos do disjuntor ocorra no instante em que a tensão do sistema está com polaridade oposta à da linha. Como consequência, elevados níveis de sobretensões podem ser atingidos. Estudos de casos utilizando dados do SIN (Sistema Interligado Nacional) serão realizados por meio de simulações digitais no ATP (*Alternative Transients Program*). As análises são baseadas em dados de sistemas elétricos reais e no funcionamento do filtro digital recursivo. De acordo com os resultados verifica-se que a inserção do filtro recursivo reduz os erros de medição causados pelos TPC quando submetidos a condições transitórias, melhorando assim, o desempenho do chaveamento controlado.

**Palavras Chaves:** Sobretensões de manobra; linhas de transmissão; chaveamento controlado; transformador de potencial capacitivo; filtro digital recursivo; transitórios eletromagnéticos.

# Abstract

This work presents a recursive digital filter to rectify the Coupling Capacitor Voltage Transformers (CCVT) secondary voltage, with the purpose of correctly estimate the polarity of the trapped charge onto an uncompensated line and allow the application of controlled switching techniques. Overvoltages in transmission systems cannot be totally avoided, but their effects can be minimized. The analysis of the techniques available to mitigate these surges is extremely important for enhance the quality of energy. The controlled switching of transmission lines eliminates the need for pre-insertion resistors. While the electrical performance of two solutions is similar, controlled switching has become an economical solution for the lowest initial costs and increases the reliability of the circuit breaker due to the reduced number of moving parts. Controlled Switching of transmission lines requires measurements of its primary voltages. These voltages are obtained from existing Coupling Capacitor Voltage Transformers on the busbar. In steady state, the voltage obtained from the secondary of a CCVT is a replica of the voltage applied to its primary. However, the performance of this equipment is not ideal when subjected to transient situations or for measuring DC voltages. These inaccuracies may cause the closing of the circuit breaker contacts at the instant when the polarity of the line voltage may be the opposite of that last seen by the controller. As a consequence, high levels of surge can be achieved. Case studies using data from Brazilian Power System Grid will be simulated by Alternative Transients Program (ATP). The analyses are based on data obtained from electrical systems in service and on the performance of the filters. According to the results indicated that the insertion recursive digital filter reduce measurement errors caused by the CCVT when subjected to transient conditions, thereby improving the performance of the controlled switching.

**Keywords:** Switching overvoltages; transmission lines; controlled switching; coupling capacitor voltage transformer; recursive digital filter; electromagnetic transients.



# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xii</b>
<b>Glossário</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xiv</b>
<b>Capítulo 1 - Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação .....	2
1.2 Objetivos .....	4
1.3 Organização do Trabalho .....	4
<b>Capítulo 2 - Fundamentação Teórica</b>	<b>6</b>
2.1 Sobretensões de manobra .....	6
2.2 Chaveamento Controlado .....	7
2.2.1 Abertura Controlada .....	10
2.2.2 Fechamento Controlado .....	11
2.3 Transformador de Potencial Capacitivo .....	12
2.4 Filtro Digital Recursivo .....	15
2.4.1 Compensação de Sinais .....	15
2.4.2 Modelo Analítico do TPC .....	18
2.4.3 Estimação dos parâmetros do Modelo do TPC .....	19
2.4.4 Análise da Compensação no Domínio do Tempo .....	19
2.4.5 Análise da Compensação no Domínio da Frequência .....	21
<b>Capítulo 3 - Revisão Bibliográfica</b>	<b>23</b>
3.1 Chaveamento Controlado .....	23
3.2 Filtro Digital Recursivo .....	29
<b>Capítulo 4 - Metodologia</b>	<b>32</b>
4.1 Chaveamento Controlado .....	32

---

4.1.1 Energização de Linhas de Transmissão .....	32
4.1.2 Religamento de Linhas de Transmissão sem Compensação .....	32
4.1.3 Acoplamento Eletromagnético .....	33
4.1.4 Controle do Chaveamento .....	33
4.2 Compensação de Sinais .....	36
<b>Capítulo 5 - Resultados e Análises</b>	<b>38</b>
<b>Capítulo 6 - Conclusões</b>	<b>45</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>47</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1 – Tensão nos contatos do disjuntor para religamento de linhas não compensadas...	9
Figura 2.2 – Tensão nos contatos do disjuntor para religamento de linhas compensadas .....	10
Figura 2.3 – Sequência de Abertura Controlada.....	11
Figura 2.4 – Sequência de Fechamento Controlado .....	13
Figura 2.5 – Esquema elétrico simplificado para um TPC típico.....	15
Figura 2.6 – Modelo simplificado de um TPC para frequências de 10 Hz a 10 kHz.....	16
Figura 2.7 – Ganho e fase de um TPC compensado para frequências de 10 Hz a 10 kHz .....	17
Figura 2.8 – Diagrama de blocos de compensação do TPC .....	18
Figura 4.1 – Estimação dos sinais de referência em instantes futuros .....	35
Figura 5.1 – Parte do sistema utilizado para estudo .....	38
Figura 5.2 – Sinais de tensão da linha de transmissão comparando a tensão do primário do TPC da linha com a tensão do seu secundário para manobra de energização.....	39
Figura 5.3 – Sinais de tensão da linha de transmissão comparando a tensão do primário do TPC da linha com a tensão do seu secundário compensado para manobra de energização.....	40
Figura 5.4 – Sinais de tensão da linha de transmissão comparando as tensões : primário, secundário e secundário compensado do TPC da linha.....	41
Figura 5.5 – Sinais de tensão da linha de transmissão com chaveamento controlado .....	42
Figura 5.6 – Sinais de tensão da linha de transmissão sem chaveamento controlado.....	43
Figura 5.7 – Comparação de níveis de sobretensões ao longo da linha de transmissão.....	44

# Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Resumo da revisão bibliográfica .....	31
Tabela 4.1 – Parâmetros para o TPC de 500 kV .....	37
Tabela 4.2 – Coeficientes dos filtros digitais recursivos de segunda ordem que ditarão o comportamento dinâmico do FDR para o TPC de 500 kV.....	37
Tabela 5.1 – Parâmetros Elétricos LT 500 kV São João do Piauí – Milagres – 400 km .....	38
Tabela 5.2 – Máximas sobretensões com chaveamento controlado.....	44
Tabela 5.3 – Máximas sobretensões sem chaveamento controlado .....	44

# Glossário

ATP – *Alternative Transients Program.*

BC Hydro – *British Columbia Hydro and Power Authority.*

BPA – *Bonneville Power Administration.*

Chesf – *Companhia Hidro Elétrica do São Francisco.*

CCVT – *Coupling Capacitor Voltage Transformers.*

Cigré – *International Council on Large Electric Systems.*

EAT – *Extra-Alta Tensão.*

FDR – *Filtro Digital Recursivo.*

FPL – *Florida Power & Light Company.*

LT – *Linha de Transmissão.*

MOSA – *Metal Oxide Surge Arrester.*

Pu – *Valor por unidade.*

RDDS – *Taxa de decrescimento da rigidez dielétrica.*

RPI – *Resistor de Pré-inserção.*

SIN – *Sistema Interligado Nacional.*

TPC – *Transformador de Potencial Capacitivo.*

TPI – *Transformador de Potencial Indutivo.*

UAT – *Ultra-Alta Tensão.*

UFMG – *Universidade Federal de Campina Grande.*

ZnO – *Óxido de Zinco.*

# Lista de Símbolos

## Chaveamento Controlado

$N_{ciclos}$  – Número de ciclos entre  $t_{zero2}$  e  $t_{otimo1}$ .

$N.T_{zero}$  – É um número inteiro de meio ciclos necessário para se obter um valor positivo de  $T_{contab}$ .

$s_{ref}$  – Sinal de referência para o chaveamento controlado.

$t_{comando}$  – Instante aleatório de comando para energização ou religamento de linhas de transmissão.

$t_{estimado}$  – Primeiro instante futuro estimado para o sinal de referência para o chaveamento controlado.

$t_{otimo}$  – Instante ótimo para o fechamento físico dos contatos do disjuntor.

$t_{otimo1}$  – Primeiro instante ótimo disponível para o chaveamento.

$t_{zero1}$  – Penúltimo instante de passagem pelo zero do sinal de referência para o chaveamento.

$t_{zero2}$  – Último instante de passagem pelo zero do sinal de referência para o chaveamento.

$T_{atraso}$  – Intervalo de tempo utilizado para atrasar  $t_{comando}$ .

$T_{contab}$  – tempo de atraso intencional de sincronização em relação a referência na abertura.

$T_{nominal}$  – Tempo nominal de operação do disjuntor.

$T_{operação}$  – Tempo de operação do disjuntor.

$T_{esp}$  – Tempo de espera usado pelo controlador para suas operações internas.

$T_{total}$  – Soma de um intervalo de tempo de atraso intencional de sincronização em relação a referência,  $T_{contab}$ , e um determinado intervalo de tempo de espera,  $T_{esp}$ .

$T_{abertura}$  – Tempo de abertura mecânica do disjuntor.

$t_{sep}$  – Instante de separação elétrica dos contatos em relação ao próximo zero da corrente em que a extinção do arco ocorre.

$T_{conf}$  – Tempo de atraso intencional de sincronização em relação a referência no fechamento.

$T_{fech}$  – Intervalo de tempo entre a energização da bobina de fechamento do disjuntor e o toque mecânico dos contatos.

$T_{pre-arco}$  – Tempo que decorre entre o instante de *pré strike* e o toque dos contatos.

$T_{contato}$  – Intervalo de tempo entre a energização da bobina de fechamento e o ponto onde a corrente começa a circular.

$t_{fluir}$  – Ponto onde a corrente começa a circular.

$T_m$  – Intervalo de tempo entre o tempo em que a corrente começa a circular e o zero seguinte.

$T_{sr}$  – Meio período do sinal de referência para o chaveamento.

### **Parâmetros do Modelo Geral do TPC**

$C_{p1}, C_1$  – Capacitância superior do divisor capacitivo.

$C_{p2}, C_2$  – Capacitância inferior do divisor capacitivo.

$C_c$  – Capacitância parasita do reator de compensação.

$C_f$  – Capacitância do circuito supressor de ferroressonância.

$C_p$  – Capacitância parasita do enrolamento primário.

$L_c$  – Indutância para o reator de compensação do TPC.

$L_{f1}$  – Indutância do circuito supressor de ferroressonância.

$L_{f2}$  – Indutância do circuito supressor de ferroressonância.

$L_m$  – Indutância de magnetização do TPI.

$L_p$  – Indutância de dispersão do enrolamento primário do TPI.

$M$  – Indutância mútua do circuito supressor de ferroressonância.

$R_m$  – Resistência do ramo de magnetização do TPI.

$R_p$  – Resistência do enrolamento primário do TPI.

$Z_b$  – Carga secundária do TPC.

### **Funções de Transferência**

$\alpha(s)$  – Função que ditará a dinâmica de um TPC ideal.

$G_{COM}(s)$  – Função de transferência do compensador analógico.

$G_{COM}(z)$  – Função de transferência do compensador na forma digital.

$G_{TPC}(s)$  – Função de transferência do TPC.

### **Coefficientes das Funções de Transferência**

$A_i$  – Coeficientes do numerador da função de transferência do TPC.

$a_j$  – Coeficientes do denominador da função de transferência do compensador analógico.

$B_i$  – Coeficientes do denominador da função de transferência do TPC.

$b_j$  – Coeficientes do numerador da função de transferência do compensador analógico.

$c_i$  – Coeficientes do denominador da função de transferência do filtro digital recursivo.

$D_i$  – Coeficientes do denominador da função de transferência do modelo do TPC compensado.

$d_j$  – Coeficientes do numerador da função de transferência do filtro digital recursivo.

$k_0$  – Coeficiente de escalonamento filtro digital recursivo.

$k_{ij}$  –  $j$ -ésimo coeficiente da  $i$ -ésima seção do filtro digital recursivo.

### **Sinais de Tensão**

$V_i$  – Tensão primária do TPC no domínio da frequência.

$V_o$  – Tensão secundária do TPC no domínio da frequência.

$v_i$  – Tensão primária do TPC no domínio do tempo.

$v_n$  – Tensão de saída da  $n$ -ésima seção do filtro digital recursivo.

$v_o$  – Tensão secundária no domínio do tempo.



$V_{sc}$  – Tensão secundária compensada no domínio da frequência.

$v_{sc}$  – Tensão secundária compensada no domínio do tempo.

### **Outros símbolos**

$\Delta t$  – Passo de integração.

$\varphi(s)$  – Função racional imprópria.

# Capítulo 1

## Introdução

Os sistemas elétricos de potência operam, em maior parte do tempo, em regime permanente, mas é durante os transitórios que são submetidos a situações extremas. Portanto, o projeto de um sistema de potência é elaborado sob maior influência das condições transitórias do que pelo seu comportamento permanente (VAN DER SLUIS, 2001).

Os isolamentos de linhas de transmissão e subestações são definidos pelas sobretensões que deverão ser suportadas sem que seja comprometido o bom funcionamento do sistema, seus equipamentos, elementos componentes e também para evitar riscos à integridade física de pessoas ou do meio ambiente e/ou outras consequências ao sistema elétrico.

As sobretensões de manobra são fatores que influenciam na determinação dos níveis de isolamento dos sistemas elétricos de extra-alta tensão (EAT) e ultra-alta tensão (UAT). Estas sobretensões não podem ser totalmente suprimidas, no entanto, suas amplitudes podem ser reduzidas para que sejam compatíveis com os níveis de isolamento considerados na elaboração das especificações dos equipamentos e dimensionamento de linhas de transmissão. Assim, a análise das técnicas disponíveis para mitigação dessas sobretensões é de suma importância para promover a qualidade da energia no sistema elétrico.

Um método tradicional é a utilização de disjuntores com resistores de pré-inserção para reduzir as sobretensões de manobras em linhas de transmissão. O método mostra-se eficiente, porém, por meio de experiências em campo foi constatada a baixa confiabilidade dos resistores de pré-inserção devido a falhas mecânicas e o elevado custo associado a sua aquisição e manutenção de disjuntores (LEGATE et al., 1988; RIBEIRO; MCCALLUM, 1989). As principais empresas de transmissão do mundo buscam alternativas para o controle de sobretensões de manobras. Um dos métodos mais favoráveis é a utilização de técnicas de chaveamento controlado.

O chaveamento controlado é uma técnica que utiliza dispositivos eletrônicos para controlar o instante de fechamento e/ou abertura dos polos de um disjuntor em relação ao ângulo de fase de um sinal de referência de tensão ou corrente.

O uso do chaveamento controlado tem sido estudado há mais de 30 anos para energizar linhas de transmissão sem carga e bancos de capacitores. Porém, somente em tempos recentes houve a comutação síncrona com a evolução dos projetos de disjuntores de alta tensão e o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos para sistemas de potência. Em simulações, comparando o uso do resistor de pré-inserção e o chaveamento controlado, o último tem como vantagem a redução do custo dos disjuntores através da eliminação de alguns de seus componentes como as câmaras auxiliares e a confiabilidade devido a problemas com mecanismos do resistor de pré-inserção durante a vida operacional dos disjuntores de EAT (FERNANDEZ et al., 2004).

DANTAS (2012) avaliou a influência da resposta dos TPC no desempenho do chaveamento controlado para linhas de transmissão com compensação reativa em derivação quanto à determinação dos instantes apropriados para o religamento de linhas e às sobretensões resultantes.

De acordo com o estudo, a maior elevação encontrada nas máximas sobretensões foi de 6% utilizando um modelo de TPC comparado ao modelo de TPC ideal. Os erros apresentados para o religamento da linha foram limitados a valores abaixo daqueles obtidos a partir de manobras de energização da linha, que foram de 1,76 p.u., sendo assim, considerados aceitáveis.

Diante do exposto, para o escopo deste trabalho será considerado o chaveamento controlado de linhas de transmissão sem compensação e a utilização de um filtro digital recursivo para corrigir a tensão secundária do TPC, com o intuito de obter um sinal de saída idêntico ao sinal do primário, otimizando assim, as técnicas de chaveamento controlado.

## 1.1 Motivação

A energia elétrica é fundamental para o desenvolvimento dos países e a qualidade de vida das pessoas. Quanto mais os países se desenvolvem, mais se torna necessário aumentar a produção de energia. Para atender a demanda crescente, o sistema elétrico brasileiro tem aumentado a interconexão com o objetivo de propiciar maiores opções de exportação e importação de energia de uma região para outra, e, conseqüentemente, aumentar as possibilidades de fornecimento de energia ao sistema como um todo. O Sistema Elétrico

Nacional é composto pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), e pelos Sistemas Isolados, localizados principalmente no Norte do país. O SIN é formado por empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. A qualidade do serviço das transmissoras é aferida por meio de indicadores associados à disponibilidade do sistema de transmissão. Quando a qualidade da energia prestada não é adequada ao serviço público, uma parcela é deduzida da receita da transmissora, é a parcela variável (PV).

Para garantir tais exigências do sistema elétrico, torna-se necessária a utilização de equipamentos que permitam aumentar a capacidade de transmissão e também melhorar a qualidade da energia transmitida, possibilitando assim a economia ou postergação de novos investimentos nos sistemas de transmissão. Com o intuito de manter a qualidade da energia, o chaveamento controlado de disjuntores surge como um método de grande aceitação tanto pelas empresas de energia elétrica quanto pelos fabricantes de equipamentos elétricos.

O chaveamento controlado utiliza um equipamento eletrônico (controlador) que permite realizar a operação da manobra em um ponto ótimo da onda de tensão através dos contatos do disjuntor. O princípio de funcionamento do controlador consiste em reconhecer o padrão do sinal de referência, permitindo a predição do ponto ótimo da onda para manobrar o disjuntor.

O sinal da tensão de referência necessário para a manobra controlada é obtido dos transformadores de potencial capacitivos (TPC) existentes no barramento. Os TPC devem reproduzir os efeitos transitórios e de regime permanente aplicados ao circuito de alta tensão o mais fiel possível no circuito de baixa tensão. Porém, devido à própria característica construtiva desses equipamentos, a tensão obtida nos terminais de baixa tensão só é uma réplica da tensão primária na operação em regime permanente. Durante as operações de manobras do sistema de energia elétrica, a tensão no barramento do TPC pode conter componentes de frequências diferentes da fundamental que propiciam uma tensão secundária não fidedigna à tensão do sistema. Essa tensão secundária, não representando o sinal real, é processada pelos sistemas de proteção, controle e chaveamento, o que pode levar a realizar operações inapropriadas, como por exemplo, a retirada indevida de equipamentos, proporcionando sobretensões acima de valores permitidos.

Devido a esta ocorrência, no escopo deste trabalho, é necessário um dispositivo que possa corrigir o sinal no secundário do TPC com a finalidade de garantir uma correta ação do chaveamento controlado.

As referências utilizadas aqui para a correção da tensão secundária foram propostas por MACHADO (2009) e SILVA (2014). Na sua dissertação de mestrado, MACHADO (2009), apresenta uma técnica para corrigir dinamicamente os distúrbios apresentados pela tensão secundária do TPC, sendo conveniente utilizar essa mesma técnica para corrigir o sinal do secundário dos TPC a fim de otimizar o uso do chaveamento controlado. Essa correção é realizada por meio de filtros digitais recursivos (FDR) atuando no sinal do secundário do TPC. SILVA (2014) propõe um novo método de obtenção de parâmetros de FDR para reduzir o impacto da resposta transitória dos TPC sobre o desempenho dos sistemas de medição, proteção e controle. A referência de MACHADO (2009) torna-se mais conveniente para este trabalho devido ao mesmo ter implementado o projeto do filtro corretor da tensão secundária do TPC na linguagem MODELS do ATP.

Diante do exposto acima, a contribuição deste trabalho é apresentar um estudo que compare as tensões de referência utilizadas no chaveamento controlado sem e com a inserção do filtro recursivo, confirmando assim, a sua influência na melhoria do desempenho do chaveamento controlado diante dos transitórios.

## 1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo que permita o chaveamento controlado de linhas de transmissão considerando manobras usuais de energização e religamento sem compensação com carga residual, utilizando um filtro recursivo para corrigir o sinal de saída do TPC. Simulações utilizando o ATP (*Alternative Transients Program*) são utilizadas para a avaliação e validação do método. Para o estudo é utilizada parte do SIN (Sistema Interligado Nacional).

## 1.3 Organização do Trabalho

Esta dissertação está organizada de acordo com a seguinte estrutura:

- O Capítulo 2 apresenta uma fundamentação teórica sobre sobretensões, chaveamento controlado, transformadores de potencial capacitivos e filtro digital recursivo.

- No Capítulo 3 é feita uma revisão bibliográfica sobre estudos e experiências da utilização de algumas técnicas de mitigação de transitórios de manobra e a utilização do filtro digital recursivo.
- No Capítulo 4 é descrita a metodologia empregada para o chaveamento controlado como o tratamento dos sinais de referência e a determinação dos pontos ótimos para a energização e o religamento de linhas de transmissão sem compensação. É considerado o efeito dos TPC nos sinais de referência e a utilização dos filtros digitais recursivos.
- No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos a partir do emprego da técnica proposta, bem com a análise desses resultados.
- No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### Fundamentação Teórica

Este capítulo destina-se a apresentação de conceitos fundamentais sobre sobretensões de manobra, chaveamento controlado, transformadores de potencial capacitivos com os elementos que os constituem e o filtro digital recursivo com o modelo de TPC utilizado para estudos de transitórios eletromagnéticos, bem como, a compensação de sinais.

#### 2.1 Sobretensões de manobra

As redes elétricas estão sujeitas a várias formas de fenômenos transitórios, envolvendo variações súbitas de tensão e corrente provocadas por descargas atmosféricas, faltas no sistema ou operação de disjuntores ou seccionadores.

De uma forma genérica, os estudos realizados com a finalidade de obtenção dos valores referentes aos fenômenos transitórios de interesse para a especificação dos equipamentos de um sistema elétrico são denominados de estudos de sobretensões. Na prática, além dos valores das possíveis sobretensões nos terminais dos equipamentos, é de interesse também a determinação dos valores de corrente e energia nos para-raios e correntes transitórias, para a verificação dos esforços mecânicos nos equipamentos e barramentos de uma subestação (FRONTIN et al., 2013).

As sobretensões podem ser definidas como tensões transitórias, variáveis com o tempo, cujo valor máximo é superior ao valor de crista das tensões máximas de operação do sistema. Podem ser classificadas em sobretensões de origem interna e externa ao sistema, sendo a diferença entre elas dependente apenas dos eventos que as causam (ARAÚJO; NEVES, 2005).

As sobretensões externas são aquelas que não têm origem no sistema elétrico, ou seja, independem das contingências e manobras do sistema elétrico e não tem ponto de aplicação definido. As descargas atmosféricas, em sua maioria, são as razões da origem de tais

sobretensões. Já as sobretensões internas são aquelas causadas por eventos dentro do sistema elétrico. Como exemplos: manobras de disjuntores ou curto-circuitos.

Tradicionalmente, as sobretensões são classificadas quanto à sua origem em sobretensões atmosféricas, sobretensões de manobra e sobretensões temporárias. Além da origem do fenômeno, a diferença entre as três categorias está na amplitude, na duração e no grau de amortecimento da forma de onda.

Neste trabalho será dada atenção às sobretensões de manobra, as quais são originadas a partir de mudanças bruscas na configuração do sistema, causadas por chaveamento de equipamentos ou pela ocorrência de curto-circuitos. Os principais eventos que provocam esse tipo de sobretensão são a energização de transformadores, rejeição de carga, energização e religamento de linhas de transmissão e eliminação de faltas. Possuem forma de onda de impulso ou irregular e são, em geral, altamente amortecidas e de curta duração, caracterizadas por uma frente de onda lenta da ordem de dezenas a centenas de microssegundos, sendo exceção a manobra de chaves em subestações SF<sub>6</sub>, com frentes de onda rápidas, classificadas em outra categoria.

## 2.2 Chaveamento Controlado

As sobretensões de manobra estão entre os fatores mais importantes para determinação da coordenação de isolamento de linhas de transmissão, particularmente em sistemas com tensões acima de 300 kV. Se a máxima tensão de manobra exceder o nível máximo de impulso de manobra da linha de transmissão, métodos para reduzir essas sobretensões devem ser utilizados.

A principal motivação para o uso do chaveamento controlado em linhas de transmissão é a minimização do efeito das sobretensões de manobra tanto durante a energização quanto o religamento rápido (CIGRÉ WORKING GROUP A3.07, 2004).

Chaveamento controlado é o termo comumente utilizado para descrever o uso de equipamentos eletrônicos para controlar a operação dos contatos de disjuntores em um ponto pré-determinado em relação a um sinal de referência elétrica (CIGRÉ WORKING GROUP 13.07, 1999).



O fenômeno físico que rege as sobretensões de manobra é a propagação das ondas eletromagnéticas ao longo das linhas de transmissão, geralmente chamado de fenômeno das ondas viajantes. As ondas viajantes são ocasionadas pela operação de estabelecimento do disjuntor, sendo influenciadas pela amplitude da tensão inicial de pré-arco, isto é, a tensão instantânea através do disjuntor no instante de estabelecimento da corrente de carregamento da linha. Conseqüentemente, a amplitude das sobretensões devido à manobras de chaveamento tem relação direta com a amplitude da tensão de pré-arco, o que torna o chaveamento controlado um método eficiente para o controle de sobretensões. Os efeitos negativos causados por estas sobretensões, tais como a degradação da qualidade da energia e a redução da vida útil dos equipamentos do sistema elétrico, podem ser reduzidos controlando-se a abertura ou o fechamento dos contatos dos disjuntores de forma que a manobra seja realizada em um instante ótimo pré-determinado, tomando-se como referência sinais elétricos de tensão ou corrente. Como consequência das ondas viajantes, para o chaveamento de linhas de transmissão, este instante ótimo ocorre idealmente quando a tensão entre os contatos do disjuntor é zero (DANTAS, 2007; FRONTIN, 2013).

Para linhas de transmissão, os fenômenos mais importantes ocorrem nos momentos de energização e religamento e dependem do instante do fechamento, da dispersão entre os polos do disjuntor, de reatores de linha e dos dispositivos de controle existentes no sistema.

A energização é uma manobra transitória que ocorre com relativa frequência em um sistema de potência, sendo uma manobra efetuada por disjuntores com o fechamento de seus contatos. A energização de linhas em vazio sem tensão residual do lado da carga tem como momento ótimo, a ocorrência de um zero de tensão do lado da fonte.

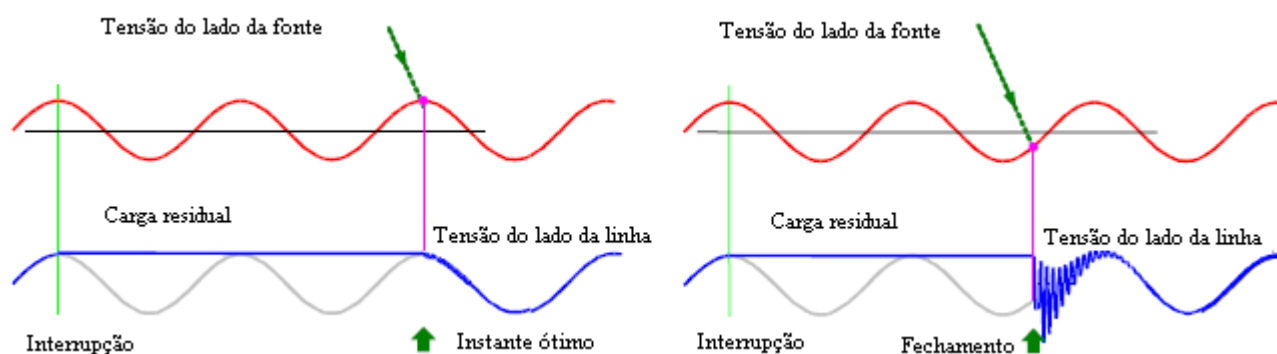
O religamento de linhas é realizado segundo uma dada sequência de eventos. Supondo que a linha está operando normalmente e ocorre um curto-circuito (falta), os disjuntores isolam a seção em curto e aguardam um período de tempo, denominado tempo morto, para efetuarem uma tentativa de religamento da linha. Esse tempo morto busca viabilizar em termos probabilísticos a extinção do arco elétrico quando a falta não é permanente.

A diferença básica entre o religamento rápido e uma energização de LT consiste na presença de carga residual na linha de transmissão, fazendo com que a fonte encontre a linha com condições iniciais não quiescentes. A condição em que não há a presença de carga residual na linha de transmissão no instante de fechamento do disjuntor é certamente a mais simples para a realização do chaveamento controlado. Neste caso, o instante ótimo ocorre na

passagem por zero da tensão do lado da fonte. Assim, para cada fase, basta o monitoramento deste sinal de tensão, o qual será o sinal de referência para o controle do instante ótimo para o chaveamento (ZANETTA, 2003).

Na Figura 2.1 estão ilustradas as tensões no disjuntor quando do religamento de linhas não compensadas, quando a tensão do lado da fonte tem a mesma polaridade da tensão residual na linha e o fechamento é realizado no instante ótimo. Também é indicado o comportamento da tensão do lado da linha quando o chaveamento não é efetuado no ponto ótimo, apresentando sobretensões.

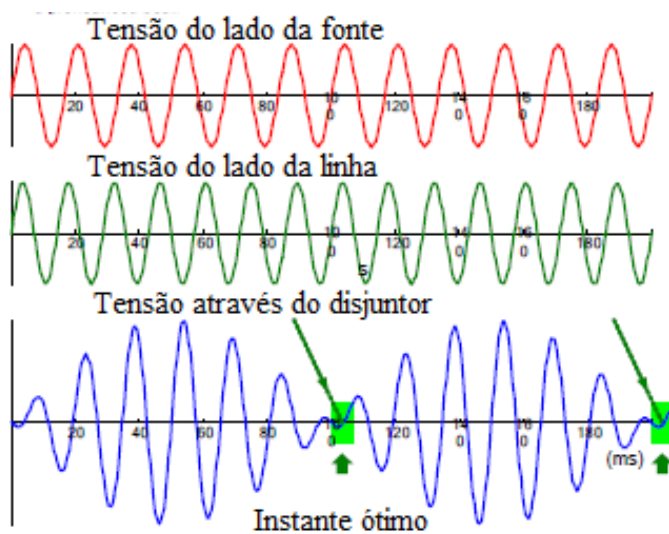
Figura 2.1 – Tensão nos contatos do disjuntor para religamento de linhas não compensadas



Fonte – MITSUBISHI, 2007

Na Figura 2.2 é apresentado o caso de uma linha compensada. O grau de compensação tem um efeito significativo na tensão da linha. A tensão no disjuntor mostra um batimento especialmente para um alto grau de compensação devido a frequência de oscilação típica da linha estar no intervalo de 30 a 50 Hz. O instante ótimo para o chaveamento ocorre na passagem por zero do sinal de tensão entre os contatos do disjuntor e no período de menor pulsação deste sinal. Com isto, pode-se minimizar o efeito do pré-arco no momento do fechamento dos contatos do disjuntor, aumentando assim a confiabilidade do chaveamento controlado.

Figura 2.2 – Tensão nos contatos do disjuntor para religamento de linhas compensadas



Fonte – MITSUBISHI, 2007

### 2.2.1 Abertura Controlada

A abertura controlada de um disjuntor refere-se ao controle da separação do contato elétrico em cada polo do disjuntor em relação ao ângulo de fase da corrente, e assim, determinar o tempo de arco dos contatos com o objetivo de reduzir os desgastes no disjuntor, além de minimizar os estresses e perturbações no sistema elétrico.

O controle da abertura do disjuntor é realizado de forma que a separação de seus contatos se inicie imediatamente após a passagem da corrente por zero. Com o movimento de separação dos contatos, um arco elétrico é estabelecido e se extingue em um tempo menor que um semi-ciclo, no próximo zero da corrente. Neste momento, os contatos deverão estar separados de forma a proporcionar a máxima rigidez dielétrica, disponibilizando ao disjuntor a melhor condição para suportar o restabelecimento da tensão entre os contatos sem a ocorrência de reignição ou reacendimento do arco.

A sequência de tempo para a abertura controlada é mostrada na Figura 2.3. O comando para abertura é emitido aleatoriamente em relação ao ângulo de fase do sinal de referência no instante  $t_{comando}$ . Este comando é atrasado pelo controlador por um intervalo de tempo,  $T_{total}$ ,

que é a soma de um intervalo de tempo de atraso intencional de sincronização em relação a referência,  $T_{contab}$ , e um determinado intervalo de tempo de espera,  $T_{esp}$ .

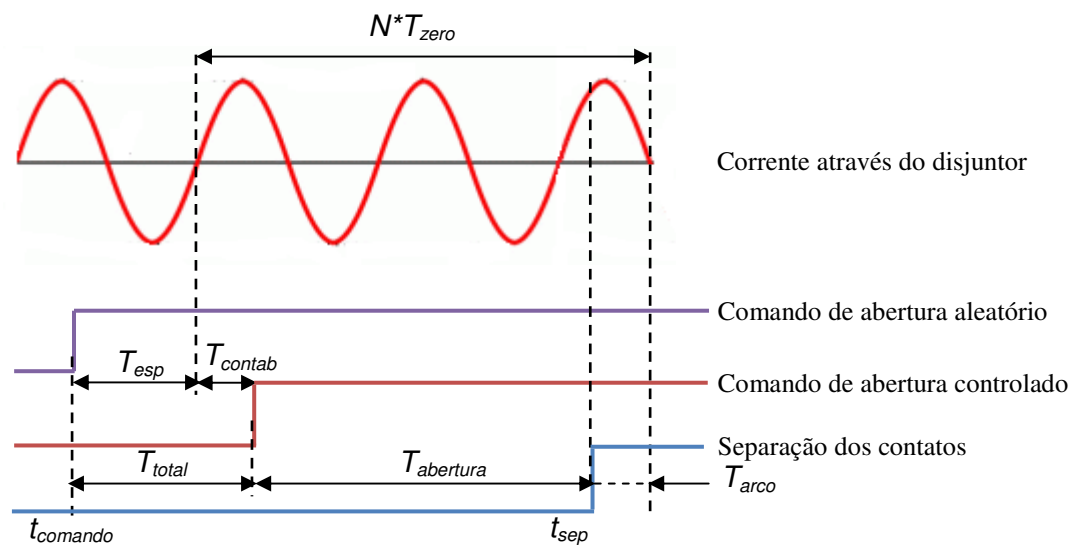
$$T_{total} = T_{esp} + T_{contab} \quad (2.1)$$

$T_{contab}$  é calculado em relação a um determinado cruzamento do zero da referência e em função do tempo de abertura mecânica do disjuntor,  $T_{abertura}$ , e pelo instante de separação elétrica dos contatos em relação ao próximo zero da corrente em que a extinção do arco ocorre,  $t_{sep}$ . Portanto, o controle preciso de  $t_{sep}$  efetivamente define o tempo de arco.

$$T_{contab} = N * T_{zero} - T_{arco} - T_{abertura} \quad (2.2)$$

O tempo de abertura mecânica  $T_{abertura}$ , é o intervalo entre a energização da bobina de abertura e a separação dos contatos do disjuntor.  $N * T_{zero}$  é um número inteiro de meio ciclos necessário para se obter um valor positivo de  $T_{contab}$  como mostrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Sequência de Abertura Controlada



## 2.2.2 Fechamento Controlado

O fechamento controlado de um disjuntor refere-se ao controle do ponto de condução de corrente em cada polo do disjuntor em relação ao ângulo de fase da tensão de referência. O comando de fechamento é emitido aleatoriamente em relação ao ângulo de fase do sinal de referência no instante  $t_{comando}$ . O controlador atrasa o comando de fechamento por um tempo,  $T_{total}$ , que é a soma do tempo de sincronização intencional de atraso,  $T_{conf}$ , e um determinado intervalo de tempo de espera,  $T_{esp}$ .

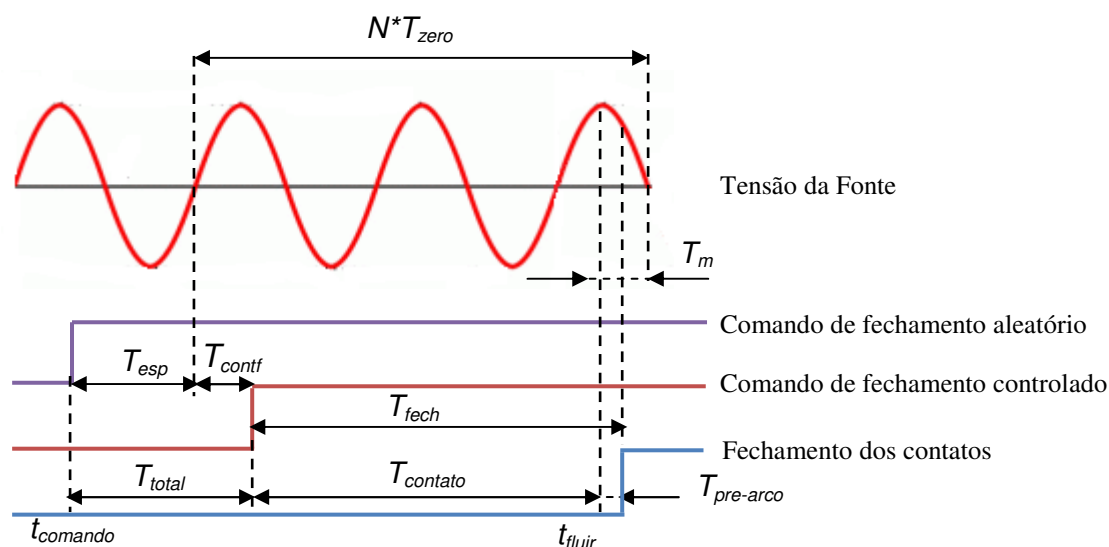
$$T_{total} = T_{esp} + T_{conf} \quad (2.3)$$

No fechamento  $T_{conf}$  é determinado pelo tempo de fechamento mecânico do disjuntor, o tempo de pré arco ( $T_{pre-arco}$ ) e o ângulo de fase alvo do instante do fechamento real dos contatos ( $T_{contato}$ ). A Figura 2.4 mostra a sequência de tempo para uma energização de uma carga indutiva, onde o ponto ótimo para o fechamento dos contatos é o pico da tensão e o tempo de pré-arco é assumido ser um quarto de ciclo.

$$\begin{aligned} T_{conf} &= N.T_{zero} - T_m - (T_{fech} - T_{pre-arco}) \\ &= N.T_{zero} - T_m - T_{contato} \end{aligned} \quad (2.4)$$

A corrente começa a circular no instante do fechamento elétrico dos contatos,  $t_{fluir}$ . O correspondente intervalo de tempo,  $T_m$ , é definido em relação ao cruzamento do zero seguinte. O tempo de fechamento,  $T_{fech}$ , é o intervalo de tempo entre a energização da bobina de fechamento do disjuntor e o toque mecânico dos contatos. O tempo de pré arco,  $T_{pre-arco}$ , é o tempo que decorre entre o instante de *pré strike* e o toque dos contatos.  $T_{contato}$  é o intervalo de tempo entre a energização da bobina de fechamento e  $t_{fluir}$ , que é o ponto onde a corrente começa a circular.

Figura 2.4 – Sequência de Fechamento Controlado



## 2.3 Transformador de Potencial Capacitivo

Os transformadores de potencial são usados na alimentação de medidores, relés de proteção e outros dispositivos associados às linhas de transmissão de alta tensão. Estes transformadores proporcionam isolamento contra a alta tensão do circuito primário, através do acoplamento magnético dos circuitos primário e secundário. No seu secundário, as correntes e tensões são proporcionais às que circulam pelos circuitos de potência, suficientemente reduzidas, de forma que estes instrumentos possam ser fabricados relativamente pequenos, do ponto de vista de isolamento. Também são de grande importância no sistema elétrico de potência, sem os quais não seria possível mensurar os valores de corrente e tensão utilizados ou proteger os equipamentos e a vida humana.

Existem basicamente duas tecnologias aplicadas em transformadores de potencial amplamente conhecidas em sistemas de alta tensão, sendo elas: transformadores de potencial indutivos (TPI) e transformadores de potencial capacitivos (TPC). Normalmente em sistemas de até 145 kV, encontram-se instalações com transformadores de potencial indutivos, e acima de 145 kV transformadores de potencial capacitivos devido ao elevado custo para fabricação de transformadores indutivos acima desta tensão. Um dos motivos desse alto custo dos transformadores de potencial indutivos é o elevado número de espiras do enrolamento primário de equipamentos em sistemas acima de 145 kV.

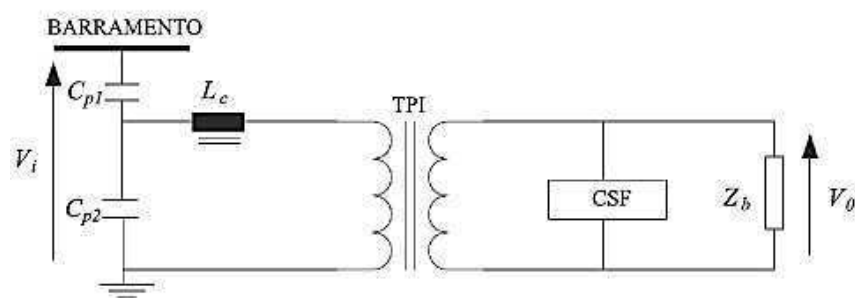
O princípio de funcionamento dos transformadores de potencial é a conversão eletromagnética de energia entre os enrolamentos. Assim, ao ser aplicada uma tensão no enrolamento primário, será obtido nos terminais secundários um valor de tensão reduzido conforme a relação de transformação do equipamento.

O transformador de potencial capacitivo é composto basicamente por 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 conectado entre fase e terra, sendo que uma derivação intermediária alimenta uma unidade eletromagnética de média tensão que compreende, basicamente, os seguintes elementos:

- Transformador de potencial indutivo, que é constituído por dois ou mais enrolamentos que são montados no mesmo núcleo, conectado na derivação capacitiva intermediária fornecendo as tensões secundárias desejadas;
- Reator de compensação ajustável para controlar a defasagem angular provocada pelo divisor capacitivo, na frequência nominal, independentemente da carga utilizada no secundário, porém nos limites definidos pela classe de exatidão considerada;
- Dispositivo de amortecimento dos fenômenos de ferroressonância.

Na Figura 2.5 é apresentado o esquema elétrico simplificado para o TPC. No esquema, as capacitâncias  $C_{p1}$  e  $C_{p2}$  possuem a função de reduzir o nível de tensão do sistema para alimentar o enrolamento primário de um transformador de potencial indutivo (TPI) cuja tensão secundária alimenta os instrumentos de medição, proteção e controle. O reator  $L_c$  compensa a reatância capacitiva do divisor, na frequência fundamental do sistema, evitando diferenças de fase entre  $V_i$  e  $V_o$ , nessa frequência (D'AJUZ et al., 1985). O TPC é equipado com um circuito supressor de ferroressonância (CSF), normalmente conectado no lado secundário do TPI, com a finalidade de evitar o fenômeno de ferroressonância entre as capacitâncias do circuito e as não linearidades no núcleo ferromagnético de  $L_c$  e do TPI.  $Z_b$  está representando a carga do TPC.

Figura 2.5 – Esquema elétrico simplificado para um TPC típico



Fonte – DANTAS, 2012

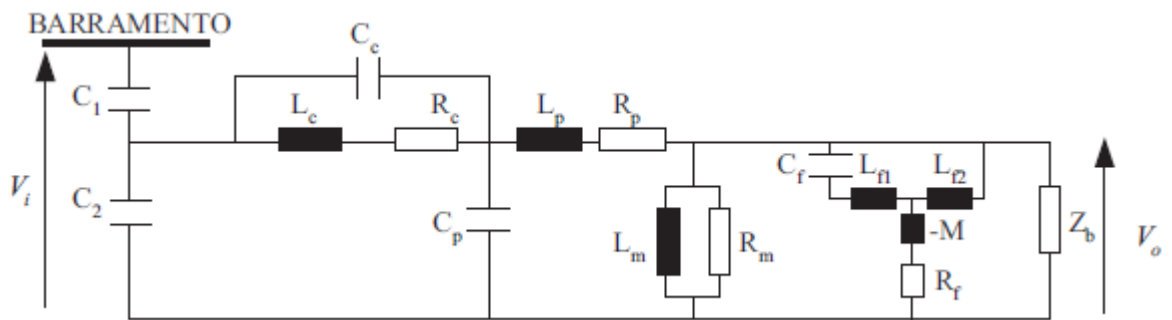
Para o regime permanente, a tensão obtida no secundário de um TPC é uma réplica da tensão aplicada ao seu primário. No entanto, com relação à sua resposta a transitórios de tensão, referindo-se à falhas que provocam redução da tensão do barramento, a saída do secundário pode não responder instantaneamente devido aos elementos armazenadores de energia. Quanto maior a capacitância do divisor capacitivo, maior será o tempo de resposta transitória. Dependendo dos valores de capacitância do divisor capacitivo, a influência na resposta em frequência do transformador de potencial capacitivo irá produzir ressonância harmônica em frequências baixas na ordem de 200 Hz, operando como um filtro de harmônicos para terra, impossibilitando a medição correta nos terminais secundários.

## 2.4 Filtro Digital Recursivo

O filtro a ser utilizado neste trabalho foi apresentado por MACHADO (2009) e SILVA (2014). Os trabalhos apresentam o modelo simplificado do TPC com apenas os parâmetros mais relevantes cuja topologia é mostrada na Figura 2.6. O modelo é acrescido dos elementos limitadores de tensão e dos elementos que contêm núcleo ferromagnético que foram utilizados com sucesso em estudos de transitórios eletromagnéticos. Os trabalhos referenciam FERNANDES JÚNIOR (2003) cuja aplicação da metodologia de obtenção da função de transferência, considerando os valores medidos de amplitude e fase da relação de tensão de TPC estudados apresentaram resultados satisfatórios até a frequência de 10 kHz.



Figura 2.6 – Modelo simplificado de um TPC para frequências de 10 Hz a 10 kHz

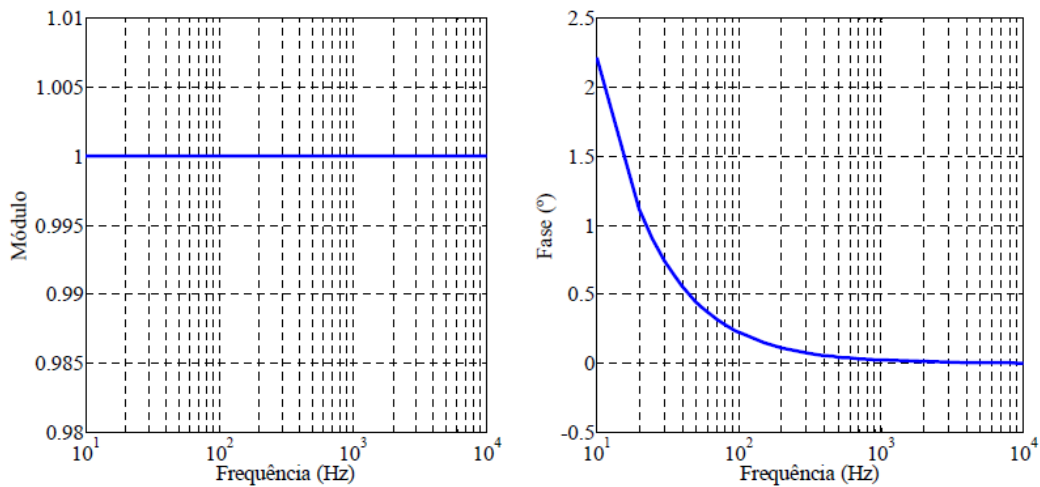


Fonte – MACHADO, 2009

### 2.4.1 Compensação de Sinais

A partir da relação de transformação de tensão de um modelo de TPC e de um método para obtenção dos seus parâmetros R, L e C, é desenvolvido um compensador o qual tem seu desempenho testado no domínio da frequência e do tempo. O intuito é a obtenção de uma compensação ideal, isto é, ganho unitário e um mínimo de deslocamento de fase entre a tensão primária e a secundária compensada. O comportamento do ganho e da fase do modelo de TPC compensado no espectro de frequências entre 10 Hz e 10 kHz é mostrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Ganho e fase de um TPC compensado para frequências de 10 Hz a 10 kHz



Fonte – SILVA, 2014

SILVA (2014) utiliza a relação de transformação de tensão do modelo do TPC apresentada na Equação (2.5).

$$G_{TPC}(s) = \frac{A_7.s^7 + A_6.s^6 + A_5.s^5 + A_4.s^4 + A_3.s^3 + A_2.s^2 + A_1.s + A_0}{B_8.s^8 + B_7.s^7 + B_6.s^6 + B_5.s^5 + B_4.s^4 + B_3.s^3 + B_2.s^2 + B_1.s + B_0} \quad (2.5)$$

Nessa equação, os coeficientes  $A_n$ ,  $n = 2, \dots, 7$  e  $B_m$ ,  $m = 0, \dots, 8$  são funções não lineares dos elementos R, L e C do modelo de TPC.

Para obter uma compensação ideal, isto é, ganho unitário e um mínimo de deslocamento de fase entre a tensão primária e secundária compensada, verifica-se que a função de transferência do compensador e do TPC definidas por  $G_{COM}(s)$  e  $G_{TPC}(s)$ , respectivamente, devem possuir a relação:

$$G_{TPC}(s).G_{COM}(s) = 1 \angle 0^\circ. \quad (2.6)$$

Ao isolar  $G_{COM}(s)$  na Equação (2.6), verifica-se que o compensador é instável no domínio do tempo. Para solucionar essa inconveniência, foi proposto alterar a Equação (2.6) para forma,

$$G_{TPC}(s).G_{COM}(s).\varphi(s) = 1 \angle 0^\circ, \quad (2.7)$$

em que  $\varphi(s)$  é uma função racional imprópria que ditará a dinâmica de um TPC ideal. Assim, a função de transferência do compensador assume a expressão:

$$G_{COM}(s)=[G_{TPC}(s)\varphi(s)]^{-1}. \quad (2.8)$$

substituindo (2.8) em (2.7), tem-se:

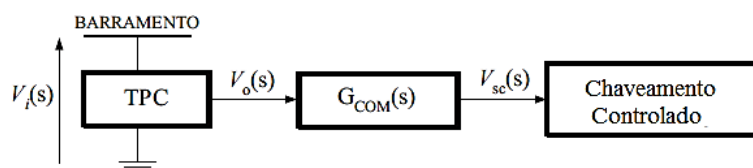
$$G_{TPC}(s).G_{TPC}(s)^{-1}.\varphi(s)^{-1}=1\angle 0^\circ, \quad (2.9)$$

$$\varphi(s)^{-1}=1\angle 0^\circ. \quad (2.10)$$

em que,  $\alpha(s) = \varphi(s)^{-1}$  é uma função racional própria que corresponderá à função de transferência do TPC compensado e, conseqüentemente,  $\alpha(s)$  ditará a resposta em frequência bem como o comportamento dinâmico e de regime do TPC compensado.

Na Figura 2.8 é mostrado um diagrama de blocos sintetizando o explicado acima, na qual  $V_i(s)$ ,  $V_o(s)$  e  $V_{sc}(s)$  são, respectivamente, a tensão primária do TPC, tensão secundária não compensada e tensão secundária compensada.

Figura 2.8 – Diagrama de blocos de compensação do TPC



De acordo com a Figura 2.8 e a Equação (2.8), a tensão primária do TPC e a tensão secundária compensada estão relacionadas pela equação:

$$V_{sc}(s) = V_i(s).\alpha(s). \quad (2.11)$$

Com a compensação da tensão secundária, todos os polos do TPC são compensados. Ao cancelar apenas os polos dominantes não atende às especificações de reposta em frequência desejadas, que são, ganho unitário e deslocamento de fase mínimo. Assim, toda a dinâmica do

TPC é cancelada, ficando a função  $\alpha(s)$  responsável pelo comportamento dinâmico e a resposta em frequência do TPC compensado.

## 2.4.2 Modelo Analítico do TPC

De forma ideal, a função de transferência do compensador deveria corresponder à inversa da função de transferência do TPC. Todavia essa implementação levaria a compensadores no domínio do tempo com funções impulso ou suas derivadas, pois o número de polos do compensador seria menor que o número de zeros. Os polos dominantes foram compensados, porém o TPC compensado não possui resposta em frequência plana e necessita de compensadores por avanço ou atraso de fase para ajustar o ganho e a fase nas condições normais de operação.

$$G_{COM}(s) = \left[ \frac{B_8 \cdot s^8 + B_7 \cdot s^7 + B_6 \cdot s^6 + B_5 \cdot s^5 + B_4 \cdot s^4 + B_3 \cdot s^3 + B_2 \cdot s^2 + B_1 \cdot s + B_0}{A_7 \cdot s^7 + A_6 \cdot s^6 + A_5 \cdot s^5 + A_4 \cdot s^4 + A_3 \cdot s^3 + A_2 \cdot s^2 + A_1 \cdot s + A_0} \right] \cdot \alpha(s). \quad (2.12)$$

Para cancelar o polo duplo da origem,  $\alpha(s)$  deve possuir pelo menos um zero duplo na origem. Seria essa característica de  $\alpha(s)$  uma primeira condição de contorno. A segunda condição de contorno é que o compensador no domínio do tempo é livre de funções impulso ou suas derivadas somente se  $\alpha(s)$  for uma função estritamente própria. Baseado nessas condições de contorno de  $\alpha(s)$ , a expressão para obter a função de transferência do TPC compensado é simplificada pela Equação (2.13).

$$\alpha(s) = \frac{C_2 s^2 + C_1 s + C_0}{s^3 + D_2 s^2 + D_1 s + D_0}. \quad (2.13)$$

Como  $\alpha(s)$  é uma função não-linear dos elementos  $C_2$ ,  $C_1$ ,  $C_0$ ,  $D_2$ ,  $D_1$  e  $D_0$  foi necessário fazer uso da técnica de mínimos quadrados não lineares para calcular esses coeficientes.

## 2.4.3 Estimação dos parâmetros do Modelo do TPC

Para computar os elementos  $D_i$ ,  $i=0, \dots, 3$  foi implementado, por MACHADO (2009), o método de Levenberg-Marquardt para minimizar a função dada pela Equação (2.14)

$$F(\mathbf{D}) = \sum_{i=1}^n (y_i - \alpha(w_i; \mathbf{D}))^2. \quad (2.14)$$

Em que  $w_i$  é o  $i$ -ésimo valor de frequência,  $\mathbf{D}$  é o vetor paramétrico a ser determinado,  $y_i$  é a resposta em frequência de referência e  $\alpha(w_i; D)$  é a função de transferência do modelo do TPC compensado.

#### 2.4.4 Análise da Compensação no Domínio do Tempo

A análise no domínio do tempo permite verificar o comportamento em regime permanente e transitório do TPC com e sem a compensação. Porém, para obter a resposta no domínio do tempo de um sistema representado no domínio da frequência, é necessário realizar a conversão entre esses dois domínios.

De acordo com o diagrama de blocos de compensação do TPC da Figura 2.8 e as Equações (2.12) e (2.13), a função de transferência do compensador,  $G_{COM}(s)$ , pode ser generalizada por:

$$G_{COM}(s) = \frac{V_{sc}(s)}{V_o(s)} = \left[ \frac{b_8 \cdot s^8 + b_7 \cdot s^7 + b_6 \cdot s^6 + b_5 \cdot s^5 + b_4 \cdot s^4 + b_3 \cdot s^3 + b_2 \cdot s^2 + b_1 \cdot s + b_0}{a_8 \cdot s^8 + a_7 \cdot s^7 + a_6 \cdot s^6 + a_5 \cdot s^5 + a_4 \cdot s^4 + a_3 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_1 \cdot s + a_0} \right]. \quad (2.15)$$

Os parâmetros  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $j = 0, \dots, 8$  são funções não lineares dos elementos R, L e C do TPC e dos parâmetros  $D_i$ ,  $i = 0, \dots, 3$  da função de transferência do modelo de TPC compensado.

As equações diferenciais de coeficientes constantes podem ser solucionadas diretamente por meio de métodos numéricos de integração que permitem discretizar e tornar as equações diferenciais em equações de diferença.

Aplicando a transformada inversa de Laplace sobre a Equação 2.15,

$$\begin{aligned} \frac{d^8 v_{sc}(t)}{dt^8} + a_7 \frac{d^7 v_{sc}(t)}{dt^7} + \dots + a_1 \frac{dv_{sc}(t)}{dt} + a_0 v_{sc}(t) = \\ = b_8 \frac{d^8 v_o(t)}{dt^8} + b_7 \frac{d^7 v_o(t)}{dt^7} + \dots + b_1 \frac{dv_o(t)}{dt} + b_0 v_o(t). \end{aligned} \quad (2.16)$$

Essa equação diferencial linear de coeficientes constantes corresponde à equação dinâmica de um filtro analógico cuja solução no tempo fornece a tensão de saída do TPC compensado.

As equações diferenciais de coeficientes constantes podem ser solucionadas por meio de métodos numéricos de integração que permitem discretizar, e assim, tornar as equações diferenciais em equações de diferença.

Os programas do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) utilizam a integração trapezoidal, mapeando entre o plano  $s$  e o plano  $z$  através da transformação,

$$s = \frac{2}{\Delta t} \left( \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \right). \quad (2.17)$$

Aplicando essa transformação à função de transferência do compensador, obtém-se uma função de transferência discreta no domínio  $z$  da forma,

$$\frac{V_{sc}(z)}{V_o(z)} = \frac{d_0 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + d_3 z^{-3} + d_4 z^{-4} + d_5 z^{-5} + d_6 z^{-6} + d_7 z^{-7} + d_8 z^{-8}}{1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + c_3 z^{-3} + c_4 z^{-4} + c_5 z^{-5} + c_6 z^{-6} + c_7 z^{-7} + c_8 z^{-8}}. \quad (2.18)$$

Os coeficientes  $d_j$  com  $j = 0, \dots, 8$  e  $c_i$  com  $i = 1, \dots, 8$ , são função do passo de integração  $\Delta t$  e dos coeficientes  $a_j$  e  $b_j$  da equação diferencial linear no tempo contínuo.

Reescrevendo a Equação (2.18), tem-se:

$$V_{sc}(z) = [d_0 + d_1 z^{-1} + \dots + d_8 z^{-8}] V_o(z) - [c_1 z^{-1} + \dots + c_8 z^{-8}] V_{sc}(z). \quad (2.19)$$

Foram encontrados problemas na realização direta desse filtro digital provavelmente pelo fato de que os filtros de ordem elevada quando implementados diretamente podem tornar-se altamente sensíveis à quantização de seus coeficientes e portanto, qualquer variação em um único coeficiente  $a_j$  ou  $b_j$  pode provocar variações significativas nos polos e zeros do filtro digital (MACHADO, 2009). Para solucionar isso, a função de transferência foi implementada através da conexão de quatro seções de segunda ordem formando um filtro digital em cascata (compensador). Essa conexão tem a função de transferência expressa na forma da Equação (2.20).

$$G_{COM}(z) = \frac{V_{sc}(z)}{V_o(z)} = k_0 \prod_{i=1}^4 \frac{k_{i1} + k_{i2} z^{-1} + k_{i3} z^{-2}}{1 + k_{i4} z^{-1} + k_{i5} z^{-2}}. \quad (2.20)$$

em que,  $k_0$  e  $k_{ij}$ , com  $i = 1, \dots, 4$  e  $j = 1, \dots, 5$  são respectivamente, a constante de escalonamento do filtro e os coeficientes das seções de segunda ordem do filtro digital recursivo.

A constante de escalamento do filtro pode ser definida pela razão entre um valor da tensão secundária  $V_o$  e a tensão secundária compensada  $V_{sc}$  em um ponto de operação  $n$ .

$$k_0 = \frac{V_o(n)}{V_{sc}(n)}. \quad (2.21)$$

Por questões de simplicidade, MACHADO (2009) considera o cálculo da constante de escalamento durante o processo de sintonia do filtro.

Os coeficientes  $k_{ij}$  são obtidos a partir da aplicação da transformação bilinear sobre as seções de segunda ordem obtidas no plano  $s$ . A transformação bilinear consiste basicamente em mapear a metade esquerda do plano  $s$  no interior do círculo unitário do plano  $z$ .

## 2.4.5 Análise da Compensação no Domínio da Frequência

A análise no domínio da frequência é uma etapa importante do processo de compensação dinâmica. Conhecida a resposta em frequência de dois sistemas em cascata, a resposta do sistema resultante é obtida pelo produto das respostas em frequência dos sistemas. Assim, utilizando a resposta em frequência do TPC e do compensador, foi avaliado o comportamento do TPC compensado no espectro de 10 Hz a 10 kHz.

## Capítulo 3

### Revisão Bibliográfica

Sobretensões de manobra tornaram-se importantes com a introdução de linhas de transmissão acima de 300 kV, já que seu chaveamento impõe ao isolamento do sistema um grande esforço. Entre os métodos tradicionais mais utilizados para supressão de sobretensões em um sistema de transmissão está o uso dos resistores de pré-inserção na energização e no religamento de linhas de transmissão.

O chaveamento controlado é utilizado para minimizar as sobretensões de manobra no chaveamento de bancos de capacitores, reatores de derivação e transformadores de potência. O método também está ganhando aceitação para o religamento de linhas de transmissão de EAT (Extra-Alta Tensão), e substituindo os tradicionais resistores de pré-inserção. O chaveamento controlado propicia a limitação das sobretensões de manobra especialmente quando usados em combinação com os para-raios, sendo semelhante ao que é conseguido com resistores de pré-inserção (ABB, 2013).

A seguir é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o chaveamento controlado e outras técnicas utilizadas para mitigar os efeitos dos transitórios de manobra, como também, as técnicas de compensação para corrigir a tensão secundária do TPC mediante os transitórios.

#### 3.1 Chaveamento Controlado

KONKEL et al. (1977) publicaram a experiência da Bonneville Power Administration (BPA) utilizando o chaveamento controlado de disjuntores convencionais equipados com apenas um resistor de pré-inserção por fase para limitar as sobretensões provenientes da energização de linhas de transmissão. Um protótipo de dispositivo de controle foi incorporado aos disjuntores e instalado em uma linha de 500 kV (222 km) em 1975. O método teve sua eficiência comprovada através de testes de campo, onde as sobretensões foram limitadas a valores semelhantes aos obtidos com vários resistores de pré-inserção por fase. Em LEGATE



et al. (1988) a Bonneville Power Administration (BPA) verificou que o projeto desses disjuntores foi considerado conservativo, muito mais complexo do que o necessário e precisava ser reavaliado. Nessa reavaliação, a BPA que foi a pioneira na utilização desses resistores, empregou como alternativa para limitar as sobretensões de chaveamento a instalação de para-raios de óxido metálico (MOSA) nos terminais da linha e o fechamento dos contatos dos disjuntores considerando a polaridade da carga residual na linha. O método foi validado através de simulações digitais e testes de campo, onde as sobretensões foram limitadas a menos de 1,7 p.u. em 98 % dos casos para linhas longas.

No estudo de RIBEIRO e McCALLUM (1989) é reportada a experiência da Florida Power & Light Co. (FPL) em 1985, com problemas com os mecanismos dos resistores de pré-inserção em um grande percentual de seus disjuntores de 550 kV a SF<sub>6</sub>. A primeira reação da FPL foi encomendar as partes para reconstruir os mecanismos, porém a baixa confiabilidade dos resistores e o possível impacto adverso na confiabilidade do sistema levaram a FPL a procurar alternativas.

Por coincidência, em 1986 a FPL completou um projeto para a instalação de para-raios de óxido metálico com tensão nominal de 396 kV. Este projeto teve como motivação a confiabilidade e segurança de pessoal sem ter relação ao desempenho dos disjuntores. No entanto, devido ao ineficiente funcionamento dos mecanismos dos resistores de pré-inserção, a alternativa mais atraente foi substituir os mesmos e contar com as características dos para-raios de óxido metálico para limitar as sobretensões de manobras nos terminais da linha a 1,7 p.u.

Através de simulações digitais realizadas em programas do tipo EMTP para um sistema de 500 kV verificou-se que os riscos de falhas de isolamento de linhas de transmissão, sem resistores de pré-inserção e como para-raios de óxido metálico, são relativamente baixos (uma falha para cada 135 manobras). De acordo com seus estudos, a FPL adquiriu e instalou disjuntores de 550 kV sem resistores de pré-inserção, representando assim uma significativa redução nos custos de aquisição e manutenção.

CARVALHO et al. (1995) analisaram a redução de sobretensões de manobra em linhas de transmissão mediante o uso de para-raios de óxido metálico e chaveamento controlado. Para a análise foi utilizada uma linha de transmissão de 550 kV com comprimentos variando de 100 km a 400 km. A compensação série também é variada de 35 % a 70 % da potência reativa total da linha de transmissão. A intenção básica é apresentar, através de simulações

digitais via ATP, a redução de sobretensões de manobra obtida pelos para-raios de óxido metálico e o ganho adicional proporcionado quando atua em conjunto com o chaveamento controlado.

As simulações realizadas com o ATP demonstram que os para-raios de óxido metálico atuando juntamente com o chaveamento controlado são eficientes, entretanto, a generalização de resultados é perigosa e nem sempre acompanha as tendências esperadas. Isto é consequência da influência de um grande número de parâmetros nas sobretensões de manobra, como a configuração da linha, o comprimento da linha, a resistividade do solo, características das componentes modais, grau de compensação em derivação, características dos para-raios, entre outros. É verificado que utilizar para-raios em conjunto com o chaveamento controlado pode eliminar a necessidade de resistores de pré-inserção em EAT (Extra Alta Tensão).

O CIGRÉ TASK FORCE 13.00.1 (1995, 1996) em seu primeiro documento apresenta o Estado da Arte, onde são explanados os detalhes das reduções de sobretensões para vários casos de chaveamento. Em destaque as aplicações mais usuais de chaveamento de bancos de capacitores, linhas de transmissão, reatores em derivação e transformadores. Também são apresentados os requisitos e características dos disjuntores necessários para o bom desempenho do chaveamento controlado; considerações sobre a confiabilidade, manutenção e aspectos econômicos; o número e o tipo de instalações em diferentes países que utilizam a técnica de chaveamento controlado. No segundo documento foram realizados estudos para diferentes aplicações e níveis de tensão e enumeradas as vantagens e desvantagens associadas ao uso do chaveamento controlado para tais situações.

Em FROEHLICH et al. (1997) foi apresentado o primeiro dispositivo para chaveamento controlado em linhas de transmissão com compensação em derivação. Para as linhas de 500 kV, da BC Hydro, Canadá, decidiu-se limitar o nível de sobretensão de chaveamento para 1,7 p.u. utilizando para-raios de óxido metálico e chaveamento controlado no disjuntor.

Para esse estudo foram realizadas várias simulações com o programa EMTP comparando diferentes métodos de limitação de sobretensões para a energização e religamento trifásico de uma linha de 500 kV, de 330 km, com reatores em derivação de 135 MVA nos terminais e um banco de capacitores em série de 605 MVA alocado no meio da linha. Os estudos mostram que um resistor de pré-inserção de 400  $\Omega$  com 8 ms de tempo de inserção não limitaria a sobretensão a 1,7 p.u., concluindo assim que, com os para-raios e o

fechamento controlado do disjuntor pode-se reduzir as sobretensões de manobras sem a utilização dos resistores de pré-inserção.

O estudo de ROCHA et al. (1997) descreve um modelo desenvolvido para o programa *Alternative Transient Program* (ATP) para simular manobra controlada em sistema de transmissão. O modelo implementa a característica dielétrica do disjuntor durante a operação de fechamento, bem como a dispersão do disjuntor e imprecisão do instante ótimo determinado pelo controlador. A representação da característica dielétrica do disjuntor foi concebida através da rotina *Transient Analysis of Control Systems* (TACS). Este novo modelo determina de forma mais realista a tensão de pré-arco do disjuntor, assim sendo, oferece uma avaliação mais precisa do desempenho do disjuntor e do controlador em manobra controlada.

STENSTRÖM e MOBEDJINA (1998) descrevem o uso de para-raios de linhas de Extra Alta Tensão (EAT) para a limitação de sobretensões de manobra. Uma tendência atual é tentar encontrar alternativas para os resistores de pré-inserção através do uso de para-raios ou chaveamento controlado. Para serem utilizados como alternativa ao resistor de pré-inserção, os para-raios devem ser instalados ao longo da linha em pontos selecionados, podendo ser instalados diretamente nas torres, para obter uma redução eficiente das sobretensões ao longo das linhas. O estudo foi realizado utilizando o EMTP em linhas de transmissão de 420 kV e 550 kV, com comprimento variando de 100 km a 300 km, e graus de compensação de 30 % e 60 %. O número de para-raios utilizados ao longo da linha varia em função do comprimento da mesma. Os melhores resultados foram obtidos utilizando-se para-raios no meio da linha ou a 1/3 e 2/3 da linha, incluindo os para-raios localizados nos terminais, permitindo dispensar o uso do resistor de pré-inserção.

ESMERALDO et al. (1999) descrevem o estudo realizado para avaliar as sobretensões impostas aos disjuntores de linha de uma expansão no sistema de transmissão de FURNAS na tensão de 500 kV. O estudo considerou três configurações de linhas de transmissão: uma configuração convencional com três condutores por fase e duas configurações com torres compactas, uma com quatro condutores por fase e a outra com seis condutores por fase. Simulações digitais foram feitas com o auxílio do ATP para calcular as sobretensões de manobras em uma linha de transmissão de 500 kV e 250 km, com reatores em derivação de 136 Mvar e para-raios de óxido metálico de 420 kV com capacidade de absorção de energia de 13 kJ/kV em ambos os terminais. São estudadas quatro alternativas para a mitigação de sobretensões: resistor de pré-inserção, fechamento sincronizado, fechamento escalonado e

para-raios de óxido metálico nos terminais. O estudo conclui que para energização e religamento trifásico rápido, tanto o resistor de pré-inserção quanto o fechamento sincronizado são igualmente viáveis e efetivos, estando os para-raios de óxido metálico e os reatores em derivação conectados.

O CIGRÉ WG 13.07 (1999) publicou em duas partes um guia de aplicação do chaveamento controlado para diversos equipamentos como reatores, bancos de capacitores, transformadores e linhas de transmissão. O guia apresenta a teoria do chaveamento controlado, bem como seus benefícios e viabilidade para diversos casos. Também evidencia que o uso prático do chaveamento controlado depende fortemente do tipo de chaveamento, dos parâmetros do sistema e das características do disjuntor.

ITO (2002) explica o estado da arte do chaveamento controlado descrevendo os requisitos dos disjuntores em aplicações de manobras em banco de capacitores em derivação, banco de reatores em derivação, transformadores e linhas de transmissão. O autor também cita o crescente número de instalações que utilizam o chaveamento controlado devido ao seu desempenho satisfatório. Antes de 1995, a instalação dos controladores era limitada devido a falta de maturidade tecnológica. A compensação do tempo ocioso é essencial para o chaveamento controlado de linhas porque o desempenho do controlador é altamente afetado pela dependência do tempo ocioso. Em se tratando dos disjuntores de operação monopolar, o autor considera como parâmetros importantes: a taxa de decrescimento da rigidez dielétrica (RDDS), dispersão mecânica para os tempos de abertura e fechamento em função de condições externas (temperatura ambiente, tensão de controle, pressão hidráulica) e a relação entre o tempo ocioso e o tempo de operação.

SEYEDI et al. (2005) propõem reduzir as sobretensões de manobra através da instalação de um conjunto de para-raios e, em seguida, procurar o ponto ótimo de instalação, pelo chaveamento em ambos os terminais da linha. O ponto ótimo está entre dois pontos sub-ótimos para chaveamento, em ambas as extremidades da linha. Verificou-se que este método pode proporcionar um perfil de tensão mais homogêneo ao longo da linha de transmissão. Usando este método poderia eliminar a necessidade de instalação de resistores de pré-inserção. Se a sobretensão máxima de manobra para o ponto ótimo encontrado estiver abaixo do nível de proteção da linha, então é aceitável. Caso contrário, outro método como dois conjuntos de para-raios ou chaveamento controlado, deve ser usado.

O uso de resistores de pré-inserção promove uma eficiente limitação das sobretensões de manobra, no entanto, os mesmos fazem os disjuntores mecanicamente mais complexos e onerosos. O chaveamento controlado elimina a necessidade de resistores de pré-inserção. As simulações realizadas por SANAYE et al. (2005) mostram que o chaveamento controlado limita as sobretensões a valores aceitáveis para a energização e o religamento automático de linhas de transmissão sem compensação, principalmente quando utilizado em conjunto com para-raios. As simulações são realizadas com o EMTP e é utilizada a distribuição de probabilidade para a escolha do nível de isolamento de modo a atingir um critério de taxa de falha.

VALERO (2007) realizou uma análise comparativa de três métodos para a manobra de energização e religamento trifásico de linhas de transmissão, sendo eles, resistores de pré-inserção, para-raios nos terminais e ao longo das linhas e técnicas de chaveamento controlado. Para suporte da análise foram realizadas simulações com o programa PSCAD/EMTDC de um caso específico com dados reais dos geradores, transformadores, características dos trechos de linhas de transmissão, para-raios e reatores de compensação em derivação usando como base um sistema de 500 kV. Os resultados apresentados evidenciam o bom desempenho do chaveamento controlado na redução de sobretensões de manobra em linhas de transmissão, sendo o método mais eficiente para o religamento trifásico. Nas demais situações, alcança níveis de tensão aceitáveis de, no máximo, 1,64 p.u. para o pior caso.

DANTAS (2007) propõe um método de chaveamento controlado de linhas de transmissão. O método é baseado em um algoritmo de detecção de passagem por zero e é implementado diretamente no ATP usando a linguagem MODELS. Utiliza para estudo parte do SIN e por meio de simulações de diversas condições de operações de chaveamento comprova a eficiência do método, obtendo níveis de sobretensões de manobra de 1,55 p.u. para o caso de linhas de transmissão com compensação.

Os fabricantes de equipamentos elétricos apresentam o chaveamento controlado como substituição aos resistores de pré-inserção (RPI). Os disjuntores equipados com RPI são utilizados para reduzir sobretensões de manobra em linhas de transmissão. Entretanto, os RPI fazem os disjuntores se tornarem mais complexos e onerosos, e técnicas alternativas têm sido desenvolvidas para eliminá-los (ABB, 2013; MITSUBISHI, 2007).

DANTAS et al. (2008) apresentam um método para chaveamento controlado de linhas de transmissão determinando os instantes apropriados para o chaveamento baseando-se nas passagens por zero dos sinais de tensão do lado da linha e da fonte de maneira independente

das passagens por zero do sinal de tensão entre os contatos do disjuntor superando as dificuldades encontradas para o tratamento de sinais para linhas com baixo grau de compensação.

DANTAS (2012) desenvolve um método de controle de manobras de religamento para linhas de transmissão com compensação reativa em derivação, baseando-se na análise do comportamento das cargas residuais nas linhas e contempla em um de seus objetivos, a avaliação da influência da resposta do TPC no desempenho do chaveamento controlado, observando que em linhas de transmissão com 64 % de compensação reativa o TPC praticamente não influencia no desempenho do chaveamento. Para uma compensação de 32% há uma elevação nas máximas sobretensões em relação a um TPC ideal, porém os erros são aceitáveis, uma vez que as sobretensões oriundas do religamento foram limitadas a 1,76 p.u.

## 3.2 Filtro Digital Recursivo

Também para o FDR foram encontradas referências que tratam da utilização do filtro para a compensação dos sinais no secundário do TPC.

MACHADO (2009) apresenta uma técnica de compensação para corrigir dinamicamente os distúrbios apresentados pela tensão secundária dos TPC, baseada na filtragem digital recursiva da tensão secundária de um modelo de TPC. Os parâmetros do compensador (filtro digital recursivo) são obtidos a partir da função de transferência do TPC e de um modelo para o TPC compensado, cujos parâmetros são estimados a partir de um processo de ajuste de curvas. A avaliação da técnica é feita por meio de simulações digitais utilizando o ATP (*Alternative Transients Program*) e a linguagem MODELS, que permite uma interação dinâmica com o ATP. As simulações digitais comprovam que a compensação dinâmica da tensão secundária de TPC pode ser utilizada para aumentar o desempenho e a confiabilidade dos sistemas de medição, proteção e controle.

No trabalho de SILVA (2010) é apresentado o protótipo de um dispositivo capaz de realizar correção da tensão secundária do TPC, denominado compensador. O funcionamento do dispositivo é fundamentado na utilização do modelo de TPC proposto por KEZUNOVIC et al. (1992), na inversão da função de transferência do modelo de TPC adotado e em um

software para obtenção dos parâmetros do TPC desenvolvido em NEVES et al. (2007). O método adotado tem como base a implementação de um filtro digital recursivo.

SANTOS (2011) apresenta um filtro corretor para a tensão secundária de transformadores de potencial capacitivos implementando no RTDS<sup>TM</sup> (*Real Time Digital Simulator*). Foram realizadas simulações de faltas, distorções provocadas por componentes harmônicos e um estudo sobre a influência do compensador em algoritmos de estimação fasorial, comprovando a eficiência do compensador na correção da tensão secundária do TPC. A técnica proposta para correção da tensão secundária do TPC é validada mediante simulações em tempo real através do simulador RTDS<sup>TM</sup> (*Real Time Digital Simulator*).

MACHADO (2013) apresenta um novo método de correção numérica de transitórios de baixa frequência de TPC. O método proposto é baseado em um filtro digital simples que recupera a forma do sinal primário, cujas frequências estão compreendidas entre 10 e 60 Hz, a partir de amostras da tensão secundária. O método tem como destaque a não dependência direta da topologia do transformador nem das características operacionais do sistema protegido.

Em SILVA (2014) é proposto um novo método de obtenção de parâmetros de filtros digitais recursivos (FDR) para reduzir o impacto da resposta transitória dos transformadores de potencial capacitivos (TPC) sobre o desempenho dos sistemas de medição, proteção e controle. O método se aplica com facilidade a TPC de diferentes classes de tensão e independe das características operacionais do sistema e é validado através de simulações digitais em tempo real via simulador RTDS<sup>TM</sup> (*Real Time Digital Simulator*). Os dados fazem parte de sistemas elétricos reais e as análises baseadas no funcionamento dinâmico dos filtros, através da estimação dos fasores das tensões e estudos de localização de falta. De acordo com os resultados os FDR (Filtro Digital Recursivo) reduzem significativamente os erros de medição causados pelos TPC na presença de transitórios. Os resultados são obtidos por simulações digitais a partir de dados reais do Sistema Interligado Nacional e estuda quatro TPC de diferentes classes de tensão analisados, sendo comprovada a eficiência do método.

Este trabalho propõe unir o chaveamento controlado de linhas de transmissão sem compensação à utilização de um filtro digital recursivo para corrigir a tensão secundária do TPC, com o intuito de obter um sinal de saída idêntico ao sinal do primário, otimizando assim, as técnicas de chaveamento controlado.

Na Tabela 3.1 é apresentado um resumo dos artigos referenciados, em ordem cronológica, de acordo com o método utilizado para mitigação das sobretensões de manobra em linhas de transmissão, como também as referências usadas para a compensação da tensão secundária do TPC.

Tabela 3.1 – Resumo da revisão bibliográfica

Referência	Método				
	Resistores de Pré-inserção	Para-raios	Chaveamento Controlado	Compensação	Chaveamento + Compensação
Konkel (1977)	*		*		
Legate (1988)		*			
Ribeiro & McCallum (1989)		*			
Carvalho et al. (1995)		*	*		
Cigré TF 13.00.1 (1995,1996)			*		
Froehlich (1997)		*	*		
Rocha (1997)			*		
Stenstrom & Mobedjina (1998)		*			
Esmeraldo (1999)	*	*	*		
Cigré WG 13.07 (1999)			*		
Ito (2002)		*	*		
Seyedi et al. (2005)		*			
Sanaye-Pasand et al. (2005)		*	*		
Dantas (2007)			*		
Valero (2007)		*	*		
Dantas (2008)		*	*		
Dantas (2012)		*	*		
Machado (2009)				*	
Silva (2010)				*	
Santos (2011)				*	
Machado (2013)				*	
Silva (2014)				*	
<b>Trabalho Proposto</b>					*



## Capítulo 4

### Metodologia

Neste capítulo é apresentado a metodologia para simular o chaveamento controlado de uma linha de transmissão sem compensação utilizando o TPC e o filtro recursivo na saída do TPC para corrigir a tensão do secundário. O procedimento utilizado é unir o chaveamento controlado à compensação da resposta do TPC. Para tanto devem ser explicados os dois procedimentos.

#### 4.1 Chaveamento Controlado

##### 4.1.1 Energização de Linhas de Transmissão

As estratégias para a energização de linha de transmissão variam conforme a linha tenha ou não compensação e também se existe carga residual. Os sinais de tensão do lado da fonte e da linha, em cada fase, são obtidos a partir do sistema elétrico e filtrados para que as componentes de alta frequência sejam eliminadas. Os sinais são amostrados a uma frequência de 960 Hz (16 amostras por ciclo), escolhida por ser comumente usada em sistemas de proteção digital. Assim, a periodicidade dos sinais de referência pode ser determinada através da detecção de duas passagens por zero consecutivas, obtendo meio período destes sinais. Essa amostragem ocorre em tempo real até que o disjuntor receba o comando para o chaveamento.

##### 4.1.2 Religamento de Linhas de Transmissão sem Compensação

Para o religamento de linhas de transmissão sem compensação são avaliadas as tensões do lado da fonte e da linha separadamente. Os sinais de tensão do lado da fonte são estimados de maneira similar à estimação realizada para a manobra de energização de linhas de transmissão. Para os sinais de tensão do lado da linha, devido à existência da carga residual

com comportamento praticamente constante, apenas a polaridade da tensão na linha para cada fase é detectada. Assim, de acordo com a polaridade, o instante ótimo a ser determinado pode situar-se no pico positivo ou negativo do sinal de tensão do lado da fonte.

### 4.1.3 Acoplamento Eletromagnético

Quando o primeiro polo de um disjuntor é fechado, uma tensão é induzida nas outras fases, e o mesmo ocorre com a terceira fase após a energização da segunda. Assim, o acoplamento magnético entre as fases nas linhas de transmissão pode ocasionar desvios nos sinais de tensão entre os contatos do disjuntor com relação aos instantes ótimos previstos para o fechamento de cada fase. Para minimizar estes desvios, os instantes ótimos para cada fase são determinados em conjunto e não individualmente.

### 4.1.4 Controle do Chaveamento

Os sinais de tensão utilizados como referência para o chaveamento dos contatos do disjuntor são fornecidos do sistema elétrico de potência. Além da obtenção de dados do sistema elétrico são necessárias outras etapas para o controle do chaveamento. A seguir uma breve explicação das etapas que foram utilizadas nas simulações.

- a) Filtragem dos Sinais – Devido aos transitórios eletromagnéticos resultantes de manobras de chaveamento possuírem componentes de alta frequência, um filtro passa-baixas é utilizado para filtrar essas componentes para evitar que ocorra o efeito da sobreposição de espectro durante o processo de amostragem dos sinais. Para este trabalho foi utilizado um filtro de Butterworth passa-baixas de terceira ordem com frequência de corte de 187,89 Hz. A função de transferência do filtro é mostrada na Equação (4.1) (SILVA, 2006). O filtro é aplicado a todos os sinais a serem analisados, a fim de que atrasos e atenuações referentes ao filtro não interfiram na resposta para o chaveamento controlado de linhas de transmissão.

$$H(s) = \frac{1,645 \cdot 10^9}{s^3 + 2361s^2 + 2,787 \cdot 10^6s + 1,645 \cdot 10^9} \quad (4.1)$$

- b) Amostragem dos Sinais – Após o processo de filtragem, os sinais de tensão são amostrados a uma frequência de 960 Hz, resultando em um total de 16 amostras por ciclo de 60 Hz. A frequência de amostragem é maior que o dobro da maior frequência contida no sinal filtrado, sendo suficiente para que o sinal possa ser reproduzido integralmente sem erro de sobreposição de espectro, estando de acordo com o Teorema de Nyquist. Desta forma, a avaliação e estimação destes sinais em instantes futuros podem ser realizadas sem ocorrer a introdução de erros significativos referentes ao tratamento dos sinais.
- c) Detecção de Zeros ou Polaridades – Após a desenergização da LT, quando da abertura dos contatos do disjuntor, e já com os sinais de tensão filtrados e amostrados deve ser detectada a passagem por zero dos sinais senoidais do lado da fonte para a manobra de energização da LT e detectada a polaridade da carga residual quando se tratando de uma manobra de religamento em uma linha de transmissão sem compensação. Para isso é verificado se o sinal de tensão está com valor positivo ou negativo.
- d) Estimação dos Sinais – Após o comando para chaveamento do disjuntor, o controle do chaveamento do mesmo, estima os sinais de referência em instantes futuros tomando-se como base os últimos valores de amplitude e polaridade da carga residual em cada fase da linha de transmissão. O primeiro instante futuro a ser determinado leva em consideração o tempo nominal de operação do disjuntor. Com  $t_{comando}$  sendo o instante em que ocorre o comando para operação do disjuntor e  $t_{zero1}$  o primeiro instante de passagem pelo zero do sinal de referência. O próximo zero será  $t_{zero2}$  considerando o último zero do sinal de referência. Sendo  $A$  a amplitude do sinal e  $T_{sr}$  meio período do mesmo, o sinal de referência ( $s_{ref}$ ) é estimado após o  $T_{operação}$ , que é o tempo de operação do disjuntor, levando à equação:

$$s_{ref}(t) = A \cdot \text{sen}(w_{sr} \cdot (t + \Delta T)). \quad (4.2)$$

em que,

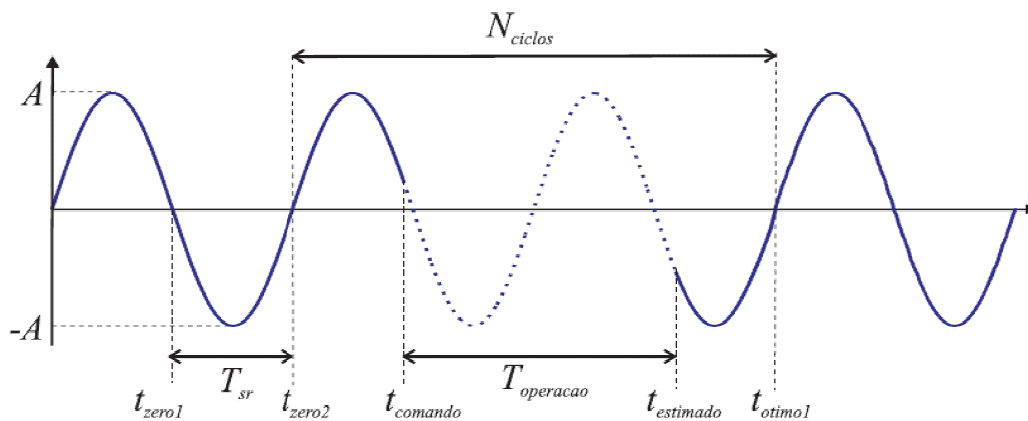
$$w_{sr} = \frac{\pi}{T_{sr}}, \quad (4.3)$$

e

$$\Delta T = T_{operação} + (t_{comando} - t_{zero2}), \quad (4.4)$$

assim, o primeiro instante futuro será  $t_{estimado}$  e considerando que o instante ótimo para a realização da manobra seja na passagem do zero do sinal, o primeiro instante ótimo disponível para o chaveamento será  $t_{otimo1}$ . O procedimento é ilustrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Estimação dos sinais de referência em instantes futuros



Fonte – DANTAS, 2007

- e) Cálculo dos Instantes Ótimos – Com os sinais de referência estimados em instantes futuros, pode ser determinada uma relação de possíveis instantes ótimos para cada fase de acordo com a condição de operação de chaveamento da LT. Para a manobra de energização, os instantes ótimos para o chaveamento ocorrem na passagem por zero da tensão do lado da fonte.

Baseado na Figura 4.1 e na Equação (4.4), o número de ciclos entre o último instante da passagem por zero do sinal e o primeiro instante ótimo é determinado por:

$$N_{ciclos} = \text{int}_{sup} \left( \frac{\Delta T}{2T_{sr}} \right). \quad (4.5)$$

Em que,  $\text{int}_{sup}(x) = x$  para  $x$  um número inteiro, não ocorrendo, o valor de  $x$  será arredondado. Assim, o primeiro instante ótimo disponível será:

$$t_{otimo1} = t_{zero2} + N_{ciclos} \cdot (2T_{sr}). \quad (4.6)$$

e os próximos instantes se repetem a cada  $T_{sr}$  segundos.

Para o religamento de uma linha de transmissão sem compensação, o instante ótimo a ser determinado pode estar situado no pico positivo ou negativo do sinal da tensão do lado da fonte, dependendo da polaridade da carga residual. Se a polaridade for positiva, o instante ótimo a ser encontrado será:

$$t_{otimo1} = t_{zero2} + (N_{ciclos} + \frac{1}{4}) \cdot (2T_{sr}). \quad (4.7)$$

Se a polaridade da carga for negativa, temos:

$$t_{otimo1} = t_{zero2} + (N_{ciclos} + \frac{3}{4}) \cdot (2T_{sr}). \quad (4.8)$$

e os próximos instantes ótimos se repetem a cada  $2T_{sr}$  segundos.

- f) Lógica do controlador – Estando com a relação de instantes ótimos para cada fase e tendo como referência o comando para a operação de chaveamento do disjuntor,  $t_{comando}$ , o controlador atua no atraso deste comando por um intervalo de tempo necessário para que o chaveamento de cada fase ocorra em um instante ótimo futuro de forma que o intervalo entre o instante de fechamento da primeira fase e o instante de fechamento da última fase seja o menor possível.

$$T_{atraso} = (t_{otimo} - t_{comando}) - T_{nominal}. \quad (4.9)$$

- g) Chave Controlada – É responsável pela coordenação do comando de fechamento das chaves no sistema modelado no ATP, que simulam o disjuntor. Também tem a função de indicar para o sistema de controle se o disjuntor está aberto ou fechado, para que o mesmo possa atuar adequadamente.

## 4.2 Compensação de Sinais

A Compensação de Sinais foi explicada no Capítulo 2 referente a Fundamentação Teórica na seção 2.4, em que são demonstrados os cálculos do filtro digital recursivo.

Os parâmetros do TPC utilizado neste trabalho estão contidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros para o TPC de 500 kV

<b>Parâmetros Elétricos do TPC 500 kV</b>		
$C_1=1,6$ nF	$C_p=445,7$ pF	$L_{r1}=38,94$ mH
$C_2=90$ nF	$R_p=11,64$ k $\Omega$	$C_f=32,28$ $\mu$ F
$R_c=4,16$ $\Omega$	$L_p=76,64$ H	$L_{r2}=205,22$ mH
$L_c=1,92$ H	$R_m=4,84$ M $\Omega$	$R_f=575,3$ $\Omega$
$C_c= 21,16$ nF	$L_m=159$ kH	$M=32,7$ mH

Na Tabela 4.2 são apresentados os coeficientes do filtro digital recursivo de segunda ordem utilizado na compensação do TPC e com  $k_0 = 315,0$  E+03.

Tabela 4.2 – Coeficientes dos filtros digitais recursivos de segunda ordem que ditarão o comportamento dinâmico do FDR para o TPC de 500 kV

<b>Coeficientes</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
$k_{i1}$	9.5835559E-04	1.0007925E+00	1.0003619E+00	1.0007088E+00
$k_{i2}$	-2.1923754E-05	-1.9957237E+00	-1.9987460E+00	-1.9987405E+00
$k_{i3}$	-9.3642627E-04	9.9496716E-01	9.9838900E-01	1.0005017E+00
$k_{i4}$	1.7736896E+00	-1.9957354E+00	-1.9975186E+00	-1.9999756E+00
$k_{i5}$	7.7373346E-01	9.9574807E-01	9.9997841E-01	9.9997560E-01

## Capítulo 5

### Resultados e Análises

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas simulações.

O procedimento utilizado para chaveamento controlado de LT é avaliado mediante simulações digitais de energizações de linhas de transmissão em aberto e fazendo uso do *software* ATP.

O sistema elétrico, utilizado para simulação, consiste em parte do SIN referente a ampliação da interligação Norte – Nordeste através do segundo circuito da LT 500 kV Colinas – Ribeiro Gonçalves – São João do Piauí e da LT 500 kV São João do Piauí – Milagres, sendo representado na Figura 5.1. Os parâmetros elétricos da LT 500 kV São João do Piauí – Milagres são ilustrados na Tabela 5.1.

Figura 5.1 – Parte do sistema utilizado para estudo

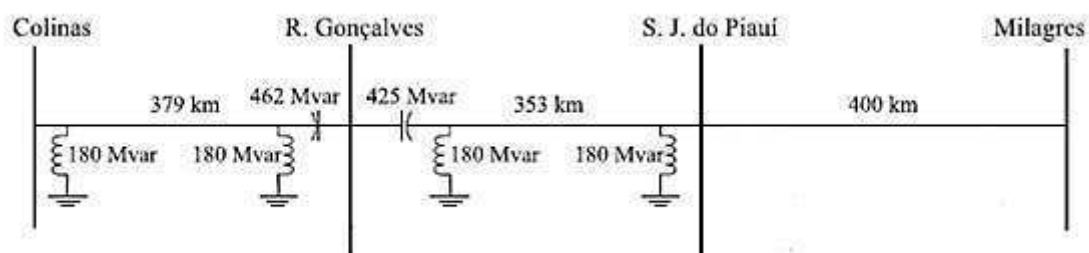


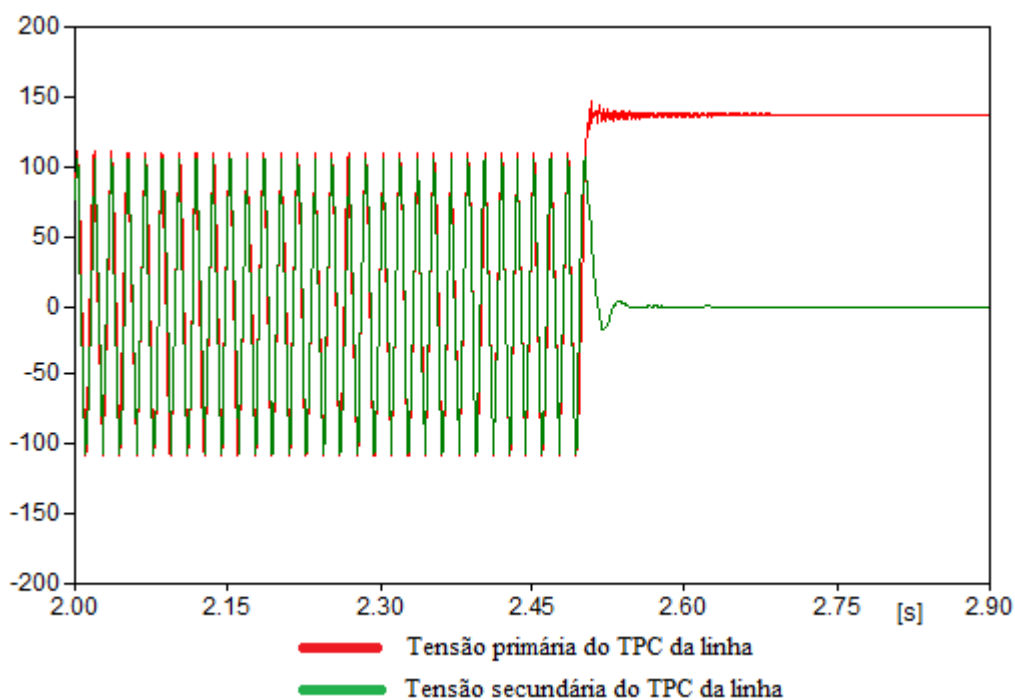
Tabela 5.1 – Parâmetros Elétricos LT 500 kV São João do Piauí – Milagres – 400 km

Sequência Positiva			Sequência Zero		
$R_1$	$X_1$	$Y_1$	$R_0$	$X_0$	$Y_0$
( $\Omega/\text{km}$ )	( $\Omega/\text{km}$ )	( $\mu\text{S}/\text{km}$ )	( $\Omega/\text{km}$ )	( $\Omega/\text{km}$ )	( $\mu\text{S}/\text{km}$ )
0,0186	0,2670	6,1240	0,4930	1,3390	2,8900

Na Figura 5.2 são apresentadas as formas de onda das tensões da linha de transmissão do primário e secundário do TPC na qual estão apresentados os distúrbios causados no secundário do TPC. As escalas estão ajustadas devido a relação de transformação para que seja possível uma melhor visualização da diferença de tensão entre os circuitos primário e secundário do TPC.

Diante dos transitórios a tensão do secundário do TPC não é a réplica da tensão no seu primário.

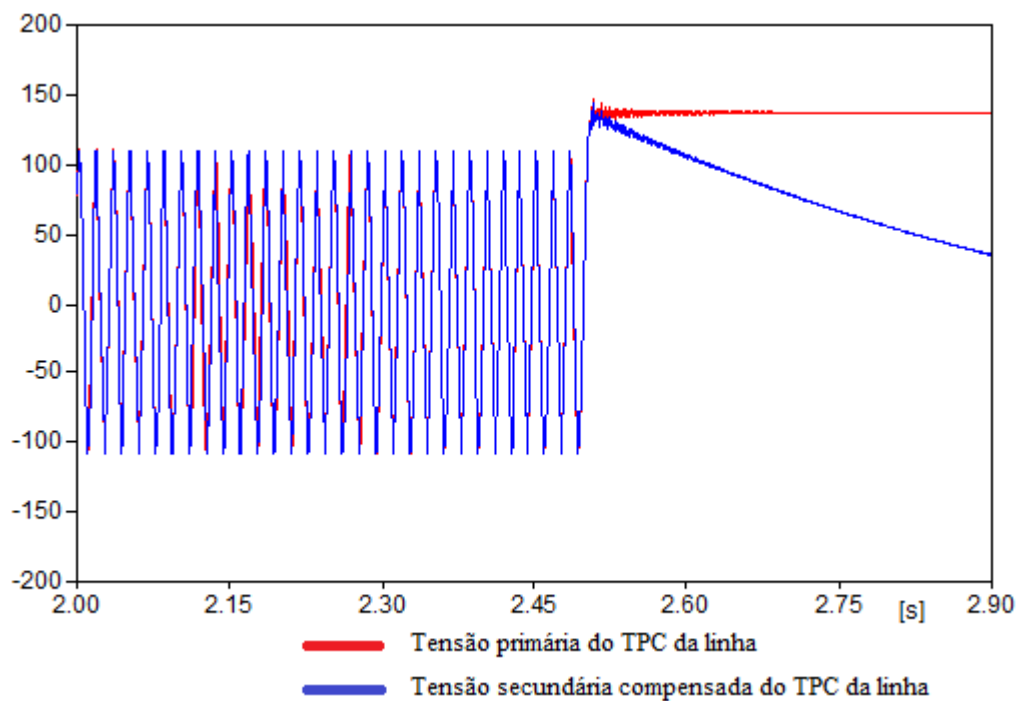
Figura 5.2 – Sinais de tensão da linha de transmissão comparando a tensão do primário do TPC da linha com a tensão do seu secundário para manobra de energização



Na Figura 5.3 é observada a correção do sinal do secundário do TPC permitindo estimar a polaridade da tensão da linha e, com isso, possibilitando o melhor desempenho do chaveamento controlado.

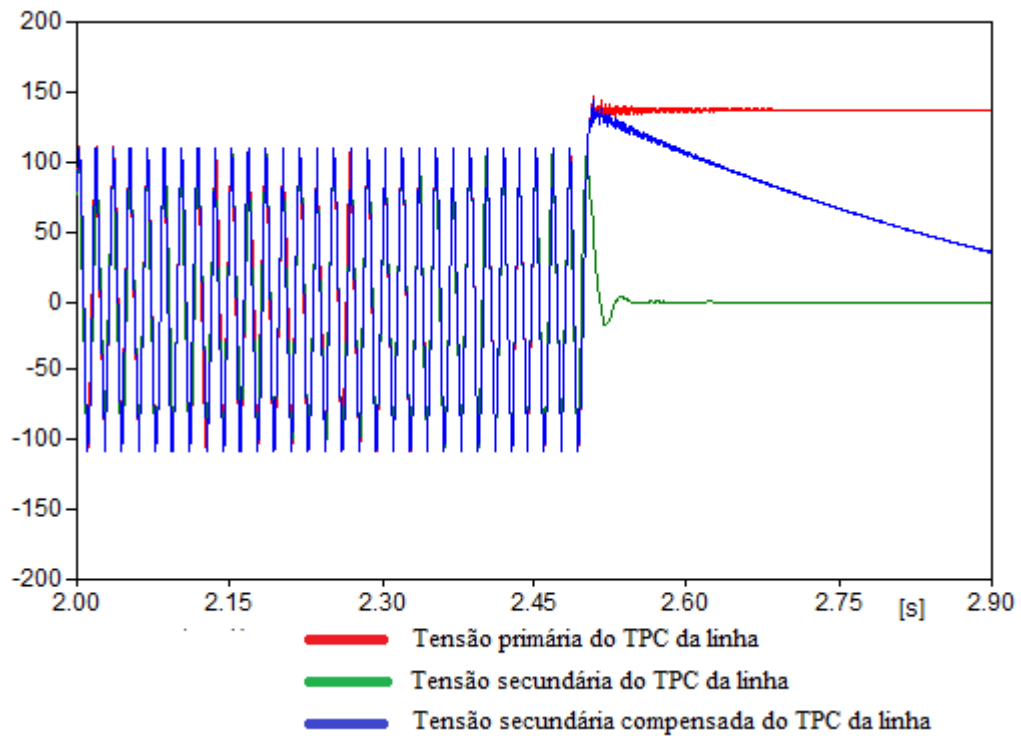


Figura 5.3 – Sinais de tensão da linha de transmissão comparando a tensão do primário do TPC da linha com a tensão do seu secundário compensado para manobra de energização



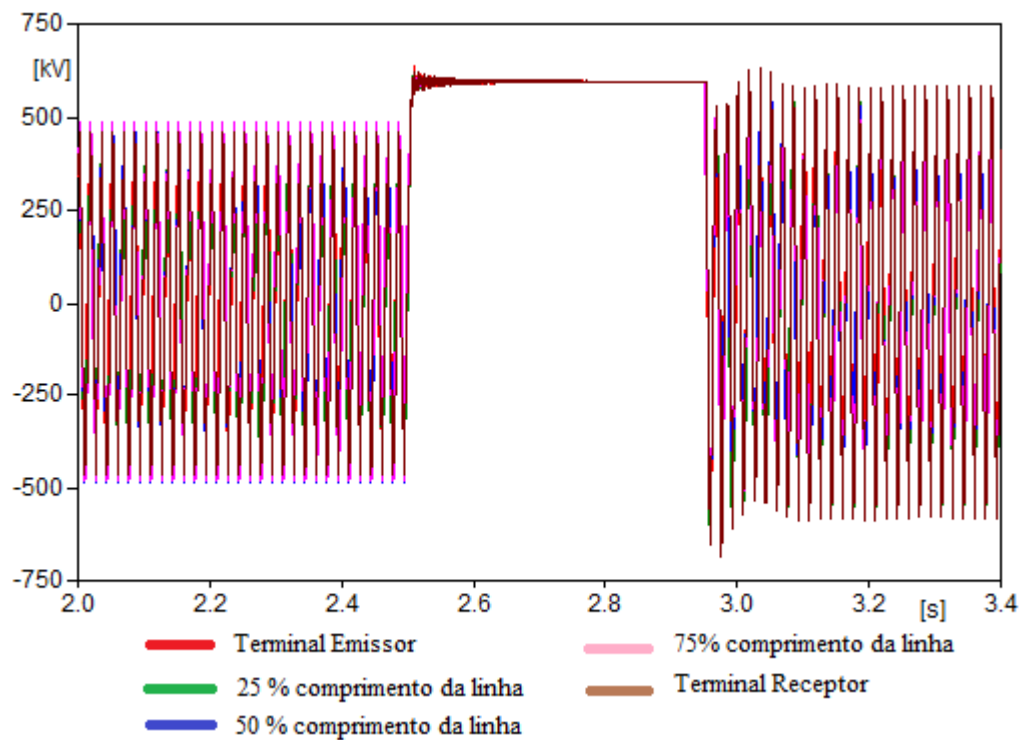
Os sinais de tensão na linha de transmissão são mostrados na Figura 5.4 , na qual pode-se comparar as tensões do primário, secundário e secundário compensado do TPC da linha. O filtro permite uma estimativa da polaridade da tensão no primário do TPC.

Figura 5.4 – Sinais de tensão da linha de transmissão comparando as tensões : primário, secundário e secundário compensado do TPC da linha



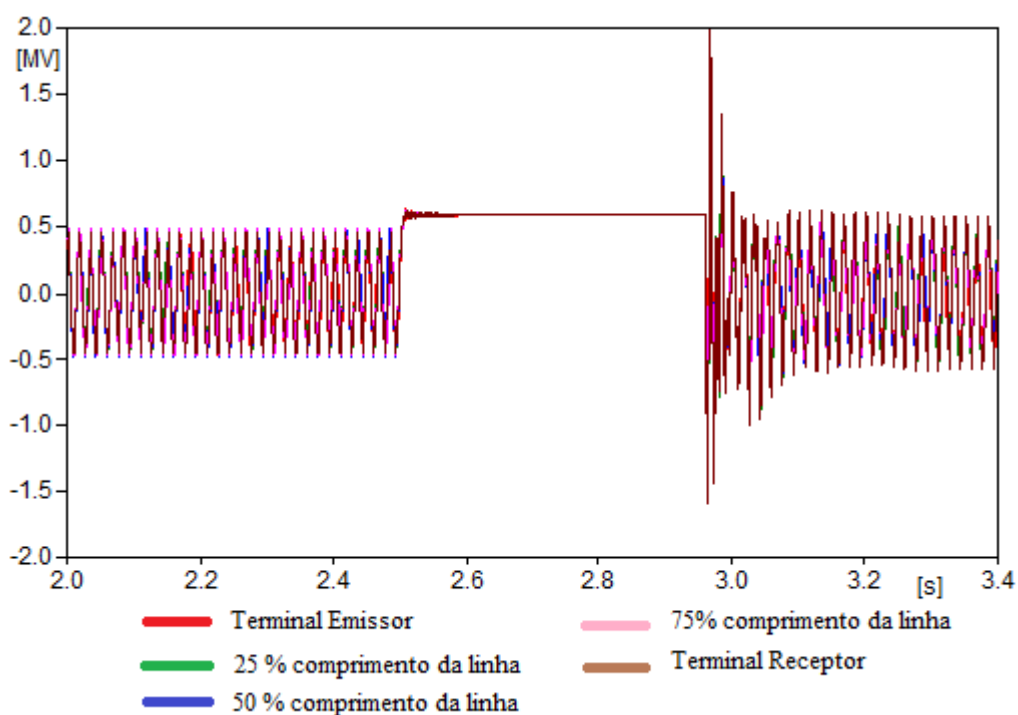
Na Figura 5.5 são apresentados os sinais de tensão nos terminais e em trechos da linha de transmissão utilizando o chaveamento controlado.

Figura 5.5 – Sinais de tensão da linha de transmissão com chaveamento controlado



Na Figura 5.6 são apresentados os sinais de tensão nos terminais e em trechos da linha de transmissão sem o chaveamento controlado, sendo considerado o pior caso.

Figura 5.6 – Sinais de tensão da linha de transmissão sem chaveamento controlado



Com a finalidade de facilitar a análise comparativa entre os resultados do chaveamento controlado com e sem a correção da tensão secundária do TPC, apresenta-se nas Tabelas 5.2 e 5.3, os máximos valores de sobretensões encontrados para uma linha de transmissão com chaveamento controlado e sem chaveamento controlado. A Figura 5.7 mostra os resultados num mesmo gráfico oferecendo uma melhor visualização.

Diante dos resultados é possível verificar o desempenho do chaveamento controlado na redução dos níveis de sobretensões.

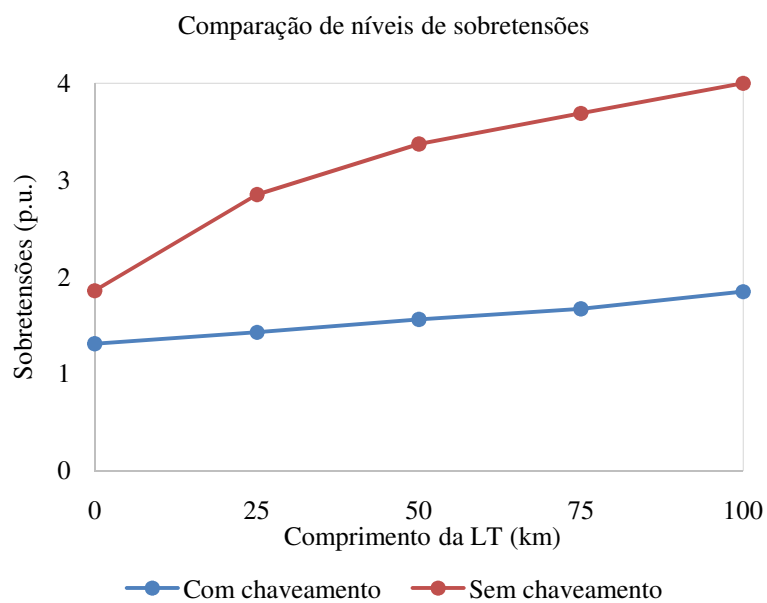
Tabela 5.2 – Máximas sobretensões com chaveamento controlado

Locais	Sobretensões (p.u.)
Terminal Emissor	1,31
25% do comprimento da linha	1,43
50% do comprimento da linha	1,56
75% do comprimento da linha	1,67
Terminal Receptor	1,85

Tabela 5.3 – Máximas sobretensões sem chaveamento controlado

Locais	Sobretensões (p.u.)
Terminal Emissor	1,86
25% do comprimento da linha	2,85
50% do comprimento da linha	3,37
75% do comprimento da linha	3,69
Terminal Receptor	4,00

Figura 5.7 – Comparação de níveis de sobretensões ao longo da linha de transmissão



## Capítulo 6

### Conclusões

Nesta dissertação foi apresentada a utilização de um filtro digital recursivo para corrigir a tensão secundária do TPC, cujo modelo depende da relação de tensão do TPC e de um método para obter os seus parâmetros R, L e C.

A metodologia para simular o chaveamento controlado em linhas de transmissão sem compensação reativa foi detalhada e os dois procedimentos foram unidos com o intuito de avaliar a eficiência do filtro na correção da tensão secundária do TPC.

A avaliação dos resultados foi realizada por meio de simulações via ATP, considerando sistemas elétricos de potência em EAT e utilizando dados de parte do Sistema Interligado Nacional. Condições de operação de chaveamento controlado de linhas de transmissão foram estudadas, considerando-se a não compensação reativa e a presença de cargas residuais durante as manobras de fechamento.

Os resultados comprovaram a influência do TPC nos sinais elétricos diante dos transitórios e também a eficiência dos filtros digitais recursivos em corrigir esses sinais. A utilização da compensação possibilitou estimar a polaridade da carga residual na linha de transmissão permitindo um melhor desempenho do chaveamento controlado na redução das sobretensões.

Como sugestões para trabalhos futuros, as seguintes atividades podem ser desenvolvidas:

- Avaliar a correção de sinais no chaveamento de linhas de transmissão de diferentes níveis de tensão em EAT e UAT. Para isto, seria necessário o modelo das linhas com suas características e filtro adequados a cada nível de tensão;
- Realizar um estudo da influência do chaveamento controlado com compensação dos sinais do secundário dos TPC em linhas de transmissão na configuração de circuito duplo, analisando a interferência do circuito chaveado sobre o circuito energizado e vice-versa;

- Desenvolver um protótipo de filtro digital para ser utilizado em um sincronizador disponível na Chesf, e por meio da rede de oscilografia criar um banco de dados para avaliação do seu desempenho.

## Referências Bibliográficas

- ABB. **Controlled Switching, Buyer's & Application Guide**. Edition 4. Ludvika, Sweden, Aug 2013.
- ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. **Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia**. Belo Horizonte, MG - Brasil: Editora UFMG, 2005.
- CARVALHO, A. C.; LACORTE, M.; KNUDSEN, O. **Improved EHV Line Switching Surge Control by Application of MO-arresters and Controlled Switching**. International Conference on Energy Management and Power Delivery, v. 1, p. 292–297, November 1995.
- CIGRE Task Force 13.00.1. **Controlled Switching: A State of the Art Survey - Part I**. ELECTRA, n. 162, p. 65–97, October 1995.
- CIGRE Task Force 13.00.1. **Controlled Switching: A State of the Art Survey - Part II**. ELECTRA, n. 164, p. 39–61, February 1996.
- CIGRE Working Group 13.07. **Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers - 1st Part**. ELECTRA, n. 183, p. 42–73, April 1999.
- CIGRE Working Group 13.07. **Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers - 2nd Part**. ELECTRA, n. 185, p.36–57, August 1999.
- CIGRE Working Group 13.07. **Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Planning, Specification and Testing of controlled switching systems**. ELECTRA, n. 197, p. 23–33, August 2001.
- CIGRÉ Working Group A3.07. **Controlled Switching Of HVAC Circuit Breakers - Benefits & Economic Aspects**. Brochure 262, December 2004.
- D'AJUZ, A.; FONSECA, C. S.; CARVALHO, F. M. S.; AMON FILHO, J.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; ESMERALDO, P. C. V.; VAISMAN, R.; FRONTIN, S. de O. **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamentos - Aplicação em Sistemas de**



- Potência de Alta-Tensão.** Niterói, Rio de Janeiro: FURNAS, Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.
- DANTAS, K. M. C. **Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, Setembro 2007.
- DANTAS, K. M. C.; FERNANDES Jr., D.; NEVES, W. L. A.; SOUZA, B. A.; FONSECA, L. C. A. **Mitigation of Switching Overvoltages in Transmission Lines via Controlled Switching.** *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Pittsburgh, Pennsylvania USA, July 2008.
- DANTAS, K. M. C. **Chaveamento Controlado Aplicado ao Religamento Rápido de Linhas de Transmissão.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, Abril 2012.
- ESMERALDO, P. C. V.; FILHO, J. A.; CARVALHO, F. M. S.; CARVALHO, A. C. C.; MORAIS, S. A. **Circuit-Breaker Requirements for Alternative Configurations of a 500 kV Transmission System.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 1, p. 169\_175, January 1999.
- FERNANDES JÚNIOR, D. **Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos.** Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Dezembro 2003.
- FERNANDEZ, P. C.; ESMERALDO, P. C. V.; FILHO, J. A.; ZANI, C. R. **Use of Controlled Switching Systems in Power System to Mitigate Switching Transients. Trends and Benefits - Brazilian Experience.** 2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, p. 85–90, 2004.
- FROEHLICH, K.; HOELZL, C.; STANEK, M.; CARVALHO, A. C.; HOFBAUER, W.;HOEGG, P.; AVENT, B. L.; PEELO, D. F.; SAWADA, J. H. **Controlled Closing on Shunt Reactor Compensated Transmission Lines. Part I: Closing Control Device Development.** *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 12, n. 2, p. 734–740, April 1997.
- FROEHLICH, K.; HOELZL, C.; STANEK, M.; CARVALHO, A. C.; HOFBAUER, W.;HOEGG, P.; AVENT, B. L.; PEELO, D. F.; SAWADA, J. H. **Controlled Closing on Shunt Reactor Compensated Transmission Lines. Part II: Application of**

- Closing Control Device for High-Speed Autoreclosing on BC Hydro 500 kV Transmission Line.** *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 12, n. 2, p. 741–746, April 1997.
- FRONTIN, S. O.; VIOLIN, A.; ABREU, A.M.; MONTEIRO, A.M.; CARVALHO, A. C. C.; BRASIL Jr, A. C. P. ; D’AJUZ, A.; ALENCAR, B. M. S. M.; LOPES, C. F.; GABAGLIA, C. P. R.; FRATE, C.; COSTA, C. A.; CORREIA, D. M.; RESENDE, F. M.; CARVALHO, F. M. S.; PINTO, J. O. S.; AMON FILHO, J.; ARAÚJO, J. A.; JARDINI, J. A.; MENDES, J. C.; MEDEIROS, J. R.; PERFEITO, L. R.; MURÇA, L. B.; MARTINEZ, M. L. B.; MORAES, M. S.; SCHWARZ, M. B.; ALVES, M. E. G.; LACORTE, M.; KASTRUP FILHO, O.; ESMERALDO, P. C. V.; ALENCAR, R. F. M.; CAMPOS, R. C.; SILVA, R. J.; VAISMAN, R.; MORAIS, S. A.; CABRAL, S. VILELA, T. S. V.; NOMI, Y. **Equipamentos de Alta Tensão Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas.** ANEEL, TAESA, Brasnorte, Finatec, Goya Editora, 2013.
- ITO, H. **Controlled Switching Technologies, State-of-the-art.** Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, IEEE/PES, 2002.
- KEZUNOVIC, M.; KOJOVIC, L. ; SKENDZIC, V.; FROMEN, C. W.; SEVCIK, D. R.; NILSSON, S. L. **Digital Models of Coupling Voltage Transformers for Protective Relay Transients Studies.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 4, pp. 1927-1935, October 1992.
- KONKEL, H. E.; LEGATE, A. C.; RAMBERG, H. C. **Limiting Switching Surge Overvoltages with Conventional Power Circuit Breakers.** *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-96, n. 2, p. 535–542, April 1977.
- LEGATE, A. C.; BRUNKE, J. H.; RAY, J. J.; YASUDA, E. J. **Elimination of Closing Resistors on EHV Circuit Breakers.** *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 3, n. 1, p. 223–231, January 1988.
- MACHADO, E. P. **Uma Técnica para Compensação Dinâmica de Transformadores de Potencial Capacitivos.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, Março 2009.

- MACHADO, E. P. **Compensação Dinâmica dos Transitórios de Baixa Frequência de Transformadores de Potencial Capacitivos para Otimização da Proteção de Linhas de Transmissão**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, Dezembro 2013.
- MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. **Mitsubishi Electric Advance-controlled Switching System**. Japan, Mar. 2007, vol. 117.
- NEVES, W. L. A.; SOUZA, B. A.; FERNANDES JÚNIOR, D.; COSTA, E. G.; ALMEIDA, G. J. C.; LIRA, G. R. S.; SILVA, C. A.; MACHADO, E. P.; VASCONCELOS, J. C. R. S. A.; GODOY, M. V. **Relatório de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento - Representação de Transformadores de Potencial Capacitivos em Estudos de Transitórios Eletromagnéticos**. [S.l.], Abril 2007.
- RIBEIRO, J. R.; MCCALLUM, M. E. **An Application of Metal Oxide Surge Arresters in the Elimination of Need for Closing Resistors in EHV Breakers**. IEEE Transaction on Power Delivery, v. 4, n. 1, p. 282–291, January 1989.
- ROCHA, R.; CARVALHO, A. C.; TÁVORA, J. L. **Manobra Controlada: Modelagem da Suportabilidade Dielétrica do Disjuntor Durante a Operação de Fechamento**. XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belém, Brasil, 1997.
- SANAYE-PASAND, M.; DADASHZADEH, M.; KHODAYAR, M. **Limitation of Transmission Line Switching Overvoltages Using Switchsync Relays**. International Conference on Power Systems Transients (IPST), Montreal, Canada, June 2005.
- SANTOS, A. K. X. **Um Compensador para a Correção em Tempo Real da Tensão Secundária de Transformadores de Potencial Capacitivos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, Setembro 2011.
- SEYEDI, H.; SANAYE-PASAND, M.; DADASHZADEH, M. **Application of Transmission Line Surge Arresters to Reduce Switching Overvoltages**. International Conference on Power Systems Transients (IPST), Montreal, Canada, June 2005.
- SEYEDI, H.; GOLABI,S.; ABAM, Z. **Limitation of Transmission Line Switching Overvoltages**. International Conference on Power and Energy (PECon), Kuala Lumpur, Malaysia, November - December 2010.

- SILVA, C. A. **Correção da Tensão Secundária de Transformadores de Potencial Capacitivos em Tempo Real**. Dissertação de Mestrado — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, Março 2010.
- SILVA, C. A. **Filtros Digitais Recursivos para Redução do Impacto da Resposta Transitória do TPC**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, Maio 2014.
- SILVA, K. M. **Avaliação da Proteção de Distância de Linhas de Transmissão a Partir de Simulações de Transitórios Eletromagnéticos**. Projeto de Pesquisa – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, Novembro 2006.
- STENSTRÖM, L.; MOBEDJINA, M. **Limitation of Switching Overvoltages by Use of Transmission Line Surge Arresters**. CIGRE SC 33 International Conference, Zagreb, Croatia, 1998.
- VALERO, P. M. **Análise Comparativa de Técnicas de Controle de Sobretensões Transitórias nas Manobras de Energização e Religamento de Linhas de Transmissão**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, Junho 2007.
- VAN DER SLUIS, L. **Transients in Power Systems**. West Sussex – England: John Wiley & Sons, 2001.
- ZANNETA Jr., L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. São Paulo, SP - Brasil: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2003.