

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

Jozias Rufino Leite Neto

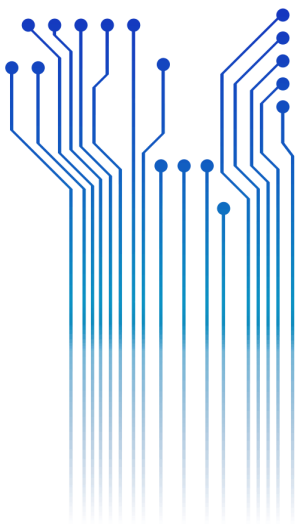


Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
ESTUDO DE TRANSITÓRIOS RELACIONADOS A BANCOS DE CAPACITORES EM  
REDES ELÉTRICAS



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande  
2018

JOZIAS RUFINO LEITE NETO

ESTUDO DE TRANSITÓRIOS RELACIONADOS A BANCO DE CAPACITORES EM REDES  
ELÉTRICAS

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

Área de Concentração: Proteção de Sistemas Elétricos

Orientador:

Professor Francisco das Chagas Fernandes Guerra, D. Sc.

Campina Grande  
2018

JOZIAS RUFINO LEITE NETO

ESTUDO DE TRANSITÓRIOS RELACIONADOS A BANCO DE CAPACITORES EM REDES  
ELÉTRICAS

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

Área de Concentração: Proteção de Sistemas Elétricos

Aprovado em 08/08/2018

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

**Professor Francisco das Chagas Fernandes Guerra, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho à minha família, a fonte de coragem que me impulsiona a continuar meus trabalhos com tanta dedicação.

# AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela minha vida e pelo dom da perseverança, que me permitiu concluir este trabalho, e pela interseção da Virgem Mãe, que sempre me acolheu pelas orações nos momentos de tribulação e de gratidão.

Agradeço também a meus pais, Maria das Graças e José Neto, por terem se esforçado tanto em me proporcionar uma boa educação, por ter me alimentado com saúde, força e coragem, as quais foram essenciais para superação de todas as adversidades ao longo desta caminhada.

Agradeço ao meu irmão, Jhonnathan, por ser motivo para que eu permaneça buscando sempre o caminho correto e íntegro, servindo-o de exemplo.

Agradeço também a todos os demais familiares e amigos, que, com todo carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse a esta etapa da minha vida. Em especial aqueles que também vivenciaram esta jornada no curso de Engenharia Elétrica e permanecerão em minha vida. Agradecimento mais que especial a um anjo, que, no momento de desânimo, veio me levantar e ajudar a organizar meu tempo para a elaboração deste trabalho, Newton Alexandria.

Agradeço ao professor Francisco das Chagas, por aceitar me orientar neste trabalho de conclusão de curso e ser paciente mesmo nas adversidades.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma passaram pela minha vida e permanecem contribuindo para a construção de quem sou.

*“Amigo fiel é proteção poderosa,  
e quem o encontrar,  
terá encontrado um tesouro.”*

Eclesiástico 6, 14

## RESUMO

As melhorias na qualidade de energia são fundamentais para preservar a integridade dos equipamentos conectados na rede elétrica, reduzir perdas de energia e, conseqüentemente, evitar prejuízos financeiros. Os efeitos transitórios são a maior causa dos problemas do sistema elétrico, e a energização dos bancos de capacitores é uma das ações que originam esses efeitos. Neste trabalho é abordada uma revisão teórica dos conceitos referentes a banco de capacitores, que ajudarão na análise das simulações e elucidarão os meios de reduzir os problemas causados por transitórios. O sistema simulado é o chaveamento de um banco trifásico de capacitores com potência nominal de 40 MVar, instalado em um sistema com potência de curto-circuito trifásico da fonte de 4 GVar, valor eficaz da tensão de 138 kV e frequência de 60 Hz, ligado em estrela com neutro aterrado, como também a simulação de bancos de capacitores de potência nominal 30 MVar, ligados a um sistema com potência de curto-circuito trifásico da fonte de 1,8 GVar, valor eficaz da tensão de 69 kV e frequência de 60 Hz, em derivação. Os estudos referentes aos transitórios de corrente e tensão, provocados por manobras em banco de capacitores, servem de base para o desenvolvimento das medidas de proteção dos sistemas elétricos. Com isso, os riscos e perdas são minimizados, proporcionando energia de qualidade e economia, principalmente no setor industrial.

**Palavras-chave:** Banco de capacitor, energização, corrente, *inrush*, *back-to-back*, sobretensão, sobrecorrente.

# ABSTRACT

The improvements in energy quality are fundamental to preserve the integrity of equipment connected in the electrical system, reduce energy losses, and avoid financial losses, consequently. The transient effects are the major cause of electrical system problems and the energization of capacitor banks is one of the activities that give rise to these effects. In this work, a theoretical revision of the concepts related to capacitor banks is presented, which will help in the analysis of the simulations and elucidate the way to reduce the problems caused by transients. The simulated system is a switching of a three-phase capacitor bank with nominal power of 40 MVar, installed in a system with a 3-phase short-circuit power supply of 4 GVar, a voltage efficacy value of 138 kV and a frequency of 60 Hz, in star connection and grounded, as well for the simulation in the case of back-to-back shunt capacitor banks of nominal power 30 MVar, connected to a system with a three-phase short-circuit power of 1.8 GVar, voltage efficiency of 69 kV and frequency of 60 Hz. The studies about current and voltage transients, caused by capacitor bank maneuvers, serve as a basis for the development of electrical power protection. As a result, the risks and losses are minimized, providing quality energy and economy, mainly in the industrial sector.

**Keywords:** Capacitor bank, energizing, current, inrush, back-to-back, overvoltage, overcurrent.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Triângulo de potências .....	15
Figura 2.2: Triângulo de potência para correção do fator de potência .....	16
Figura 2.3: Circuito elétrico com carga indutiva em paralelo com capacitor.....	17
Figura 2.4: Diagrama fasorial para correção do fator de potência .....	17
Figura 2.5: Forma de onda típica da corrente de curto-circuito .....	20
Figura 2.6: Circuito usado para o cálculo da corrente de <i>inrush</i> em banco de capacitores .....	21
Figura 2.7: Circuito usado para o cálculo da corrente de <i>inrush</i> com energização <i>back-to-back</i> em banco de capacitores .....	23
Figura 2.8: Circuito equivalente para o cálculo da corrente de <i>inrush</i> com energização <i>back-to-back</i> em banco de capacitores .....	23
Figura 2.9: Chaveamento com o resistor em subestação de média tensão .....	25
Figura 2.10: Circuito equivalente do chaveamento com resistência no tempo $t_1$ .....	25
Figura 2.11: Circuito de instalação do reator em série com banco de capacitores .....	27
Figura 2.12: Diagrama de tensões (a) antes da instalação do reator em série e (b) após instalação .....	27
Figura 2.13: Ligação em delta .....	28
Figura 2.14: Ligação em estrela simples e em dupla estrela .....	29
Figura 2.15: Ligação em ponte H .....	30
Figura 3.1: Esquema do sistema elétrico com o banco de capacitores.....	31
Figura 3.2: Esquema do sistema elétrico com os bancos de capacitores em derivação .	32
Figura 4.1: Gráfico da corrente para a energização do banco de capacitores isolado ligação estrela aterrado .....	33
Figura 4.2: Gráfico da tensão para a energização do banco de capacitores isolado ligação estrela aterrado .....	34
Figura 4.3: Gráfico da corrente para a energização do banco de capacitores isolado ligação delta.....	35
Figura 4.4: Gráfico da corrente para a energização dos bancos de capacitores com chaveamento <i>back-to-back</i> ligação estrela aterrado .....	35
Figura 4.5: Gráfico da tensão para a energização dos bancos de capacitores com chaveamento <i>back-to-back</i> ligação estrela aterrado .....	36

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BACK-TO-BACK	<i>(Em sucessão)</i>
HDL	<i>Hardware Description Language</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INRUSH	<i>(Irrupção)</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
NBR	Norma Brasileira
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIMSCAPE	Model and Simulate Multidomain Physical Systems
STD	Standards
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potência

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varphi$	Ângulo de fase do triângulo de potência
$\varphi_{novo}$	Ângulo de fase com a compensação reativa
A	Ampère
C	Capacitância
FP	Fator de potência
$FP_{novo}$	Fator de potência (requerido ou melhorado)
GVar	Gigavolt-ampère reativo
Hz	Hertz
$I_n$	Corrente do neutro
$I_0$	Corrente de sequência zero
$i_L$	Corrente do indutor
$i_C$	Corrente do capacitor
kA	Quiloampère
kHz	Quilohertz
kV	Quilovolt
L	Indutância
MVar	Megavolt-ampère reativo
P	Potência ativa
Q	Potência reativa
$Q_{cap}$	Potência reativa do banco de capacitores
$Q_C$	Potência reativa capacitiva
$Q_L$	Potência reativa indutiva
$Q_{novo}$	Potência reativa compensada
R	Resistência
s	Segundos
S	Potência aparente
$S_{novo}$	Potência aparente com a compensação reativa
$t_1$	Tempo do disjuntor 1

$t_2$	Tempo do disjuntor 2
$U_0$	Tensão inicial do banco de capacitores
$U_C$	Tensão do capacitor
$U_L$	Tensão do indutor
$U_m$	Tensão máxima da rede elétrica
$X$	Reatância
$X_C$	Reatância capacitiva
$X_L$	Reatância indutiva

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	13
1.1	Objetivos .....	13
1.1.1	Objetivos Gerais .....	13
1.1.2	Objetivos Específicos .....	13
1.2	Estrutura do Trabalho .....	14
2	Fundamentação Teórica .....	15
2.1	Correção do Fator de Potência .....	15
2.1.1	Triângulo de Potências .....	15
2.1.2	Diagrama Fasorial .....	17
2.2	Distúrbios Relacionados à Corrente Elétrica .....	18
2.2.1	Desequilíbrios de Corrente .....	18
2.2.2	Sobrecargas .....	18
2.2.3	Curtos-circuitos .....	19
2.2.4	Surtos de Energização .....	20
2.2.4.1	Energização com Chaveamento Simples .....	21
2.2.4.2	Energização <i>Back-to-back</i> .....	23
2.3	Métodos de Mitigação das Correntes de <i>Inrush</i> .....	24
2.4	Ligações de Banco de Capacitores Trifásicos .....	28
2.4.1	Ligação em Delta Simples ou Duplo .....	28
2.4.2	Ligação em Estrela Simples ou Duplo .....	28
2.4.3	Ligação em Ponte H .....	29
3	Simulações Computacionais de Banco de Capacitores .....	31
4	Análise dos Resultados .....	33
5	Conclusão .....	37
	Referências Bibliográficas .....	38

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVOS GERAIS

A compensação de reativos é uma prática bastante utilizada nas redes elétricas que visa melhoramento do fator de potência, liberação da capacidade de equipamentos, além de redução das perdas e queda de tensão. Antes da instalação de bancos de capacitores é imprescindível que se faça estudos dos efeitos que esses componentes provocam no funcionamento do sistema, inclusive no regime transitório. Para isso, deve-se analisar as solicitações de tensão e de corrente em diversos pontos do sistema provocados pela energização dos bancos de capacitores e a ocorrência de curtos-circuitos próximos a eles.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho ajudará a elucidar os problemas de transitórios causados por energização de bancos de capacitores isolados, além de bancos de capacitores em que há outros bancos energizados próximos a eles (chaveamento *back-to-back*). Proporcionando informações importantes para implementação de projetos de banco de capacitores.

De forma sucinta, os bancos de capacitores são equipamentos compostos de unidades capacitivas com uma combinação série-paralela que fornece à rede elétrica uma quantidade de potência reativa, adequada, sob uma determinada tensão de operação. Por conseguinte, o banco de capacitores instalado adequadamente proporciona melhoria na qualidade de energia, no funcionamento dos equipamentos (consequentemente, no seu tempo de vida útil), reduz custos de manutenção e de consumo, entre outros benefícios que serão discutidos neste trabalho. O banco de capacitores é constituído de unidades capacitivas, disjuntores, chaves seccionadoras, dispositivos de proteção, por exemplo, para-raios, reatores de amortecimento e de relés, composto também de TP e/ou TC. As normas aplicáveis para banco de capacitores são: NBR 5282, IEC 60076-1 ou IEEE Std 18.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira: O Capítulo 1 caracteriza o trabalho, define quais os objetivos gerais e específicos, e apresenta a estrutura do trabalho. O Capítulo 2 contém um estudo teórico que ajudará no entendimento do funcionamento dos bancos de capacitores e na análise dos resultados obtidos neste trabalho. O Capítulo 3 mostra a configuração da rede elétrica que é simulado no *Simscape (toolbox do MATLAB)* para analisar o comportamento das correntes transitórias em bancos de capacitores, durante o processo de energização (corrente de *inrush*). No Capítulo 4 é analisado as sobretensões em equipamentos de medição e proteção instalados no secundário de transformadores de corrente (TCs), resultantes da ocorrência de curtos-circuitos próximos aos bancos de capacitores. O Capítulo 5 é conclusivo e destaca as análises dos resultados obtidos nas simulações, os projetos futuros para continuidade desse estudo, desafios enfrentados e sugestão para o aprimoramento do ensino na graduação do curso de Engenharia Elétrica.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Considerando a complexidade de alguns conceitos na abordagem de banco de capacitores, neste capítulo será realizada uma revisão teórica para ajudar no entendimento deste trabalho.

### 2.1 CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

No âmbito técnico e econômico, é essencial ter uma energia de qualidade e usá-la de forma eficiente. O fator de potência (FP) é um indicador que qualifica a energia elétrica e é um dos responsáveis pela minimização das perdas.

#### 2.1.1 TRIÂNGULO DE POTÊNCIAS

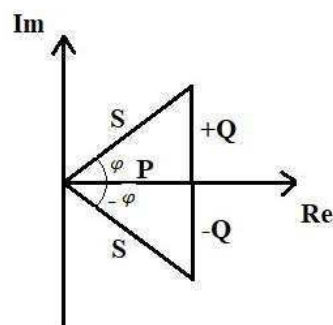
As potências ativa ( $P$ ) e aparente ( $S$ ) podem ser relacionadas por meio do FP. A relação é dada pela Equação 2.1:

$$P = S \cos \varphi. \quad (2.1)$$

Lembrando que  $FP = \cos \varphi$ .

As grandezas das potências ativa ( $P$ ), reativa ( $Q$ ) e aparente ( $S$ ) são normalmente representadas como ilustrado na Figura 2.1, formando o triângulo de potências.

Figura 2.1: Triângulo de potências



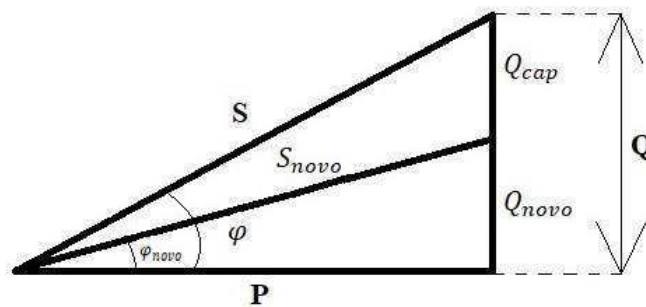
Fonte: O próprio autor



A representação da Figura 2.1 é o triângulo de potência de uma carga qualquer. Pelo FP não é possível analisar a natureza da carga, porque a função cosseno é uma função par. Então, observa-se que no caso de ser atribuído sinal positivo para  $Q$  a carga é de caráter indutivo, se sinal negativo a carga é de caráter capacitivo, e se  $Q = 0$  a carga tem caráter resistivo e  $S = P$ .

Com isso, o melhoramento do FP é feito controlando a quantidade de  $Q$  presente no sistema. A determinação da quantidade de reativos a ser injetada é feita por relações matemáticas usando o triângulo de potência da Figura 2.2.

Figura 2.2: Triângulo de potência para correção do fator de potência



Fonte: O próprio autor

Sendo  $\varphi_{novo}$ ,  $S_{novo}$  e  $Q_{novo}$  os novos valores para uma injeção de reativos capacitivos ( $Q_{cap}$ ). Por se tratar de uma carga indutiva ( $Q > 0$ ), a injeção de reativos capacitivos irá reduzir a quantidade de reativos vista pelo sistema. O valor de  $Q_{cap}$  pode ser determinado fixando um valor de  $Q_{novo}$  desejado.

$$Q_{cap} = Q - Q_{novo}. \quad (2.2)$$

O valor de  $Q_{cap}$  é a potência do capacitor ou banco de capacitores necessária para a correção da quantidade de reativos no sistema elétrico, também podendo ser calculado usando a relação entre  $P$  e  $Q$ :

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \text{ e } \varphi = \cos^{-1}(FP) \quad (2.3)$$

$$\tan \varphi_{novo} = \frac{Q_{novo}}{P} \text{ e } \varphi_{novo} = \cos^{-1}(FP_{novo}) \quad (2.4)$$

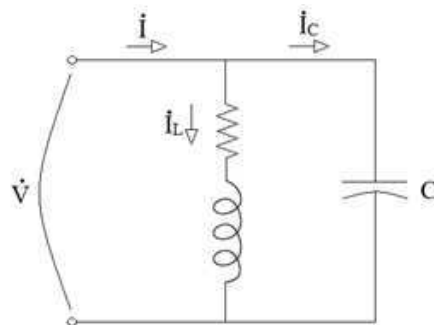
Com isso, pode-se reescrever a Equação 2.2 da seguinte maneira:

$$Q_{cap} = P(\tan \varphi - \tan \varphi_{novo}) \quad (2.5)$$

### 2.1.2 DIAGRAMA FASORIAL

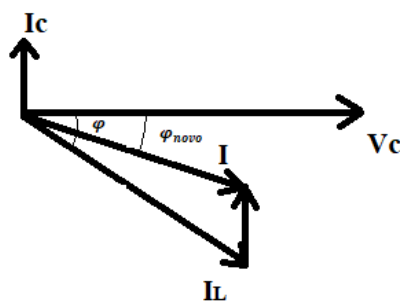
A análise do diagrama fasorial das correntes indutivas e capacitivas de um sistema elétrico, que possui um banco de capacitores instalado em paralelo, também ajuda a compreender a correção do fator de potência. Observe o modelo simples de um circuito elétrico, com carga resistiva e indutiva, conectado a um capacitor, em paralelo.

Figura 2.3: Circuito elétrico com carga indutiva em paralelo com capacitor



Da Figura 2.3 pode-se obter o diagrama ilustrado na Figura 2.4. Lembrando que no capacitor a corrente é adiantada da tensão em um ângulo de  $90^\circ$ .

Figura 2.4: Diagrama fasorial para correção do fator de potência



Fonte: O próprio autor

Observa-se o melhoramento do fator de potência com a instalação da carga capacitiva, adequadamente dimensionada.

## 2.2 DISTÚRBIOS RELACIONADOS À CORRENTE ELÉTRICA

Em todos os patamares do sistema elétrico de potência (geração, transmissão, distribuição ou consumo) podem ocorrer desequilíbrios relacionados à corrente elétrica. Entre as principais causas estão: desequilíbrios de corrente, sobretensão, curto-circuito e surtos de energização.

Neste tópico, teremos uma breve abordagem sobre cada uma dessas situações.

### 2.2.1 DESEQUILÍBRIOS DE CORRENTE

As causas dos desequilíbrios de corrente estão relacionadas ao desbalanceamento de tensão e/ou cargas, causando vários problemas ao sistema elétrico de potência (SEP). A maioria destas ocorrências de desequilíbrios estão presentes no setor de distribuição de energia elétrica causadas pela má distribuição de cargas por fase, seja com novas conexões e/ou saídas de cargas.

Também ocorre no setor de distribuição o emprego excessivo de transformadores monofásicos e bifásicos usados para alimentar cargas do tipo residencial ou iluminações públicas. E as variações nessas cargas ocasionam correntes diferentes nos condutores de cada fase que podem provocar diversos problemas. Por exemplo: sobrecargas nos equipamentos e condutores, inclusive no neutro, com o aumento da corrente do neutro,  $I_n = 3I_0$ ; dispositivos de proteção atuarem de forma indevida, especialmente relés de sobrecorrente; além do aumento das perdas de energia.

No setor de transmissão as maiores causas estão voltadas para as irregularidades na transposição das fases ao longo de trechos extensos. Destas irregularidades pode-se destacar: problemas nos isoladores, seja por rachaduras, ausência de isoladores em determinada fase; abertura de condutores ou de chaves fusíveis em uma das fases do banco de capacitores.

### 2.2.2 SOBRECARGAS

Como o próprio nome sugere, quando aos condutores ou equipamentos são solicitadas correntes superiores à sua capacidade de funcionamento em regime contínuo, diz-se que está em sobrecarga. Isso ocasiona perdas por efeito Joule, redução do tempo

de vida útil ou danificação do material, por causa da elevação de temperatura. Os níveis das causas dependerão da intensidade e duração da sobrecarga, das características térmicas do material, do valor inicial da temperatura e do tipo de resfriamento do equipamento.

No sistema elétrico, a proteção contra sobrecarga é feita por chaves fusíveis e disjuntores termomagnéticos em baixa tensão e por disjuntores comandados por relé de sobrecorrente para média e alta tensão.

### 2.2.3 CURTOS-CIRCUITOS

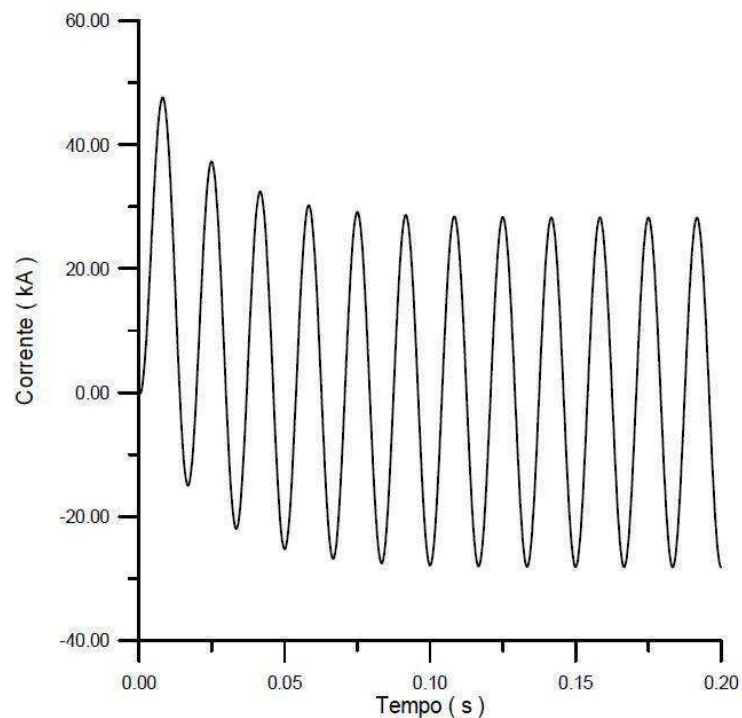
Os curtos-circuitos compõem os distúrbios de maior frequência no SEP. Este se caracteriza pelo contato através de baixa impedância de duas ou mais fases entre si ou do contato de uma ou mais fases com a terra. Os curtos-circuitos podem ser de quatro tipos: fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e trifásico.

A ocorrência desse distúrbio é causada por diversos problemas, sejam eles técnicos, humanos ou por efeito natural. As principais causas são ação do vento, neve, galhos de árvores que possam tocar a rede elétrica, descargas atmosféricas, surtos de chaveamento em manobras, sobretensões, mau dimensionamento dos isoladores, falta de manutenção nos equipamentos.

O curto-circuito pode ser classificado em dois tipos quanto à duração, sendo eles temporários e permanentes. O temporário, após a atuação do sistema de proteção, normalmente pode retomar o funcionamento do sistema sem problemas por meio do religamento automático. Diferentemente, o permanente é irreversível e faz-se necessário o conserto para restabelecer o sistema.

Na Figura 2.5 é apresentado como se comportam as correntes de curto-circuito. Observa-se uma componente alternada de 60 Hz superposta a uma componente contínua com decaimento exponencial.

Figura 2.5: Forma de onda típica da corrente de curto-circuito



Fonte: Distúrbios de corrente em redes elétricas (GUERRA, 2018)

#### 2.2.4 SURTOS DE ENERGIZAÇÃO

Alguns equipamentos, da rede elétrica, ao serem energizados provocam surtos de corrente e a magnitude de pico inicial dessas correntes pode chegar a valores elevados. Esses surtos comprometem o funcionamento e a vida útil dos sistemas elétricos. As principais ocorrências que provocam esse fenômeno são: energização de transformadores e de reatores; partida de motores; energização de carga fria e energização de banco de capacitores.

Neste subtópico da fundamentação teórica, será abordado apenas o que se refere a energização de banco de capacitores que se comporta como um curto-circuito para o sistema. Este, ao ser energizado, ocasiona um surto de corrente de alta frequência, conhecida como corrente de *inrush*, que possui diversos efeitos na rede elétrica, por exemplo:

- Abaixamento do nível de tensão temporariamente, o que reflete em baixa qualidade de energia.
- Redução de vida útil dos equipamentos do sistema, resultado de solicitações térmicas e eletromecânicas;

- Atuação indevida de fusíveis e relés de proteção de atuação rápida;
- Sobretensões.

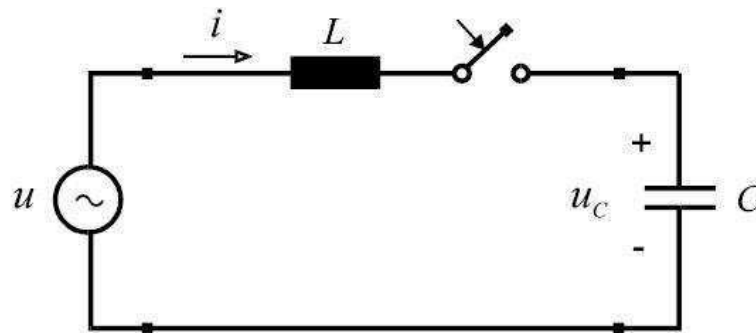
#### 2.2.4.1 ENERGIZAÇÃO COM CHAVEAMENTO SIMPLES

Este tipo de energização é o caso que apresenta as condições menos críticas, pois a impedância do sistema funciona como limitador para correntes transitórias.

Para analisar essa situação, são adotadas algumas considerações, como: perdas no circuito nulas, o banco já possui uma tensão inicial  $U_0$  e é energizado no momento que a tensão da fonte é máxima, e sendo a frequência do surto muito superior a 60 Hz, na ordem de kHz, supõe-se que o intervalo de tempo considerado seja  $u \approx U_m$ .

Na figura 2.6 é apresentado o circuito usado para o cálculo da corrente de *inrush*, que será demonstrado em seguida. Supondo que  $u = U_m \cos \omega t$ . Assim, tem-se que:

Figura 2.6: Circuito usado para o cálculo da corrente de *inrush* em banco de capacitores



Fonte: Distúrbios de corrente em redes elétricas (GUERRA, 2018)

$$L \frac{di(t)}{dt} + u_c(t) \approx U_m \quad (2.6)$$

$$u_c(t) = U_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \quad (2.7)$$

Substituindo o valor de  $u_c(t)$  da Equação 2.7 em 2.6, tem-se que:

$$L \frac{di(t)}{dt} + U_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = U_m \quad (2.8)$$

Em seguida, para  $i(0) = 0$  e usando a transformada de Laplace. Obtém-se que:

$$\left(sL + \frac{1}{sC}\right) I(s) = \frac{U_m - U_0}{s} \quad (2.9)$$

$$I(s) = \frac{(U_m - U_0)C}{s^2LC + 1} = \frac{(U_m - U_0)C/(LC)}{s^2 + 1/(LC)} = \frac{(U_m - U_0)}{\omega_0 L} \frac{\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} \quad (2.10)$$

$$I(s) = \frac{(U_m - U_0)}{L\sqrt{1/(LC)}} \frac{\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} \quad (2.11)$$

Usando a transformada inversa teremos a Equação 2.11 no domínio do tempo.

$$i(t) = \frac{(U_m - U_0)}{Z_0} \sin \omega_0 t \quad (2.12)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ e } Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.13)$$

Sendo,  $\omega_0$  a frequência natural de oscilação do circuito e  $Z_0$  a impedância característica do circuito no momento do surto. O valor máximo da corrente de *inrush* é dado por:

$$i_{max} = (U_m - U_0) \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2.14)$$

Quando o desligamento ocorre em um pico da onda de tensão e o religamento no pico de onda oposto, o cálculo do valor de pico máximo da corrente será:

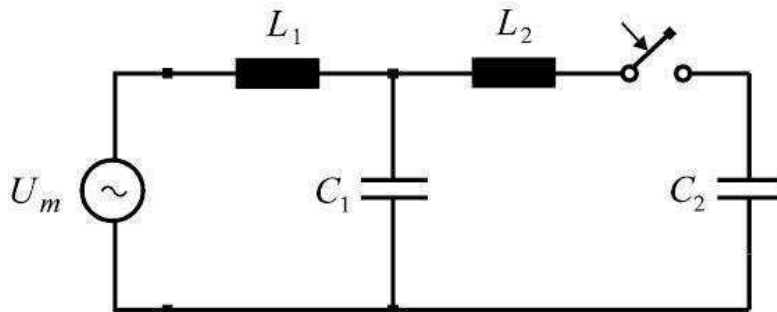
$$i_{max} = (U_m - (-U_m)) \sqrt{\frac{C}{L}} = 2U_m \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2.15)$$

Este caso, Equação 2.15, é o mais crítico, no qual o valor de pico máximo da corrente pode alcançar até quinze vezes a corrente nominal do banco. A frequência transitória, para o caso de chaveamento simples de capacitores, da tensão varia de 300 a 1000 kHz e da corrente em torno de 200 a 600 kHz.

### 2.2.4.2 ENERGIZAÇÃO *BACK-TO-BACK*

O circuito da Figura 2.7 é usado para compreender o caso de energização *back-to-back*. Observa-se a seguinte situação, um capacitor é chaveado a outro já energizado na mesma barra.

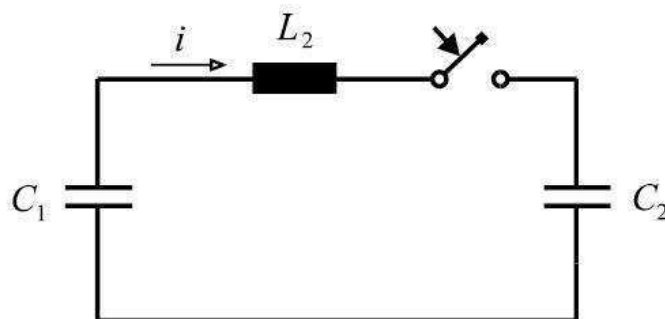
Figura 2.7: Circuito usado para o cálculo da corrente de *inrush* com energização *back-to-back* em banco de capacitores



Fonte: Distúrbios de corrente em redes elétricas (GUERRA, 2018)

Nesta circunstância, os valores das correntes de *inrush* podem assumir valores ainda maiores, por causa da indutância equivalente  $L_2$  que limita essas correntes. E a magnitude de  $L_2$  é muito menor que  $L_1$ , a indutância equivalente da rede. Por essa razão, o circuito ilustrado na Figura 2.7 pode ser representado pelo circuito equivalente apresentado na Figura 2.8, pois, sendo  $L_1 \gg L_2$ , a corrente entre os capacitores é muito maior. Assim, a parte do circuito equivalente à rede se torna desprezível nesta análise.

Figura 2.8: Circuito equivalente para o cálculo da corrente de *inrush* com energização *back-to-back* em banco de capacitores



Fonte: Distúrbios de corrente em redes elétricas (GUERRA, 2018)

Neste caso, o cálculo da corrente de *inrush* pode ser efetuado repetindo o procedimento realizado a partir da Equação 2.6, feito para o caso de um capacitor chaveado de forma simples. Considera-se que  $u_{C_1}(0) = U_m$  e  $u_{C_2}(0) = U_0$ , tem-se que:



$$i(t) = -\frac{(U_m - U_0)}{Z_0} \sin \omega_0 t \quad (2.16)$$

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.17)$$

O valor máximo atingido é dado por:

$$i_{max} = (U_m - U_0) \sqrt{\frac{C}{L_2}} \quad (2.18)$$

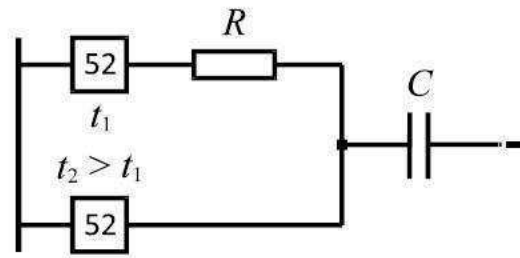
A corrente de *inrush* máxima suportada por um banco de capacitores em regime transitório é de 100 vezes a corrente nominal do banco. No caso do chaveamento back-to-back acontece que a indutância  $L_2$  é muito baixa e a corrente de *inrush* será de 20 a 250 vezes maior do que a corrente nominal do banco. A frequência transitória da tensão pode ser de 2 a 10kHz e da corrente de 5 a 20kHz. Esta corrente pode, inclusive, exceder a corrente de curto-circuito nos capacitores (CHAVES, 2007).

### 2.3 MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DAS CORRENTES DE *INRUSH*

Diante de diversos problemas, causados pelas correntes de *inrush* na rede elétrica, serão mostrados alguns métodos para mitigação desses efeitos, como: chaveamento com resistência, instalação de reator em série, chaveamento controlado e divisão do banco de capacitores em bancos menores. Para os dois primeiros casos, é considerada a situação mais crítica, em que os contatos do disjuntor são fechados quando a tensão assume o valor de pico.

Em subestação de média tensão, os disjuntores não possuem resistores de fechamento, que agem na mitigação dos valores de picos e frequência das tensões de restabelecimento transitório e no valor da corrente de *inrush*. Para contornar isso, são utilizados dois disjuntores com tempos de fechamento diferentes. Assim, o banco é colocado em série com o resistor por curto período e este atenuará o valor da corrente de *inrush*.

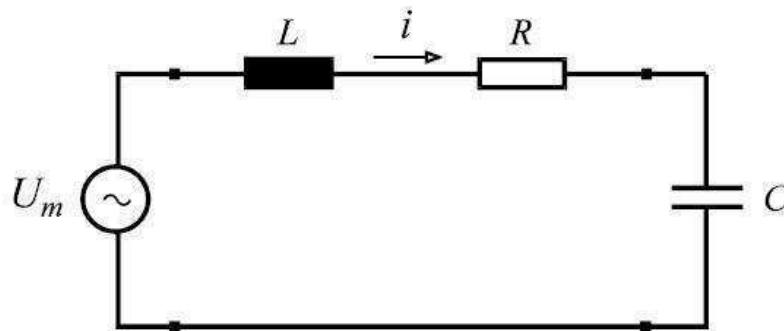
Figura 2.9: Chaveamento com o resistor em subestação de média tensão



Fonte: Distúrbios de corrente em redes elétricas (GUERRA, 2018)

Observando a Figura 2.9, durante o período do tempo  $t_1$  o circuito terá a configuração apresentada na Figura 2.10.

Figura 2.10: Circuito equivalente do chaveamento com resistência no tempo  $t_1$



Fonte: Distúrbios de corrente em redes elétricas (GUERRA, 2018)

Dessa maneira, o cálculo da corrente de *inrush* será dado da seguinte forma:

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + U_0 + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = U_m \quad (2.19)$$

Desprezando a componente resistiva da impedância do sistema alimentador e utilizando a transformada de Laplace, obtém-se que:

$$\left( sL + R + \frac{1}{sC} \right) I(s) = \frac{U_m - U_0}{s} \quad (2.20)$$

$$I(s) = \frac{U_m - U_0}{s^2 L + Rs + C} = \frac{U_m - U_0}{L} \frac{1}{s^2 + \left(\frac{R}{L}\right)s + 1/(LC)} \quad (2.21)$$

Para  $s^2 + \left(\frac{R}{L}\right)s + \frac{1}{LC} = (s + \sigma)^2 + \omega_0^2$ , a Equação 2.21 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$I(s) = \frac{U_m - U_0}{\omega_0 L} \frac{\omega_0}{(s + \sigma)^2 + \omega_0^2} \quad (2.22)$$

Retornando a Equação 2.22 para o domínio do tempo, a equação da corrente é dada por:

$$i(t) = \frac{U_m - U_0}{\omega_0 L} e^{-\sigma t} \sin \omega_0 t \quad (2.23)$$

O fator de amortecimento e a frequência de oscilação, respectivamente, são:

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{R}{L} \text{ e } \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{1}{2} \frac{R}{L}\right)^2} \quad (2.24)$$

A frequência do transitório é reduzida para zero com um resistor, dado por:

$$R = 2 \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.25)$$

A Equação 2.25 pode ser reescrita para uma forma mais conveniente:

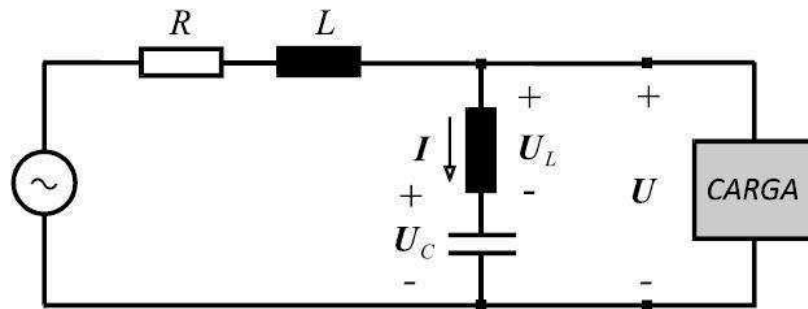
$$R = 2 \sqrt{\frac{U_{FN}}{I_{CC} \omega C}} \quad (2.26)$$

Dado que a tensão fase-neutro é  $U_{FN}$  e a corrente de curto-circuito no barramento é  $I_{CC}$ .

No caso de subestação de alta tensão, os disjuntores possuem resistores de fechamento que têm as funções de reduzir os picos e a frequência da tensão de restabelecimento transitório, como também atenuar o valor da corrente de *inrush*.

Em seguida, um outro método de mitigação das correntes de *inrush* é a instalação de reator em série. A redução da amplitude e frequência dessas correntes em banco de capacitores funciona da seguinte maneira: o reator faz com que a reatância capacitiva total ( $X_C - X_L$ ) diminua. Porém, a potência reativa líquida de caráter capacitivo ( $Q_C - Q_L$ ) aumenta, pois a potência reativa gerada pelo capacitor varia com o quadrado da tensão do banco ( $Q_C = \omega C (U_C)^2$ ) (DIAS, 2005). Na Figura 2.11 é mostrado o circuito equivalente da instalação do reator em série com banco de capacitores.

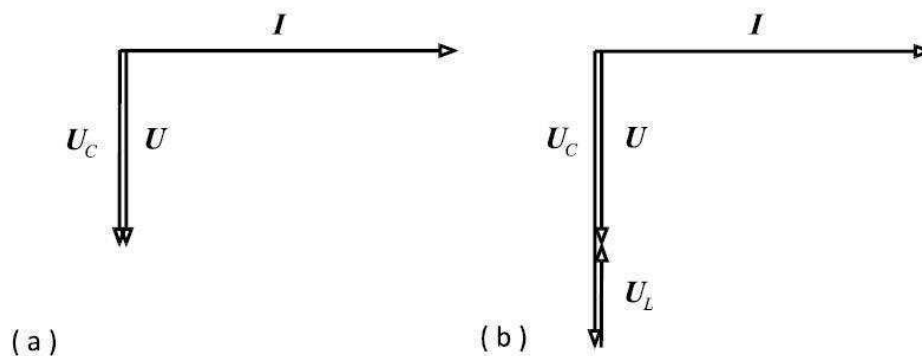
Figura 2.11: Circuito de instalação do reator em série com banco de capacitores



Fonte: Distúrbios de corrente em redes elétricas (GUERRA, 2018)

Na Figura 2.12 pode-se perceber o crescimento da queda de tensão nos terminais do banco de capacitores após instalação do reator em série.

Figura 2.12: Diagrama de tensões (a) antes da instalação do reator em série e (b) após instalação



Fonte: Distúrbios de corrente em redes elétricas (GUERRA, 2018)

Outro método é o chaveamento controlado, uma técnica que utiliza um módulo eletrônico de controle para realizar o fechamento dos polos do disjuntor de forma independente durante a passagem da onda de tensão de cada fase por zero. Com isso, reduz-se os valores de pico da corrente, melhora-se a qualidade da energia elétrica, os disjuntores terão um melhor desempenho, reduz-se o custo com manutenção, haja vista que aumenta o tempo de vida útil dos equipamentos.

O último método desse estudo para a redução das correntes de *inrush* é o de divisão de banco de capacitores em bancos menores. A fragmentação dos bancos reduz a quantidade de energia transferida entre os componentes do sistema e, conseqüentemente, reduz os valores de pico das correntes.

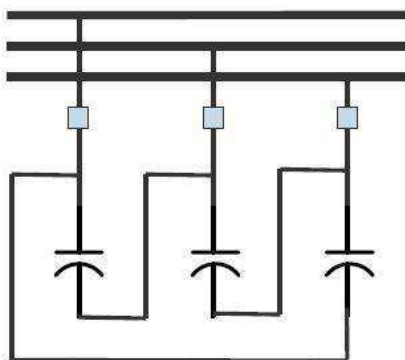
## 2.4 LIGAÇÕES DE BANCO DE CAPACITORES TRIFÁSICOS

As ligações do banco de capacitores trifásicos são do tipo delta simples ou dupla, tipo estrela simples ou dupla e em ponte H. A escolha do tipo de ligação ideal em determinada situação depende de alguns critérios importantes, por exemplo: tensões de operação e tipo de aterramento do SEP, tensão e potência do banco, as características construtivas e tecnológicas, entre outros.

### 2.4.1 LIGAÇÃO EM DELTA SIMPLES OU DUPLO

A ligação em delta, seja simples ou duplo, é normalmente usada para bancos com tensão de até 13,8 kV em redes secundárias. Este tipo de ligação apresenta algumas vantagens, como: não apresenta sobretensões sob uma situação de falha na rede elétrica e impossibilita a circulação de correntes da 3ª harmônica. Na Figura 2.13, é mostrado o diagrama unifilar da ligação em delta simples.

Figura 2.13: Ligação em delta

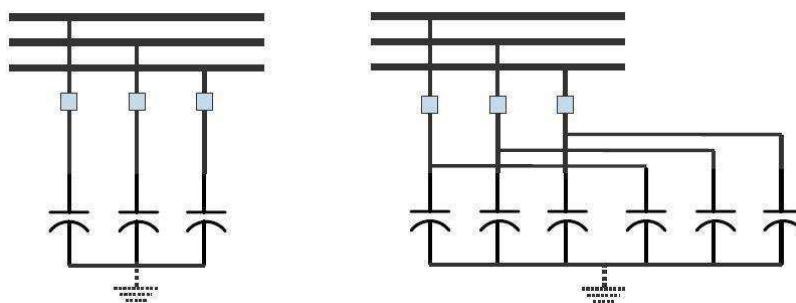


Fonte: Equipamentos de Alta Tensão (FURNAS, 2013)

### 2.4.2 LIGAÇÃO EM ESTRELA SIMPLES OU DUPLO

A ligação em estrela, simples e duplo, tem seu diagrama unifilar ilustrado na Figura 2.14, respectivamente.

Figura 2.14: Ligação em estrela simples e em dupla estrela



Fonte: Equipamentos de Alta Tensão (FURNAS, 2013)

Usualmente, em redes elétricas com tensão nominal igual ou superior a 138 kV é utilizado este tipo de ligação e o neutro é solidamente aterrado, para reduzir as sobretensões durante faltas monofásicas, garante a proteção contra surtos atmosféricos, e também diminui a ocorrência de reacendimento do arco, pois a existência de tensões de restabelecimento é menor. As desvantagens para o aterramento do neutro consistem em permitir a circulação de correntes harmônicas e de sequência zero através do banco, além de resultar em correntes transitórias de grande magnitude.

Para redes elétricas com tensão igual ou inferior a 72,5 kV, usualmente é utilizada a isolação da terra. Esta configuração garante que correntes harmônicas ou de sequência zero não circulem pelo banco, correntes transitórias de pequena magnitude se comparadas a existentes quando o neutro é solidamente aterrado. Porém, o isolamento do neutro em bancos isolados pode ficar bastante oneroso.

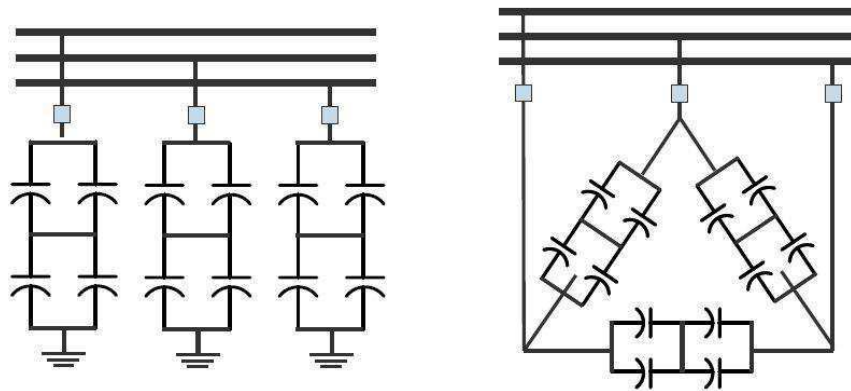
A configuração em dupla estrela possui uma menor influência com relação às interferências externas ao banco de capacitores, e o projeto lógico de maior sensibilidade à corrente de desequilíbrio se torna mais prático de se implementar.

#### 2.4.3 LIGAÇÃO EM PONTE H

Esta configuração pode ser utilizada em qualquer nível de tensão. As duas configurações anteriores de ligação de banco de capacitores podem ser arranjadas no formato de ponto H. Neste caso, a fase é dividida em quatro seções, chamadas de quadrantes. Isto facilita o controle da corrente de desequilíbrio em qualquer ponto dos quadrantes, apenas com a instalação de um TC entre os dois ramos do H.

Na Figura 2.15 é ilustrada a ligação em ponte H, estrela e delta, respectivamente.

Figura 2.15: Ligação em ponte H



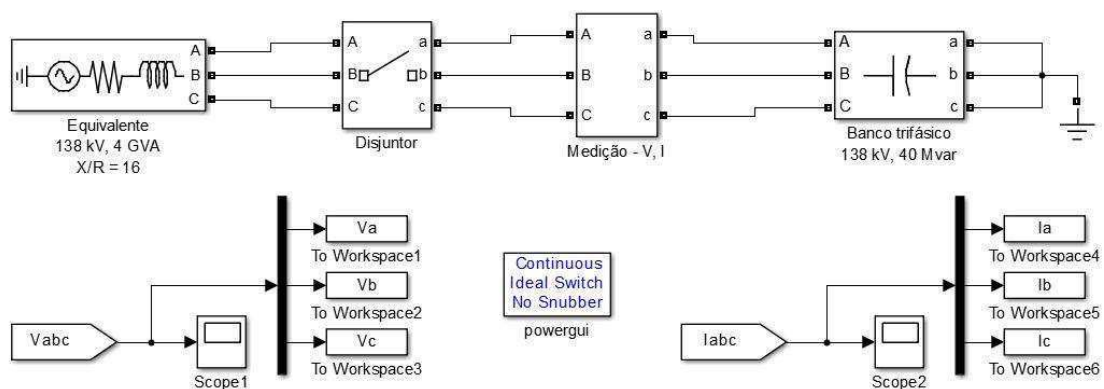
Fonte: Equipamentos de Alta Tensão (FURNAS, 2013)

### 3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE BANCO DE CAPACITORES

Nesta seção, foram feitas simulações utilizando a ferramenta computacional do MATLAB, o *toolbox Simscape*, desenvolvido pela MathWorks Inc. O *Simscape* é um ambiente de blocos/diagramas oriundos do conceito de códigos, permitindo a modelagem de sistemas físicos (real) no meio computacional. Isso possibilita estudos e testes de sistemas sem tantos gastos de materiais, redução dos riscos e do tempo de testes, além de gerar códigos de qualidade em Linguagem C e HDL, evitando trabalhos excessivos na escrita de códigos.

Com o propósito de analisar os transitórios de correntes e tensões em diversos pontos do sistema, primeiramente foi considerado um banco trifásico de capacitores de potência nominal 40 MVar, instalado em um sistema com potência de curto-circuito trifásico da fonte 4 GVar, de valor eficaz da tensão 138 kV e frequência 60 Hz, ligado em estrela com neutro aterrado. O esquema simplificado da rede elétrica é ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1: Esquema do sistema elétrico com o banco de capacitores

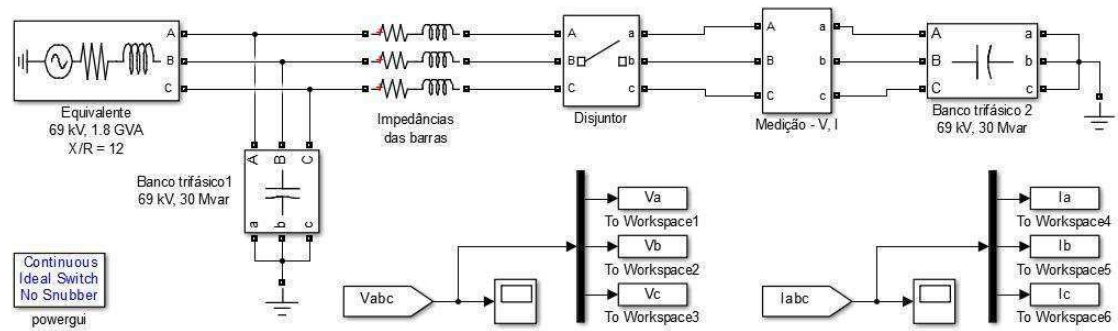


Fonte: *Simscape/MATLAB*

No caso de banco de capacitores em derivação, ou *back-to-back*, foram considerados bancos trifásicos de capacitores de potência nominal 30 MVar. Além disso, ligados a um sistema de potência de curto-circuito trifásico da fonte 1,8 GVar, de valor eficaz da tensão 69 kV e frequência 60 Hz. O esquema simplificado da rede elétrica é ilustrado na Figura 3.2.



Figura 3.2: Esquema do sistema elétrico com os bancos de capacitores em derivação



Fonte: *Simscape/MATLAB*

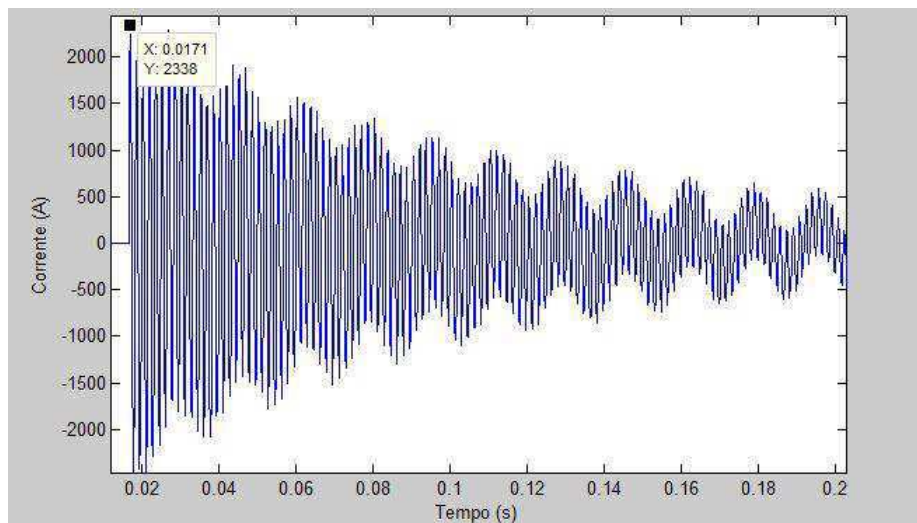
No capítulo seguinte, são apresentados os resultados das simulações do processo de energização de bancos de capacitores e comparando com os resultados obtidos pelas informações teóricas abordadas anteriormente neste trabalho.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados e análises dos esquemas ilustrados capítulo 3.

Primeiramente, para o caso de energização do banco de capacitores isolado analisando a corrente da fase A o valor de pico é de 2,34 kA e frequência de oscilação de 588 Hz. O gráfico da corrente é apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1: Gráfico da corrente para a energização do banco de capacitores isolado ligação estrela aterrado



Fonte: *Simscape/MATLAB*

Pode-se comparar o valor de pico da corrente simulado com o valor teórico pela Equação 2.14. Primeiramente, calculando a corrente curto-circuito:

$$I_{CC} = \frac{S_{CC}}{\sqrt{3}U_m} \quad (4.1)$$

Para  $S_{CC} = 4$  GVar e  $U_m = 138$  kV,  $I_{CC} = 16734,79$  A. Os valores da reatância, indutância de Thévenin e a capacitância do banco capacitivo são:

$$X = \frac{U_m}{I_{CC}} \quad (4.2)$$

$$L = \frac{X}{\omega} \quad (4.3)$$

$$C = \frac{Q_{cap}}{\omega U_m^2} \quad (4.4)$$

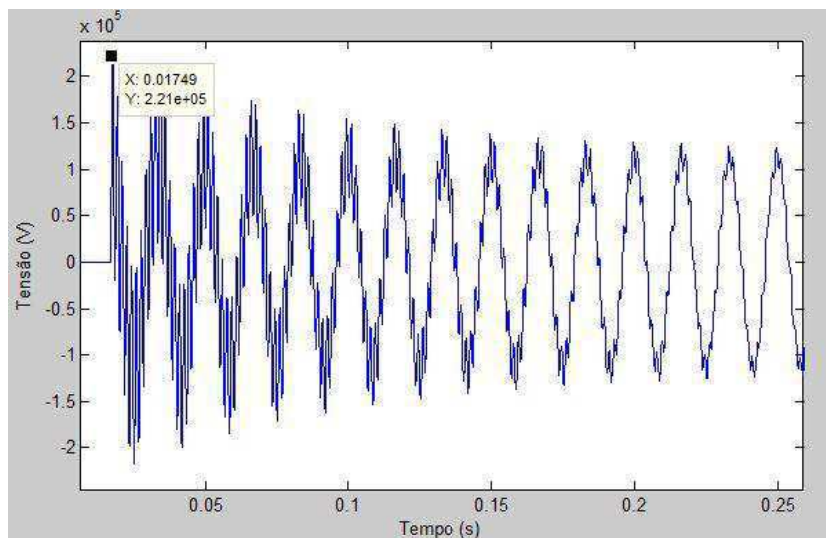
Dado que  $\omega = 2\pi f$  e  $Q_{cap} = 40$  MVar. Então,  $X = 4,76 \Omega$ ,  $L = 12,6$  mH e  $C = 5,57\mu\text{F}$ .

Usando a Equação 2.14 e considerando que o banco está inicialmente desenergizado, o valor teórico de pico da corrente é  $i_{max} = 2369,06$  A, ou ainda  $i_{max} = 2,37$  kA. O desvio percentual do valor de pico da corrente simulado com relação ao valor teórico é:

$$\varepsilon_{\%} = \frac{2369,06 - 2338}{2369,06} \times 100 = 1,3\% \quad (4.5)$$

Na Figura 4.2 mostra-se o comportamento da tensão na fase A com valor máximo de 221 kV com os capacitores inicialmente descarregados.

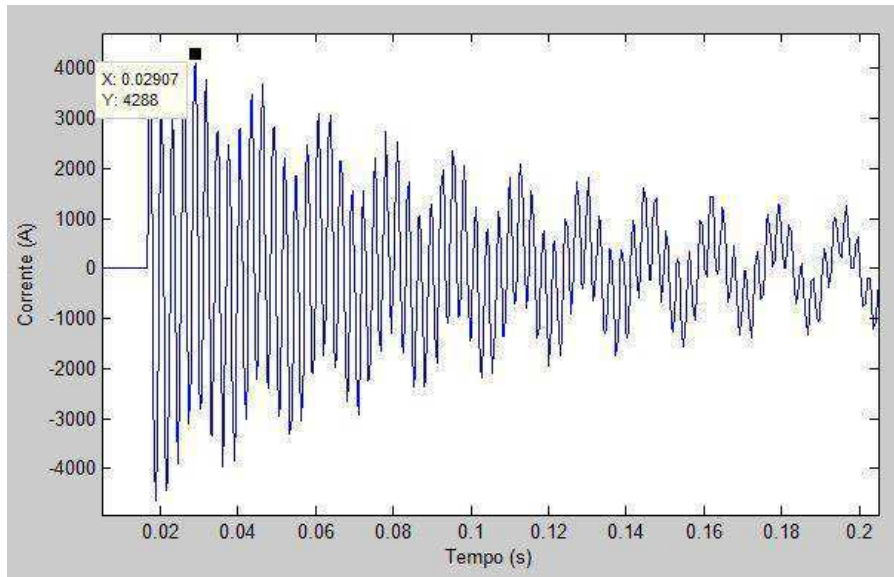
Figura 4.2: Gráfico da tensão para a energização do banco de capacitores isolado ligação estrela aterrado



Fonte: Simscape/MATLAB

Na ligação em delta para a energização do banco de capacitor isolado, a corrente de *inrush* é na ordem de 4,28 kA e frequência de oscilação de 286 kHz.

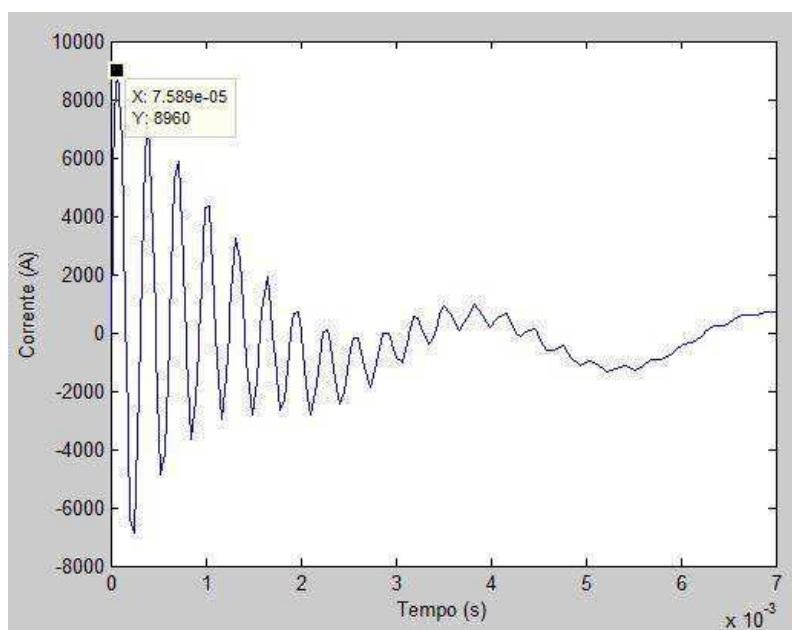
Figura 4.3: Gráfico da corrente para a energização do banco de capacitores isolado ligação delta



Fonte: *Simscape/MATLAB*

Para o caso de energização de banco de capacitores com chaveamento *back-to-back*, analisando a corrente da fase A, o valor de pico é de 8,96 kA. O gráfico da corrente é apresentado na Figura 4.4.

Figura 4.4: Gráfico da corrente para a energização dos bancos de capacitores com chaveamento *back-to-back* ligação estrela aterrado



Fonte: *Simscape/MATLAB*

Da mesma maneira, pode-se comparar o valor de pico da corrente simulado com o valor teórico pela Equação 2.14. Para o banco de capacitores 1, usando as Equações 4.1 – 4.4 e considerando os valores de  $S_{CC} = 1,8 \text{ GVar}$  e  $U_m = 69 \text{ kV}$ ,  $I_{CC} = 15061,31 \text{ A}$ .

Para  $\omega = 2\pi f$  e  $Q_{cap} = 30 \text{ MVar}$ , os valores da reatância, indutância de Thévenin e a capacitância do bando capacitivo são:  $X_1 = 2,64 \text{ } \Omega$ ,  $L_1 = 7,02 \text{ mH}$  e  $C_1 = C_2 = 16,71 \mu\text{F}$ .

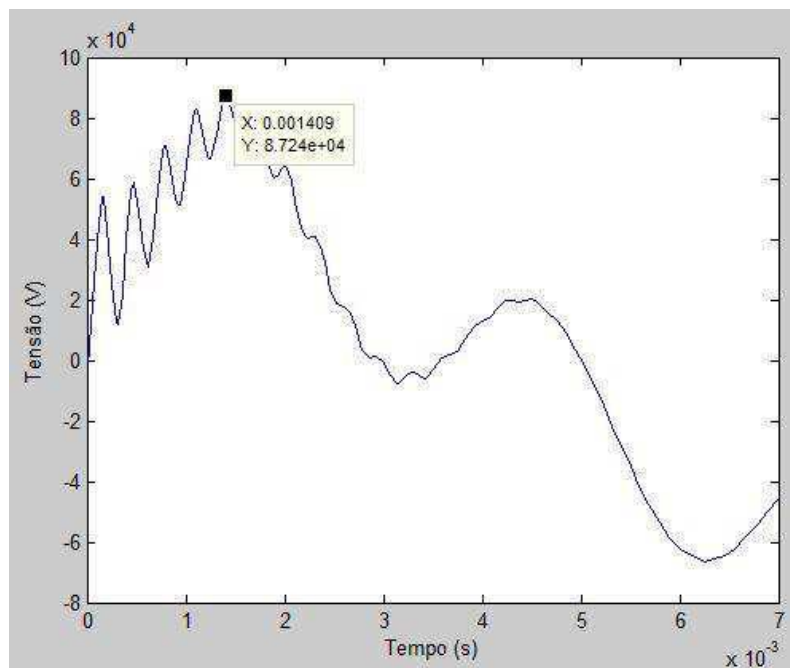
Usando a Equação 2.17, encontra-se que a capacitância equivalente é  $C = 8,35 \mu\text{F}$  e os valores para  $R_1 = 2 \text{ } \Omega$ ,  $R_2 = 0,5 \text{ } \Omega$  e  $L_2 = 0,3 \text{ mH}$ .

Considerando que o banco de capacitores 1 está inicialmente desenergizado, o valor teórico de pico da corrente é calculado pela Equação 2.18, logo  $i_{max} = 9399 \text{ A}$ , ou ainda  $i_{max} = 9,40 \text{ kA}$ . O desvio percentual do valor de pico da corrente simulado com relação ao valor teórico é:

$$\varepsilon\% = \frac{9399 - 8960}{9399} \times 100 = 4,67\% \quad (4.5)$$

Na Figura 4.5 mostra-se o comportamento da tensão na fase A com valor máximo de 8724 V.

Figura 4.5: Gráfico da tensão para a energização dos bancos de capacitores com chaveamento *back-to-back* ligação estrela aterrado



Fonte: *Simscape/MATLAB*

## 5 CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho de conclusão de curso foi apresentar de forma concisa o estudo de transitórios de banco de capacitores em redes elétricas e também apresentar os transitórios da corrente de *inrush*, oriunda da energização de banco de capacitores, e da tensão. Este objetivo foi alcançado e simulações, utilizando o *Simscape* (toolbox do MATLAB), de energização de bancos com chaveamento simples ou isolado e em derivação ou *back-to-back*, foram apresentadas, com valores de pico inicial de corrente de 2,34 kA e 8,96 kA, respectivamente.

Pode-se observar que o chaveamento *back-to-back* apresenta o caso mais crítico com surto de corrente elevado. Além disso, comparando os valores de pico inicial de corrente simulado com o valor de pico teórico da corrente, obteve 1,3% de erro para o chaveamento simples e 4,67% para o chaveamento *back-to-back*.

Este trabalho foi de suma importância para aprofundar os estudos relacionados ao melhoramento da qualidade de sistemas elétricos de distribuição com a utilização de banco de capacitores. Além de ser uma base para o desenvolvimento de futuros projetos na área de proteção de sistemas elétricos para mitigação das elevadas correntes e frequências que surgem a partir da energização de banco de capacitores.

Durante a elaboração deste projeto, as dificuldades enfrentadas foram no uso da ferramenta do *Simscape*, ferramenta que é tão útil para simular diversos tipos de sistemas elétricos, dos mais básicos aos mais complexos. São poucos os alunos que têm a oportunidade de trabalhar com as utilidades que o MATLAB oferece — professores e alunos, portanto, deveriam abordar mais esses trabalhos. Assim, muito provavelmente o desenvolvimento em pesquisas apresentaria um aumento.

Definitivamente, os estudos nesta área são de suma importância para o desenvolvimento de métodos eficientes de proteção e para o uso adequado e seguro de banco de capacitores. Isso proporcionará qualidade no sistema elétrico, melhores condições de funcionamento dos equipamentos e economia relacionada a manutenção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARROS, A. A. (2015). Análise de Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias na Energização de Bancos de Capacitores. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro/ Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro.
- GUERRA, F. das C. F (2018). Distúrbios de Corrente em Redes Elétricas. Apóstila (p.79-105), Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Elétrica, Campina Grande.
- FRONTIN, S. O. (Organizador) (2013). Equipamentos de Alta Tensão - Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas. Brasília: Teixeira.
- D'AJUZ, A. et al. (1987). Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão. FURNAS/UFF. Rio de Janeiro.
- D'AJUZ, A., FERREIRA, A. G. (1987). IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Belo Horizonte - MG.
- SANTOS, C. J. dos (2000). Transitórios Originados pelo Chaveamento de Bancos de Capacitores da Concessionária em um Sistema Elétrico de Distribuição. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica), Escola de Engenharia de São Carlos/ USP. São Carlos - SP.
- D'AJUZ, A., CARVALHO, F. M. S., DIAS, L. E. N. Problemas com a Instalação de Banco de Banco de Capacitores de 200 MVar na SE Jacarepaguá 138 kV. VI SNTTEE.
- CHAVES, F. S. (2007). Avaliação técnica do desempenho da compensação reativa shunt capacitiva aplicada à expansão de sistemas elétricos, Tese de Doutorado, PPGEE/UFMG, Belo Horizonte - MG.