



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CAMPUS I
CENTRO DE ENGENHARIA ELETRICA E INFORMATICA
CURSO DE ENGENHARIA ELETRICA

ANTONIO MAURICIO DOS SANTOS SOBRINHO

**ESTUDO DE TRANSITÓRIOS CAUSADOS POR MANOBRA DE BANCOS DE
CAPACITORES EM REDES ELÉTRICAS.**

CAMPINA GRANDE – PB

2015

ANTONIO MAURICIO DOS SANTOS SOBRINHO

ESTUDO DE TRANSITÓRIOS CAUSADOS POR MANOBRA DE BANCOS DE
CAPACITORES EM REDES ELÉTRICAS.

Trabalho de conclusão de curso apresentada
ao curso de graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande em exigência para
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco das Chagas Guerra

CAMPINA GRANDE- PB

2015

ANTONIO MAURICIO DOS SANTOS SOBRINHO

ESTUDO DE TRANSITÓRIOS CAUSADOS POR MANOBRA DE BANCOS DE
CAPACITORES EM REDES ELÉTRICAS.

Trabalho de conclusão de curso apresentada
ao curso de graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande em exigência para
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Aprovado em: __/__/____

Profº Drº Francisco das Chagas Fernandes Guerra

Orientador

Profº Drº

Examinador

*Dedico esse trabalho aos meus pais, que
sempre se esforçaram para me proporcionar
a melhor educação sendo exemplos
de força e dedicação.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me sustentado todo esse tempo e por me dar forças para prosseguir nessa longa caminhada, por providenciar os recursos para que me mantivesse estudando fora de minha cidade natal e por ser meu refúgio nas horas em que nem minha própria família pode me ajudar. "Por que tudo que tenho, tudo que sou, e o que vier a ser vem de Ti Senhor".

Agradeço aos meus pais que acreditaram comigo nesse sonho, pelo investimento e paciência em me educar com os valores mais importantes que possuem, por negarem a si mesmos em meu benefício, pelo total esforço e dedicação que jamais serão esquecidos. Tenho orgulho de ter chegado até aqui trazendo os nomes de vocês: Fernando e Virgínia.

Aos meus professores, que contribuíram de forma generosa e gentil para minha educação desde criança até a universidade, cada um a seu modo e importância, mas com certeza com muito valor. Não teria chegado a lugar algum sem o esforço e trabalho de vocês.

Aos meus amigos Pablo, Jordan, Petrus, Luan, Jardiel, Pedro, Raísa pelo apoio e amizade, por me ajudarem de todos os modos possíveis e amarem como irmãos. Pelos momentos de farras e descontração que passamos juntos e a esperança que nossa relação continue forte e saudável pelos próximos anos.

A Camila de Oliveira Melo, pelo companheirismo carinho atenção e amor demonstrados por mim, pelos conselhos e pelos ensinamentos que vão bem além da academia. Ajuda e incentivos tão importantes e sem os quais este trabalho com certeza não seria o mesmo, meus sinceros reconhecimentos.

Ao meu irmão por torcer por mim mesmo em silêncio. Sempre busquei ser referência para ele nas atitudes e conquistas. Sempre quis que tivesse orgulho de me chamar de irmão e um dia conseguir as mesmas vitórias que tenho tido. Por de algum modo ser combustível do meu trabalho, meus sinceros agradecimentos Samuel.

Aos demais familiares e amigos que de algum modo se lembraram de mim em seus pensamentos e orações e mesmo que sem poder ajudar da forma que gostariam torceram por mim e acreditaram no meu potencial e jamais duvidaram dos meus objetivos, meu muito obrigado.

“Os que em lágrimas semeiam, em jubilo ceifarão! Aquele que parte chorando, enquanto lança a semente, retornará entoando cânticos de louvor, trazendo seus feixes.” SL126:5-6.

RESUMO

A utilização de banco de capacitores em sistemas elétricos tem aumentado continuamente seguindo o crescimento da carga e conseqüentemente do próprio sistema. No entanto, a aplicação de Bancos de Capacitores necessita de cuidados pois podem ocorrer efeitos indesejados, principalmente quando se faz manobra no equipamento, entrando assim em transitórios severos que podem se propagar pelo sistema e causar os mais diversos danos. O *ATP Draw (Alternative Transient Program)* é um software dedicado para estudos eletromagnéticos, possuindo uma série de aplicações e vantagens. Por meio dele é possível modelar adequadamente os sistemas elétricos, reproduzindo a configuração real das redes elétricas. O presente trabalho tem por objetivo analisar por meio de *software* os transitórios capacitivos, bem como avaliar métodos de atenuação desse fenômeno. As simulações ocorreram de modo a seguir uma seqüência definida: montagem do circuito, configuração dos elementos, configuração dos parâmetros de simulação, tratamento e análise dos resultados. Os resultados obtidos por simulação foram compatíveis com os obtidos a partir das expressões matemáticas deduzidas no texto e dos resultados reportados na literatura. Entretanto, para validação dos resultados obtidos faz – se necessário um estudo de campo realizando as montagens simuladas a fim de verificar a confiabilidade do método utilizado e confrontar os dados adquiridos.

Palavras-chaves: banco de capacitores, *ATP Draw*, Transitórios de energização e Métodos de atenuação

ABSTRACT

The utilization of capacitors banks in electric systems have been being increased continuously following the system's need. However, the application of capacitors banks need attention once may happen undesired problems, mainly while the equipment is in operational mode. Therefore, severe transitory may happen caused by the system and end up causing damage for the whole system. The ATP (Alternative Transient Program) is a software specialized in studies of electromagnetics, having several applications and advantages. Through this software, it is possible to create good electric systems reproducing the real configuration of the electric network. The present article has the objective of analyze through the software the capacitive transitory, as well study the methods of attenuation of this phenomenon. The simulations happened as the following: assembly the circuit; configuration of the elements; configuration of the parameters of simulation; treatment and analysis of the results. The results obtained by simulation were compatible with the ones obtained from the mathematical expressions, explained further in this article, and the results from the books. In contrast, to the validation of the collected results it is necessary a good study in a lab, making simulated circuits in a manner to get better results, verifying the quality of the method used, and confront the acquired results.

Key words: Capacitors bank, ATP Draw, Transitory, and Attenuation Methods

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Indutâncias típicas de Barramentos e Bancos	34
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Garrafa de Leiden. (a) esquema da garrafa de Leiden (b) garrafa de Leiden	16
Figura 2: Formação dos dipolos (a) e campo elétrico no interior do capacitor (b).	17
Figura 3: Representação interna de arranjo de uma unidade.....	18
Figura 4: Ligação em série: estrela aterrada.....	20
Figura 5: Ligação em paralelo: estrela aterrada.	20
Figura 6: Ligação em série: estrela isolada.	21
Figura 7: Ligação em paralelo: estrela isolada.	22
Figura 8: Ligação em paralelo: banco delta.	23
Figura 9: Ligação em série: banco delta.....	23
Figura 10: Células em série: banco dupla estrela isolada.....	24
Figura 11: Circuito equivalente de um banco de capacitor sendo chaveado.....	27
Figura 12: Interrupção de corrente capacitiva.	29
Figura 13: Interrupção de corrente capacitiva sem reignição de arco.	30
Figura 14: Interrupção de corrente capacitiva com reignição de arco.....	31
Figura 15: Energização back-to-back.....	33
Figura 16: Energização back-to-back simplificado.....	33
Figura 17: Reator (a) e chaveamento de Reator (b).	35
Figura 18: Representação do disjuntor com resistor de pré-inserção.....	36
Figura 19: Sequência de abertura controlada.	37
Figura 20: Circuito trifásico simulado para energização de banco de capacitores.....	40
Figura 21: - Corrente (a) e Tensão Transitória de energização de banco isolado de capacitores (b).	40
Figura 22: Corrente de Energização Trifásica de Banco Isolado de Capacitores.	41
Figura 23: Circuito Trifásico para Energização Back to Back.....	41
Figura 24: Tensão no Capacitor Energizado (a) e chaveado (b).	42
Figura 25: Corrente de Energização Back- to- Back antes de ser chaveada (a) e chaveada (b)..	42
Figura 26: Corrente de Energização Back- to- Back.....	43
Figura 27: Circuito Trifásico para Energização de banco de capacitores com Reator Limitador.	43
Figura 28: Corrente (a) e Tensão para energização com Reator Limitador (b).....	44
Figura 29: Corrente de Energização Trifásica com Reator Limitador	44
Figura 30: Circuito Trifásico para Energização de banco de capacitores com Resistor de Pré-inserção.	45
Figura 31: Corrente e Tensão de Energização com Resistor de Pré-inserção.	45
Figura 32: Corrente Trifásica com Resistor de Pré-inserção.....	46
Figura 33: Circuito Trifásico para Chaveamento Controlado.	46
Figura 34: Corrente em cada fase chaveada A (a) B (b) e C (c).	47
Figura 35: Corrente de Energização Trifásica com Chaveamento Controlado.	47

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BC - Banco de Capacitores

EMTP – *EletroMagnetic Transient Program*

ATP – *Alternative Transient Program*

EPRI - *Electric Power Research Institute*

BPA - *Bonneville Power Administration*

LEC - *Leuven EMPT Center*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3.	REFERENCIAL TEORICO	16
3.1	BANCOS DE CAPACITORES	16
3.1.1	Definição e Histórico	16
3.1.2	Visão Geral.....	17
3.2	TIPOS DE LIGAÇÕES DE BANCOS DE CAPACITORES.....	20
3.2.1	Configuração em Estrela Aterrada	20
3.2.2	Configuração Estrela Isolada.....	21
3.2.3	Configuração em Delta ou Triângulo.....	23
3.2.4	Configuração em Dupla Estrela Isolada.....	24
3.3	DIMENSIONAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES	25
3.4	SOBRETENSÕES DE MANOBRA.....	25
3.5	BANCO DE CAPACITORES	27
3.5.1	Transitório de energização	27
3.5.2	Interrupção de corrente capacitiva	29
3.5.3	Energização <i>back-to-back</i>	33
3.5.4	Controle de chaveamento em banco de capacitores	35
3.5.4.1	Reator serie.....	35
3.2.4.2	Resistência de Chaveamento	36
3.2.4.3	Ponto de onda de Chaveamento	37
3.2.4.4	Para-Raios	38
4.	METODOLOGIA	39
4.1	Materiais.....	39
4.2	Métodos.....	39
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
6	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	49

1. INTRODUÇÃO

A utilização de banco de capacitores em sistemas elétricos tem aumentado continuamente seguindo o crescimento da carga e conseqüentemente do próprio sistema.

Com o objetivo de otimizar desempenho, as concessionárias de energia elétrica utilizam bancos de capacitores como alternativa para corrigir o fator de potência - por consequência transmitir maior potência ativa - e ainda como bônus regular a tensão.

Em sistemas industriais também tem se avançado a este respeito. Uma das maiores preocupações das empresas tem sido manter o fator de potência dentro dos limites impostos pela legislação a fim de evitar multa e faturamento de energia reativa excedente, que onera ainda mais os gastos com consumo.

No entanto, a aplicação de bancos de capacitores necessita de cuidados pois podem ocorrer efeitos indesejados, principalmente quando se faz manobra no equipamento, entrando assim em transitórios severos que podem se propagar pelo sistema e causar os mais diversos danos.

O *ATP Draw (Alternative Transient Program)* é um *software* dedicado para estudos eletromagnéticos, possuindo uma série de aplicações e vantagens. Por meio dele é possível modelar adequadamente os sistemas elétricos, reproduzindo o mais fielmente a configuração real das redes elétricas. Esse programa é uma ferramenta de grande flexibilidade e importância na realização de estudos de regime transitório ou permanente em sistemas de potência.

A partir do decênio de 1960 iniciou-se o desenvolvimento do EMTP (*EletroMagnetic Transient Program*) por Herman W. Dommel para a *Bonneville Power Administration (BPA)*. O programa inicial trabalhava com simulação de circuitos monofásicos através de modelos de indutâncias, capacitâncias e resistências em linhas sem perdas, incluindo uma chave e uma fonte de excitação.

Com o passar dos anos, o programa foi sofrendo alterações de diversos colaboradores do mundo todo. A partir de 1973, Scott Meyer assumiu a coordenação e o desenvolvimento do programa na BPA, estabelecendo um processo de desenvolvimento articulado com os usuários do EMTP, que o tornou uma ferramenta poderosa em estudos de transitórios em sistemas elétricos.

Divergências entre Scott Meyer e o EPRI (*Electric Power Research Institute*, que investiu no projeto do EMTP a partir de 1984) levaram à criação de uma nova versão do EMTP (baseada na versão M39), a qual foi enviada para a Bélgica, onde foi instalado o *Leuven EMTP Center* (LEC). Esta nova versão é denominada ATP, que constitui a continuação das versões anteriores do programa (PRADO,2003).

O estudo de transitório capacitivos é extenso e por vezes complexo, no entanto alguns efeitos de maior destaque são abordados no presente trabalho como: energização de banco isolado, energização *back to back*, formas de atenuação de transitório.

O presente trabalho tem por objetivo analisar por meio de *software* as mudanças de transitórios capacitivos, demonstrando assim como os problemas nesse campo afetam diretamente o bom funcionamento dos sistemas elétricos.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Verificar e analisar as mudanças na configuração do sistema elétrico, no que diz respeito ao transitório em circuitos capacitivos utilizando *software* apropriado.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar as características de funcionamento, construção e operação e forma de ligação dos capacitores.
- Demonstrar como os problemas de transitório afetam o funcionamento do sistema de potência;
- Discutir as características dos circuitos capacitivos;
- Verificar e analisar por meio de simulação os efeitos do transiente nas variáveis tensão, corrente e frequência para comparar aos resultados algébricos obtidos;
- Ilustrar formas de atenuar os surtos transitórios capacitivos bem como mensurar seus efeitos;

3. REFERENCIAL TEORICO

3.1 BANCOS DE CAPACITORES

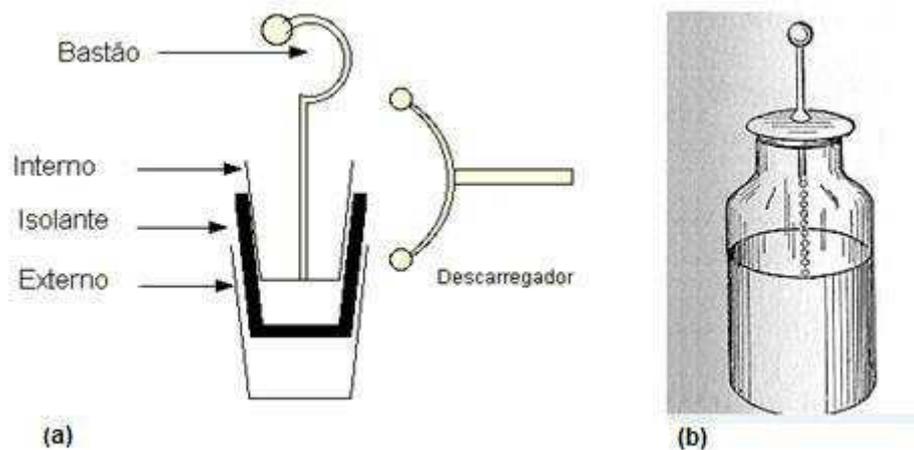
3.1.1 Definição e Histórico

Capacitor, também chamado de condensador é um dispositivo capaz de armazenar uma determinada quantidade de energia em um campo elétrico (FILHO,2013).

Segundo Williams, o primeiro dispositivo inventado acidentalmente no ano de 1745 que foi capaz de armazenar energia elétrica é conhecido garrafa de Leiden (Figura 1), desenvolvida pelo professor Pieter van Musschenbroek da universidade de Leiden na Holanda

A jarra de Leiden, o dispositivo original era composto por uma jarra de vidro com água no seu interior com uma rolha perfurada por uma haste metálica que ficava em contato com o líquido. Quando a haste é colocada em contato com uma máquina eletrostática uma grande quantidade de cargas elétricas se acumula nas paredes da garrafa.

Figura 1: Garrafa de Leiden. (a) esquema da garrafa de Leiden (b) garrafa de Leiden



Fonte: Adaptado da Internet,2015 (<http://www.geocities.ws/saladefisica5/leituras/leyden.html>).

Daniel Gralath foi o primeiro a combinar várias jarras em paralelo para aumentar a capacidade de armazenamento de cargas. Benjamim Franklin mostrou que a carga estava armazenada no vidro e não na água. Adotou o nome de “bateria”, que

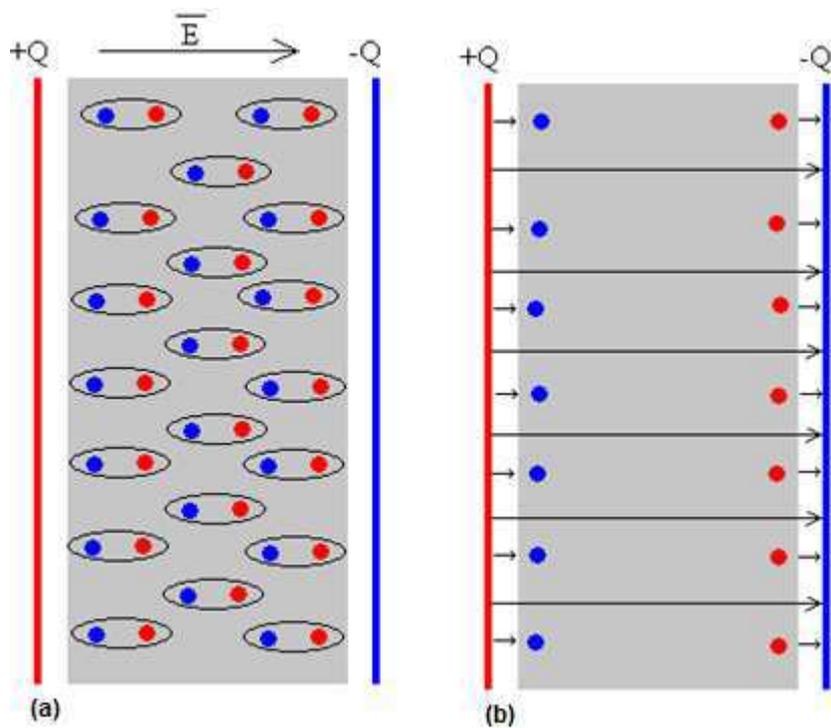
posteriormente foi aplicado ao aglomerado de células eletroquímicas (FRANKLIN,1748).

3.1.2 Visão Geral

Os formatos típicos consistem em dois eletrodos ou placas que armazenam cargas oposta. Estas duas placas são condutoras separadas por um isolante ou dielétrico, a carga é armazenada na superfície das placas com o dielétrico. A carga total no dispositivo é sempre zero.

Quando uma diferença de potencial é aplicada as placas de um capacitor simples surge um campo elétrico entre elas. Esses fenômenos podem ser observados na Figura 2.

Figura 2: Formação dos dipolos (a) e campo elétrico no interior do capacitor (b).



Fonte: Retirado da Internet, 2015

(http://200.17.141.35/egsantana/electromagnet/campo_eletrico/dielétrico/dielétrico.htm).

$$V = E \cdot d$$

(1)

A capacitância é a grandeza escalar determinada pela quantidade energia que pode ser acumulada em si por determinada tensão e pela quantidade de corrente que atravessa o capacitor numa determina frequência.

$$C = \frac{Q}{V} (F) \quad (2)$$

A capacitância de um capacitor de placas paralelas constituído de dois eletrodos planos de tamanhos iguais separados por uma distância d é:

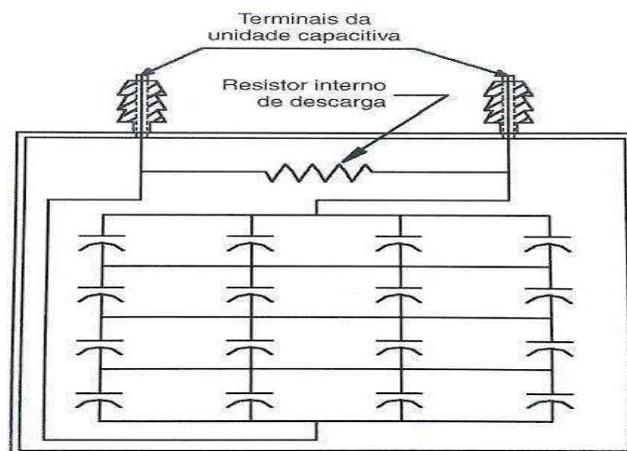
$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_a \frac{A}{d} \quad (3)$$

Onde ε_0 é a permissividade elétrica do vácuo e ε_a é a permissividade do dielétrico.

Dielétrico é um isolante elétrico que, sob ação de um campo exterior acima do limite da sua rigidez dielétrica, permite a passagem de corrente. As unidades capacitivas atualmente são constituídas de uma fina camada de filme de polipropileno metalizado a zinco com dielétrico seco (FILHO,2013).

Quando a tensão é retirada dos terminais de um capacitor, a carga elétrica armazenada precisa ser drenada, para que a tensão resultante seja eliminada evitando situações de risco. Para tanto é inserido entre seus terminais um resistor com finalidade de transformar em perda por efeito Joule a energia armazenada no dielétrico reduzindo a 5 V o nível de tensão. Este dispositivo pode ser instalado interna ou externamente sendo mais comum o primeiro caso (FILHO, 2013).

Figura 3: Representação interna de arranjo de uma unidade.



Fonte: (Filho, 2013).

A potência nominal de um capacitor é aquela absorvida do sistema quando este está submetido a tensão e frequência nominais a uma temperatura ambiente não superior a 20°C (ABNT).

Conhecida como potência nominal do capacitor pode ser facilmente calculada por:

$$C = \frac{Qc}{2 * \pi * f * Vn^2} \quad (4)$$

Os isolantes sólidos e líquidos de impregnação que constituem os dielétricos dos capacitores apresentam constante dielétrica variável com a temperatura ambiente e interna devido as perdas na parte viva. Quanto maior for a temperatura menor é a constante dielétrica influenciando na capacitância e potência capacitiva absorvida (FILHO,2013).

Segundo Manual Técnico Capacitores de Potência: “máxima tensão de operação prevista para capacitores em derivação é de 110% de sua tensão nominal, incluindo eventuais harmônicas, durante um intervalo de 12 horas em um período de 24 horas”.

As máximas tensões que podem ser submetidas segundo a IEC 831/1:

- ✓ 1,0 . Vn Duração Contínua – Maior valor médio durante qualquer período de energização do Banco.
- ✓ 1,1 . Vn Duração de 8 h a cada 24 h de operação (não contínuo) – Flutuações do sistema.
- ✓ 1,15 . Vn Duração de 30 min a cada 24 h de operação (não contínuo) – Flutuações do sistema.
- ✓ 1,20 . Vn Duração de 5 min (200 vezes durante a vida do capacitor) – Tensão a carga leve.
- ✓ 1,30 . Vn Duração de 1 min (200 vezes durante a vida do capacitor).

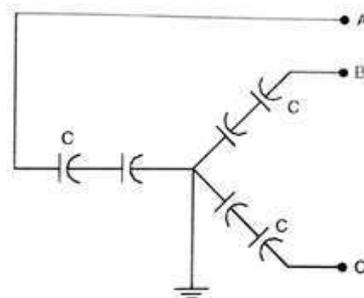
Os capacitores podem suportar uma sobrecarga de 135% da sua potência nominal com tensão não superior a 110% da sua tensão nominal. No que diz respeito a corrente, podem operar continuamente com no máximo 180% da corrente nominal, em valor eficaz, a frequência nominal, considerando as eventuais harmônicas (FILHO, 2013).

3.2 TIPOS DE LIGAÇÕES DE BANCOS DE CAPACITORES

3.2.1 Configuração em Estrela Aterrada

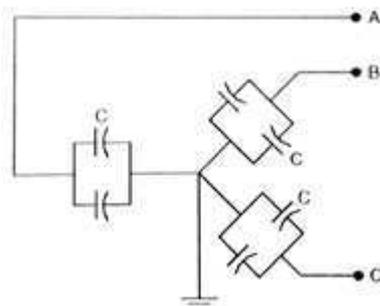
Na configuração em estrela aterrada, as células capacitivas podem ser ligadas tantas em série quanto em paralelo como pode ser visto nas Figuras 4 e 5.

Figura 4: Ligação em série: estrela aterrada



Fonte: (Filho, 2013).

Figura 5: Ligação em paralelo: estrela aterrada.



Fonte: (Filho, 2013).

Esse tipo de arranjo só deve ser empregado em sistemas cujo neutro seja efetivamente aterrado que é normalmente encontrado em subestações e instalações industriais pois fornece um caminho de baixa impedância para correntes de descargas atmosféricas (TLA).

Não se deve empregar esse tipo de arranjo em sistemas cujo ponto de neutro é isolado, pois se estaria criando um caminho de circulação de correntes de sequência zero, o que poderia gerar sobretensões na ocorrência de faltas fase-terra.

Algumas vantagens apresentadas por esse método são:

- ✓ Pode-se ter um maior número de capacitores com defeito antes que se atinja o limite de 10% de sobretensão;
- ✓ Custo de instalação inferior ao de outras configurações;
- ✓ Ocupação de uma área pequena;
- ✓ O banco é auto protegido contra correntes de descargas atmosféricas.

Algumas desvantagens apresentadas nesta configuração:

- ✓ As proteções devem ser dotadas de filtros com terceira harmônica;
- ✓ Pode haver interferências nos circuitos de comunicação devido ao fluxo de terceira harmônica para terra;
- ✓ A proteção de desequilíbrio de corrente por meio de relés sensíveis pode apresentar falhas.

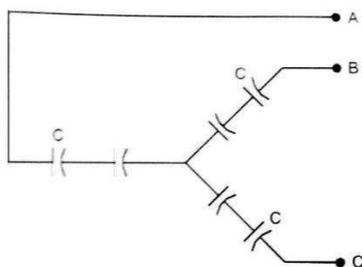
3.2.2 Configuração Estrela Isolada

A configuração estrela isolada pode ser usada tanto em sistemas com neutro aterrado quanto em sistemas com neutro isolado.

Por não possuírem ligação com a terra os bancos de capacitores em estrela isolada não permitem circulação de corrente de sequência zero, nos defeitos para terra. Conforme mostradas nas Figuras 6 e 7.

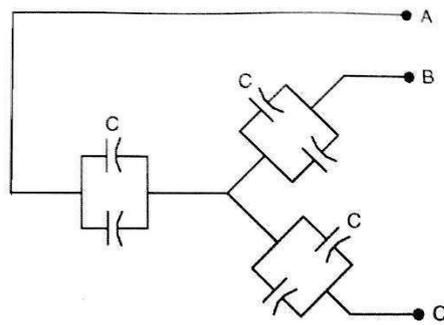
Como resultado de manobras ou pela eliminação de células defeituosas ou ainda com a operação dos seus respectivos fusíveis, os bancos de capacitores com essas configurações que permitem o potencial de neutro atinjam o potencial de fase, devendo-se nesse caso isolar o banco para a tensão de fase (FILHO,2013).

Figura 6: Ligação em série: estrela isolada.



Fonte: (Filho, 2013).

Figura 7: Ligação em paralelo: estrela isolada.



Fonte: (Filho, 2013).

Algumas vantagens podem ser observadas:

- ✓ Não há circulação de correntes harmônicas de terceira ordem;
- ✓ As correntes de defeito são limitadas pela impedância das fases não atingidas;
- ✓ Não provoca interferência nos circuitos de telecomunicações.

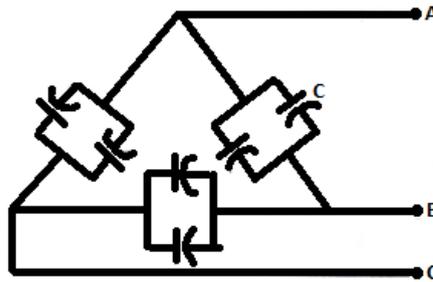
As desvantagens são:

- ✓ O neutro deve ser isolado para tensão de fase, para evitar surtos de manobra;
- ✓ Anti-econômico para bancos de tensão superior a 13,8 kV.

3.2.3 Configuração em Delta ou Triângulo

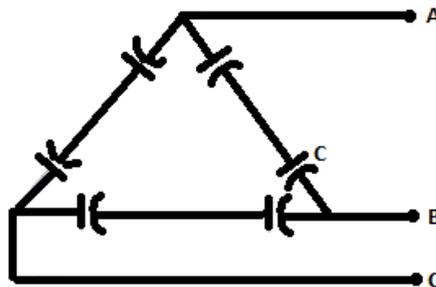
Esse tipo de ligação geralmente é utilizado no banco de capacitores ligados a rede secundária. Nas Figuras 8 e 9 são apresentados os esquemas básicos para células capacitivas em série e em paralelo.

Figura 8: Ligação em paralelo: banco delta.



Fonte: Adaptado de Filho, 2013

Figura 9: Ligação em série: banco delta.



Fonte: Adaptado de Filho, 2013.

Esse tipo de configuração não permite circulação de correntes de terceira harmônica. Essas componentes circulam em fase entre si, anulando-se.

Vantagens da ligação em triângulo:

- ✓ Não há circulação de correntes harmônicas;
- ✓ Conexão com redes elétricas com tensão inferior a 2,4 kV.

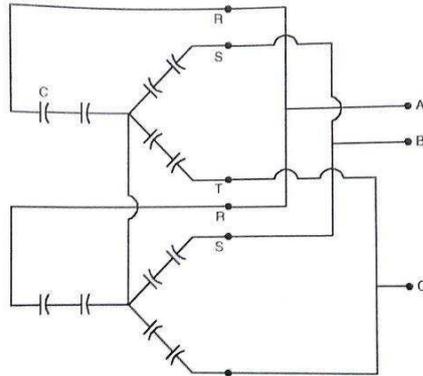
Desvantagens da ligação em delta:

- ✓ Custo elevado da proteção, especialmente quando é necessária proteção diferencial;
- ✓ Sensibilidade moderada dos relés de sobrecorrente.

3.2.4 Configuração em Dupla Estrela Isolada

A configuração em dupla estrela isolada é utilizada em bancos de grande capacidade. É mostrada na Figura 10 as ligações básicas com células em série.

Figura 10: Células em série: banco dupla estrela isolada.



Fonte: (Filho, 2013).

Outra característica dessa ligação é que pode - se dizer que o distúrbio do sistema não se transmite ao circuito de proteção do banco de capacitores. Não há vias de escoamento para correntes harmônicas de sequência zero e possuem custos relativamente baixos (TLA).

Algumas vantagens demonstradas nesse método:

- ✓ Não há circulação de correntes harmônicas de terceira ordem;
- ✓ Banco de baixo custo.

Desvantagens do arranjo dupla estrela isolada:

- ✓ O neutro deve ter o mesmo nível de isolamento do sistema;
- ✓ É necessário dispor de área para instalação do banco comparado a outros esquemas;
- ✓ Uso de células capacitivas em quantidade superior à o de outros esquemas para satisfazer ao número mínimo de células capacitivas em paralelo.

3.3 DIMENSIONAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES

A potência total de um banco de capacitores, independentemente do nível de tensão do sistema, é ditada pela potência reativa determinada em projeto. Porém, o arranjo e o número de células capacitivas formando grupos correspondentes devem obedecer a determinadas precauções.

Um número reduzido de grupos de capacitores em série por fase ou um número reduzido de capacitores em paralelo por grupo e por fase pode implicar em sobretensões quando da eliminação de uma ou mais células do grupo pela atuação do fusível correspondente.

3.4 SOBRETENSÕES DE MANOBRA

Para Araújo e Neves (2005) “as sobretensões podem ser definidas como tensões transitórias variáveis com o tempo cujo valor máximo é superior ao valor de crista das tensões de operação do sistema[...]”

É a sobretensão fase-terra ou entre fases, em um dado ponto do sistema, devido a operação de um equipamento de manobra, cuja forma de onda para fins de coordenação de isolamento, é similar a onda de impulso de manobra utilizado para ensaio. (D’AJUZ, 1987 p.35-36)

Suas causas são operações de chaveamento que promovem mudanças bruscas na configuração do sistema, como curto-circuito, energização e desenergização em carga de elementos capacitivos e indutivos não lineares (GUERRA,2010).

As sobretensões de manobra têm sua origem através do chaveamento dos equipamentos de manobra, ou qualquer variação brusca da rede. São fenômenos transitórios eletromagnéticos impostos a tensão e frequência industrial. Sua ocorrência depende do número de faltas e operações do sistema e a magnitude é influenciada pela configuração e potência de curto-circuito. (D’AJUZ, 1987 p.73)

Como consequência ocorrem transferências abruptas de energia entre campos elétricos e magnéticos, resultando em sobretensões oscilatórias de alguns kHz, forte amortecimento, e valores de pico máximo de até 4 pu. Acima de 345 kV surtos de manobra causam solicitações mais severas que surtos atmosféricos (GUERRA,2010).

Uma característica importante das sobretensões de manobra é que para determinada manobra podem-se obter diferentes valores de sobretensão, uma vez que não dependem unicamente da dispersão no instante do fechamento do disjuntor como também do instante da onda de tensão em que ocorreu.

3.5 BANCO DE CAPACITORES

3.5.1 Transitório de energização

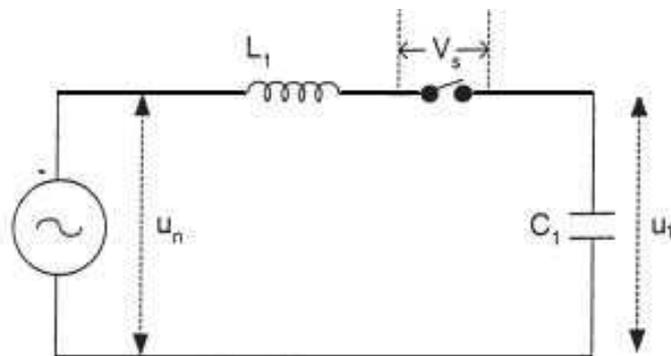
A energização de um banco de capacitores pode ocorrer no pico da onda de tensão, na pior condição. O capacitor que está sendo energizado encontra-se inicialmente descarregado. Nessa situação, no instante do fechamento, o capacitor comporta-se como um curto-circuito. Carrega-se com um valor igual ao de pico da tensão de alimentação. A queda de tensão e o transitório são função da impedância da fonte e do barramento (BARBOSA, 1989).

A tensão então vai se recuperando através de oscilações de alta frequência. No início do transitório, a tensão pode chegar a 2 pu da tensão do barramento. A mudança de degrau inicial e as oscilações subsequentes são importantes, pois, podem se propagar no sistema e se acoplar entre transformadores e serem amplificadas. No caso de ressonância, a frequência predominante do transitório pode coincidir com a frequência natural do transformador e isso pode amplificar a tensão transitória causando falha de isolamento (DAS, 2005).

A oscilação de alta frequência demora alguns ciclos antes de amortecerem. O amortecimento é função das perdas do sistema.

Na Figura 11 é apresentado um circuito no qual um capacitor simples está sendo chaveado na barra. Considerando que as perdas no circuito são desprezadas e que o banco é energizado no instante que a tensão da fonte é máxima.

Figura 11: Circuito equivalente de um banco de capacitor sendo chaveado.



Fonte: (Das,2005)

Do circuito pode-se dizer que a partir do fechamento da chave uma corrente $i(t)$ irá circular, e pela lei de Kirchoff das tensões temos que:

$$V = L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \quad (5)$$

A solução no domínio do tempo se torna complexa e o que se faz é passar para o domínio da frequência usando a transformada de Laplace que transforma equações diferenciais em equações algébricas como segue:

$$\sqrt{2} * \frac{E}{s} = sLI(s) + \frac{1}{sC} * I(s) \quad (6)$$

Isolando-se $I(s)$ na equação (6):

$$I(s) = \frac{\frac{E}{s} * \sqrt{2}}{Ls + \frac{1}{sC}} = \frac{\frac{E}{s} * \sqrt{2}}{s^2LC + 1} * sC = \frac{\sqrt{2} * E * C}{LC} = \sqrt{2} * \frac{E}{L} * \frac{1}{s^2 + \frac{1}{LC}} \quad (7)$$

Aplicando a transformada inversa temos:

$$i(t) = \frac{\sqrt{2} * E * \sqrt{LC} * \sin(\omega_0 t)}{L} \quad (8)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (9)$$

Assim, portanto podemos escrever:

$$i(t) = \frac{\sqrt{2} * E * \sin(\omega_0 t)}{\omega_0 L} \quad (10)$$

Manipulando mais um pouco obtemos:

$$i(t) = \frac{\sqrt{2} * E * \sin(\frac{1}{\sqrt{LC}} * t)}{\frac{1}{\sqrt{LC}} * L} = \frac{\sqrt{2} * E * \sqrt{LC} * \sin(\frac{1}{\sqrt{LC}} * t)}{\sqrt{L^2}} = \sqrt{2} * E * \sqrt{\frac{C}{L}} * \sin(\frac{1}{\sqrt{LC}} * t) \quad (11)$$

Para determinar o valor máximo da corrente ou corrente de *inrush* é necessário considerar o valor do seno sendo 1:

$$imaxpico(t) = \sqrt{2} * \sqrt{\frac{C}{L}} * E \quad (12)$$

Ou ainda para o caso de as grandezas não estarem em valores por fase a fórmula pode ser usada:

$$i_{maxpico}(t) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * \sqrt{\frac{C}{L}} * E_{linha} \quad (13)$$

A frequência durante o chaveamento do banco pode ser calculada por:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} * C_{eq}}} \text{ e } \omega_0 = 2 * \pi * f \quad (14)$$

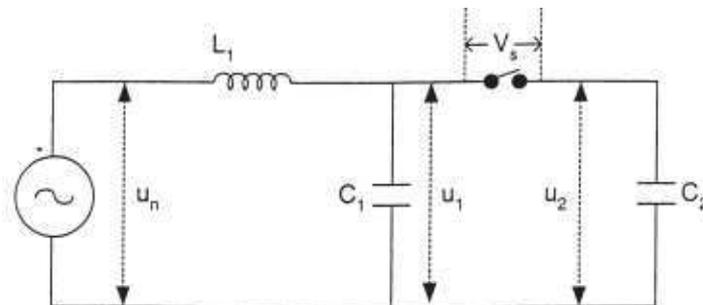
$$f = \frac{1}{2\pi * \sqrt{L_{eq} * C_{eq}}} \quad (15)$$

Assim, então, alguma ideia do transitório de chaveamento de capacitores pode ser obtido e calculado a partir de equações simples (MARDEGAN, 2011).

3.5.2 Interrupção de corrente capacitiva

No capacitor a corrente é defasada de 90° da tensão, o disjuntor interrompe a corrente quando ocorre a passagem pelo zero da mesma. Com referência a Figura 12 a tensão no lado da alimentação oscila a uma frequência determinada pela indutância e capacitância do lado da alimentação e a diferença entre as duas tensões aparece entre os polos do disjuntor. Esta tensão poder mais que o dobro da tensão nominal (DAS, 2005).

Figura 12: Interrupção de corrente capacitiva.



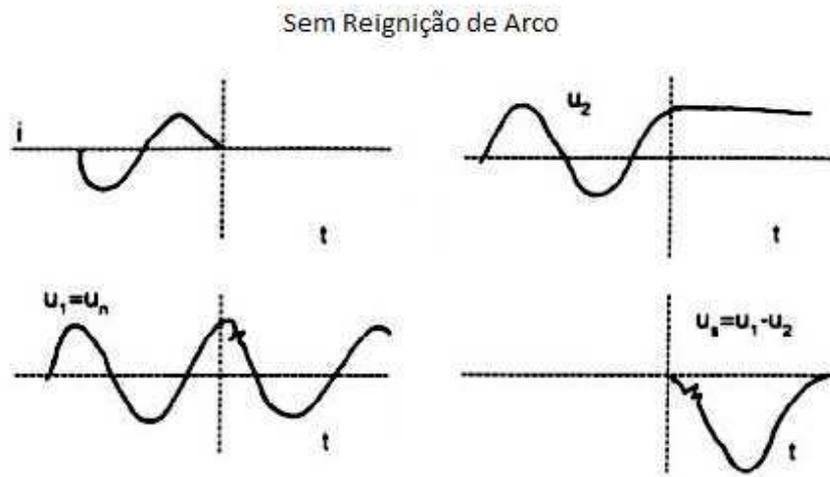
Fonte: (Das, 2005).

Se o espaço entre o pólos do disjuntor não recuperou o suficiente a rigidez dielétrica, um arco ponte pode se estabelecer entre os contatos. O capacitor começa a ser desconectado e reconectado ao sistema de alimentação.

Isso resulta em uma frequência mais elevadas do que a frequência natural do sistema de alimentação a ser imposta a tensão do sistema em 60 Hz. As correntes podem ser interrompidas na passagem pelo zero no processo de reignição. Assim uma tensão de alta frequência, na sua crista é aprisionada nos capacitores. Assim sendo, meio ciclo depois da primeira reignição podem ocorrer a segunda e a terceira (DAS, 2005).

Na Figura 13 e 14 é apresentado graficamente as situações de interrupção sem e com reacendimento do arco.

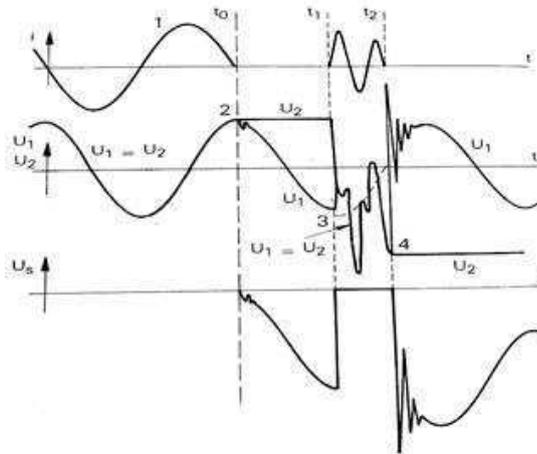
Figura 13: Interrupção de corrente capacitiva sem reignição de arco.



Fonte: (Das, 2005)

No caso de ocorrer a interrupção sem reignição, a corrente é interrompida na passagem pelo zero a tensão do capacitor C_1 toma o valor da fonte em regime. O valor de tensão do capacitor C_2 retirado do circuito fica com tensão constante do momento de chaveamento, enquanto a tensão na chave assume o valor da diferença entre as tensões nos capacitores.

Figura 14: Interrupção de corrente capacitiva com reignição de arco.



Fonte: (D'Ajuz, 1987).

No entanto, o caso onde há a reignição de arco o processo é mais complexo. Quando os contatos do disjuntor se abrem em torno do ponto 1 se estabelece um arco entre os contatos do disjuntor e a corrente continua a fluir até sua passagem pelo zero, então o arco perde sua condutividade.

No ponto 2 quando a corrente é efetivamente interrompida, ocorre uma pequena oscilação na tensão devido à equalização de energia entre a indutância da fonte L e as capacitâncias parasitas C_1 . Neste caso não ocorre reignição pois a tensão através do disjuntor é pequena.

Quando a tensão da fonte muda de polaridade, a tensão de reestabelecimento do disjuntor aumenta e quando atinge o valor de 2 pu, se o disjuntor não tiver obtido suficiente rigidez dielétrica para suportar a tensão entre seus contatos ocorrerá a reignição como indica o ponto 3.

Com base no circuito da figura 2 pode-se determinar a expressão de $i(t)$ a seguir:

$$L \frac{di}{dt} + U_2 = Un * \cos \omega t \quad (16)$$

Sabe-se que:

$$U_2 = U_2(0) + \frac{1}{C_2} \int idt \quad (17)$$

Substituindo a equação y em x temos:

$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_2} \int i dt = Un - U_2(0) \quad (18)$$

Aplicando a Transformada de Laplace temos que:

$$sLI(s) - LI(0) + \frac{I(s)}{sC_2} = \frac{Un - U_2}{s} \quad (19)$$

Considerando $I(0) = 0$, já que a corrente na hora da abertura é zero, e como $\omega_0^2 = \frac{1}{\sqrt{LC_2}}$ a expressão fica:

$$I(s) = \frac{Un - U_2}{L(s^2 + \omega_0^2)} \quad (20)$$

Aplicando a transformada inversa:

$$i(t) = \frac{Un - U_2}{Z_0} * \sin \omega_0 t \quad (21)$$

Onde:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_2}} \quad (22)$$

Quando a tensão no capacitor atingir seu valor máximo no ponto 4, a corrente de descarga transitória estará passando pelo zero e o arco se extinguirá novamente, deixando o capacitor carregado em uma tensão mais alta. Em suma, esse processo teoricamente poderia continuar indefinidamente, mas na prática perdas, capacitâncias parasitas e falha de isolamento limitam está sobretensão (D'AJUZ, 1987).

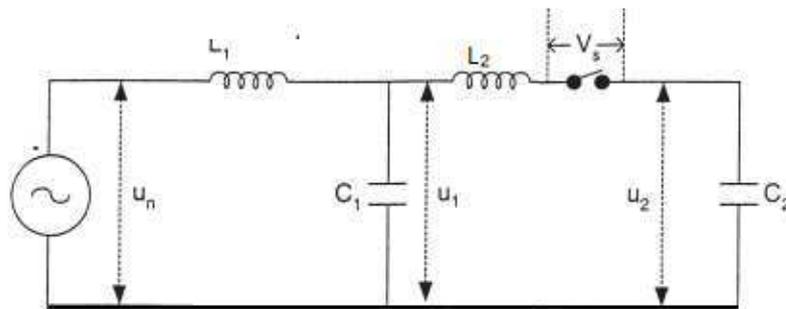
Avanços nos materiais de contato e em tecnologia de interrupção a vácuo reduziu as reignições dos anos iniciais e com isso também as correntes parasitas. No entanto não se pode dizer que as reignições são eliminadas totalmente. A aplicação de para-raios fornece maior segurança contra sobretensões e consequentes falhas de isolamento (DAS, 2005).

3.5.3 Energização *back-to-back*

O chaveamento chamado de *back-to-back* envolve a energização de um banco de capacitores no mesmo barramento quando outro banco presente já está energizado. A corrente transitória, nesse caso, consiste principalmente de um intercâmbio de corrente entre os bancos e a corrente fornecida pelo sistema é desprezível. Isso só é válido se a impedância da fonte for muito maior que entre os bancos $L_1 \gg L_2$ (DAS, 2005).

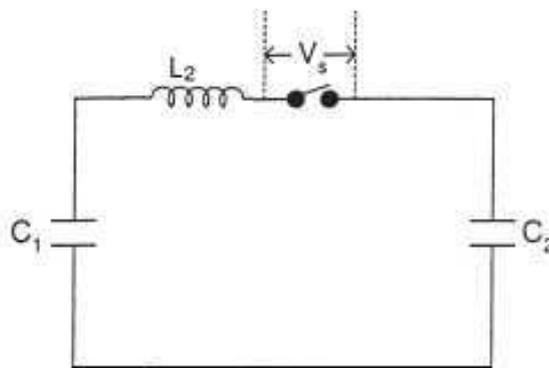
Assim o circuito equivalente se torna:

Figura 15: Energização *back-to-back*.



Fonte: (Das, 2005)

Figura 16: Energização *back-to-back* simplificado.



Fonte: (Das, 2005)

A corrente de chaveamento e a frequência podem ser calculadas como segue:

$$i_{m\acute{a}x}(t) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * E * \sqrt{\frac{C_{eq}}{L_2}} * \sin\left(\frac{1}{\sqrt{LC}} * t\right) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * E * \sqrt{\frac{C_1 * C_2}{L_2 * (C_1 + C_2)}} * \sin\left(\frac{1}{\sqrt{LC}} * t\right) \quad (23)$$

$$i_{maxpico} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * E * \sqrt{\frac{C1 * C2}{L2 * (C1 + C2)}} \quad (24)$$

$$f = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{\frac{L2 * C1 * C2}{(C1 + C2)}}} \quad (25)$$

Na tabela 1 são apresentas as indutâncias típicas dos bancos e dos barramentos:

Tabela 1: Indutâncias típicas de Barramentos e Bancos

Tabela1- Indutância Típica de Barramento e Bancos		
Tensão (kV)	Indutância da Barra (mH/m)	Indutância típica dos Capacitores (mF)
<15,5	0,7021	5
38,0	0,7808	5
48,3	0,8399	10
72,5	0,8399	10
121,0	0,8563	10
145,0	0,8563	10
169,0	0,8793	10
242,5	0,9350	10

Fonte: (Mardegan.,2011).

Como a indutância L_2 é muito baixa, a corrente de *inrush* poderá exceder o valor da corrente de curto-circuito no local dos capacitores, alcançando 20 a 250 vezes a corrente nominal do banco. Normalmente a corrente de *inrush* máxima suportada por um banco em regime transitório é 100 vezes sua corrente nominal (GUERRA, 2010).

3.5.4 Controle de chaveamento em banco de capacitores

O chaveamento transitório de bancos de capacitores pode controlado ser por alguns métodos como:

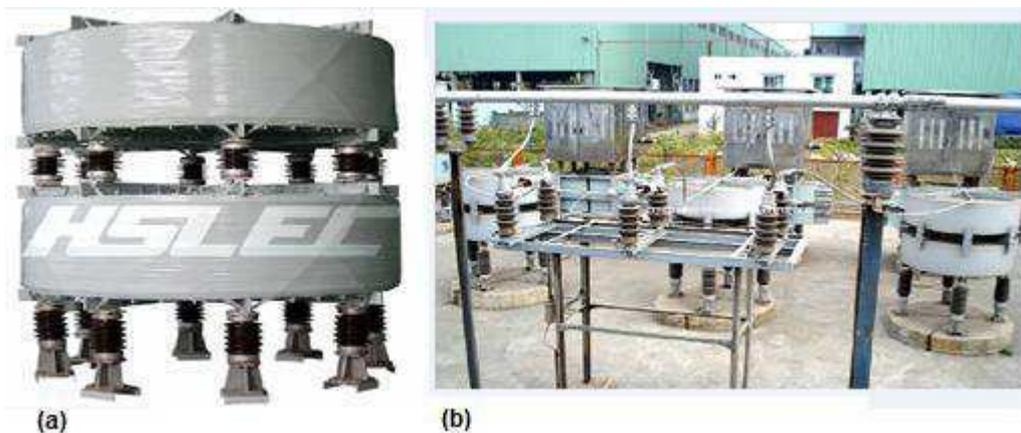
- Reator série limitar de *inrush*;
- Resistência de chaveamento (Resistor de pré-inserção);
- Pontos de onda de chaveamento (Chaveamento Controlado);
- Aplicação de para-raios;
- Dividir o banco capacitores em tamanhos menores (DAS, 2005).

3.5.4.1 Reator serie

A amplitude da corrente de *inrush* e da frequência bem como as obrigações dos dispositivos de chaveamento podem ser reduzidos. Faz-se necessário atentar para algumas observações.

É necessário ter cuidado com essa situação pois o reator vai sintonizar o capacitor a uma frequência. Quando harmônicos da carga estão presentes é precisa cautela para não sintonizar numa harmônica, caso contrário transformaria em filtros individuais o que requer informações sobrecarga dos capacitores (DAS, 2005).

Figura 17: Reator (a) e chaveamento de Reator (b).



Fonte: Adaptado da Internet, 2015 (<http://www.hqualit.com.br/hnit/projeto-de-instalacao-de-reatores-limitadores-de-corrente>).

3.2.4.2 Resistência de Chaveamento

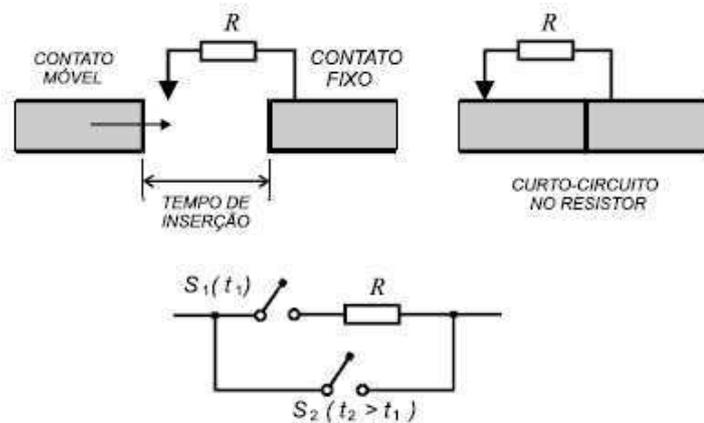
Na tecnologia de interrupção de corrente alternada, o uso de resistores de pré-inserção – instalados nas câmaras dos disjuntores para reduzir as sobretensões durante o fechamento bem como frequência de tensão transitória – é bem implementado (DAS,2005).

Podemos mostrar que com resistor de pré-inserção a frequência do transitório é dada por:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{(1/LC - 1/4(R/L - 1/\tau C)^2)} \quad (26)$$

Onde τ é o resistor inserido e R e L são a resistência e a indutância do sistema e C a capacitância do capacitor a ser chaveado.

Figura 18: Representação do disjuntor com resistor de pré-inserção



Fonte: (Guerra,2010).

Em sistemas de potência a resistência geralmente é muito menor que a reatância. Se R do sistema é ignorado, então a partir de (26) a frequência do transitório é reduzida a zero para um resistor de pré-inserção de valor:

$$\tau = \frac{1}{2} * \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (27)$$

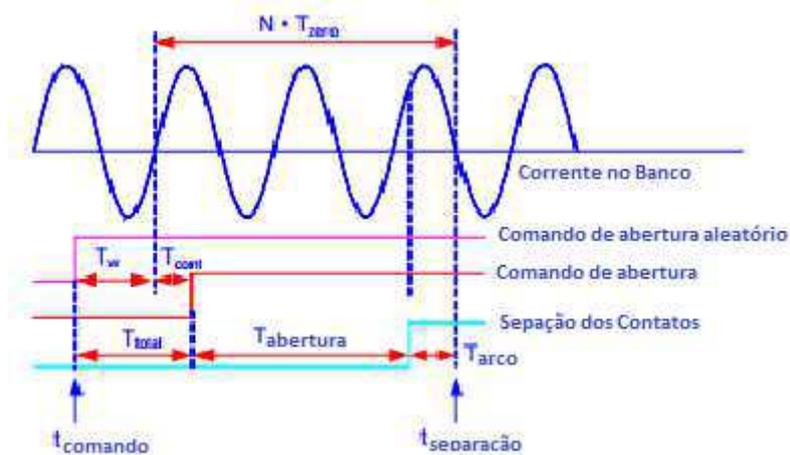
3.2.4.3 Ponto de onda de Chaveamento

Comutação controlada é uma técnica que usa um dispositivo inteligente, isto é, um relé moderno ou um controlador, para controlar o tempo de abertura e fechamento independente dos pólos do disjuntor com relação ao ângulo de fase da tensão de referência ou sinal de corrente elétrica.

A operação de abertura controlada refere-se a controlar os contatos de cada pólo do disjuntor com respeito ao ângulo de fase da corrente. Controlando o tempo de separação dos contatos determinamos o tempo de arco para evitar falhas nos disjuntores e minimizar estresses e perturbações no sistema de potência (GOLDSWORTHY *et al.*,2008).

A Figura 19 representa em o controle de abertura em termos de sequência:

Figura 19: Sequência de abertura controlada.



Fonte: (GOLDSWORTHY *et al.*,2008)

O comando de controle é emitido aleatoriamente em relação ao ângulo de fase do sinal de referência no instante $t_{comando}$. O comando de abertura é retardado pelo controlador t_w o qual é somado ao tempo de sincronização t_{cont} para ter como resultado t_{total} .

A partir de então é que de fato começa a abertura mecânica do disjuntor como representado na figura 19 é bem mais longo que os demais tempos. Em seguida se inicia o tempo de arco e logo depois os contatos estão separados.

Os benefícios do chaveamento controlado incluem melhoria do desempenho de disjuntores, transitório de chaveamento reduzido, redução de custos de manutenção, aumento da vida útil dos equipamentos e melhoria da qualidade de energia (GOLDSWORTHY *et al.*, 2008).

Capacitores são os dispositivos mais comumente chaveados em sistemas de potência. Para entregar tensão constante devem ser chaveados várias vezes ao dia. Cada operação resulta em transitório em uma ou mais fases. O rápido colapso de tensão e corrente insere harmônicos na rede.

O fechamento controlado pode mitigar a tensão e a corrente do transitório de energização. Fechar com sucesso um disjuntor a uma tensão zero no barramento é difícil para um disjuntor requer tempos de fechamento consistentes e uma taxa íngreme de decadência da rigidez dielétrica (GOLDSWORTHY *et al.*, 2008).

3.2.4.4 Para-Raios

Para-raios do tipo carboneto de silício em serie com resistores não lineares podem ser expostos a altas tensões ao proteger bancos de capacitores. Se um transiente aciona o para-raios o capacitor descarrega completamente e a energia é dissipada no equipamento (DAS, 2005).

Os parâmetros que devem ser considerados são:

- ✓ Tensão nominal do sistema;
- ✓ Sistema de aterramento;
- ✓ Amplitude e duração das sobretensões;
- ✓ Energia dissipada através do para-raios.

4. METODOLOGIA

4.1 Materiais

- *Software ATP Draw*

4.2 Métodos

As simulações ocorreram de modo a seguir uma sequência definida: montagem do circuito, configuração dos elementos, configuração dos parâmetros de simulação, tratamento e análise dos resultados.

A montagem do circuito pode ser realizada buscando os componentes necessários nas bibliotecas disponíveis e em seguida configurando cada elemento utilizado com parâmetros de interesse para cada situação a ser simulada.

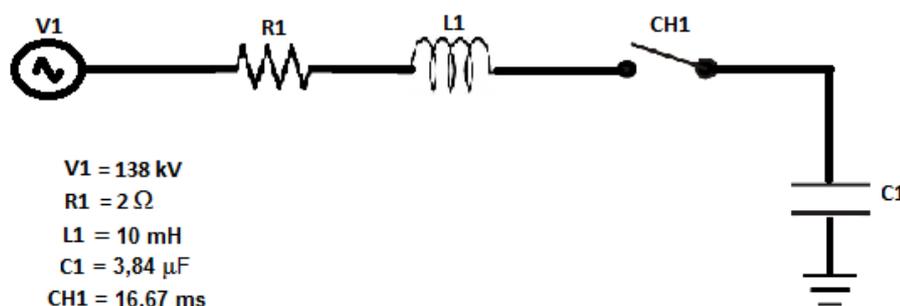
A partir de então, voltamos nossa atenção para a escolha de parâmetros adequados de simulação, para que o *software* pudesse dar a solução numérica com maior correção possível. De modo geral, foram feitas as escolhas de encontrar uma solução de regime, encontrar soluções no domínio do tempo com passo de simulação de 1 μ s, tempo de simulação variando entre 80 a 150 ms, com método de integração numérica trapezoidal e Euler regressivo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultado devemos comparar os valores obtidos nas simulações com os resultados teóricos esperados e discutir as possíveis causas do que for percebido disso.

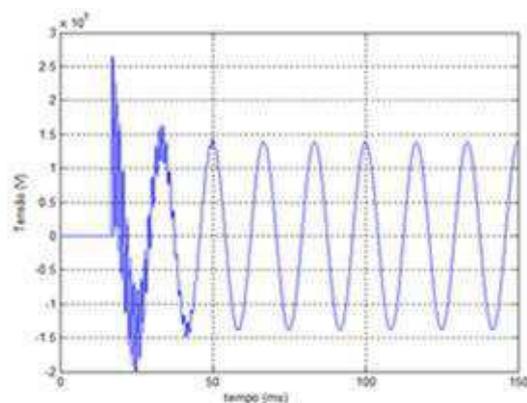
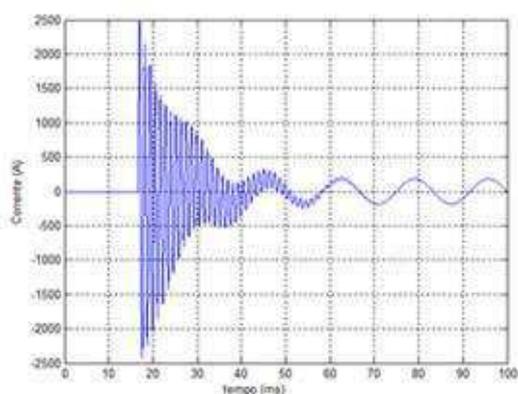
A abertura da chave é feita no pior caso, ou seja, ponto de máximo da tensão de alimentação e assim acontece para os demais circuitos salvo quando dito. O circuito mostrado na Figura 20 é um exemplo de energização de um banco isolado de capacitores com tensão nominal de 138 kV e potência reativa de 25 Mvar.

Figura 20: Circuito trifásico simulado para energização de banco de capacitores.



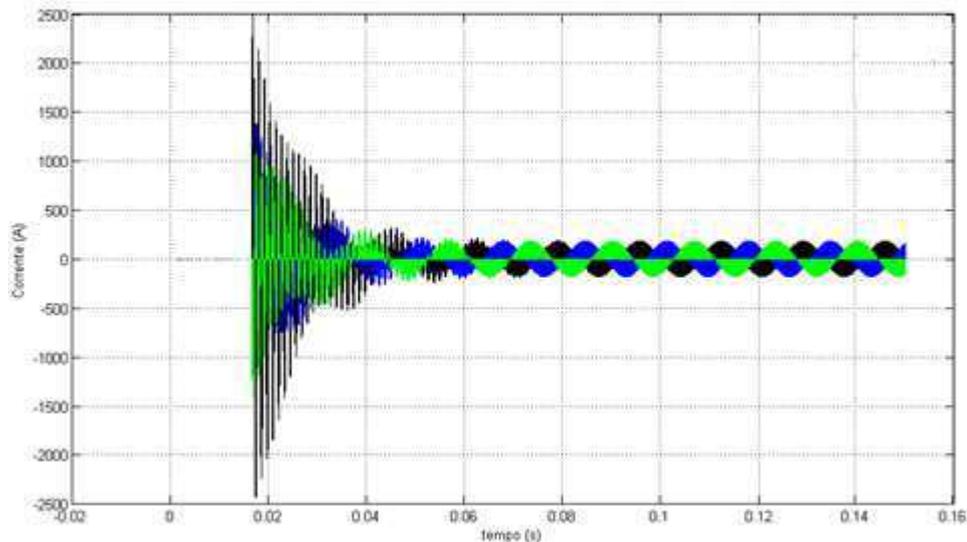
Os resultados obtidos desta simulação podem ser observados na Figura 21 e então comparando com a teoria e os valores calculados por meio das equações (13) e (15).

Figura 21: - Corrente (a) e Tensão Transitória de energização de banco isolado de capacitores (b).



Os valores calculados para corrente máxima de pico pela equação (13) e para a frequência transitória equação (15) são respectivamente 2102 A e 853 Hz. Os valores obtidos em simulação foram 2494 A e 848 Hz. No que diz respeito a tensão o valor de pico encontrado foi de 266 kV, como dito anteriormente esse surto pode alcançar até 2 pu da tensão nominal.

Figura 22: Corrente de Energização Trifásica de Banco Isolado de Capacitores.

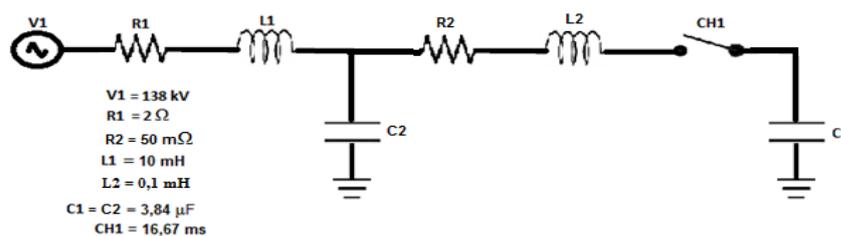


Como podemos observar os valores simulados e calculados estão bem próximos, com variação de 15% para corrente e de 1% para frequência. No que diz respeito a tensão o valor de pico da sobretensão foi de 1,92 pu, dentro do esperado para este caso.

Os resultados são bem aceitáveis do ponto de vista de engenharia, pois possuem desvios pequenos e isso significa que o modelo matemático que o *software* resolve é próximo a dedução algébrica usada para chegar as fórmulas (13) e (15).

Para a energização conhecida como *back to back* foi simulado o circuito mostrado na Figura 23, observando seus resultados e posteriormente analisando suas características.

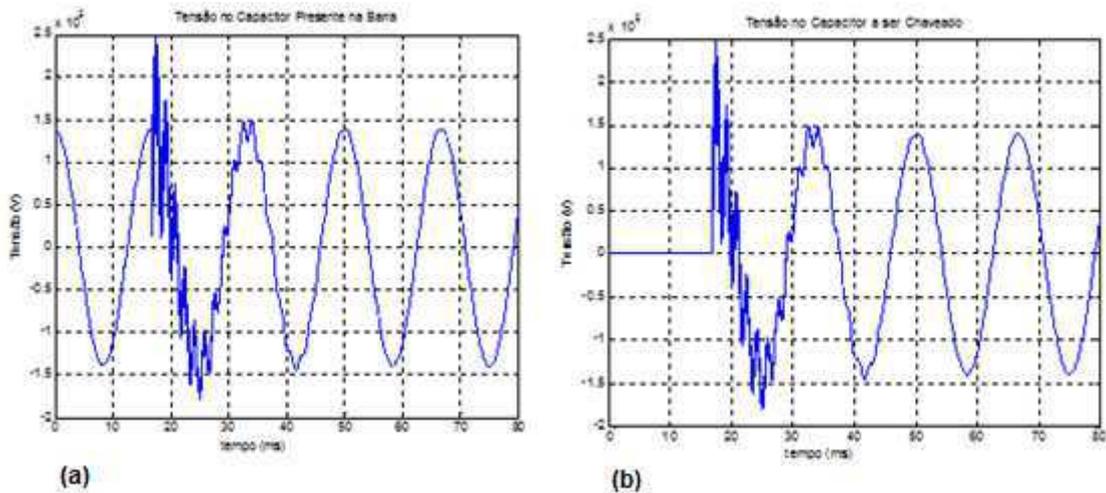
Figura 23: Circuito Trifásico para Energização *Back to Back*.



Os resultados podem ser observados nas Figuras 24,25 e 26 onde são mostradas as ondas de tensão e de corrente em uma das fases no capacitor que estava no banco e do que entra posteriormente e a corrente trifásica.

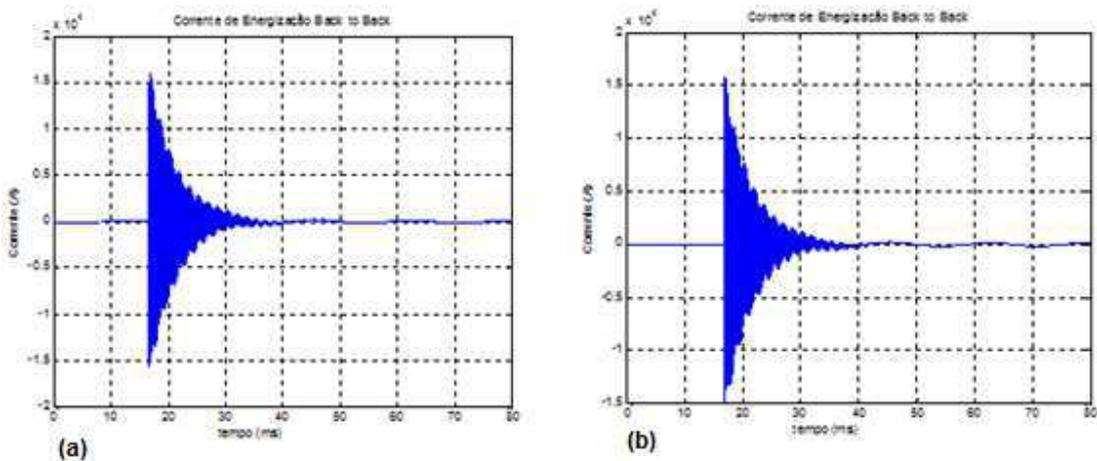
O transitório nos capacitores apresentou sobretensão de 1,79 pu em relação a tensão do barramento. Esses valores apesar de bastante altos, no entanto, estão dentro do máximo teórico que é de até 2 pu.

Figura 24: Tensão no Capacitor Energizado (a) e chaveado (b).



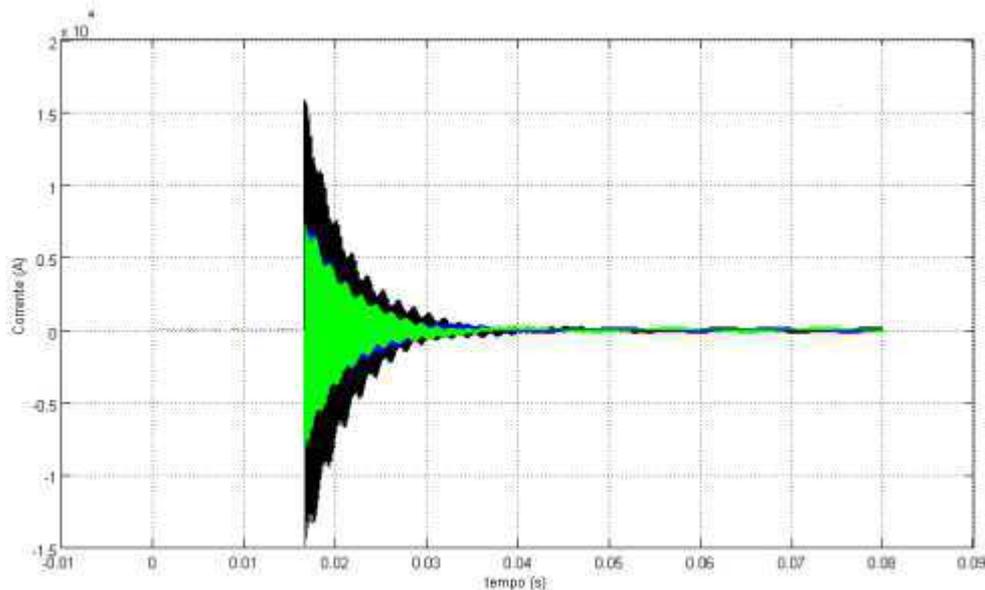
No que diz respeito ao transitório de corrente foi encontrado por meio de simulação um pico máximo de 15820 A e uma frequência de 11587 Hz. Já por meio das equações (20) e (21) os resultados obtidos foram de 14863 A e 12065 Hz. As formas de onda podem ser observadas na Figura 25.

Figura 25: Corrente de Energização *Back- to- Back* antes de ser chaveada (a) e chaveada (b).



Analisando os valores calculados e simulados obtivemos um desvio de 6% para a corrente e de 4% para a frequência. Percebemos que os resultados simulados e calculados estão convergindo para valores próximos ao esperado o que concerne nesta situação maior credibilidade as simulações realizadas.

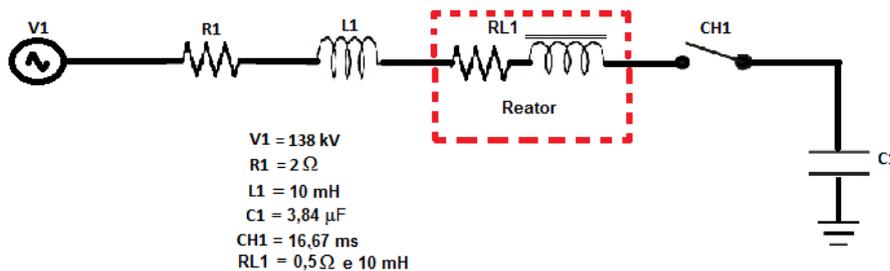
Figura 26: Corrente de Energização *Back- to- Back*



Para reduzir os efeitos dos transitórios alguns métodos anteriormente citados são utilizados e, portanto, necessitamos de simulações para termos dimensão dos efeitos e do grau de melhora que produzem.

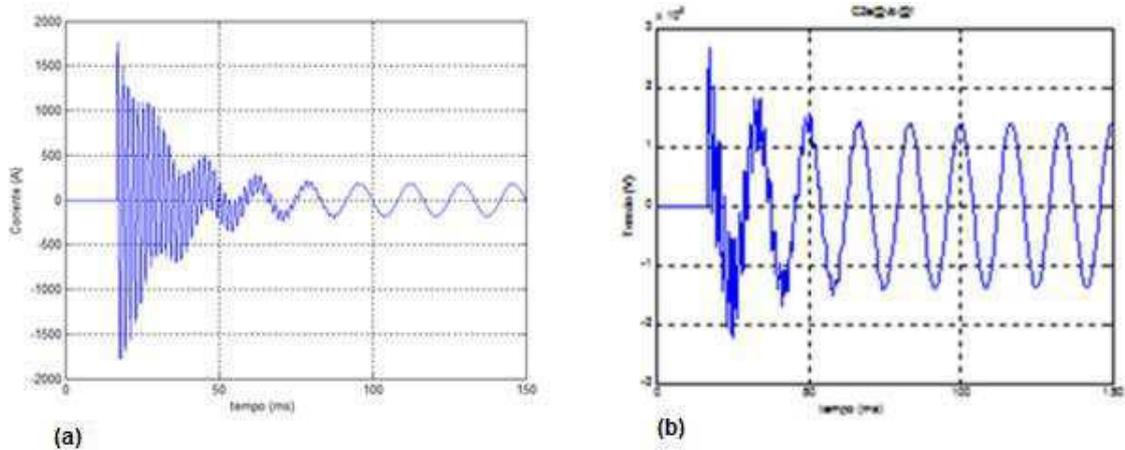
O primeiro método é do reator serie e usamos o circuito da Figura 20 modificando apenas com a inserção de um reator limitador de corrente como é mostrado o circuito da Figura 27.

Figura 27: Circuito Trifásico para Energização de banco de capacitores com Reator Limitador.



Os resultados desta simulação podem ser observados na Figura 28 e posteriormente comparados os resultados com a Figura 21.

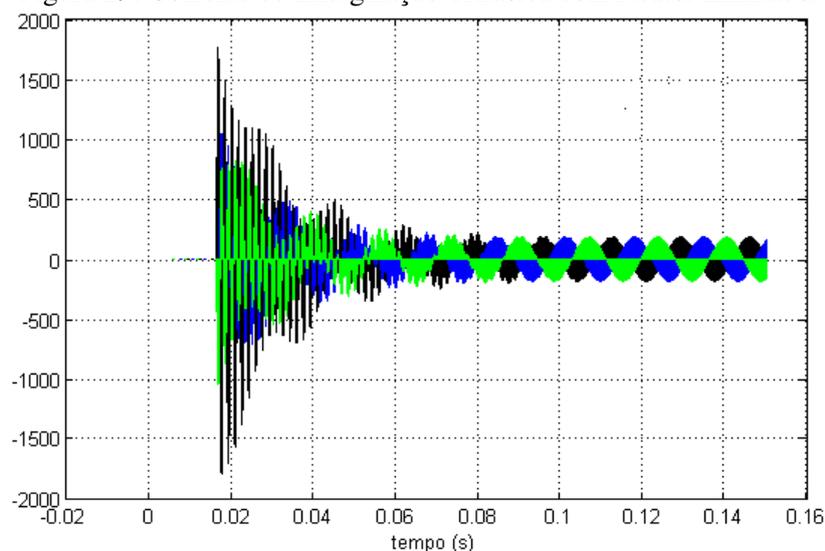
Figura 28: Corrente (a) e Tensão para energização com Reator Limitador (b).



A corrente de pico máxima do transitório neste caso é de 1764 A e a frequência é de 597 Hz com o valor da tensão transitória atingindo seu máximo em 265 kV.

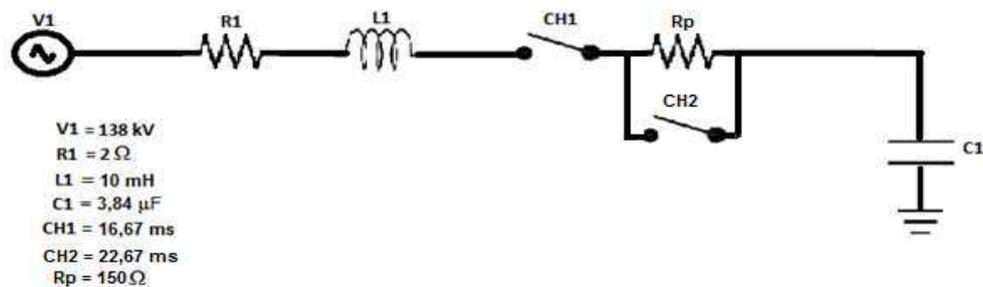
Por meio apenas da inserção do reator podemos verificar uma redução de 30% da corrente de *inrush* e de 30% da frequência do transitório, comparando os valores simulados, ao passo que a tensão transitória teve uma leve redução inferior a 1% no seu valor máximo de pico, porém ainda dentro do valor máximo previsto de até 2 pu.

Figura 29: Corrente de Energização Trifásica com Reator Limitador



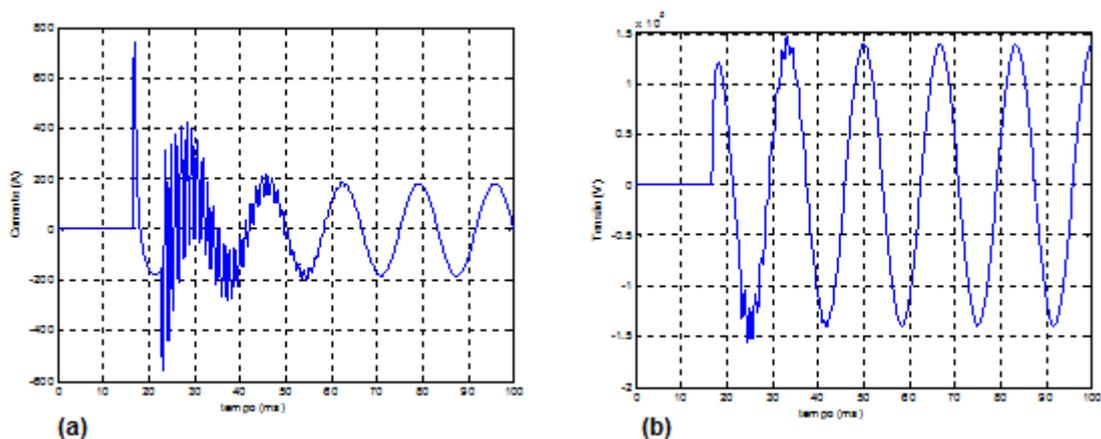
Outro método usado para diminuir o efeito do transitório é a instalação do resistor de pré-inserção como é mostrado no circuito da Figura 30.

Figura 30: Circuito Trifásico para Energização de banco de capacitores com Resistor de Pré-inserção.



Os resultados da simulação desse circuito podem são mostrados na Figura 31 e posteriormente comparados com a Figura 21.

Figura 31: Corrente e Tensão de Energização com Resistor de Pré-inserção.

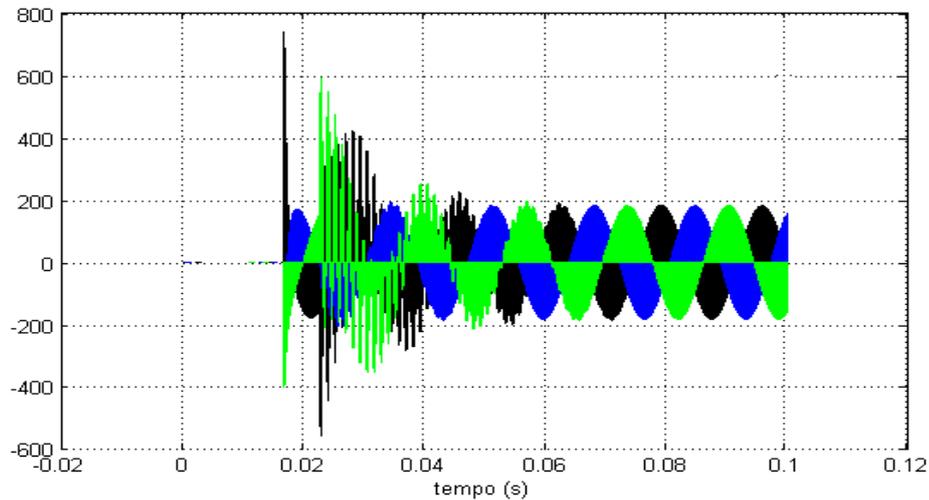


A corrente de pico máxima transitória é de 738 A e uma frequência 813 Hz com uma tensão transitória em torno de 1pu.

Com a presença do resistor de pré-inserção a corrente transitória teve uma redução de quase 70% e a frequência em 4% - com relação aos valores obtidos em simulação para o caso sem o método - com duração menor. E ainda por meio da equação (26) obtivemos um valor de 849 Hz com desvio de 5% entre valores calculados e simulados.

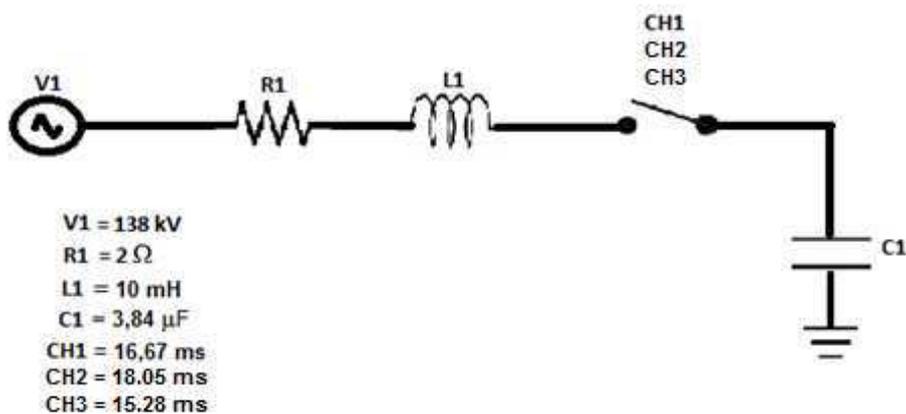
Quanto a tensão praticamente não houve pico de sobretensão transitória, o que vem a respaldar a efetividade deste método que tem por objetivo atenuar sobretensões de manobra.

Figura 32: Corrente Trifásica com Resistor de Pré-inserção.



O método do chaveamento controlado por sua vez pode ter seus efeitos reproduzidos por meio do controle de tempo do fechamento da chave que representa o disjuntor no circuito observado na Figura 33.

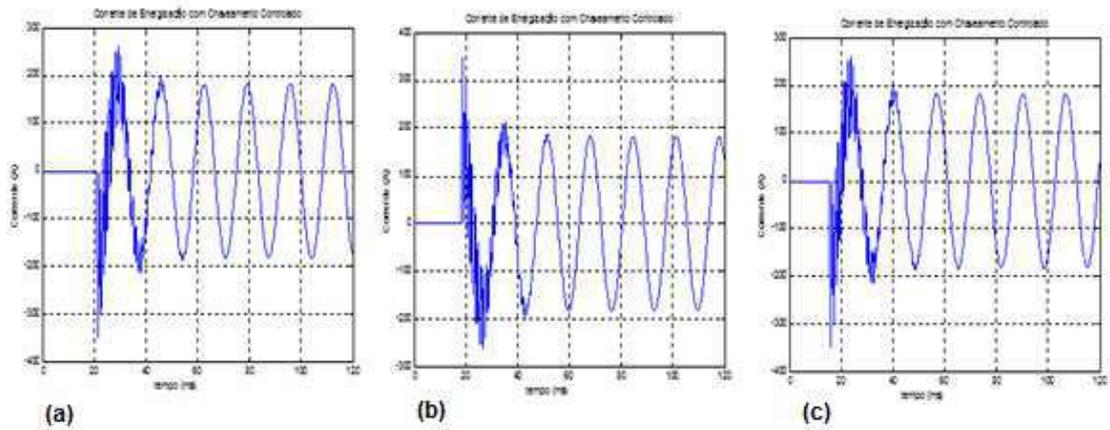
Figura 33: Circuito Trifásico para Chaveamento Controlado.



Os resultados para corrente em cada fase podem ser observados na Figura 34 e posteriormente comparados para se dimensionar a efetividade do método.

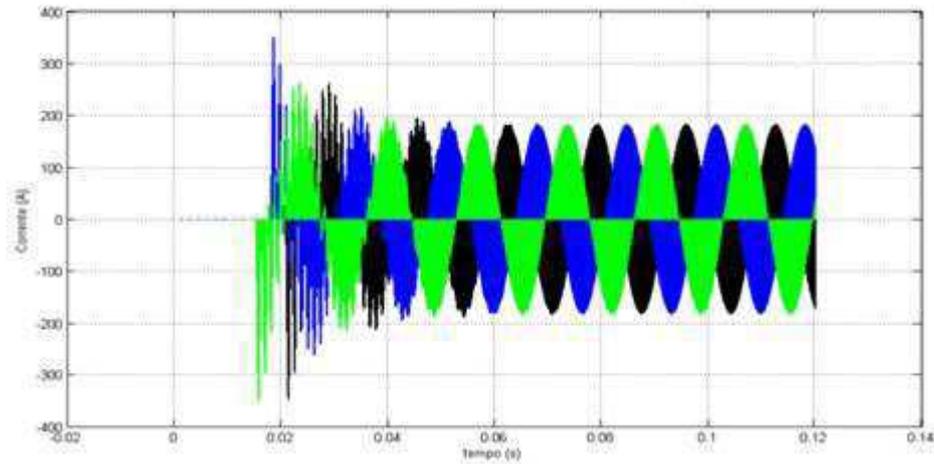
O pico de corrente transitória foi de 349 A muito menor se comparado aos 2236 A da energização direta no pico da onda de tensão. Isso representa cerca de 15% do valor obtido no pior caso, além de o transitório se extinguir muito mais rapidamente com o pico do *inrush* representando 1,91 da corrente nominal.

Figura 34: Corrente em cada fase chaveada A (a) B (b) e C (c).



Até então mostrou-se o método com mais efetividade demonstrada tendo em vista que a corrente transitória diminuiu consideravelmente e conseqüentemente seus efeitos nocivos ao sistema. Na Figura 35 é mostrada a corrente trifásica para este caso.

Figura 35: Corrente de Energização Trifásica com Chaveamento Controlado.



No que diz respeito às sobretensões transitórias praticamente não ocorreram, permanecendo por todo o tempo na tensão nominal do barramento, ou seja 1 pu.

6 CONCLUSÃO

O estudo de chaveamento de bancos em subestações é essencial para avaliação dos elevados valores de pico que podem surgir em regime transitório. Os resultados obtidos por simulação foram compatíveis com os obtidos a partir das expressões matemáticas deduzidas no texto e dos resultados reportados na literatura.

Também foram avaliados os métodos de mitigação mais usuais para o fenômeno citado, que foram: resistor de pré-inserção, reator limitador, chaveamento controlado. Podendo assim mensurar a eficiência das técnicas de atenuação do comportamento transitório apresentando reduções significativas na corrente de *inrush*, sobretensões e frequência transitória.

Para validação dos resultados obtidos faz – se necessário um estudo de campo realizando as montagens simuladas a fim de verificar a confiabilidade do método utilizado e confrontar os dados adquiridos.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO,A.E.A.; NEVES,W.L.A.; **Cálculo de Transitório Eletromagnético em Sistema de Energia**. Minas Gerais, Editora UFMG, Belo Horizonte, 2005.

BARBOSA,M.A.; **Sobretensões de Manobra – Dimensionamento do Resistor de Pré-Inserção**.1989.137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

D’AJUZ,A; **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento**. Rio de Janeiro, FURNAS, Niterói, Universidade Federal Fluminense/EDUFF,1987.

DAS, J.C.; **Analysis and Control of Large-Shunt-Capacitor-Bank Switching Transients**. **IEEE transactions on industry applications**, vol. 41, no. 6, 2005.

DOMMEL, H. W. “**EMTP Theory Book**”, **Microtran Power System Analysis Corporation**, Vancouver, B.C., Canada, 1996.

GOLDSWORTHY,D.;ROSENBERG,T.;TZIOUVARAS,D.;POPE,J.;Controlled

FILHO, J. M.; **Manual de Equipamentos Elétricos**.4ªedição.Rio de Janeiro.LTC.2013.

GUERRA,F.C.F; **Proteção de Sistemas Elétricos** . Notas de Aula, Paraíba, UFCG, Campina Grande,2010.

PAMPLONA,F. M. P.; FERNANDES JR ,D.; SOUZA, B. A.; NEVES, W. L. A; **Sobretensões Transitórias Decorrentes de Manobras de Bancos de Capacitores**.

PRADO, P.; CAMPOS, P. G.; TAVARES, M. C. D.; **Guia do ATP – Alternative Program Transient**. Disponível:<
<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~crisina/pos%20graduacao/GUIA.ATP.pdf>>.
30/11/2015.

SOARES F.S.; **Estudo do Comportamento de Transformadores de Corrente em Regime Transitório**.2015. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

Switching of HVAC Circuit Breakers: Application Examples and Benefits. **34th Annual Western Protective Relay Conference, October 2007**,

TLA. Disponível em: <http://www.halten.com.br/manual.pdf>. Acesso em: Acesso em: 10 de novembro de 2015

WILLIAMS, H.S.;. A History of Science Volume II, Part VI: The Leyden Jar Discovered. Disponível em :<
<http://www.worldwideschool.org/library/books/sci/history/AHistoryofScienceVolumeII/chap49.html> >. 10/11/2015.