



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MATEUS FERREIRA MELO

**Estudo sobre as distorções causadas por manobras em bancos de capacitores nos
sistemas elétricos de potência.**

MOSSORÓ

2021

MATEUS FERREIRA MELO

**Estudo sobre as distorções causadas por manobras em bancos de capacitores nos
sistemas elétricos de potência**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Ednardo Pereira da Rocha,
Prof. Dr.

MOSSORÓ

2021

|

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M528e MELLO, Mateus Ferreira Melo.
Estudo sobre as distorções causadas por
manobras em bancos de capacitores nos sistemas
elétricos de potência. / Mateus Ferreira Melo
MELLO. - 2021.
32 f. : il.

Orientador: Ednardo Pereira da Rocha Rocha.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Elétrica, 2021.

1. Banco de Capacitores. 2. Transitórios de
Energia. 3. ATPDraw. 4. Sistema Elétrico de
Potência. I. Rocha, Ednardo Pereira da Rocha,
orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

MATEUS FERREIRA MELO

**SIMULAÇÃO DE MANOBRAS EM BANCOS DE CAPACITORES
UTILIZANDO O SOFTWARE ATP**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Ednardo Pereira da Rocha, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Adriano Aron Freitas de Moura, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Samanta Mesquita de Holanda, Prof^a. DRa. (UFERSA)
Membro Examinador

|

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me dar forças e motivos para continuar com a caminhada durante esse processo acadêmico.

Agradeço a minha família por dar apoio durante o processo acadêmico e a paciência para que eu pudesse terminar em especial a minha mãe Maria Celia e ao meu pai Erinaldo Ferreira.

Agradeço aos meus amigos por me apoiarem nos momentos difícil em especial a Amanda Cavalcante e a Jerffeson Guimarães por pegar sempre no pé nos momentos em que quis desistir e a Edson Saraiva por sempre me apoiar quando estive abatido.

Agradeço aos professores que fizeram parte da minha formação e em especial ao docente Ednardo Pereira por ter me orientado e auxiliado durante esse processo.

Por fim, mas não menos importante agradeço a Karla Tamyres por sempre estar ao meu lado conversando e escutando minhas angustias e medos cotidianos.

“O mundo não é um mar de rosas; é um lugar sujo, um lugar cruel, que não quer saber o quanto você é durão. Vai botar você de joelhos e você vai ficar de joelhos para sempre se você deixar. Você, eu, ninguém vai bater tão forte como a vida, mas não se trata de bater forte. Se trata de quanto você aguenta apanhar e seguir em frente, o quanto você é capaz de aguentar e continuar tentando.”

Rocky Balboa

RESUMO

Com a importância das instalações de bancos de capacitores em sistemas elétricos, para fazer a correção de seu fator de potência, é fundamental a realização de uma análise no impacto da instalação desses equipamentos na rede, tendo em vista o surgimento de distúrbios que podem danificar outros equipamentos existentes na rede. Este trabalho faz um estudo por análises da corrente e tensão, para que assim possa ser visualizado como se comportam esses distúrbios que são causados nos chaveamentos de bancos de capacitores, tanto na instalação como no fechamento de chaves fusíveis, bem como na retirada desses bancos devido a abertura das chaves. Para realizar esse estudo é utilizado o *software* ATPDraw, onde é possível realizar uma modelagem de sistemas e realizar simulações que representam esses chaveamentos, sendo uma para a abertura e outra para o fechamento. Por fim é possível obter os resultados dessas simulações através de gráficos plotados onde é analisado a tensão e a corrente pelo próprio *software*, verificando os impactos causados devido a esses transitórios de manobras.

Palavras-chave: Banco de Capacitores. Transitórios de Energia. ATPDraw. Sistema Elétrico de Potência.

ABSTRACT

With the importance of capacitor bank installations in electrical systems, to correct your power factor, It is essential to carry out an analysis of the impact of installing this equipment on the network, in view of the emergence of disturbances that can damage other existing equipment on the network. This work makes a study by analysis of current and voltage, so that it can be visualized how these disturbances that are caused in the switching of capacitor banks behave, both in the installation and closing of fuse switches, as well as in the withdrawal of these banks due to the opening of the keys. To carry out this study, the ATPDraw software is used, where it is possible to perform a system modeling and perform simulations that represent these switches, one for opening and one for closing. Finally, it is possible to obtain the results of these simulations through plotted graphics where voltage and current are analyzed by the software itself, checking the impacts caused due to these maneuvering transients.

Keywords: Capacitors bank. Energy Transients. ATPDraw. Electric Power System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo da garrafa de Leiden.....	2
Figura 2 – Formação dos dipolos (a) e campo elétrico no interior do capacitor (b).....	3
Figura 3 – Circuito monofásico representando uma ligação no instante t (Circuito 1)	4
Figura 4 – Energização com excitação ao degrau.....	5
Figura 5 – Circuito equivalente de um banco de capacitor sendo chaveado.....	7
Figura 6 – Circuito equivalente de um banco de capacitor sendo chaveado.....	9
Figura 7 – Interface gráfica do ATPDraw.....	12
Figura 8 – Exemplo com abertura de chave (Circuito 1)	13
Figura 9 – Circuito com fechamento da chave do banco de capacitor (Circuito 2)	14
Figura 10 – Saída da tensão(V) pelo tempo(ms) no ponto 6 do Circuito 1.....	15
Figura 11 – Saída da tensão(V) pelo tempo(ms) no ponto 7 do Circuito 1.....	15
Figura 12 – Saída da tensão (V) com análise no intervalo de tempo em segundos(s) (Circuito 1)	16
Figura 13 – Análise da tensão (V) ao longo do tempo (ms) antes da abertura da chave...16	
Figura 14 – Análise da tensão (V) ao longo do tempo (ms) antes do fechamento da chave.....	17
Figura 15 – Saída da tensão (V) em relação ao tempo em segundos(s), no ponto antes do chaveamento.....	18
Figura 16 – Saída da tensão (V) em relação ao tempo em segundos(s), no ponto depois do chaveamento.....	18

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1. Bancos de Capacitores	2
2.2. Energização e Desenergização de Bancos de Capacitores Isolados.....	6
2.2.1. <i>Energização back-to-back</i>	8
2.2.2. <i>Desenergização de bancos de capacitores.</i>	9
2.3. Problemas transitórios no chaveamento	10
2.4. Alternativas para atenuar os surtos decorrentes de manobras em bancos de capacitores	11
2.5. ATPDraw	11
3. METODOLOGIA	12
3.1. Modelagem no ATPDraw	12
3.1.1. <i>Simulação 1: Manobra de abertura (Circuito 1)</i>	13
3.1.2. <i>Simulação 2: Manobra de fechamento (Circuito 2)</i>	14
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	19
REFERENCIAS	20

1. INTRODUÇÃO

Em Sistemas Elétricos de Potência (SEP) normalmente faz-se necessário realizar uma compensação de potência reativa, esses reativos podem ter natureza capacitiva ou indutiva. Uma das alternativas para atender à essa necessidade que oferecem o melhor custo benefício, é a instalação de banco de capacitores nestas redes, afim de atenuar cargas reativas de natureza indutiva.

A instalação de bancos de capacitores em SEP em geral, podem gerar distúrbios, alterando comportamento dos equipamentos conectados ao SEP. Os chaveamentos realizados nesses bancos de capacitores geram oscilações de corrente e tensão entre os equipamentos e no sistema de transmissão, tais como sobretensões durante a energização dos bancos, surtos de tensão e de corrente nos próprios bancos de capacitores. As manobras de bancos de capacitores podem causar transitórios significantes tanto na localização dos próprios bancos chaveados quanto em localizações remotas. Os impactos dessas manobras sobre os demais equipamentos de um sistema devem ser analisados através das correntes e tensões provocadas pelas manobras de energização desses bancos, para verificar como estes transitórios afetam os inúmeros equipamentos de potência do sistema [1].

As frequentes manobras diárias, bem como outros distúrbios sistêmicos, por exemplo faltas próximas, podem expor os componentes do filtro a tensões e correntes transitórias e de curta-duração com elevadas taxas de crescimento e longas durações por dezenas até centenas de milissegundos, que podem ser classificadas como surtos transitórios e/ou dinâmicos. Estes surtos resultam em elevados estresses dielétricos e mecânicos nos capacitores, reatores e resistores do filtro que, se não forem levados em consideração durante o projeto, podem reduzir a vida útil dos equipamentos com sérios riscos de falha. Embora o uso de disjuntores com dispositivos sincronizados seja comum para esta aplicação, as análises devem desconsiderar estes elementos para se obter resultados menos complexos. [2].

As análises de tensão e correntes se tornam bastante importante na realização de manobras de banco de capacitores, tendo o conhecimento que manobras nesses equipamentos podem afetar o sistema, gerando sobretensões e sobrecorrentes na rede. A utilização de *softwares* que realizam simulações é necessária nesse quesito, já que, para evitar prejuízos é feito um estudo prévio. Para analisar o comportamento do sistema durante realização da manobra. Esse tipo de análise pode ser realizado através de *softwares* de análise de circuitos, o *software ATPDraw* é um exemplo que pode ser utilizado na realização de simulações para estudos em sistemas de potência, pois nele encontram-se ferramentas necessárias e suficientes para esse tipo de estudo de caso, além de possui um sistema de fácil manuseio e ser um *software* livre e gratuito.

1.1.Objetivos

A pesquisa em questão tem como objetivo central o estudo sobre as distorções que ocorrem em sistemas elétricos devido as manobras por chaveamento, contendo nesse mesmo sistema banco de capacitores. Com o intuito de alcançar o objetivo central, tem-se os objetivos específicos:

- Estudar o como ocorrem as distorções harmônicas e quais os seus impactos em sistemas elétricos;
- Desenvolver de simulações através do *software ATPDraw*;
- Analisar os as características de funcionamento dos resultados simulados;
- Discutir formas de atenuar distorções em manobras.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

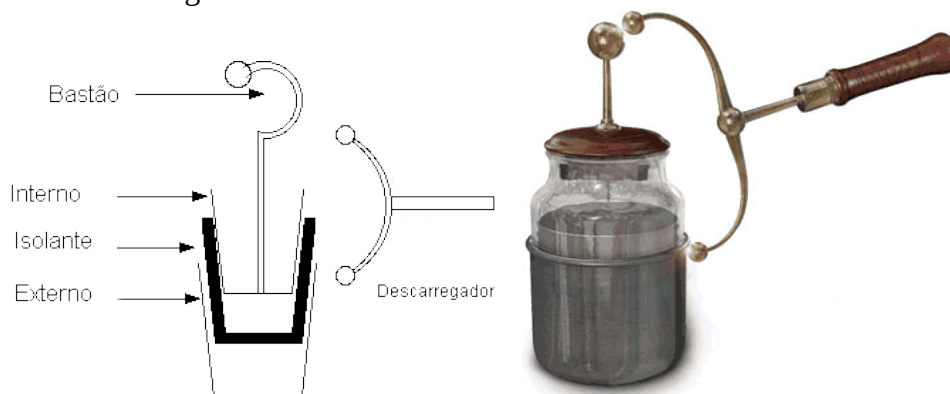
2.1. Bancos de Capacitores

Antes de chegar no conceito sobre o banco de capacitores é importante se ter o conhecimento do que seria um capacitor, pode-se falar que é um componente eletrônico que armazena energia na forma de um campo elétrico, ao qual esse campo é criado por cargas elétricas de sinais opostos [3].

A origem dos capacitores decorre de maneira acidental por volta de 1745 que por meio de um experimento foi descoberto um dispositivo capaz de armazenar energia elétrica, ao qual foi nomeado de garrafa de Leiden (Modelo da garrafa de Leiden na Figura 1), o responsável por essa descoberta foi o professor Pieter van Musschenbroek, que fazia parte da universidade Leiden localizada na Holanda [4].

O dispositivo da garrafa de Leiden era composto por uma jarra de vidro preenchida com água, possuía uma rolha e uma haste metálica que perfurava e tinha contato com a água em seu interior. Seu funcionamento ocorria quando essa haste metálica entrava em contato com alguma máquina eletrostática, fazendo com que assim as paredes no interior da garrafa acumulassem cargas elétricas.

Figura 1 – Modelo da garrafa de Leiden.

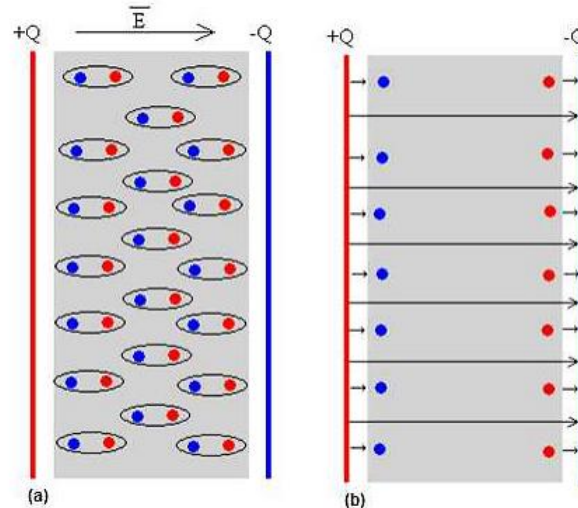


Fonte: Website – Geocities.ws s.a.

Em geral o funcionamento dos capacitores consiste em dois eletrodos ou placas as quais armazenam cargas positivas e negativas em localizações opostas. Estas placas além de serem condutoras são separadas por um isolante ou dielétrico onde a carga é armazenada apenas na superfície onde se encontra as placas com o dielétrico, vale ressaltar que a carga total deste dispositivo sempre é nula [5]

Quando existe uma diferença de potencial entre as placas de um capacitor simples, surgiu um campo entre elas, como ilustrado Figura 2.

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



Fonte: [5].

Dentro do capacitor existe a capacitância, que a quantidade de energia que pode ser acumulada, é determinada pela tensão e pela quantidade de corrente que atravessa o capacitor em uma determinada frequência (Equação 1).

$$C = \frac{Q}{V} (F) \quad [1]$$

Normalmente os capacitores são usados em bancos, isto é são reunidos vários capacitores para atender a necessidade de determinados requisitos de potência para o sistema elétrico em questão. Esses arranjos eles têm a função de injetar potência reativa capacitiva nos sistemas elétricos ao qual estão instalados, ocasionando uma redução de suas perdas, ocorrendo assim uma elevação aos níveis de tensão e evitando que exista um consumo elevado de energia reativa. O seu funcionamento pode ocorrer de forma fixa ou manobrável de acordo com a necessidade em pauta [6].

Os bancos manobráveis eles são caracterizados por serem controlados por meio de chaves interruptoras, onde esse processo permite a conexão ao sistema elétrico, o funcionamento dele só ocorre de acordo com condições previamente ajustadas, ou seja, ele atua apenas quando for necessário a injeção de potência reativa capacitiva no sistema. Já os bancos fixos eles funcionam de maneira continua fazendo com que a todo momento ocorra a injeção da potência reativa capacitiva independente de sua necessidade, nesse tipo de banco caso o consumo seja baixo em um determinado período a sua capacitância pode chegar a ser superior a reatância indutiva, o que pode gerar sobretensões no sistema elétrico [6].

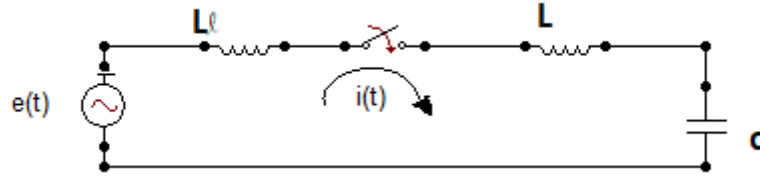
Considerando sistemas de baixa e média tensão, é comum ocorrer a instalação de bancos de capacitores no interior das subestações ou próximos a elas, esse modelo tem sido a solução mais econômica nas aplicações normais [6].

Ocorre no processo dessas manobras, transitórios de frequências elevadas e em consequência a isso altera a natureza das solicitações aos equipamentos, como exemplo podemos citar a oscilações de corrente e tensão entre os equipamentos e os sistemas de transmissão [7].

É comum encontrar frequências elevadas de acordo com a configuração em que se encontra os componentes elétricos da rede, alguns desses componentes que influenciam essa frequência seriam o número de bando de capacitores, a reatância de barramentos, se existe ou não a reatores limitados, a potência de curto-circuito a presença de para-raios entre outros.

Para entender melhor de como ocorre uma manobra nos bancos de capacitores podemos pegar como exemplo em circuitos monofásicos, tendo em vista em que um circuito trifásico seja equilibrado o equacionamento para monofásico é aplicável, envolvendo assim apenas uma sequência positiva. Assim considerando o sistema monofásico hipotético a seguir (Figura 3):

Figura 3 – Circuito monofásico representando uma ligação no instante t (Circuito 1).



Fonte: Produzida no ATPDraw.

O sistema equivalente da fonte é representado pela indutância L_s , que é uma aproximação razoável quando existem transformadores para conexão do banco de capacitores às linhas de transmissão. No caso do banco de capacitores está ligado diretamente ao sistema de transmissão, devemos representar as linhas na simulação, pois o efeito de propagação de ondas pode ter influência nos resultados.

Como observado na Figura 3, o L é a representação das indutâncias internas do banco de capacitores, considerando que o valor dele estará no intervalo de $5\mu\text{H}$ a $10\mu\text{H}$, essa indutância também representa a limitadores de corrente especialmente instalada no banco, mas para essa análise irá se considerar apenas a indutância L_s , do sistema, e com isso obtemos a Equação 2:

$$e(t) = L_s \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad [2]$$

Se considerarmos a corrente $i(0)=0$ e a sua tensão no capacitor $v_c(0)=v_o$, podemos aplicar a transformada de laplace e obter a seguinte Equação 3:

$$E(s) = \left[sL_s + \frac{1}{sC} \right] I(s) + \frac{v_o}{s} \quad [3]$$

Para a excitação cossenoidal temos apresentados nas Equações 4 - 7:

$$E(s) = \frac{Eos}{W^2 + S^2} \quad [4]$$

$$\frac{Eos}{w^2 + s^2} = \left[\frac{s^2 L_s C + 1}{sC} \right] I(s) + \frac{v_o}{s} \quad [5]$$

$$I(s) = \frac{Eos^2}{Ls(s^2 + w^2)(s^2 wo^2)} - \frac{v_o}{Ls(s^2 + wo^2)} \quad [6]$$

A frequência de excitação se dá pela Equação 7,

$$wo^2 = \frac{1}{LsC} \quad [7]$$

Observamos que a frequência natural de oscilação ω_0 estará superposta a frequência ω (60 Hz) nominal do sistema.

Uma maneira de observarmos melhor o comportamento de um circuito monofásico desse é se considerarmos uma subestação com 230 kV, 60 Hz, com uma corrente de curto-circuito de 20 kA tem um banco de capacitores de 50 MVAR. E com isso se calcularmos a frequência envolvida em manobras do banco, temos então:

A indutância é calculada pela Equação 8:

$$L_s = \frac{230}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 377} = 17,6mH \quad [8]$$

E a sua capacitância pela Equação 9:

$$C = \frac{Q}{\omega V^2} = \frac{50}{230^2 \cdot 377} = 2,51\mu F. \quad [9]$$

Atraves desse valores podemos obter a frequência natural de oscilação (Equações 10 e 11):

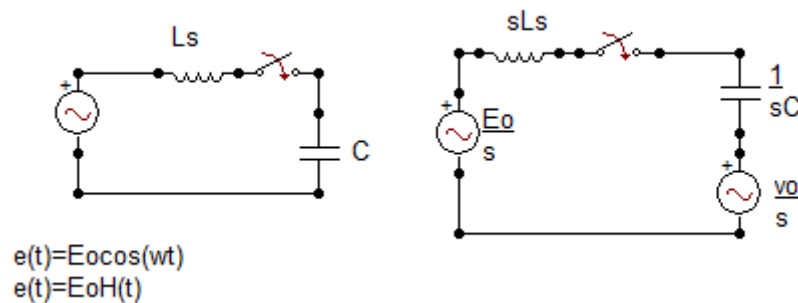
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{17,6 \times 10^{-3} \cdot 2,51 \times 10^{-6}}} \quad [10]$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{17,6 \cdot 2,51 \times 10^{-9}}} = 750HZ \quad [11]$$

Quando comparamos os valores da frequência, vemos que essa frequência é bem superior a nominal que é de 60HZ.

Essa oscilação normalmente ocorre, então devemos considerar que o período de análise a tensão $e(t)$ (Figura 4) não se altera, sendo utilizada então uma fonte de tensão constante.

Figura 4 – Energização com excitação ao degrau.



Fonte: Produzida no ATPDraw.

Observando o circuito da Figura 3, em que o valor de v_0 é a tensão ao qual corresponde a carga armazenada no capacitor é demonstrada na Equação 12 e 13.

$$\frac{E_o}{s} = \frac{s^2 LsC + 1}{sC} I(s) + \frac{v_o}{s} \quad [12]$$

$$I(s) = \frac{E_o - v_o}{s} \frac{s}{Ls(s^2 + \omega_o^2)} \quad [13]$$

Quando ocorre uma manobra de energização de um banco de capacitores, podemos considerar nessa análise que existe ou não uma carga residual no sistema, com a existência dos resistores, eles descarregam o banco para a próxima manobra de energização, considerando que o banco foi descarregado, logo $v_0=0$ e adotando os valores que foram exemplificados para o Circuito 1, representado na Figura 3, então $E_0=188$ kV, encontramos uma corrente de 2,2 kA pico.

Por meio dessa representação simplificada podemos observar os primeiros indicadores que influenciam nesse fenômeno, mas ele falha ao desconsiderar outros fatores que influenciam também, como por exemplo dispersão no fechamento dos contatos dos disjuntores, as perdas, amortecimentos e a representação de forma mais detalhada das linhas de transmissão existentes.

A análise para obtenção dos valores corretos de sobretensões durante a energização do primeiro banco é feita através de simulações com programas de transitórios eletromagnéticos, durante a energização as correntes elétricas presentes no sistema são suportáveis pelos equipamentos, entretanto é importante se observar as sobretensões na subestação.

2.2. Energização e Desenergização de Bancos de Capacitores Isolados

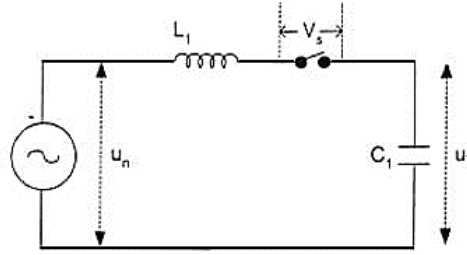
Segundo Barbosa (1989), a pior condição em um o processo de energização de banco de capacitores é quando ele ocorre no pico de onda de tensão, onde inicialmente o capacitor encontrasse descarregado e vai sendo energizado. No momento em que ocorre o fechamento da chave, o capacitor tem um comportamento que se assemelha a de um curto-circuito, e então se carrega com valor que seja igual ao pico da tensão que está alimentando. Quando nos referimos a queda da tensão e ao transitórios, esses são funções da impedância e do barramento [8].

Após esse processo as tensões vão se recuperando por meio de oscilações de alta frequência. Ao iniciar um transitório, o valor das tensões pode atingir 2p.u. em relação a tensão do barramento. É importante ter conhecimento sobre a mudança no degrau inicial e as oscilações provenientes a ela, já que elas podem se propagar no sistema ficarem entre transformadores e com isso serem amplificadas. Levando em consideração a ressonância, a frequência natural do transformador pode coincidir com a frequência predominante, isso poderia gerar uma amplificação da tensão transitória, o que isso poderia gerar possíveis falhas de isolamento [9].

Considerando uma subestação que possua vários bancos de capacitores, isso gera no sistema sobretensões de manobra, em foco isso ocorre de maneira mais intenso na energização do primeiro banco de capacitores, esse processo ocasiona oscilações que afetam o sistema, tanto o sistema dos bancos que estão sendo instalados como os sistemas de alimentação. Considerando um circuito monofásico é mais simples de exemplificar essas oscilações de tensão e corrente [10].

Na Figura 5, podemos ver o processo de energização do banco de capacitores.

Figura 5 – Circuito equivalente de um banco de capacitor sendo chaveado.



Fonte: [9].

O valor da indutância é representado por L_1 , o capacitor a ser incluído no sistema é C_1 , ainda existe uma fonte de tensão que seria um valor U_n , a partir do momento em que a chave fechar, podemos aplicar nesse sistema as *Leis de Kirchoff* das tensões e obtemos a Equação 14.

$$V = L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt. \quad [14]$$

Considerando a resolução dessa equação no domínio do tempo de ~~f~~ torna complexa, é sugerido passar ao domínio da frequência aplicando a transformada de Laplace, conforme a Equação 15.

$$\sqrt{2} \cdot \frac{E}{s} = sL(s) + \frac{1}{sC} \cdot I(s) \quad [15]$$

Isolando o membro $I(s)$ na Equação 16, temos:

$$I(s) = \frac{\frac{E}{s} \cdot \sqrt{2}}{Ls + \frac{1}{sC}} = \frac{\frac{E}{s} \cdot \sqrt{2}}{s^2LC + 1} \cdot sC = \frac{\frac{\sqrt{2} \cdot E \cdot C}{LC}}{s^2 + \frac{1}{LC}} = \sqrt{2} \cdot \frac{E}{L} \cdot \frac{1}{s^2 + \frac{1}{LC}} \quad [16]$$

Com a aplicação da transformada inversa obtemos a Equação 17 e 18:

$$I(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega t)}{L} \quad [17]$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad [18]$$

Simplificando o sistema obtemos a Equação 19:

$$I(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\omega t)}{\omega L} \quad [19]$$

Com manipulações algébricas podemos obter a Equação 20:

$$\begin{aligned}
 I(t) &= \frac{\sqrt{2} \cdot E \cdot \sin\left(\frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot t\right)}{\frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot L} = \frac{\sqrt{2} \cdot E \cdot \sqrt{LC} \cdot \sin\left(\frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot t\right)}{\sqrt{L^2}} \\
 &= \sqrt{2} \cdot E \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \sin\left(\frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot t\right)
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Considerando que queremos o valor máximo da corrente, então valor resultante do seno de ser considerando 1, logo tem-se a Equação 21:

$$I_{max}(t) = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot E \tag{21}$$

Considerando que as grandezas do sistema não estão com os valores por fase, a Equação 22 iria modificar para:

$$I_{max}(t) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot E(\text{linha}) \tag{22}$$

Durante o chaveamento do banco de capacitores encontra-se a frequência (Equação 24) através da frequência natural de oscilação (Equação 23):

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} \cdot C_{eq}}} \text{ e } \omega_0 = 2\pi f \tag{23}$$

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{eq} \cdot C_{eq}}} \tag{24}$$

Através das Equações 14-24 pode-se ter uma noção de como encontrar valores em relação ao chaveamento de capacitores.

2.2.1. Energização back-to-back

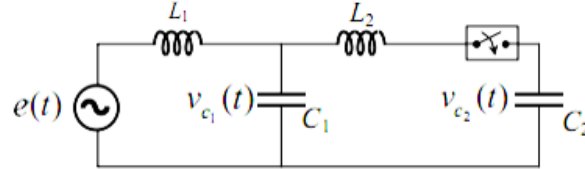
O chaveamento *back-to-back*, caracteriza-se pela energização de um banco de capacitores tendo outro banco no mesmo barramento, ou seja, é a inserção de um segundo banco de capacitores tendo já um banco instalado e energizado. A corrente transitória que existe nesse caso, consiste basicamente entre um intercâmbio de corrente existente entre os bancos e considera desprezível a corrente que é fornecida pelo sistema. Esse fenômeno é possível devido a fonte da impedância ser muito maior do que a que existe entre os bancos $L_1 \gg L_2$ [9].

Segundo Sickle e Zaborszky (1951) durante o chaveamento *back-to-back* existe uma diferença de potencial entre os dois bancos, porém ela é eliminada pela redistribuição de cargas, assim o banco que já está instalado descarrega para que o outro banco possa

ser energizado, esse processo gera excessivas corrente de energização ao quais são conhecidas como correntes “*in rush*” [11].

Na Figura 6 observa-se um modelo de energização *back-to-back* onde nota-se que já existe um banco de capacitores no sistema C_1 sendo instalado posteriormente um banco de capacitores C_2 , esse princípio de energização *back-to-back* é valido para dois ou mais bancos de capacitores em operação no sistema elétrico.

Figura 6 – Circuito equivalente de um banco de capacitor sendo chaveado.



Fonte: [10].

Segundo o estudo de Menezes (2010), a energização *back-to-back* pode ocorrer em vários instantes, tomando como exemplo um caso crítico em que a tensão que passa pela barra é um valor máximo E_0 . Considerando esse valor, pode-se assumir que a tensão armazenada no banco C_1 é aproximadamente igual a E_0 , devido a essa consideração pode-se propor a Equação 25:

$$C_{eq} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad [25]$$

E sua corrente máxima pode ser descrita pela Equação 26 como:

$$I_{max} = \frac{E_0}{\sqrt{\frac{L_2}{C_{eq}}}} \quad [26]$$

A frequência natural de excitação é apresentada pela Equação 27:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 \cdot C_{eq}}} \quad [27]$$

Considerando as equações pode-se verificar que a energização de um banco é correspondida pela troca de energia armazenada entre eles, tendo pouca participação do sistema nessa energização, é interessante observar que as sobretensões de energização no segundo banco, são inferiores à quando se comparadas ao do primeiro banco, isso ocorre devido a energização desse segundo banco que vai ser instalado ocorrer graças ao banco que já estava energizado no sistema, isso ocorre devido a esta fonte eletricamente ser bastante próxima a unidade que sendo incluída, fazendo com que as oscilações entre os bancos sejam menores.

2.2.2. Desenergização de bancos de capacitores.

Uma possível interferência pode ser observada quando ocorre a desenergização dos bancos de capacitores, mas essa interferência ocorre apenas quando existe uma reignição na abertura dos contatos do disjuntor de chaveamento. Além disso, vale destacar

que esses distúrbios provenientes a essa desenergização podem ter um impacto maior do que o que ocorre durante a energização, esses distúrbios provocam sobretensões em capacitores remotos na ordem de 4 p.u. [12].

2.3. Problemas transitórios no chaveamento

Dentre os problemas transitórios no chaveamento, sobretensões transitórias podem ocorrer tanto na energização quanto na desenergização de bancos de capacitores [13]. Nessas manobras em gerais, podemos considerar duas situações diferentes: (a) a manobra de um banco isolado, ou (b) a manobra de um banco com outros em paralelo [1]. Entre os problemas no chaveamento de bancos de capacitores, [10] destaca os seguintes pontos:

- Durante a energização do sistema pode ocorrer sobretensões nos bancos de capacitores chaveados: No instante de energização, a tensão na barra do banco de capacitores manobrado, cai abruptamente para zero, devido à carga inercial armazenada no banco. Esta variação abrupta na tensão injeta uma onda de tensão com frente íngreme nas linhas conectadas à barra do BC manobrado. Nas linhas com terminal aberto ou terminadas por transformador, ocorre uma reflexão positiva das ondas viajantes, resultando em maiores sobretensões nas barras remotas com relação às sobretensões na barra do banco de capacitores [10].
- A ocorrência de sobretensões entre fases em transformadores remotos, nas terminações de linhas, durante a energização de bancos de capacitores. As sobretensões transitórias na barra remota apresentam uma componente de alta frequência que depende do tempo de trânsito da linha. As sobretensões resultantes nas barras remotas provocam os seguintes riscos: (a) A amplitude das sobretensões entre fases, que não são efetivamente limitadas por para-raios conectados fase-terra, poderá exceder o isolamento entre fases de transformadores; (b) A amplitude das sobretensões fase-terra pode causar o disparo de para-raios convencionais e, dependendo de suas condições físicas, a sua danificação; (c) A taxa de variação da tensão (dV/dt) pode causar uma distribuição de tensão com solicitações concentradas em algumas espiras dos enrolamentos dos transformadores. Mesmo que a amplitude da sobretensão não seja elevada, a distribuição de tensão pode danificar o isolamento das espiras; (d) A frequência das sobretensões transitórias pode excitar ressonâncias internas em transformadores com consequente danificação dos mesmos [10];
- Surtos de corrente num banco de capacitores;
- Durante energização de outros capacitores podem ocorrer surtos de tensão em bancos de capacitores de nível de tensão mais baixos.

As sobretensões fase-fase são uma ameaça para a isolação de transformadores trifásicos em subestações radiais. Os fatores que influenciam a intensidade destas sobretensões são: o comprimento da linha radial que conecta a subestação e o banco chaveado, a impedância da fonte do sistema, o número de linhas conectadas à barra a qual a chave ocorre, e o tamanho do banco de capacitores [14]. Recomenda-se limitar as sobretensões fase-fase a 75% da suportabilidade entre fases do transformador. Esta margem de 25% é para levar em conta os efeitos de envelhecimento da isolação, frequência das manobras e ressonâncias internas [15]. As sobretensões fase-terra deverão ser limitadas a 80% da tensão mínima de disparo dos para-raios convencionais ou a 75% da suportabilidade dos transformadores para surto de manobra, o que for menor [15].

O ocorrer desses fenômenos pode gerar diferentes tipos de transitórios e devido a isso, podem afetar diversos equipamentos de potência. Devido a isso, é importante ser feita uma análise do impacto das manobras em bancos de capacitores no sistema, fazendo uma análise através das correntes e tensões transitórias que são geradas devido a essas manobras [10].

2.4. Alternativas para atenuar os surtos decorrentes de manobras em bancos de capacitores

Algumas alternativas podem ser adotadas para atenuar a severidade dos transitórios provenientes das manobras de chaveamento em bancos de capacitores, minimizando consequentemente os impactos que esses transitórios custam aos equipamentos conectados aos sistemas de potência com banco de capacitores. Uma das alternativas mais utilizadas se dá pelo uso de resistores de pré-inserção (RPI), esses resistores são instalados junto às câmaras dos disjuntores [18].

Um disjuntor com RPI pode ser representado pelo fechamento sequencial de duas chaves, de forma que quando o banco de capacitores é energizado, inicialmente, se fecha o contato auxiliar que insere o resistor em série entre a fonte e o banco. Após um curto período de tempo, cerca de 6 ms, o contato principal se fecha, curtocircuitando o resistor e trazendo para o banco a tensão plena da fonte [10]. Normalmente, não se encontram disponíveis resistores RPI corretamente dimensionados para os sistemas de distribuição, dificultando a utilização desse equipamento como atenuador [19].

Outra alternativa para redução das sobretensões de manobra em bancos de capacitores é a utilização de para-raios [19], de forma tal, que no instante em que a sobretensão ultrapassa o valor de tensão estabelecido por sua característica não linear, os para-raios atua drenando uma corrente de descarga, consequentemente limitando a sobretensão resultante nos seus terminais [10].

Ainda, outras técnicas têm sido cada vez mais empregadas, a exemplo de dispositivos para chaveamento sincronizado [20], a energização é realizada no instante em que $E_0 = v_0$, minimizando assim as sobrecorrentes e, por conseguinte, as sobretensões transitórias [10].

2.5. ATPDraw

Para compreensão melhor e estudo mais eficiente sobre os impactos dos quais essas manobras podem causar a utilização de ferramentas computacionais das quais possuam a capacidade de simular essas manobras se torna indispensável, tendo em vista que graças a elas podemos verificar o comportamento do sistema de maneira mais minuciosa sem causar danos reais a sistemas tendo assim uma economia monetária nos estudos.

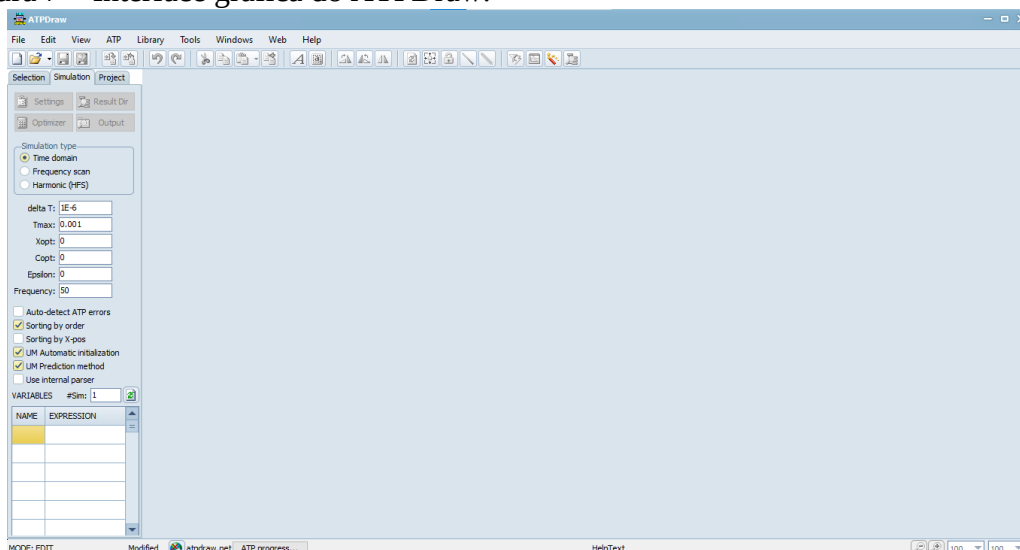
Para realização dessas simulações é escolhido o software ATPDraw, graças a ele podemos visualizar o comportamento do sistema elétrico que ocorre por consequência das manobras nos bancos de capacitores, a sua interface é bastante simples e auto intuitiva, o que facilita o manuseio dessa ferramenta, além do fato de ser gratuito.

O ATPDraw é um processador gráfico controlado por mouse, para a versão ATP do Programa de Transientes Eletromagnéticos (EMTP) na plataforma de software Windows. No programa, o usuário pode construir circuitos elétricos usando o mouse e selecionando os componentes dos menus, então o ATPDraw gera o arquivo de entrada ATP no formato apropriado baseado em "o que você vê é o que você obtém". O programa de simulação ATP e os programas de plotagem podem ser integrados ao ATPDraw [16].

Na Figura 7 é possível observar a interface gráfica ao realizar a abertura do programa, pode-se observar a montagem de circuitos se dão com a seleção daqueles

componentes necessários para montagem dos circuitos, e logo após essa escolha pode-se dimensionar esse componente para que simulação seja a mais adequada possível.

Figura 7 – Interface gráfica do ATPDraw.



Fonte: Autoria própria.

3. METODOLOGIA

Inicialmente foi realizado um estudo teórico sobre os impactos de surtos transitórios pela inserção de banco de capacitores em sistemas elétricos de potência, tendo como base qual impacto que essa inserção pode afetar outros equipamentos já existentes, em seguida para a obtenção de resultados mais práticos foi realizado um estudo em cima do *software* ATPDraw, para que assim fosse possível a realizações de simulações e obtenção de resultados de acordo com a simulação.

Durante o processo das simulações, foi estudado como realizar a configuração do sistema para que ele funcionasse de maneira mais adequada de acordo com a necessidade em questão, foi realizado a inserção e configurações de equipamentos como por exemplo os indutores, resistores, fonte de tensão, capacitores e os chaveamentos. Dessa forma foi possível analisar o comportamento das tensões e correntes no sistema, visualizando como ele se comporta antes e depois da manobra do chaveamento.

3.1. Modelagem no ATPDraw

Com o auxílio do *software* ATPDraw, foram realizadas duas simulações: uma com o objetivo de verificar o impacto de uma abertura de chaveamento e outra para avaliar o impacto causado no circuito com a o fechamento dessa chave. As configurações das simulações no *software* são definidas como sua frequência em 60 Hz. Existe uma configuração especial para que a simulação funcione de acordo com a necessidade, essa configuração dos parâmetros é chamada de cartão *miscellaneous*, no qual é possível configurar algumas partes. Neste trabalho que foram usadas apenas a “SIMULATION” e a “INTEGRE”. Na parte da *simulation* encontra-se:

- **DELTAT** - O Passo de integração.
- **TMAX** - Período em que a simulação acontece.
- **FREQ** - Frequência do sistema.
- **XOPT** - Parâmetro de controle de indutâncias (se igual a 0 $\Rightarrow$ L em mH, se igual a frequência do sistema $\Rightarrow X_L = 2\pi fL$ em Ω).

- **COPT** - Parâmetro de controle de capacitâncias (se igual a 0 $\Rightarrow$ C em μF , se igual a frequência do sistema $\Rightarrow X_L = 2\pi fC$ em μMHO).

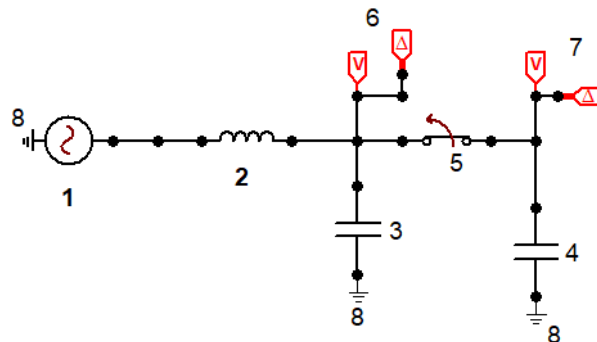
Já na parte “*Integre*” é modificado os seguintes parâmetros:

- **IOUT** - Frequência para impressão dos resultados.
- **IPLOT** - Frequência para plotagem dos resultados.
- **IDOUBL** - Impressão da tabela de conectividade (=1).
- **KSSOUT** - Impressão do regime permanente (=1).
- **MAXOUT** - Impressão dos valores máximos e mínimos (=1).
- **IPUN** - Mudança de frequência de impressão IOUT (= -1).
- **MENSAV** - Descarregamento da memória em disco para reiniciar (=1).
- **ICAT** - Armazenamento permanente em disco dos dados para plotagem.
- **NENERG** - Processamento estatístico (= 0 determinístico).

3.1.1. Simulação 1: Manobra de abertura (Circuito 1).

Com a compreensão desses dados é possível conduzir o simulador para que funcione de acordo com as necessidades desejadas, para essa primeira simulação os parâmetros do cartão *miscellaneous* são definidos em: DELTAT em 1×10^{-5} , TMAX 1×10^{-2} , os valores de XOPT, COPT são 0, e a montagem do circuito se dá de maneira como é demonstrado na Figura 8.

Figura 8 – Exemplo com abertura de chave (Circuito 1).



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 8, pode-se ver a montagem de um circuito com banco de capacitores, para a montagem foram adotados os seguintes parâmetros baseados em [17]:

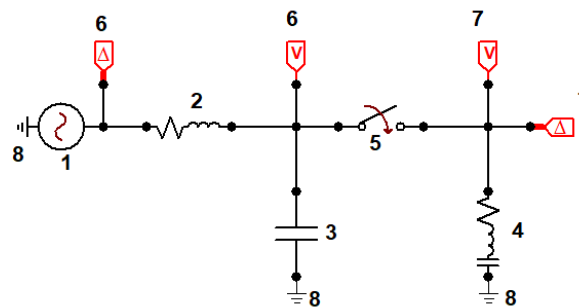
No ponto 1	Uma fonte alternada com o valor tensão de 187.794 V.
No ponto 2	Indutor com valor de 52,9 Ω
No ponto 3	Capacitor antes da chave com valor 3.79 μF .
No ponto 4	Capacitor após a chave com valor 3.79 μF .
No ponto 5	Chave do sistema, inicialmente está fechada e é aberta com 0,01 s
No ponto 6	Ponto de coleta de dados.
No ponto 7	Ponto de coleta de dados.
No ponto 8	Aterramentos do circuito.

3.1.2. Simulação 2: Manobra de fechamento (Circuito 2).

Para visualizar de maneira mais clara, é realizado o mesmo experimento agora com o fechamento de uma chave, para essa segunda simulação os parâmetros do cartão *miscellaneous* são definidos em: DELTAT em 1×10^{-4} , TMAX 1×10^{-1} , os valores de XOPT, COPT igual a 0.

O procedimento da Simulação 1, foi realizado de forma semelhante na Simulação 2 (circuito representado na Figura 9), porém, ao invés da chave estar fechada e ocorrer o processo de abertura, a chave inicialmente está aberta e ocorreu o fechamento no instante de 1s.

Figura 9 – Circuito com fechamento da chave do banco de capacitor (Circuito 2).



Fonte: Autoria própria.

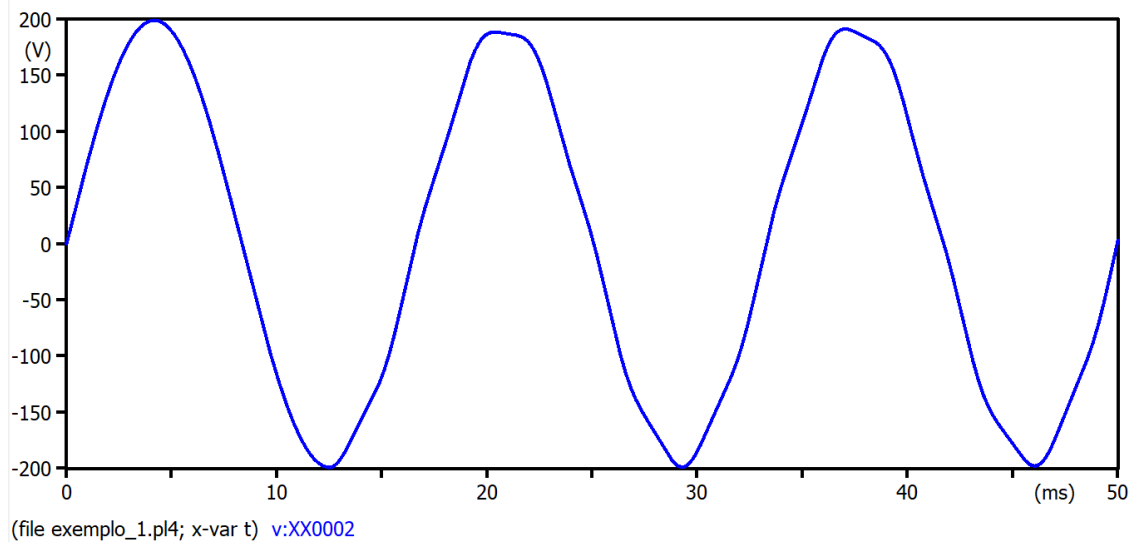
Na Figura 9, pode-se observar a montagem do Circuito 2 com banco de capacitores, para a montagem foram adotados os seguintes parâmetros baseados em [17]:

No ponto 1	Uma fonte alternada com o valor tensão de 56,3 V.
No ponto 2	Um indutor com valor de 10Ω e um resistor com o valor de $0,1 \Omega$
No ponto 3	Capacitor antes da chave com valor 10 uF.
No ponto 4	Um capacitor com valor de 10 uF, uma resistência com valor de $0,025 \Omega$ e um indutor com valor de $0,2 \Omega$.
No ponto 5	Chave do sistema, inicialmente está aberta e é fechada com 1 s
No ponto 6	Ponto de coleta de dados.
No ponto 7	Ponto de coleta de dados.
No ponto 8	Aterramentos do circuito.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a montagem desse sistema e a realização das configurações de parâmetros, pode-se obter os dados dessa simulação por meio de gráficos, e com eles se torna possível a análise das tensões e corrente no circuito no ponto 6 e 7, com esses dados pode-se ver a influência da manobra em seu circuito na Figura 10.

Figura 10 – Saída da tensão(V) pelo tempo(ms) no ponto 6 do Circuito 1.

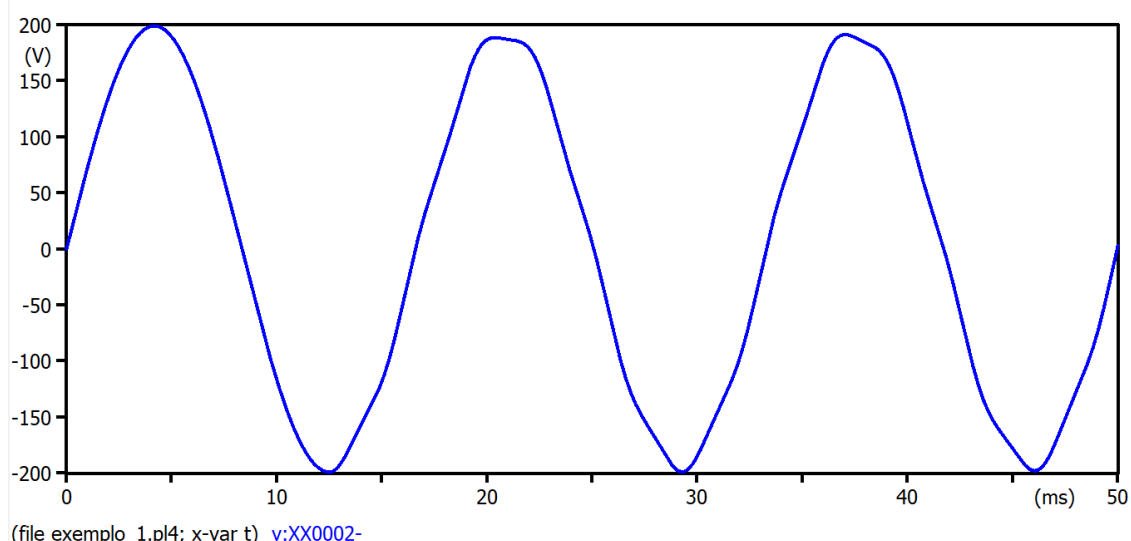


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 10, tem-se o gráfico de comportamento senoidal com tensão na amplitude de aproximadamente 200 V, sem presença de distúrbios transitórios consideráveis.

No entanto, quando ocorre o acionamento da chave próximo ao ponto 12 ms essa senoide começa a se tornar um pouco distorcida, o que demonstra o impacto da abertura da chave no circuito, onde nesse ponto é analisado antes da chave. Como mostrado na Figura 11.

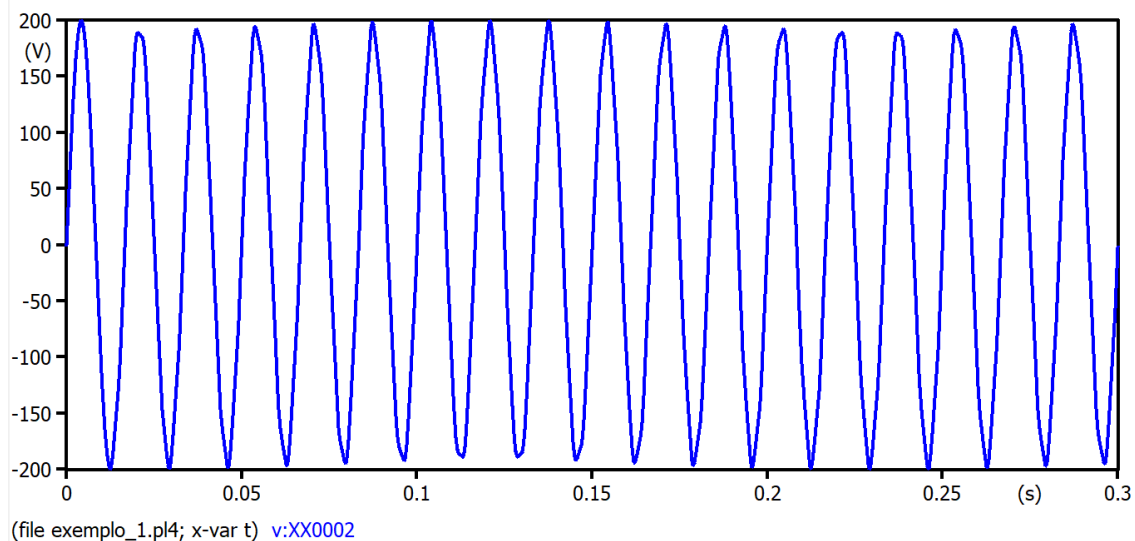
Figura 11 – Saída da tensão(V) pelo tempo(ms) no ponto 7 do Circuito 1.



Fonte: Autoria própria.

De maneira bastante semelhante pode ser observado o comportamento da tensão após a chave, onde começa a ocorrer uma distorção após o acionamento de abertura da chave, podemos observar que essa distorção é mínima, podendo ser considerada até distorções irrelevantes ao sistema, pois provavelmente nenhum equipamento no sistema iria se danificar nesta manobra. Considerando um intervalo de tempo maior, a Figura 12 representa o formato de onda do sistema para 300 ms.

Figura 12 – Saída da tensão (V) com análise no intervalo de tempo em segundos(s) (Circuito 1).



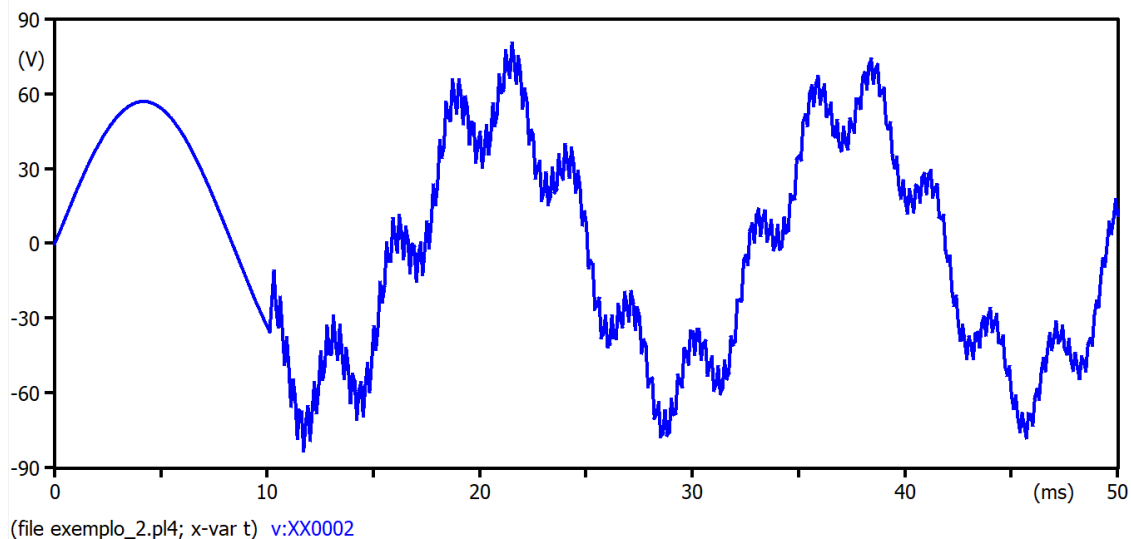
Fonte: Autoria própria.

A distorção devido ao chaveamento ocorre em um curto período de tempo até que ocorra a estabilidade novamente, ou seja, podemos observar que o impacto devido ao acionamento da chave ocorre durante apenas um período, e após ele o sistema tende a regular de maneira semelhante ao que estava anteriormente.

Após a montagem dessas configurações e por meio dos dados dessa simulação é possível se obter a análise das tensões no circuito no ponto 6 e 7, com esses dados podemos ver a influência da manobra em seu circuito.

Dando continuidade as simulações do exemplo da Figura 9, é possível obter o resultado mostrado na Figura 13, em que é verificado o comportamento do sistema ao ocorrer um fechamento de chave no ponto 6, considerando que o banco de capacitores esteja inicialmente descarregado.

Figura 13 – Análise da tensão (V) ao longo do tempo (ms) antes da abertura da chave.



Fonte: Autoria própria.

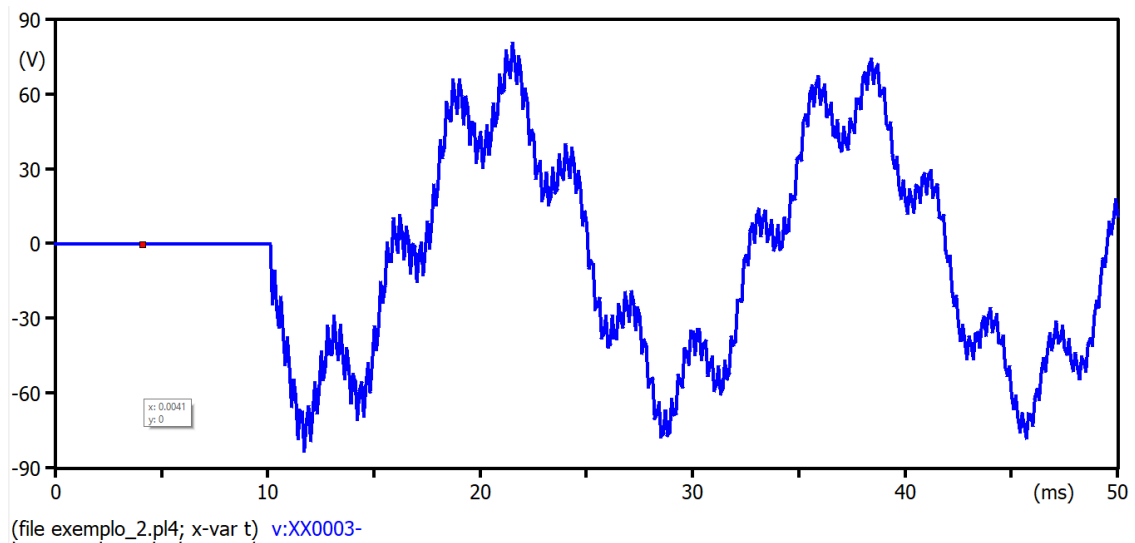
Quando o gráfico da tensão no fechamento da chave é plotado, é possível observar que existe uma distorção maior no sistema quando se comparado ao gráfico com a abertura de chaveamento, nesse caso vemos o comportamento da tensão que fica

localizada a um ponto antes dessa chave, onde inicialmente observa-se que esse ponto encontra-se em formato senoidal e com valores de tensão aproximadamente de 60 V, quando o chaveamento ocorre os valores presentes nesse ponto se o princípio de onda senoidal é mantido mas de forma distorcida.

É possível analisar um valor em relação a sobretensões de aproximadamente 83 V em seu pico o que representa uma porcentagem 38% acima do valor pico nessa simulação que seria de 60 V.

Já ao ponto a jusante ao ponto 7, mostrado na Figura 9, considerando que o banco se encontra inicialmente descarregado temos como resultado a Figura 14.

Figura 14 – Análise da tensão (V) ao longo do tempo (ms) antes do fechamento da chave.

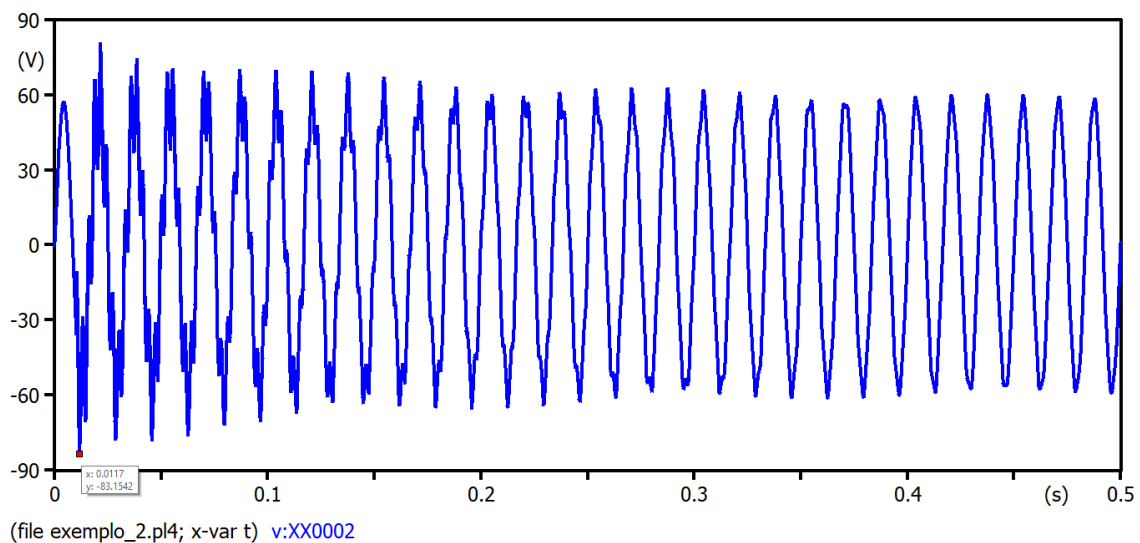


Fonte: Autoria própria.

Como a chave está inicialmente aberta e o sistema desenergizado, a leitura da tensão até o acionamento é 0. Quando ocorre o fechamento, a energização se passa de maneira distorcida, observa-se que a distorção ocorre de maneira semelhante ao que ocorre no ponto antes dessa chave.

Já quando analisado em um intervalo de tempo maior, é possível observar que essa distorção é apenas temporária (Figura 15).

Figura 15 – Saída da tensão (V) em relação ao tempo em segundos(s), no ponto antes do chaveamento.

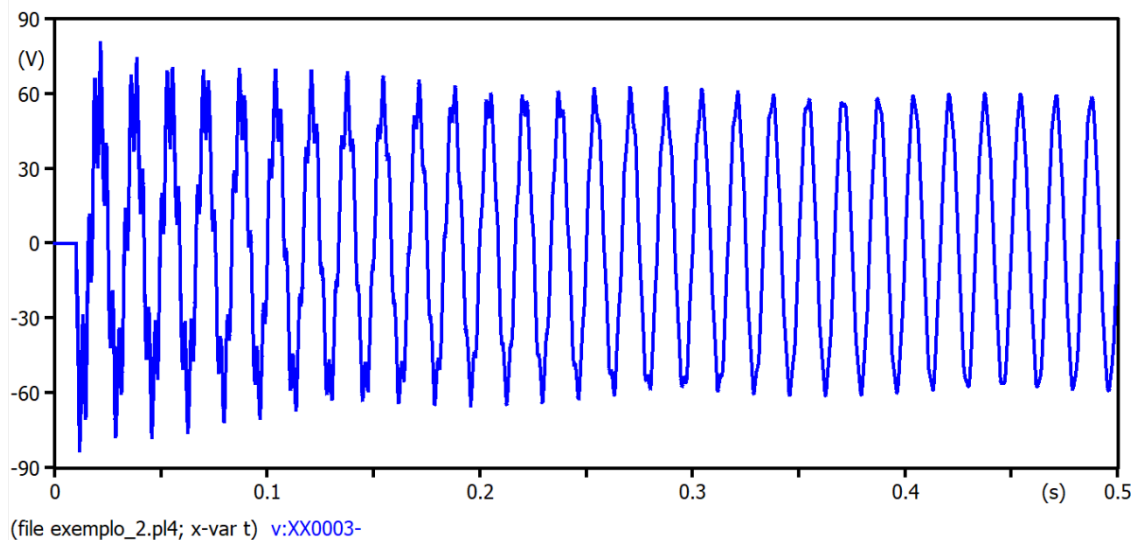


Fonte: Autoria própria.

Ao analisar o gráfico em um intervalo de tempo maior, no ponto antes da chave, nota-se que a distorção quando ocorre o acionamento da chave é temporário e por um curto espaço de tempo, após esse período o sinal se torna ao longo dele mais estável.

De mesma maneira pode-se observar que esse processo ocorre no ponto após o chaveamento na Figura 16.

Figura 16 – Saída da tensão (V) em relação ao tempo em segundos(s), no ponto depois do chaveamento.



Fonte: Autoria própria.

De modo semelhante ocorre com o sinal medido após a chave, diferenciando apenas que, inicialmente, o valor da tensão é nulo. Quando ocorre o acionamento, também se inicia a distorção na forma de onda por um intervalo de tempo até que se estabilize ao longo do tempo.

Pode-se verificar pelos gráficos que manobras com banco de capacitores causam interferências no circuito, seja no ponto anterior ou após o chaveamento. Percebe-se

também que existe um distúrbio maior no sistema quando ocorre o fechamento do chaveamento. Quando ocorre a abertura, esse transitório passa a ser irrisório quando se comparado com o fechamento, e sua duração total ocorre em um curto período de tempo, mas esses distúrbios podem ocasionar danos aos equipamentos conectados ao sistema. Em função disso, faz-se necessário implementação de soluções que visem atenuar esses distúrbios, minimizando os impactos relacionados a estes.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A importância dos bancos de capacitores em sistemas elétricos de potência se dá na correção do fator de potência, inicialmente não existe a possibilidade da instalação de um banco de capacitor junto ao SEP, já que não há como prever qual valor da correção em relação ao fator de potência será necessária, logo a inserção desses bancos ocorre após o funcionamento inicial do sistema.

A inserção desses bancos ocorre em manobras por meio de chaves fusíveis, onde inicialmente o banco encontra-se desenergizado. Dessa forma, quando ocorre esse processo de energização dos bancos, são geradas interferências no sistema que podem afetar os equipamentos que já existem no sistema.

Por meio dessas simulações foi possível observar que os parâmetros corrente e tensão do sistema sofre distúrbios. Em relação ao fechamento (inserção dos bancos) são consideravelmente grandes e por um curto período de tempo, no entanto, mesmo por um período curto de tempo, os impactos provenientes dos surtos transitórios podem danificar outros equipamentos eletrônicos já conectados no sistema em questão. Em relação a manobra de abertura de chaveamento, levando em consideração as tensões e correntes, os distúrbios gerados nessa manobra são consideravelmente inferiores se comparado as manobras de fechamento.

É importante considerar a implementação de métodos que possam amenizar essas distorções, como a utilização de RPIs, reator limitador ou chaveamento controlado. Por meio desses métodos é possível atenuar as distorções causadas nas manobras com banco de capacitores.

Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se considerar a análise através de simulação com a presença de outros fatores, como a tentativa de atenuar esses distúrbios com o uso de RPIs, o uso de para-raios no sistema ou sistema de chaveamentos sincronizados.

REFERENCIAS

- [1] F. M. P. ;(Laboratório de A. T. Pamplona, D. ;(Departament. de E. E. Fernandes, and W. L. A. ;(Universidade F. da P. Neves, “Sobretensões Transitórias Decorrentes de Manobras de Bancos de Capacitores,” no. January, 1998.
- [2] R. C. G. Campos, M. F. (PUC M. Alves, and D. de O. (Alstom G. Lacerda, “Estudos de Transitórios Eletromagnéticos em Bancos de Capacitores MSCDN,” no. May, 2012, doi: 10.13140/2.1.3574.0800.
- [3] R. C. Dorf, “Introdução aos Circuitos Elétricos,” 2016.
- [4] H. S. Williams, “A History of Science,” 1999.
- [5] A. M. D. S. SOBRINHO, “ESTUDO DE TRANSITÓRIOS CAUSADOS POR MANOBRA DE BANCOS DE CAPACITORES EM REDES ELÉTRICAS.,” vol. 13, no. 3, pp. 1576–1580, 2015.
- [6] J. Mamede Filho and D. R. Mamede, “Proteção de Sistemas Elétricos de Potência,” 2014.
- [7] A. P. Moura, A. A. F. Moura, and E. P. Rocha, *Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Alternada*. 2019.
- [8] M. A. Barbosa, “Sobretensões de Manobra: Dimensionamento de Resistor de Pré-Inserção. 1989. 137 f.,” Universidade Federal de Minas Gerais, 1989.
- [9] J. C. Das, “Analysis and Control of Large-Shunt-Capacitor-Bank Switching Transients,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 6, pp. 1444–1451, Nov. 2005, doi: 10.1109 / TIA.2005.858279.
- [10] A. V. A. de Menezes, “Estudo de Surtos Decorrentes de Manobra em Bancos de Capacitores,” 2010.

- [11] R. C. Van Sickle and J. Zaborszky, "Capacitor Switching Phenomena," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 70, no. 1, pp. 151–159, Jul. 1951, doi: 10.1109 / T-AIEE.1951.5060382.
- [12] C. de D. de P. C. S. do I. Grupo de trabalho 3.4.17 do IEEE, "Impact of shunt capacitor banks on substation surge environment and surge arrester applications," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 4, pp. 1798–1807, 1996, doi: 10.1109/61.544260.
- [13] A. Greenwood, "Electrical transients in power systems, 2nd edition." New York, NY (USA); John Wiley and Sons Inc., Jan. 01, 1991.
- [14] R. A. Jones and H. S. Fortson, "Consideration of Phase-to-Phase Surges in the Application of Capacitor Banks," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 1, no. 3, pp. 240–244, 1986, doi: 10.1109 / TPWRD.1986.4307998.
- [15] F. R. Alves, L. C. A. Fonseca, and A. R. F. Freire, "Uso de Manobra Síncrona para Eliminação do Risco de Danificação de Transformadores Devido a Energização de Bancos de Capacitores 230kV," 1999.
- [16] ATPDraw, "Home." <https://www.atpdraw.net/> (accessed Nov. 04, 2021).
- [17] D. Z. Lins and V. A. L. Ferreira, "Equipamentos aelétricos ATP Draw - Apostila de Práticas." 2017.
- [18] A. D'Ajus *et al.*, "Transitórios Eletricos e Coordenação de Isolamento." 1987.
- [19] M. F. McGranaghan, R. M. Zavadil, G. Hensley, T. Singh, and M. Samotyj, "Impact of utility switched capacitors on customer systems-magnification at low voltage capacitors," *Proc. 1991 IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, pp. 908–914, 1991, doi: 10.1109 / TDC.1991.169611.
- [20] T. E. Grebe and E. W. Gunther, "Application of the EMTP for analysis of utility capacitor switching mitigation techniques," *8th Int. Conf. Harmon. Qual. Power. Proc. (Cat. No.98EX227)*, vol. 1, pp. 583–589, 1998, doi: 10.1109 / ICHQP.1998.759975.

