

## COMPENSAÇÃO DE REATIVOS E OS SEUS EFEITOS SOBRE O SEP (SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA)

Gabriel De Novais Gomes<sup>1</sup>, João Henrique Da Silva Moreira<sup>1</sup>, Luiz Antônio Dala Barba<sup>1</sup>, Denise S. S. Bernini<sup>2</sup>, Ronimar Volkens<sup>3</sup>

1. Pós-Graduando Em Sistemas Elétrico De Potência
2. Dr<sup>a</sup>. Engenharia De Produção – Docente Multivix Vitoria
3. Mestre Engenharia Elétrica – Docente Multivix

### RESUMO

Este artigo tem como ponto central a utilização de banco de capacitores e compensadores chaveados a tiristores no controle de fator de potência e tensão de um barramento. Esses métodos são utilizados para aliviar o carregamento e evitar que o sistema opere fora da faixa de fator de potência estabelecida pela ANEEL. O objetivo desse estudo é comparar a performance desses métodos simulando sua resposta de acordo com a evolução da carga reativa utilizando o software PTW32 (Power Tools for Windows), constatando os pontos fortes de fracos de ambos.

**Palavras-chave** – PTW, Compensação de Reativos, SVC (Static Var Compensator), Banco de Capacitores.

### INTRODUÇÃO

Os SEP são circuitos destinados a transmitir grandes quantidades de energia, desde os locais de sua geração até os centros de consumo e então, distribuí-las aos consumidores individuais. Essa cadeia logística é cercada de problemas de regulação de fator de potência e controle de tensão no barramento, portanto este trabalho tem como foco estudar as fontes de compensação estática definindo a característica de cada uma e suas vantagens e desvantagens.

Segundo Brigatto (1994), planejamento e a operação dos sistemas de energia elétrica são levados a utilizar técnicas bastante sofisticadas de resolução de problemas envolvidos que permitem englobar toda a grande complexidade associada a esses sistemas. Estes sistemas são projetados para atender certos critérios mínimos, no que diz respeito a:

- Capacidade de transmissão de energia;
- Qualidade de transmissão;
- Confiabilidade; □ Economia.

Os equipamentos utilizados em uma instalação industrial (motores elétricos de indução, transformadores, etc.) são em sua maioria consumidores parciais de energia reativa indutiva a qual não produz nenhum trabalho. A energia reativa indutiva apenas é necessária para a formação do campo magnético dos referidos equipamentos. A potência reativa indutiva necessária a criação do campo magnético é normalmente transmitida a partir de uma fonte geradora distante da indústria, sobrecarregando o sistema e acarretando perdas nos sistemas de transmissão e distribuição. Desta forma seria interessante que a potência reativa indutiva fornecida (trocada) pela fonte geradora fosse fornecida por uma fonte local (na própria indústria) de maneira a aliviar o sistema fornecedor de energia. Assim o sistema poderia transportar mais

energia que efetivamente resulte em trabalho (energia ativa/potência ativa no eixo do motor). As fontes de reativos podem ser:

1. Geradores (fonte própria);
2. Motores síncronos superexcitados (compensador síncrono);
3. Capacitores;

Segundo manual para correção do fator de potência do fabricante WEG a utilização de compensadores de reativos através de banco de capacitores, controlados ou não, são utilizados em grande escala nas áreas de projeto e manutenção. No intuito de otimizar o uso da energia elétrica a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), através do Decreto Nº 479 de 20 de Março de 1992 estabeleceu que o fator de potência mínimo deve ser 0,92.

Este artigo tem como objetivo comparar as tecnologias de instalação de capacitores ou compensadores estáticos, corrigindo efetivamente o fator de potência e proporcionando às empresas maior qualidade e maior competitividade.

## **COMPENSAÇÃO DE REATIVOS E OS SEUS EFEITOS**

De acordo com Kristian Pessoa dos Santos e Augusto César Sousa Braga Monte (2009), para o bom funcionamento do sistema é fundamental que a energia reativa esteja adequada à demanda da carga, ou seja, que a oferta de energia reativa pelos sistemas de geração atenda à demanda da carga.

Segundo Santos e Monte (2009, p. 10):

Se a demanda de energia reativa pela carga for maior que a quantidade enviada pela geração, ou, ao contrário, se a oferta é maior que a demanda, o sistema poderá apresentar diversos problemas operacionais como instabilidade de tensão, perda de sincronismo de máquinas elétricas, sobreaquecimento de geradores e perdas na transmissão. Esses problemas comprometem seriamente a confiabilidade e a continuidade do sistema e podem ser responsáveis por grandes prejuízos às empresas de energia elétrica.

A compensação de reativos no SEP é o controle feito através de estudos de fluxo de carga para injeção ou absorção de reativos no sistema em sua quantidade ideal. Essa compensação de reativos é feita em tempo real, ou não, por meio de equipamentos próprios que injetam ou absorvem reativos do sistema de acordo com as necessidades da carga, garantindo o bom funcionamento do mesmo.

### **SVC – Static VAR compensator:**

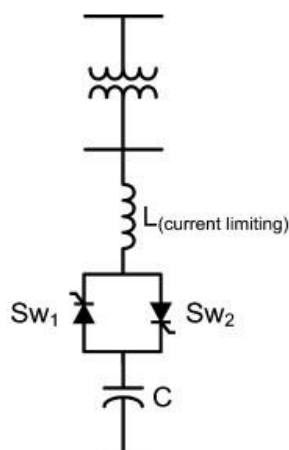
SVC é conectado a uma barra do SEP e, através do seu sistema de controle, a tensão da barra é constantemente comparada a um valor de referência com o qual fora previamente ajustado onde, dependendo do valor desta tensão, o SVC irá injetar ou absorver reativos no sistema para manter a tensão da barra próxima da tensão de referência.

Os SVCs são divididos em TSC compensador estático capacitivo e TCR compensador estático reativo.

TSC – Capacitor chaveado a tiristor

O compensador estático capacitivo possui como característica a correção da tensão na barra e fator de potência quando o sistema possui a potência reativa indutiva acima dos parâmetros pré-estabelecidos. A figura 1 ilustra o diagrama unifilar de um TSC.

Figura 1 – Diagrama Unifilar do TSC.



Fonte: Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review, 2005.

Com base na análise da figura 1, é possível observar que os TSCs são constituídos de um banco de capacitores C, tiristores bidirecionais representados por SW1 e SW2 e um indutor L responsável por limitar a corrente do ramo.

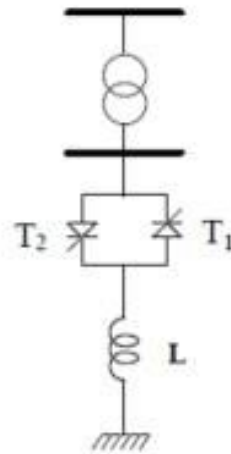
Vale lembrar que, segundo DIXON (2005), o chaveamento nos TSCs deve preferencialmente ocorrer quando a tensão na rede for igual a tensão na barra, dessa forma ocorre a diminuição de transientes no sistema interligado.

Embora o princípio de funcionamento seja muito simples, esse tipo de compensador possui algumas desvantagens: Cada banco de capacitor deve possuir um grupo bidirecional de tiristores o que torna sua implantação não atrativa economicamente, além de a capacidade de isolamento do semicondutor ser o dobro da tensão de pico da rede, garantindo assim a integridade do circuito de chaveamento.

### TSR – Reator chaveado a tiristor

O método de compensação de reativo utilizando reator chaveado a tiristor consiste em um ramo paralelo que fornece ou absorve potência reativa indutiva, cuja finalidade é controlar o fator de potência e tensão na barra, representada por L na figura 2. Outro ponto a se destacar são dois tiristores em antiparalelo, T1 e T2 responsável pelo chaveamento e controle do fluxo de potência reativa.

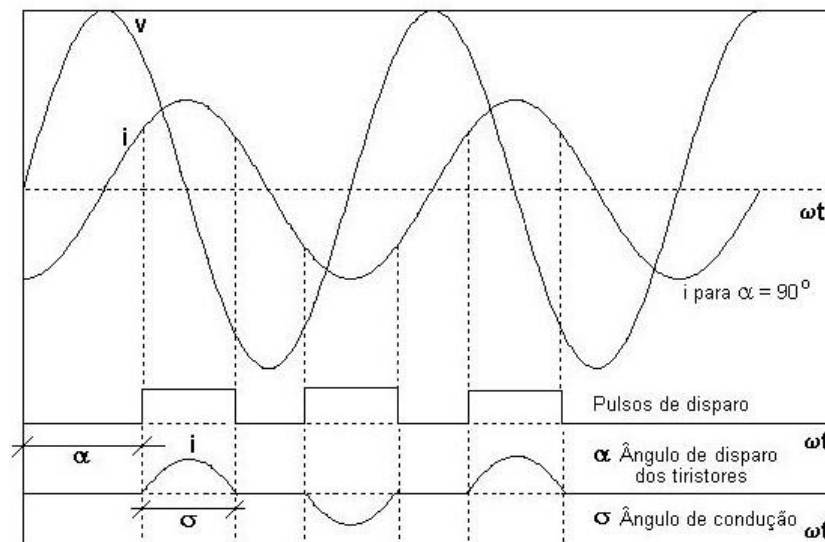
Figura 2 – Diagrama Unifilar do TSR.



Fonte: Elaborado por Janayna Silva da Costa, 2016.

A manipulação da potência reativa despachada no sistema interligado é realizada através do ângulo de disparo dos semicondutores. Conforme Jim Silva Naturesa (2001) quando o ângulo de disparo é ajustado para  $90^\circ$ , ocorre o máximo de transferência de potência reativa pelo banco, portanto este ponto representa o valor máximo de despacho de potência reativa e à medida que o ângulo incrementa até o limite de  $180^\circ$  ocorre a atenuação no módulo da potência reativa injetada no barramento. É importante ressaltar que o disparo é feito uma única vez dentro de um semiciclo da onda, portanto o disparo vai ocorrer uma vez no semiciclo positivo e uma no negativo, conforme Figura 3. Ângulos de disparo entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  não são desejáveis, pois produzem correntes assimétricas com componente contínua.

**Figura 3 – Ajustes de disparos dos semicondutores**



Fonte: Elaborado Jim Silva Naturesa, 2001.

De acordo com Fernando Mendonça da Fonseca (2010) a subestação Bandeirante localizada no estado de Goiás, possui um sistema de controle de tensão no barramento de 345kV realizado por chaveamento de tiristores. O sinal de disparo no gate do tiristor é realizado por uma malha de controle que regula o ângulo de condução do circuito de potência, dessa forma é possível controlar o despacho de potência reativa de acordo com a demanda em qualquer instante de

tempo. Com essa aplicação, essa subestação possui um controle de tensão no barramento garantindo tensão constante desde que os limites de carregamento do banco seja respeitado.

## BANCO DE CAPACITORES

São utilizados na compensação de reativos. Eles possuem baixo custo, fácil instalação e operação. A ligação nas barras de transmissão e/ou distribuição pode ser em série ou paralelo.

Ligação em paralelo: Compensar a perdas do sistema e trabalhar em níveis seguros de tensão durante o carregamento. A desvantagem é a geração de reativos proporcional ao quadrado de tensão, com isso, uma queda de tensão no sistema, a geração de reativos será menor que a necessidade do momento.

Ligação em série: Compensam a reatância indutiva das linhas de transmissão. A energia reativa capacitiva compensada na linha é menor, diminuindo as perdas e aumentando a transmissão de potência.

A principal função é corrigir o fator de potência, evitando sobrecargas em geradores e transformadores.

Segundo P. Kundur (1994, p. 581):

A utilização de bancos de capacitores chaveados apresenta um custo muito menor em relação aos sistemas FACTS, entretanto, o chaveamento de um banco capacitor, durante uma instabilidade transitória, pode não ser suficientemente rápido para prevenir a instabilidade de tensão.

**Figura 4 – Banco de Capacitores**



Fonte: [www.mmp.srv.br/bancodecapacitor](http://www.mmp.srv.br/bancodecapacitor), 1998.

A principal diferença entre o banco de capacitores e os demais componentes de controle de reativos estáticos na rede é que ele mantém um valor de reativos fixo máximo na rede com a tensão nominal, de acordo com o valor projetado, independente da necessidade do momento. Caso tenha uma queda de tensão rápida, ele não conseguirá manter o nível de tensão desejado imediatamente, pelo fato de jogar os reativos na rede inversamente ao quadrado com a queda de tensão. A ação dele não é instantânea, tornando-o menos eficiente, apesar de ser o de menor custo. A sua inserção na rede pode ser de forma manual ou automática.

## **METODOLOGIA DA PESQUISA**

Este estudo foi baseado em uso de software computacional, pois busca gerar conhecimento para aplicação de métodos de controle de tensão, fator de potência e corrente, a fim de dimensionar as fontes de energia reativa, tais elas como banco de capacitores e compensadores estáticos de reativos (SVC), e suas contribuições para a planta em questão.

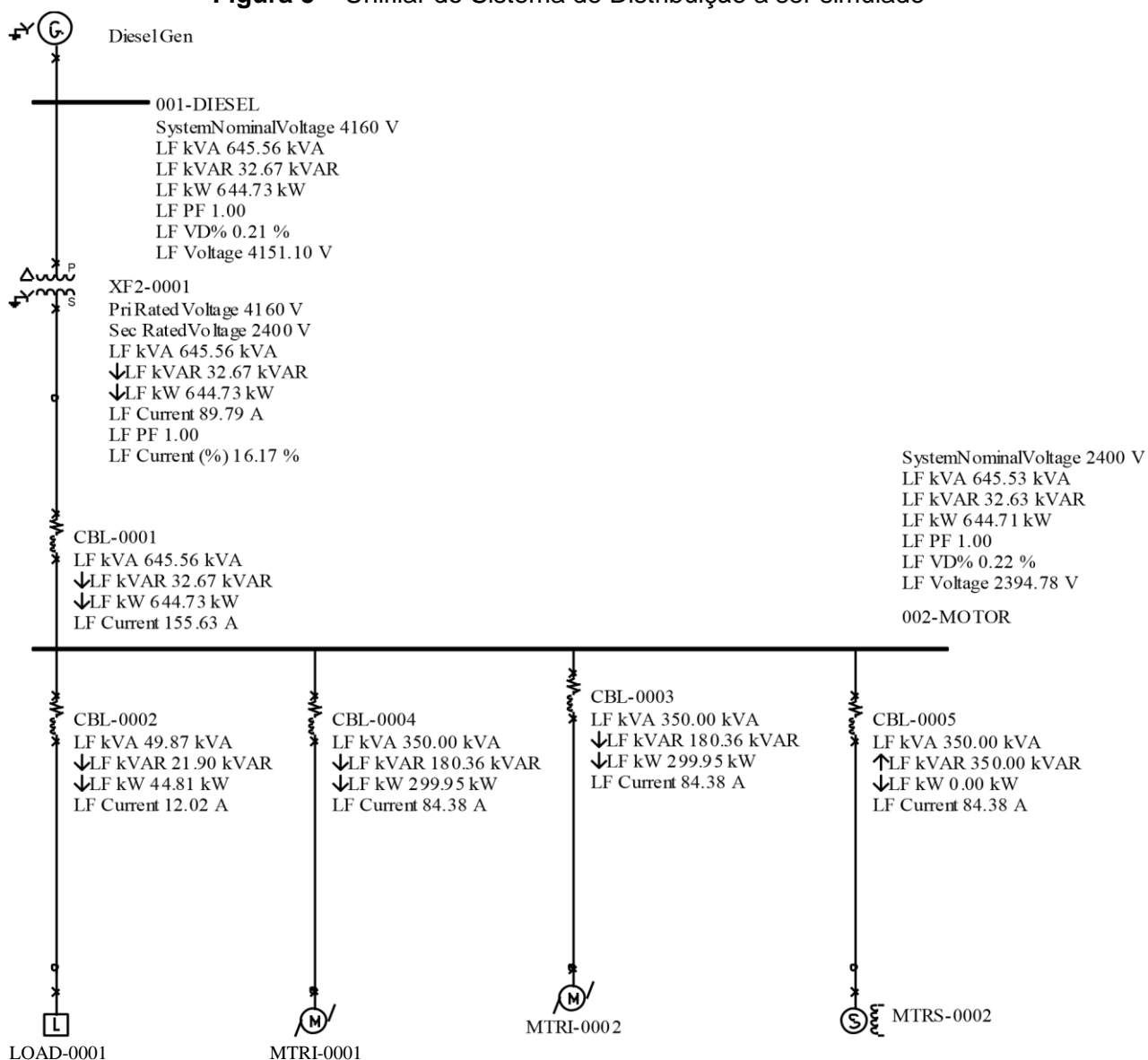
Foram utilizados os dados de um alimentador de uma empresa mineradora do ES (Espírito Santo) obtidos nas bases de dados existentes.

A abordagem foi quantitativa identificando resultados nas análises e comparativa entre os métodos pesquisados.

## **ESTUDO DE CASO**

Neste tópico será abordado um estudo de caso de compensação de reativo através de um banco de capacitores e um compensador estático, comparando suas respostas ora com a carga constante e o compensador reativo variável e ora com a carga variável e o compensador constante. A Figura 5 representa o diagrama unifilar que será estudado.

**Figura 5 – Unifilar do Sistema de Distribuição a ser simulado**



Fonte: gerado pelo software PTW32, 2017.

As Figuras 6, 7 e 8 descrevem o comportamento do fator de potência, tensão na barra 2 e corrente no transformador respectivamente utilizando um banco de capacitor como método de compensador de reativo. É importante salientar que neste caso foi considerado a carga constante e o banco de capacitor variável.

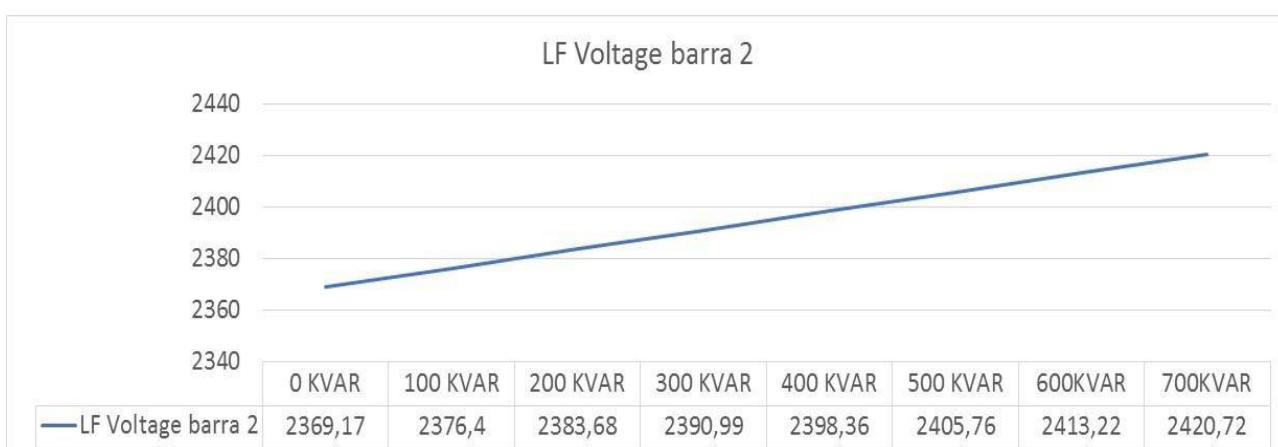
**Figura 6 – Evolução do Fator de Potência**



Fonte: simulação do PTW32, 2017.

Analisando a figura 6 é possível observar que no primeiro instante, para banco igual a 0 KVAR, o fator de potência é 0,86 indutivo em virtude da característica da carga e a medida que é incrementado potência reativa capacitiva maior o fp eleva-se até 1, ponto onde há apenas potência ativa. A partir daí, o valor começa a decrescer, pois o sistema começa assumir características capacitivas.

**Figura 7 – Evolução da Tensão**



Fonte: simulação do PTW32, 2017.

A figura 7 destaca o crescimento da tensão de acordo com o incremento da potência reativa capacitiva. Vale lembrar que esse efeito na tensão, é provocado pelas características capacitivas que o sistema está submetido.

**Figura 8 – Evolução da Corrente**





Fonte: simulação do PTW32, 2017.

A figura 8 remete-se ao perfil da corrente de acordo com o incremento de reativo capacitivo na linha. Destaca-se nesse caso, que a medida que é percorrido o eixo x, a corrente reduz até um valor mínimo e em seguida aumenta à medida que evolui a potência reativa capacitiva. Este efeito pode ser explicado dividindo o gráfico em duas partes: a primeira até atingir o valor mínimo e a segunda o aumento da corrente. No primeiro caso o sistema possui característica indutiva intrínseca à carga interligada à barra e a medida que ocorre o incremento de KVAR capacitivo, a potência reativa diminui e por consequência a potência aparente também, provocando assim a queda no valor da corrente. Já no segundo, o sistema possui características capacitivas, portanto a cada incremento de potência no banco de capacitor representa um incremento também na potência aparente, provocando assim o aumento da corrente.

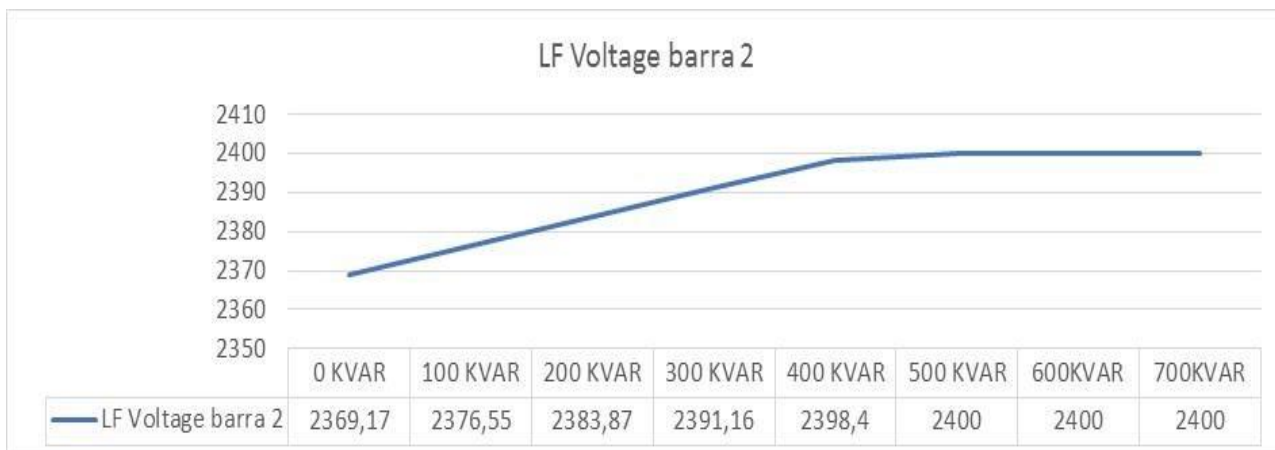
As figuras 9, 10 e 11 representam o perfil do fator de potência, tensão na barra 2 e corrente no Trafo, entretanto neste caso o método de compensação de reativos será através de um compensador estático (SVC), lembrando que a carga é constante e a potência reativa capacitiva variável.

**Figura 9 – Evolução do Fator de Potência**



Fonte: simulação do PTW32, 2017.

**Figura 10 – Evolução da Tensão**



Fonte: simulação do PTW32, 2017.

**Figura 11 – Evolução da Corrente**

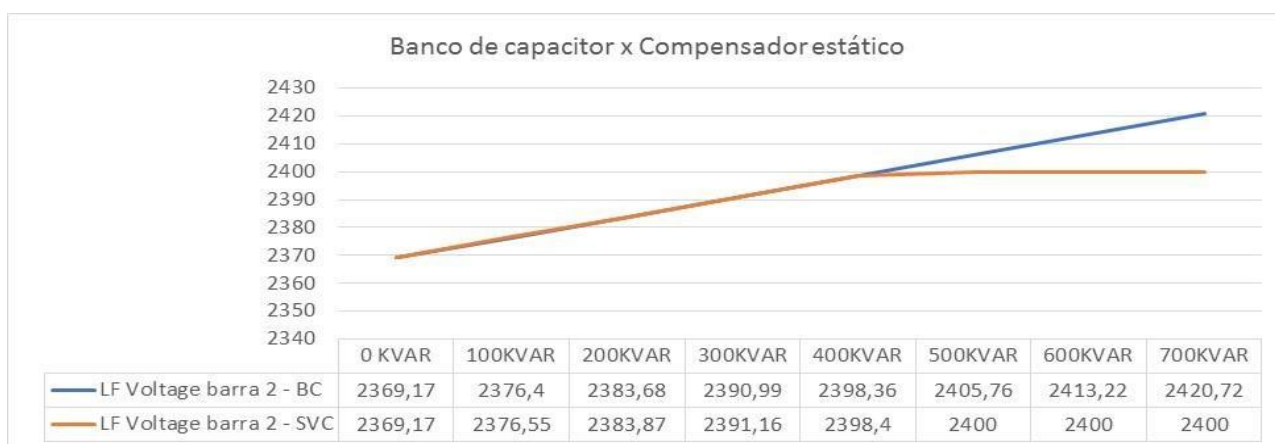


Fonte: simulação do PTW32, 2017.

O comportamento inicial das três curvas assemelha-se com a evolução apresentado pelo incremento no banco de capacitores, todavia o SVC possui uma característica que o difere do banco de capacitor convencional. Conforme explicado no tópico 3.4 sua capacitância é controlada por tiristores, portanto é possível manipular os valores de potência reativa despachada na barra. Destaca-se que a partir de 400KVAR, o valor o SVC é capaz de trazer o f.p. para 1 e a partir daí não utiliza 100% do seu reativo mesmo tendo capacidade para mais, pois controlou o fator de potência em 1 mantendo a tensão e a corrente constantes a partir desse ponto.

Finalizando este tópico do estudo, a figura 12 compara ambos os casos dentro da mesma referência.

**Figura 12 – Comparativo entre B.C. versus S.V.C.**



Fonte: simulação do PTW32, 2017.

## CARGA VARIÁVEL

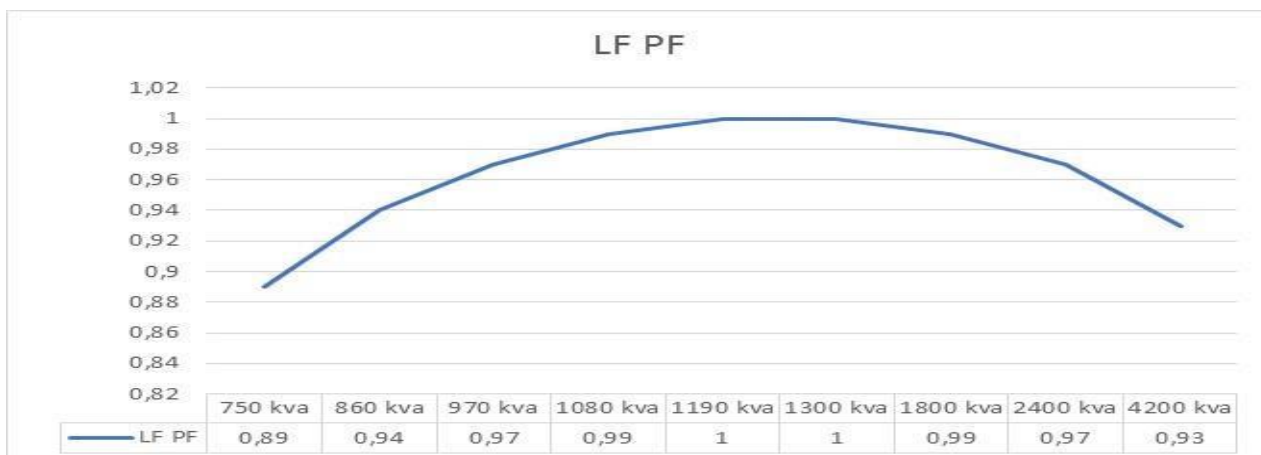
Neste tópico o estudo levanta o perfil do fator de potência, tensão e corrente utilizando um banco de capacitor de 700 kVAr, variando a carga instalada na barra de 750 kVAr até 4200 kVAr.

No primeiro ponto, a planta está com 01 B.C. fixo de 700 kVAr, que faz com que a tensão fique elevada na barra e o fator de potência reativo capacitivo.

Dessa forma, pode-se observar a evolução das grandezas elétricas com o aumento da carga instalada, nas figuras, o fator de potência na barra passa de potência reativa capacitiva para potência reativa indutiva, a tensão decreta em virtude do acréscimo de carga com

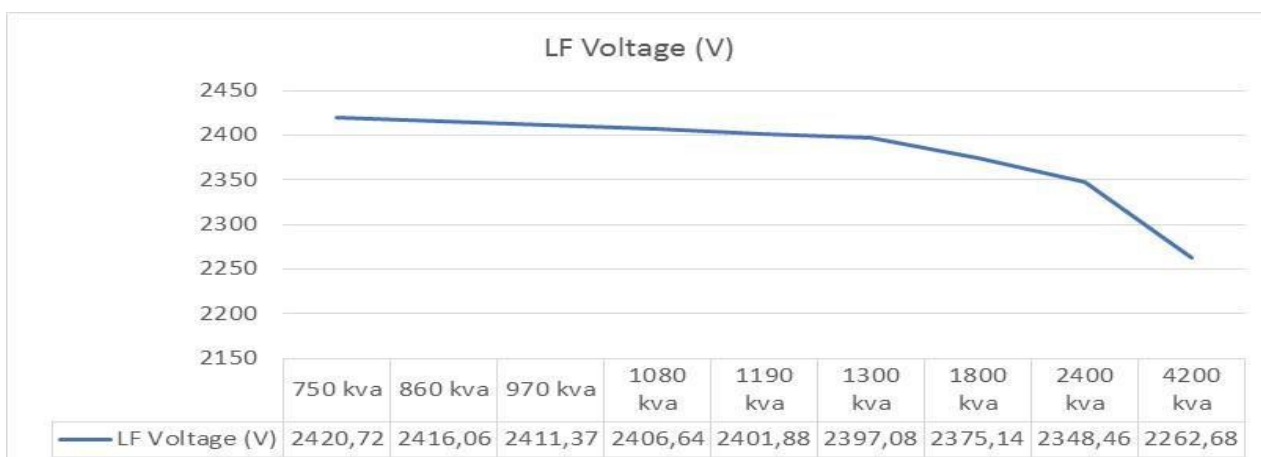
características indutivas e a corrente segue o caminho inversamente proporcional à tensão, conforme figuras 13, 14 e 15.

**Figura 13 – Evolução do Fator de Potência**



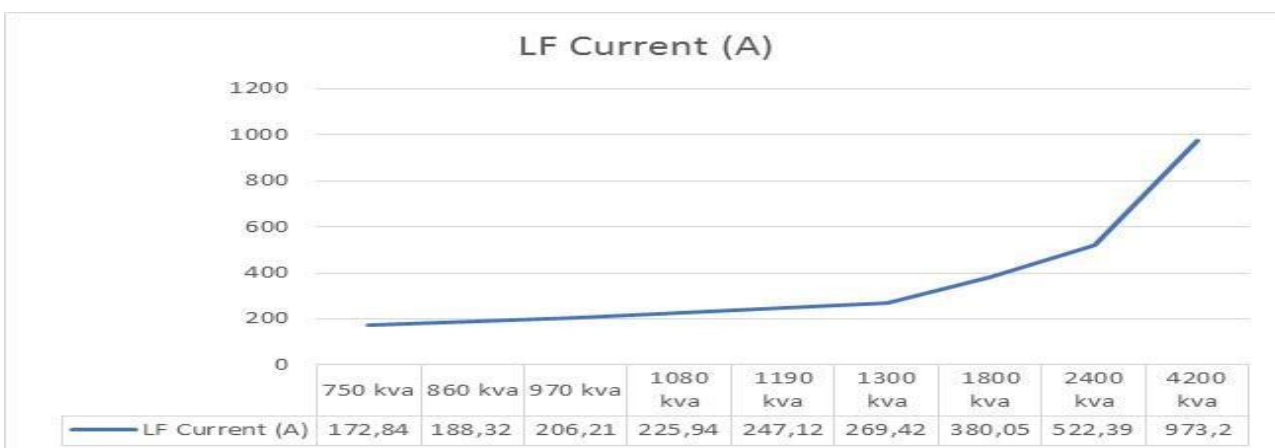
Fonte: simulação do PTW32, 2017.

**Figura 14 – Evolução da Tensão**



Fonte: simulação do PTW32, 2017.

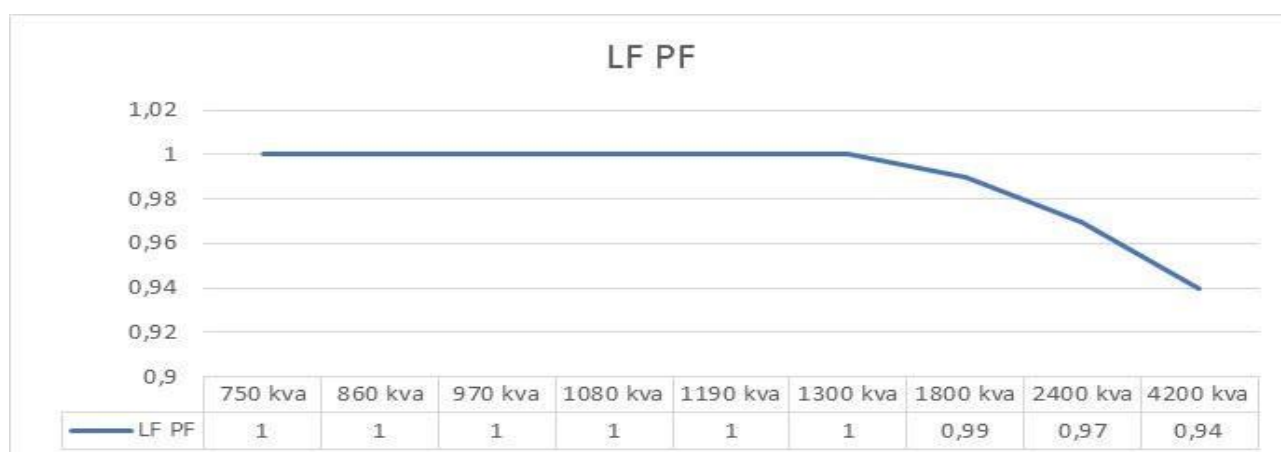
**Figura 15 – Evolução da Corrente**



Fonte: simulação do PTW32, 2017.

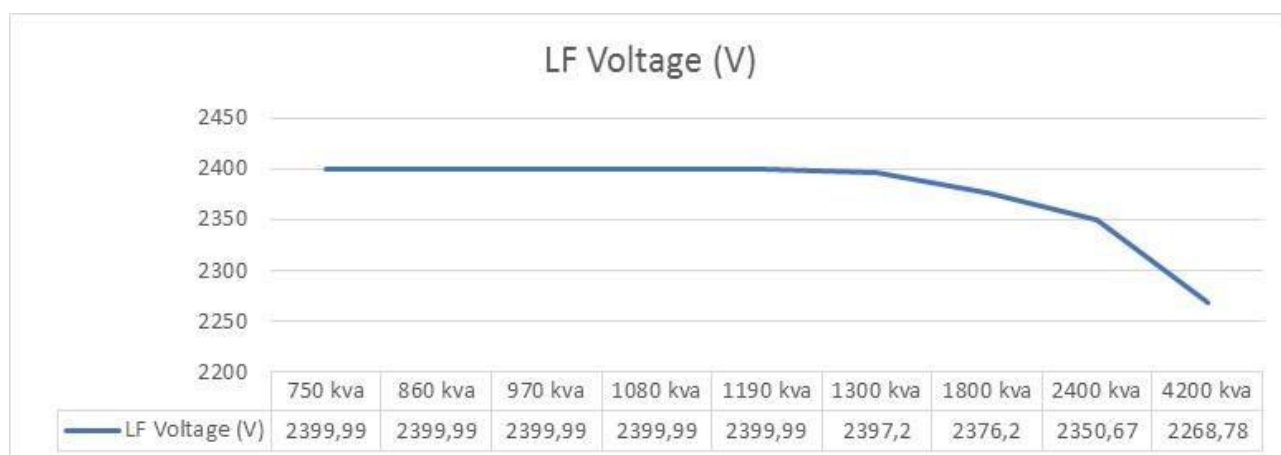
Agora a planta está com o SVC de 700 kVAr modelado para compensar o reativo da planta de modo que a tensão na barra fique com o seu valor nominal. Com essas características em regime o estudo indica que foi verificado que a tensão fica em seu valor nominal até que a potência reativa indutiva ultrapasse o valor de potência reativa do SVC, momento este observado quando a carga instalada fica em seu valor de 1300 kVA, onde o SVC contribui com toda a sua potência reativa capacitiva. Ao aumentarmos a carga na barra para 1800 kVA já é observado a queda de tensão na barra e conseqüentemente a queda do fator de potência, conforme figuras 16, 17 e 18:

**Figura 16 – Evolução do Fator de Potência**



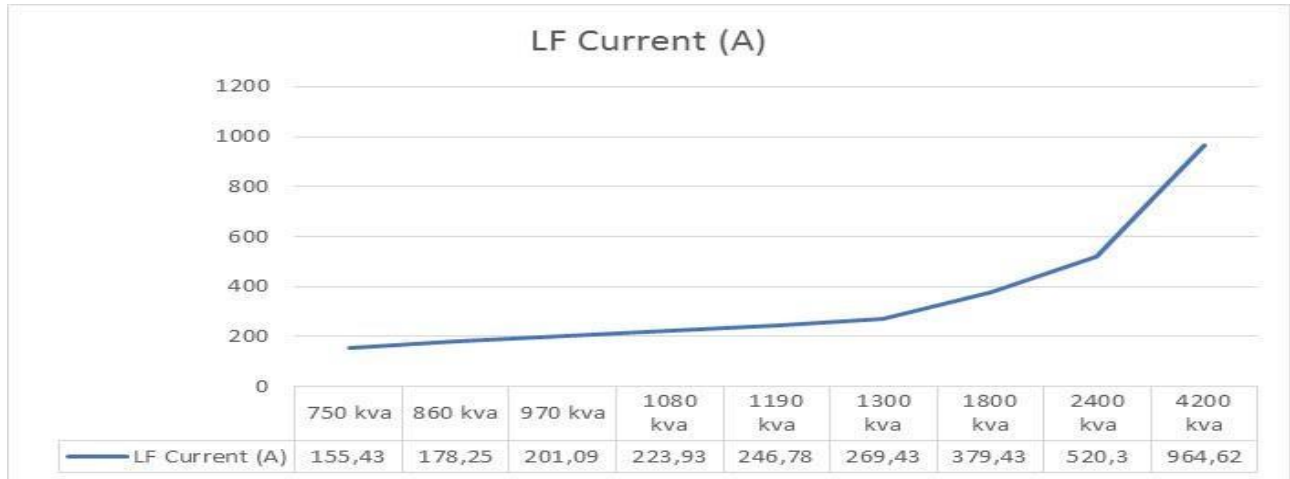
Fonte: simulação do PTW32, 2017.

**Figura 17 – Evolução da Tensão**



Fonte: simulação do PTW32, 2017.

**Figura 18 – Evolução da Corrente**



Fonte: simulação do PTW32, 2017.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O controle e a compensação de potência reativa são necessários para manter um perfil de tensão aceitável em todo sistema de distribuição.

Baseado nos resultados apresentados neste estudo observa-se que a utilização de banco de capacitores e SVCs são fundamentais na regulação do fator de potência e tensão.

Dessa forma, é possível ponderar que o banco de capacitor é uma solução prática e barata, no entanto deve ser utilizado com considerações no que tange o controle da tensão e fator de potência, pois se o valor do banco for acima do demandado, pode ocorrer um aumento indesejado desses parâmetros.

Já o compensador chaveado a tiristor possui um controle mais refinado do fator de potência e tensão no barramento despachando a potência reativa suficiente para estabelecer esses parâmetros dentro do pré-estabelecido, desde que seja respeitado os limites do equipamento. Todavia, a sua implantação se torna mais complexa e onerosa para o investidor.

Visto os resultados das simulações observa-se que o banco de capacitor despacha uma potência reativa nominal do banco, podendo provocar efeitos indesejados no controle do fator de potência, todavia o SVC entrega a potência reativa demandada de acordo com o solicitado pela rede.

## REFERÊNCIAS

ANDRÉA BRIGATTO, Gelson Antônio. **Análise de Contingências em Redes Elétricas: Um estudo do problema reativo através de fatores de sensibilidade e de distribuição**. 1994. 117 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica)- Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994. 1. Disponível em: <[http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/261319/1/Brigatto\\_GelsonAntonioAndrea\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/261319/1/Brigatto_GelsonAntonioAndrea_M.pdf)>. Acesso em: 18 set. 2018.

DIXON, JUAN et al. **Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review**. 2005. 21 f. Artigo (Ms. Eng. and Ph.D. in electrical engineering)- Universidad de Chile, Santiago, 2005. 93. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1545768/>>. Acesso em: 18 set. 2018.

MENDONÇA DA FONSECA, Fernando. **Modelagem da lógica de chaveamento de elementos reativos externos em compensadores estáticos** . 2010. 173 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica)- Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010. 1. Disponível em: <<https://saturno.unifei.edu.br/bim/0037599.PDF>>. Acesso em: 18 set. 2018.

PESSOA DOS SANTOS, Kristian; SOUSA BRAGA MONTE, Augusto César. **COMPENSAÇÃO DE REATIVOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA** . 2009. 58 f. Dissertação (Graduado em Engenharia Elétrica - Eletrotécnica.)- Universidade Estadual do Piauí, Teresina, 2009. 1. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABumsAH/monografiacompensacao-reativos-sistemas-eletricos-potencia>>. Acesso em: 18 set. 2018.

SILVA NATURESA, JIM. **A INFLUÊNCIA DE COMPENSADORES ESTÁTICOS DE REATIVOS NA ESTABILIDADE DE TENSÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA** . 2001. 89 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001. 1. Disponível em: <[http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/260083/1/Naturesa\\_JimSilva\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/260083/1/Naturesa_JimSilva_M.pdf)>. Acesso em: 18 set. 2018.