

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
Engenharia Elétrica

RAFAEL CHAGAS PIMENTA

**COMPENSAÇÃO DE REATIVOS USANDO BANCOS DE
CAPACITORES EM SÉRIE EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Itatiba
2011

RAFAEL CHAGAS PIMENTA – RA 002200500696

**COMPENSAÇÃO DE REATIVOS USANDO BANCOS DE
CAPACITORES EM SÉRIE EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. D.r Geraldo Peres Caixeta

Itatiba
2011

Para os meus pais, professores e amigos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Olavio Pimenta e Eronilda das Chagas Pimenta, que me incentivaram, me auxiliaram, me cobraram, e me apoiaram durante todo este tempo que estudei.

A minha namorada por me ajudar e me entender em todos os momentos desta graduação, aos meus irmãos que também me ajudaram muito durante este longo tempo de estudos e empenho.

Ao Prof. Geraldo Peres Caixeta, da Universidade São Francisco, meu orientador, por seu grande conhecimento na área, no qual me auxiliou muito, até mesmo na escolha e caminho do meu tema desta monografia. Agradeço também pelo engajamento, motivação, companheirismo e por sua cobrança e preocupação em momentos que estava atrasado nos prazos de entrega.

Ao Prof. Renato Franco de Camargo, da Universidade São Francisco, coordenador do curso de Engenharia Elétrica, pela atenção e ajuda com informações sobre esta disciplina e também pelas suas cobranças em momentos que estava atrasado.

A todos os professores e amigos deste curso que ajudaram muito durante toda esta etapa de graduação.

E finalmente, agradeço a Deus, por me dar forças e conhecimento para chegar até aqui.

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade.”

Albert Einstein

RESUMO

Com o grande crescimento econômico e industrial no Brasil nestes últimos anos, o aumento da necessidade de energia elétrica também aumentou muito, e com isso a busca em atender a todos gera grandes investimentos para atender toda essa demanda. Com este grande aumento no consumo de energia cresce também a quantidade de reativos na rede de distribuição elétrica, causados principalmente por sistemas de cargas especiais como fornos a arco, motores de indução, pontes retificadoras, sistemas de acionamento por chaveamento entre outros, e estas cargas especiais são responsáveis pela geração de harmônicos, flutuações de tensão, desequilíbrio de fases e principalmente baixo fator de potência. Para evitar estes problemas que causam grandes prejuízos tanto para os consumidores, quanto para os fornecedores de energia elétrica, existem diversos mecanismos hoje em dia para compensação desses reativos, em especial é aplicação de bancos capacitores em série, que tem uma resposta muito mais rápida para a compensação destes reativos.

ABSTRACT

With the great economic and industrial growth in Brazil in recent years, the increased need for electricity has also increased greatly, and thus the search leads to focusing on all major investments to meet all this demand. With this large increase in energy consumption also increases the amount of reactive power distribution network, mainly caused by special cargo systems as arc furnaces, induction motors, rectifier bridges, drive systems for switching among others, cause the generation harmonics, voltage fluctuations, phase imbalance and especially low power factor. To avoid these problems that cause great damage both to consumers and to suppliers of electricity, there are now several mechanisms for compensation of reactive, especially banks is the application of capacitors in series, which has a much faster response to compensation of reactive.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fator de potência de uma indústria automobilística	14
Figura 2 - Fator de potência médio de uma indústria metalúrgica	14
Figura 3 - Circuito simplificado para análise das flutuações de tensão no PAC.....	17
Figura 4 - a) Circuito trifásico desequilibrado com compensador reativo; b) Circuito equivalente resultante.....	19
Figura 5 - Banca de regulador de tensão (RT).....	20
Figura 6 - Esquema simplificado do controle do regulador de tensão	22
Figura 7 - Exemplo de operação do regulador de tensão em função da carga na rede.....	23
Figura 8 - Banca de capacitor em paralelo	24
Figura 9 - Banca de capacitores em série	27
Figura 10 - Diagrama unifilar do DSC	30
Figura 11 - Circuito radial sem compensação série	32
Figura 12 - Diagrama fasorial sem a compensação série	32
Figura 13 - Diagrama fasorial de carga tipicamente indutiva	33
Figura 14 - Diagrama fasorial de carga tipicamente resistiva	34
Figura 15 - Diagrama fasorial de carga tipicamente capacitiva	34
Figura 16 - Circuito radial sem compensação série	35
Figura 17 - Diagrama fasorial da carga indutiva com compensação série ($X_L = X_C$)	35
Figura 18 - Diagrama fasorial da carga resistiva com compensação série ($X_L = X_C$)	36
Figura 19 - Diagrama fasorial da carga capacitiva com compensação série ($X_L = X_C$)	36
Figura 20 - Circuito somente com capacitor série entre gerador e carga	37
Figura 21 - Circuito com a inserção de banco de capacitores série	38

Figura 22 - Relação de tensão no gerador e tensão na carga	39
Figura 23 - Gráfico tensão na carga em função da potência ativa com e sem capacitor	40
Figura 24 - Gráfico tensão na carga em função da potência ativa com e sem capacitor	41
Figura 25 - Gráfico tensão na carga em função da potência ativa com e sem capacitor	42
Figura 26 - Gráfico tensão na carga em função da potência ativa com e sem capacitor	43
Figura 27 - Gráfico tensão na carga em função da potência ativa com e sem capacitor	44
Figura 28 - Gráfico tensão na carga em função da potência ativa com e sem capacitor	45
Figura 29 - Perfil da tensão ao longo da linha com e sem capacitores	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

RT – Regulador de Tensão

PAC – Ponto de Acoplamento Comum

LDC – *Line Drop Compensator*

TC- Transformador de corrente

TP- Transformador de potencial

CSM – Capacitor Série Modular

PLC – *Programmable Logic Controller*

DSC – *Distribution Series Capacitor*

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1 PROBLEMAS CAUSADOS POR EXCESSO DE REATIVOS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICA	13
1.1 Cargas Especiais – Problemas No Sistema De Distribuição Elétrica	13
1.2 Efeito Da Cintilação Luminosa	16
2 OUTROS MEIOS DE COMPENSAÇÃO DE REATIVOS	18
2.1 Compensador Reativo Ideal	18
2.2 Regulador De Tensão	19
2.3 Capacitores.....	24
2.4 Reatores	25
2.5 Máquinas Síncronas	25
3 BANCO DE CAPACITORES EM SÉRIE.....	27
3.1 Capacitor Série Autoprotegido.....	27
3.2 Capacitor Série Semi Protegido	28
3.3 Capacitor Totalmente Protegido	29
4 CONSIDERAÇÕES DE CIRCUITO	32
4.1 Condições Da Tensão Sem Capacitores Série	32
4.2 Condições Da Tensão Com Capacitor Série	34
4.3 Relações De Compensação	37
4.4 Grau De Compensação.....	38
4.5 Relação De Tensão Na Carga De Acordo Com As Características Do Circuito	38
4.6 Perfil De Tensão Ao Longo Do Circuito	45
CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS	49

INTRODUÇÃO

A compensação reativa é cada vez mais importante, tanto para concessionária de energia elétrica que é auditada pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), quanto para consumidores, que buscam se livrar de multas e grandes prejuízos, e conseqüentemente ajudam a manter o sistema de distribuição de energia elétrica com a qualidade adequada a todos que usam esta energia.

Com os grandes avanços nas áreas de eletrônica de potência e processamento e controle digital, viabilizam técnicas para compensação de reativos muito eficazes. Que antes não eram possíveis, sem o avanço destas áreas mencionadas.

A utilização de bancos de capacitores em série para compensação de reativos já existe há algum tempo, porém no Brasil ainda é muito pouco aplicada. Esta técnica é um pouco polêmica, pois se não for muito bem projetado, pode ser perigoso. Perigoso porque poderá gerar ressonância na rede, causando grandes prejuízos e até mesmo explodindo o banco de capacitor.

A utilização de banco de capacitores em série pode ser um meio muito eficaz de controlar reativos, pois é mais rápida que outros meios, como banca de regulador de tensão, banco de capacitores em paralelo, dentre outros. Isto permite que a compensação série seja uma excelente alternativa, pois exige um investimento mais baixo que algumas técnicas de compensação, e pode se bem projetado até adiar maiores investimentos como a construções de subestações, seus alimentadores e seus respectivos ramais.

1 PROBLEMAS CAUSADOS POR EXCESSO DE REATIVOS NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICA

1.1 Cargas Especiais – Problemas No Sistema De Distribuição Elétrica

A compensação usando bancos de capacitores em série, atualmente não é padronizada, portanto para cada projeto deverão ser estudados de maneira isoladamente, abrangendo todos os parâmetros da rede, para a instalação do equipamento.

O consumo de potência reativa só é cobrado quando o limite do fator de potência médio mínimo for inferior a 0,92. Assim a concessionária de energia elétrica pode cobrar esse baixo fator de potência como multa. Esses problemas são comuns em clientes industriais, com cargas que geram muitos distúrbios na rede durante o funcionamento de seus equipamentos.

Assim as indústrias buscam meios para compensar esses baixos níveis de fator de potência, procurando atender as exigências mínimas para que o seu fator de potencia médio diário não fique abaixo dos 0,92.

A figura 1 abaixo mostra um exemplo de fator de potencia baixo, cujo media fica em torno de 0,62 de uma indústria automobilística. E a figura 2 mostra um fator de potência com media de 0,90 de uma indústria metalúrgica.

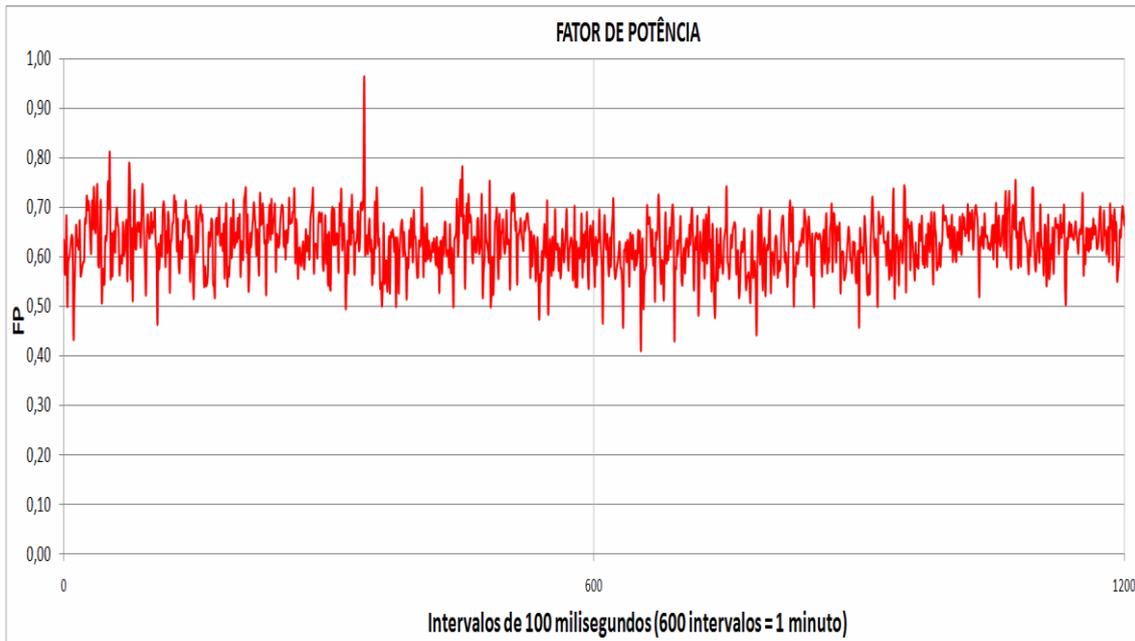


Figura 1 – Fator de potência de uma indústria automobilística.

Fonte: Operação Dinâmica de Bancos de Capacitores com Eliminação de Corrente *Inrush* (2009)

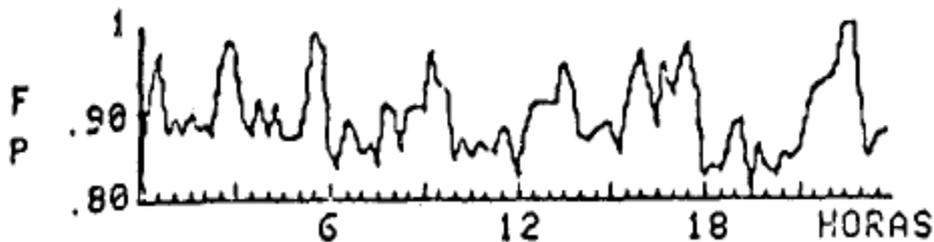


Figura 2 – fator de potência médio de uma indústria metalúrgica.

Fonte: Compensação Estática de Reativos (1987)

Diante das curvas da figura 2 mostra que não se deve apenas buscar o valor médio estabelecido pelos órgãos regulamentadores. Mostrando o comportamento dinâmico das cargas muito instável, provocando a transferência de potência reativa através do sistema de elétrico, causando queda de tensão e distúrbios nas redes, prejudicando a própria indústria, como outros clientes ligados num único alimentador, mesmo alcançando o fator de potência médio.

Problemas assim eram enfrentados, como cargas estáticas, deixando com que sofressem com esta falta de qualidade de energia. E eram instalados nestes casos para compensação de reativos, bancos de capacitores, reatores, reguladores de tensão, transformadores com derivações entre outros.

Porém com o grande crescimento do país nos últimos anos, houve um grande aumento na demanda de energia elétrica, principalmente por indústrias. Com este aumento a quantidade de reativos na rede também foi aumentando, e ocorrendo graves problemas de operação de cargas de grande porte, cargas não-lineares, variáveis e desequilibradas. Estas são cargas especiais formadas por fornos a arco, conversores estáticos, pontes retificadoras, etc.

Devido a estas cargas especiais, houve a necessidade de se estudar estas cargas de forma dinâmica e não mais estática, como era feito até então. Exigindo compensadores de reativos mais eficazes para que a qualidade de energia elétrica fosse satisfatória por parte das concessionárias.

As principais causas de problemas devido a estas cargas especiais são provocadas por alguns fatores, como:

- O aumento do nível de harmônicos na rede, gerado por correntes dessas cargas não-lineares.
- Aumento do desequilíbrio de fases.
- Flutuação de tensão, podendo provocar o efeito de cintilação luminosa ou *lamp flicker* em toda a região desta carga.
- Sobretensões e sobrecorrentes em pontos susceptíveis a ressonâncias série e paralela para correntes harmônicas.
- Atuação anormal dos sistemas de proteção, devido à distorção harmônica e flutuação de tensão e corrente.
- Aumento de perdas nos sistemas de transmissão, transformadores e redes de distribuição.
- Instabilidade do sistema de geração e transmissão de energia, podendo criar oscilações que podem ocorrer um caos nos sistemas interligados.

Para evitar esses problemas são necessárias algumas técnicas como.

- Construção de reatores de alta capacidade e baixas perdas.
- Construção de capacitores compactos e de baixas perdas.

- Construção de válvulas de semicondutores controláveis.
- Desenvolvimento de controladores rápidos analógicos e digitais.
- Desenvolvimento de sensores, transdutores e filtros de sinais analógicos e digitais.
- Desenvolvimento de esquemas de controle e algoritmos computacionais adequados para cada aplicação.

Com estas técnicas são necessárias varias áreas da engenharia elétrica para conseguir estes resultados.

1.2 Efeito Da Cintilação Luminosa

Um dos distúrbios causados pela operação de cargas variáveis é o surgimento de variações perceptíveis da intensidade luminosa, associadas às flutuações da tensão de suprimento. Esse efeito de cintilação é particularmente intenso na fase inicial de fusão nos fornos elétricos a arco e pode criar incômodo visual para os consumidores em toda a região suprida pela mesma rede de transmissão.

O nível dessas flutuações depende da rigidez elétrica do sistema de suprimento em relação às fontes de tensão. Uma forma simplificada para se tratar esse problema consiste em analisar o equivalente de *Thèvenin* do sistema de suprimento no chamado Ponto de Acoplamento Comum (PAC), que corresponde ao ponto de interligação da carga perturbadora com os demais consumidores, conforme mostrado na figura 3.

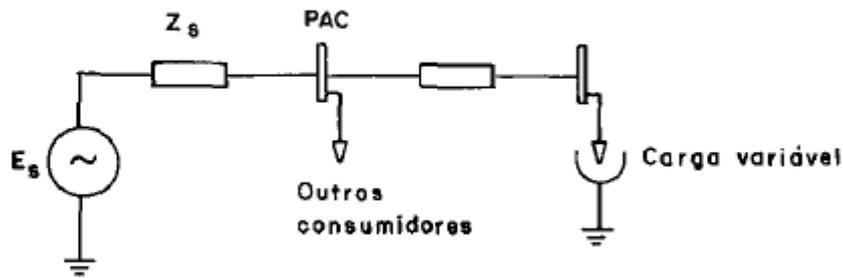


Figura 3 – Circuito simplificado para análise das flutuações de tensão no PAC.
 Fonte: Compensação Estática de Reativos (1987)

Considerando as perdas desprezíveis no sistema de transmissão, pode-se relacionar as variações de tensão em um ponto k qualquer da rede com as variações de potência reativa nesse ponto, através da equação 1:

$$\Delta V_k \cong \frac{\Delta Q_k}{S_{cc_k}} \cdot 100\%$$

Onde,

ΔV_k = variação percentual da tensão;

ΔQ_k = variação da potência reativa;

S_{cc_k} = potência de curto-circuito local.

Essa equação mostra a possibilidade de se regular a tensão através do controle da injeção de potência reativa local. Esse é o princípio básico da compensação reativa. A percepção do efeito de cintilação depende da frequência das flutuações da tensão.

2 OUTROS MEIOS DE COMPENSAÇÃO DE REATIVOS

2.1 Compensador Reativo Ideal

Steinmetz foi que estabeleceu pela primeira vez, as condições de compensação reativa ideal, necessárias para o equilíbrio de uma carga trifásica. Essas condições são representadas pela equação 2.

$$B_{ab}^c = -B_{ab} + (G_{ca} - G_{bc}) / \sqrt{3}$$

$$B_{bc}^c = -B_{bc} + (G_{ab} - G_{ca}) / \sqrt{3}$$

$$B_{ca}^c = -B_{ca} + (G_{bc} - G_{ab}) / \sqrt{3}$$

A equação 2 é mostrada na situação da figura 4 abaixo.

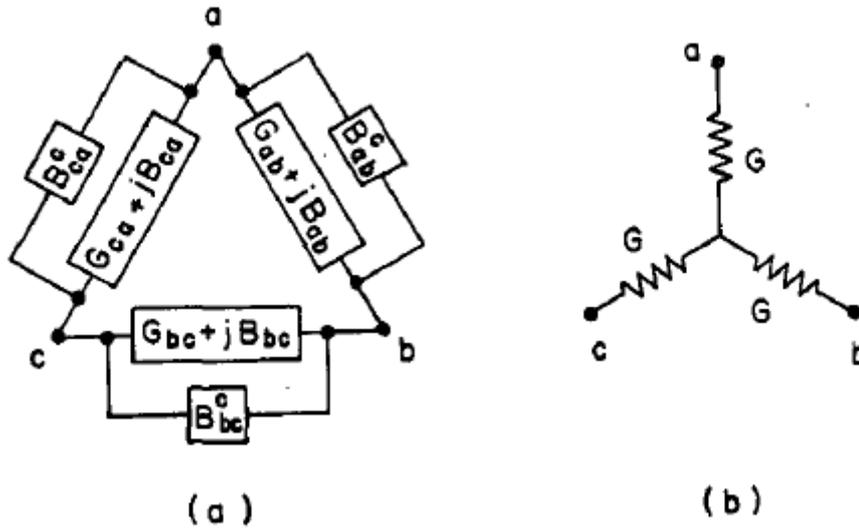


Figura 4 – a) Circuito trifásico desequilibrado com compensador reativo;
 b) Circuito equivalente resultante.
 Fonte: Compensação Estática de Reativos (1987)

Miller descreve essa compensação reativa ideal pelo seguinte princípio:

- Qualquer carga trifásica desbalanceada, linear e não aterrada, pode ser transformada numa carga trifásica real balanceada, sem alterar a transferência de potência ativa entre a fonte e a carga, através da conexão de uma rede de compensação ideal em paralelo.
- A rede de compensação ideal pode ser puramente reativa.

Para aplicar o princípio de um compensador ideal a uma carga variável e desequilibrada, é preciso que a rede de compensação admita parâmetros reativos variáveis com controle independente por fase. Os bancos de capacitores, os reatores e as máquinas síncronas apresentam dificuldades a controlabilidade da potência reativa fornecida ou consumida.

2.2 Regulador De Tensão



Figura 5 – Banca de regulador de tensão (RT)

O regulador de tensão (RT) é um equipamento projetado para manter um nível de tensão predeterminado ao longo de um alimentador de distribuição apesar das variações de carga. É um autotransformador com várias derivações no enrolamento série. Economicamente, seu uso é extremamente viável, pois além de permitir às concessionárias manterem um bom nível de serviço na qualidade de energia elétrica, aumenta a tensão média no ponto de utilização e conseqüentemente, o consumo, sem que seja necessário a substituições de condutores de maiores diâmetros, ou até mesmo a construção de um novo alimentador, o que gera um grande investimento por parte da concessionária de energia elétrica. E no caso da substituição dos condutores seria necessário efetuar vários desligamentos na rede dependendo da distância e da interligação deste sistema, o que afetaria os indicadores da concessionária, e nem sempre um cliente pode ser desligado a qualquer dia e horário.

A aplicação de reguladores de tensão nos sistemas de distribuição de energia elétrica de média tensão teve início na década de 40. Nos países desenvolvidos, principalmente nos Estados Unidos da América, em função da sua grande extensão territorial, onde os centros de consumo estão espalhados por vastas áreas, distantes dos pontos de geração e do aparecimento de grande quantidade de novos aparelhos eletro-eletrônicos sensíveis às oscilações de tensão, fez aumentar as reclamações dos consumidores, que passaram a exigir boa qualidade na distribuição de energia elétrica. Por conta disso, hoje encontram-se instalados em vários pontos daquele país, muitos reguladores, fornecendo nos pontos de consumo uma regulação de tensão adequada e conferindo qualidade do fornecimento de energia.

Atualmente, este cenário ocorre no Brasil, pois as concessionárias, por razões econômicas, sua simplicidade e versatilidade, estão intensificando a instalação de reguladores de tensão com o objetivo de minimizar os problemas de tensão em alimentadores extensos e com vários ramais de derivação, e centros de cargas distantes da fonte devido a sua enorme área territorial que o Brasil possui.

Os reguladores de tensão trazem basicamente três consequências benéficas:

- Satisfação ao consumidor (melhoria no nível de tensão);
- Redução das perdas de potência na rede de distribuição;
- Aumento do faturamento das concessionárias de energia elétrica.

Os principais componentes de um regulador de tensão são:

- Chave reversora de polaridade;
- Controle Automático;
- Ajuste do nível de tensão;
- Compensador de Queda de Tensão - *LDC (Line Drop Compensator)*;
- Retardo de Tempo.

Na figura 6 ilustra-se o esquema de controle do regulador de tensão. Nota-se em destaque o relé de tensão, o qual acopla o compensador de queda de tensão LDC, permitindo verificar as oscilações de corrente e tensão na rede elétrica.

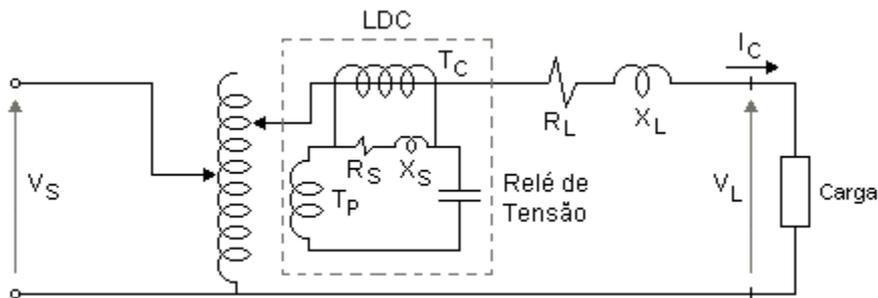


Figura 6 – Esquema simplificado do controle do regulador de tensão.

Fonte: Alocação Ótima de Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição de Energia Elétrica (2009)

Na figura 6 tem-se:

- V_S - tensão de entrada no regulador de tensão;
- T_C - transformador de corrente;
- T_P - transformador de potencial;
- R_S , X_S - respectivamente os ajustes para a compensação de tensão resistiva e reativa;
- R_L , X_L - respectivamente a resistência e reatância da rede até o ponto de controle da tensão;
- I_C , V_L - respectivamente a corrente e a tensão no ponto de controle da tensão (carga).

Na figura 6 ilustra-se um exemplo de operação do regulador de tensão em função da variação da carga ao longo de um período de tempo. Observa-se que, no período de “carga leve”, a tensão na rede permanece praticamente estável, não sendo necessário a comutação de *tap* do RT para regular a tensão na rede (carga). Entretanto, com o crescimento da carga (solicitação ou acréscimo de potência na rede), inicia-se a operação do comutador do RT respeitando os seus ajustes de controle, como também, efetua-se somente a troca do *tap* de acordo com o retardo de tempo (temporização) cadastrado no equipamento, com o intuito de

reduzir o número de comutações desnecessárias decorrentes de pequenas oscilações de carga, consequentemente, aumentando a vida útil do regulador de tensão.

Vale ressaltar que, quando o regulador de tensão é instalado corretamente na rede, deve atender principalmente à solicitação de potência no período de “carga pesada”, ou seja, deve haver posições de *tap* disponíveis para regulação da tensão ao longo deste período, obtendo-se assim a maior eficiência do RT no sistema.

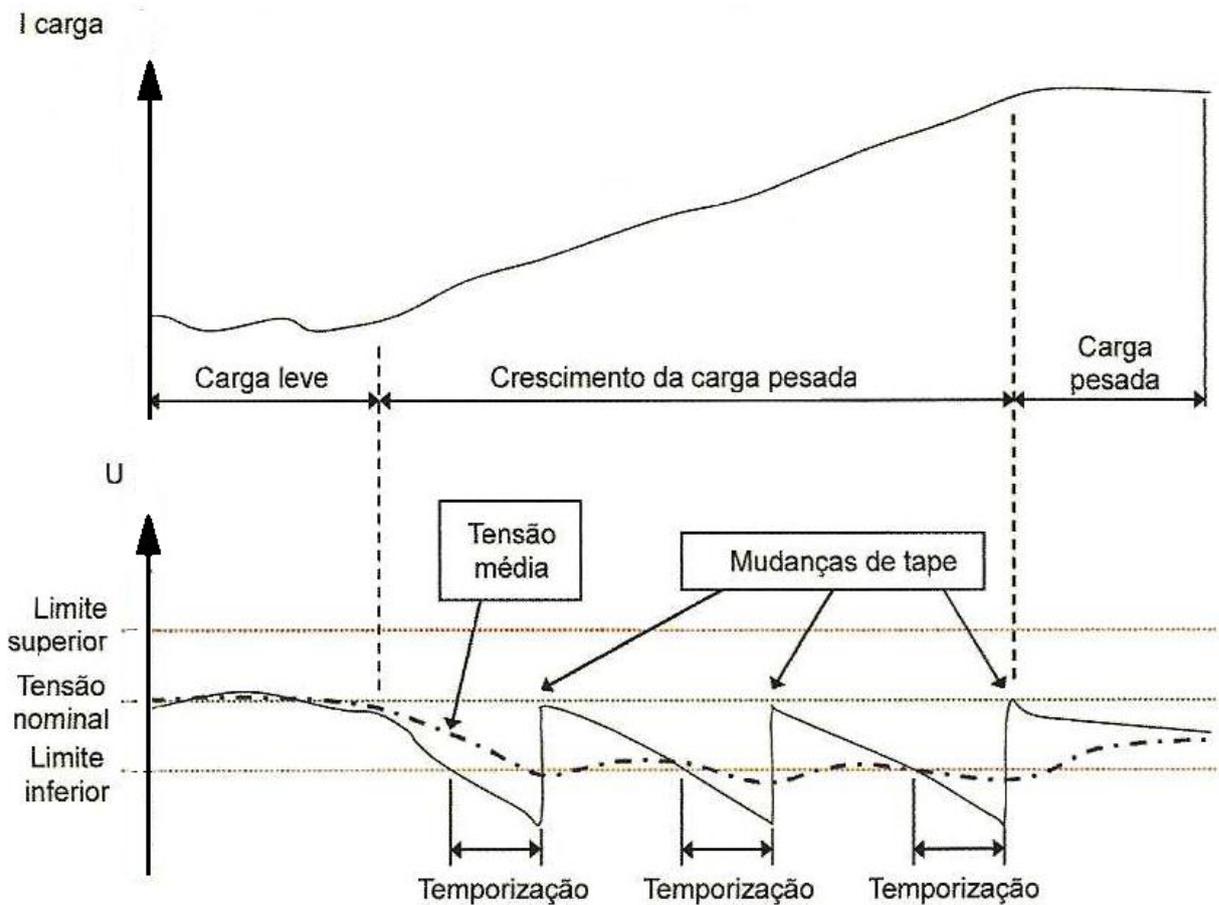


Figura 7 – Exemplo de operação do regulador de tensão em função da carga na rede.

Fonte: Alocação Ótima de Reguladores de Tensão em Redes de Distribuição de Energia Elétrica (2009)

Observa-se também na figura 7, que o RT leva um tempo para controlar a queda de tensão da rede de distribuição de energia elétrica através das mudanças dos *taps*, este tempo dependendo da carga que o cliente possui, o RT não conseguirá com que esta rede caia para um nível abaixo do tolerável para a proteção do sistema, ocasionando o desligamento do relé da subestação e acionando os dispositivos de proteção tanto do cliente como da subestação.

2.3 Capacitores



Figura 8 – Banca de capacitor em paralelo

Capacitores são fontes de energia reativa. O objetivo de sua aplicação em sistemas de potência é a compensação de energias reativas produzidas por cargas indutivas ou reatâncias de linhas. Quando adequadamente utilizados, permitem a obtenção de um conjunto de benefícios correlatos, que incluem a redução de perdas de energia, correção dos perfis de tensões, controle dos fluxos de potência e aumento da capacidade dos sistemas.

Capacitores podem ser instalados em sistemas de distribuição de duas formas: em paralelo com as cargas ou em série com as linhas. A utilização de capacitores em paralelo procura atingir os benefícios de sua utilização pela correção do fator de potência (ou seja, pela

“injeção” adequada de reativos) nos pontos de instalação. Os capacitores em série são utilizados quase que exclusivamente no controle de “*flickers*” (Murphy and Wu, 1990).

Os capacitores, quando presentes em uma rede de distribuição de energia elétrica, injetam potência reativa capacitiva (de acordo com sua capacidade), reduzindo os fluxos de potências reativas na rede.

A redução de perdas por injeção de reativos requer a solução do problema de localização e dimensionamento de capacitores em redes de distribuição de energia elétrica. Este problema procura definir, da melhor forma possível, o número de capacitores a serem instalados nos alimentadores da rede, suas localizações precisas, bem como o tipo (fixo ou chaveado) e tamanho de cada capacitor - normalmente, deseja-se encontrar o compromisso ideal entre os recursos gastos com a aquisição (e manutenção) de capacitores e os benefícios obtidos com a redução de perdas na rede. Níveis de tensão em todos os pontos da rede devem ficar entre valores máximos e mínimos, previamente especificados.

2.4 Reatores

Os reatores, por sua vez, são equipamentos de construção similar a dos transformadores de potência, apresentando os problemas de não-linearidade e perdas típicas desses equipamentos. Sofrem também da restrição do controle descontínuo através da mudança discreta de derivações.

2.5 Máquinas Síncronas

As máquinas síncronas, ao contrário, permitem o controle contínuo de reativos abrangendo dois quadrantes, um para cargas indutivas e outro para capacitivas. Mesmo assim, essa fonte de reativos não é adequada para operar como compensador reativo ideal pelas seguintes limitações:

- A resposta à ação de controle é lenta, da ordem de centenas de milissegundos, devido às constantes de tempo do sistema de excitação;
- A máquina síncrona não permite o controle independente por fase.

3 BANCO DE CAPACITORES EM SÉRIE

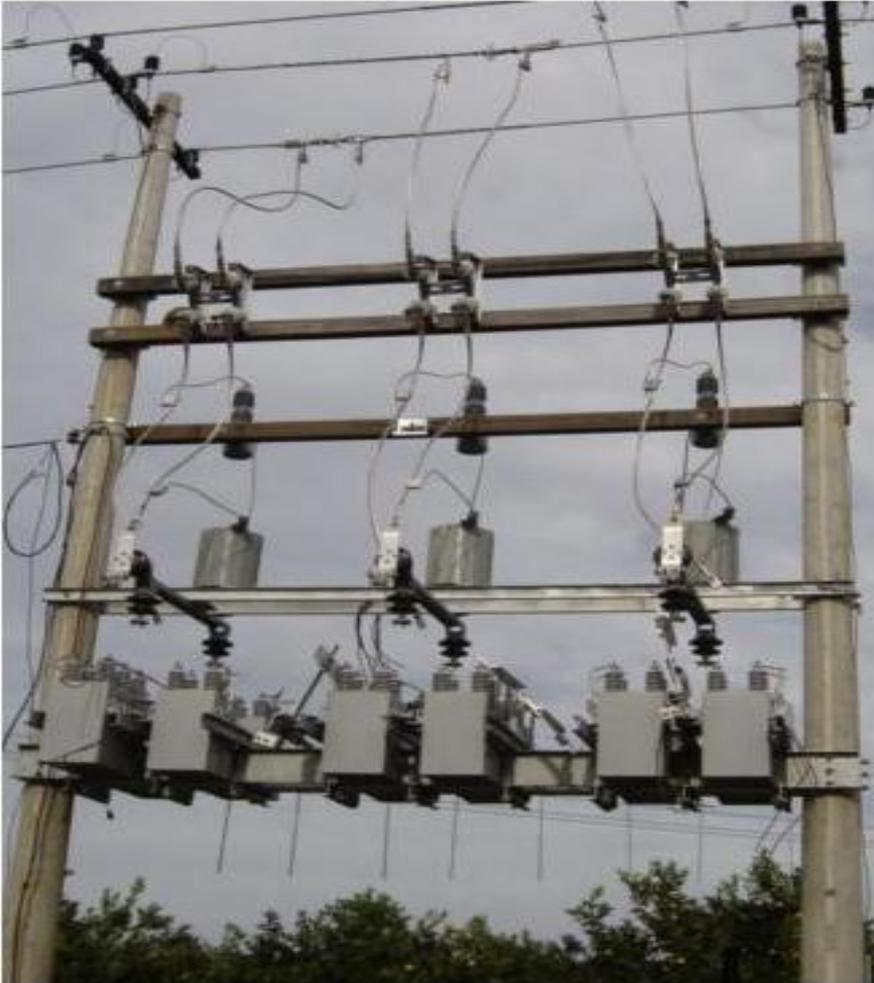


Figura 9 – Banca de capacitores em série.

Fonte: Compensador Série Modularizado para Sistemas de Distribuição até 23kV (2010)

3.1 Capacitor Série Autoprotegido

É um capacitor superdimensionado, ou seja, um capacitor dimensionado para corrente de curto-circuito, que teoricamente não precisaria de proteção, ao menos se não for submetido

a um religamento. Neste caso terá que utilizar uma chave a óleo bypassando o capacitor no tempo morto (intervalo em que o relé do disjuntor do alimentador detectou o curto e abriu e está esperando o tempo (tempo morto) para o relé de religamento mandar o disjuntor fechar).

3.2 Capacitor Série Semi Protegido

Neste capacitor é utilizado um varistor para reduzir o sobredimensionamento do mesmo. A passagem de corrente de curto-circuito pelo capacitor série causa uma diferença de potencial entre seus terminais superiores em relação aos valores obtidos em operação normal. De modo a evitar danos e super dimensionamento nos capacitores, são utilizados varistores em paralelo com os capacitores, sendo que os varistores irão dissipar uma grande quantidade de energia, já que estarão conduzindo corrente durante todo o período que durar o curto-circuito.

Estes varistores devem ser de oxido de zinco, sem “*gap*”, de maneira a proporcionar uma tensão contínua contra sobretensões. Ao se considerar a aplicação em conjunto de capacitor e varistor, cujo principal objetivo é reduzir a tensão do capacitor e permitir escolher a tensão de melhor relação custo x benefício, visa-se reduzir os custos do capacitor série. A modularidade é um conceito inovador na compensação série, pois permite estudos para casos gerais e não customizados como tem sido praticados até então.

O desenvolvimento do capacitor série modular (CSM) beneficiará as concessionárias, além de exigir menores investimentos para atender os padrões de qualidade estabelecidos por órgãos regulamentadores, demandará menores investimentos para atender novas ligações ou aumentos de cargas.

De maneira a não ser necessário sobre dimensionar os capacitores, não se pode permitir que haja religamento sobre os mesmos. No entanto, nas redes de distribuição de energia elétrica continuarão ocorrendo religamento, por inúmeros fatores como, por exemplo,

uma queda de uma árvore na rede forçando o desligamento do disjuntor do alimentador, e assim que feito todos os reparos na rede será feito o religamento da rede. Para permitir a continuidade dos religamentos é usado um conjunto de chave a óleo para curto-circuitar o banco de capacitores quando não houver tensão na rede de distribuição. Uma chave monofásica fornecida para operar manual ou eletricamente como uma unidade monopolar ou acoplada formando unidades bipolares ou tripolares. Cujas principais funções são chavear o banco de capacitores.

3.3 Capacitor Totalmente Protegido

Neste caso utiliza dispositivos semelhantes a PLC, fazendo um monitoramento da rede e analisando o melhor momento de inserir o capacitor série no sistema e retirá-lo através de suas proteções.

Com a evolução da tecnologia nas áreas da engenharia, desenvolveu-se uma nova versão do DSC (*Distribution Series Capacitor*) utilizando um sistema de proteção mais adequada a tais tipos de aplicações.

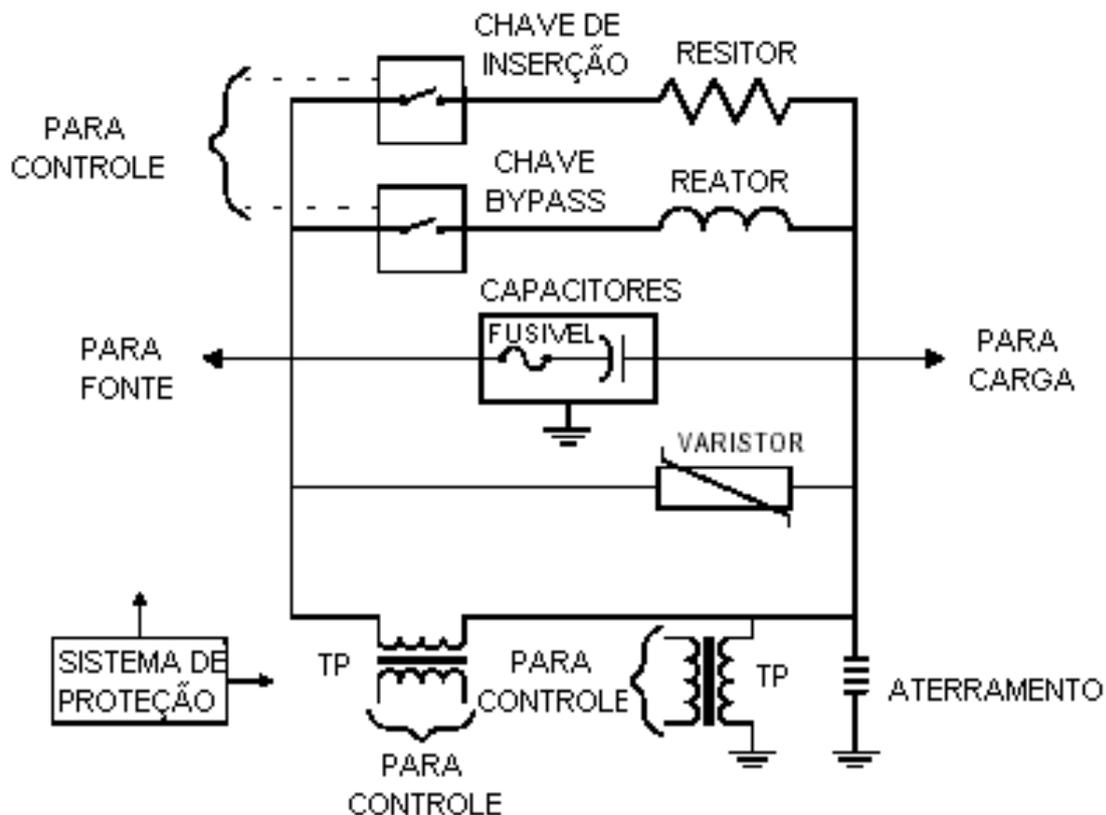


Figura 10 – Diagrama unifilar do DSC.
Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

A figura 10 mostra um diagrama unifilar com seus principais equipamentos que compõem o banco de capacitores série de distribuição, abaixo uma breve explicação de cada um deles.

- Varistores: tem a função de limitar a tensão através do capacitor em níveis seguros de operação, principalmente durante curtos circuitos na linha que resultem em um elevado valor de corrente que passará pelo capacitor.
- Reator de descarga: reduz o transitório da corrente de energização (*inrush*) de alta magnitude e transitórios de alta frequência durante o chaveamento.
- Resistor de amortecimento: responsável pela mitigação de oscilações auto-excitadas durante a partida de motores ou outra carga do gênero.
- Chave de desvio: ou chave *by-pass* usada para desviar a tensão do capacitor para o sistema elétrico, serve principalmente para manobra no equipamento.

- Chave de inserção do circuito de amortecimento: chave que insere ou desativa o equipamento no sistema elétrico.
- Transformador de potencial: conhecido como (TP) é responsável pelo isolamento contra altas tensões, ou seja, é responsável pela proteção dos capacitores.
- Para-raios: reduz os surtos de tensão causados pelo chaveamento do capacitor ou de descargas atmosféricas e protege o equipamento.
- Sistema de proteção (*master control*): como o próprio nome diz central de controle para a proteção do banco de capacitores.

4 CONSIDERAÇÕES DE CIRCUITO

4.1 Condições Da Tensão Sem Capacitores Série

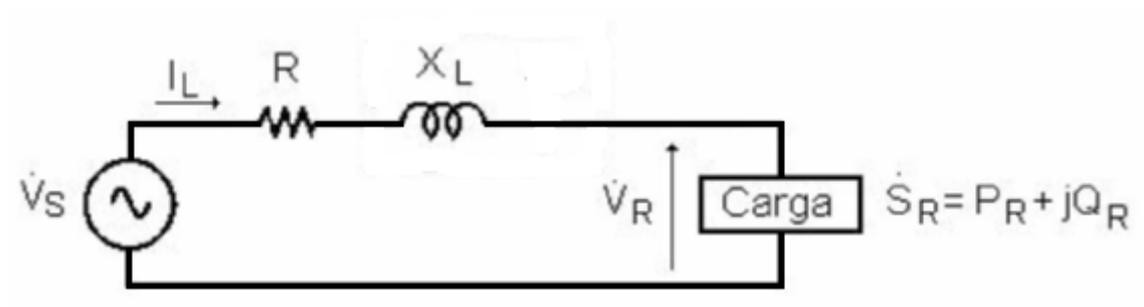


Figura 11 – Circuito radial sem compensação série.
Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

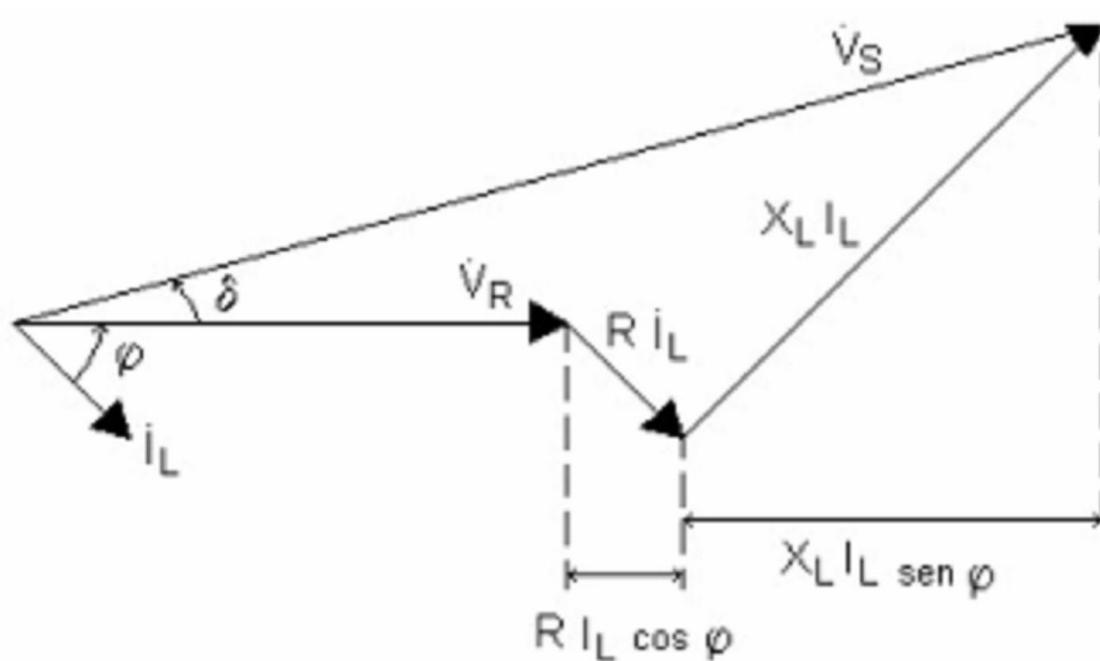


Figura 12 – Diagrama fasorial sem a compensação série
Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

$$\cos\varphi = FP$$

A queda de tensão por fase da fonte até a carga, é calculada aproximadamente por:

$$\Delta V = V_S - V_R \cong R_L I_L \cos\varphi + X_L I_L \sin\varphi$$

$$\Delta V = (\text{potência ativa}) + (\text{potência reativa})$$

$$\Delta V = P_R + Q_R$$

$$\therefore \Delta V \cong \frac{P_R R_L + Q_R X_L}{V_R}$$

Dependendo de qual tipo for carga, poderão ocorrer três casos distintos:

- Carga indutiva: são cargas residenciais, comerciais e industriais;
- Carga resistiva: cargas em sistemas de aquecimento;
- Carga capacitiva: carga sobre-compensada, linha sem carga, capacitores shunt.

Nas figuras 13, 14 e 15 mostrará os diagramas fasoriais de cada carga citada acima.

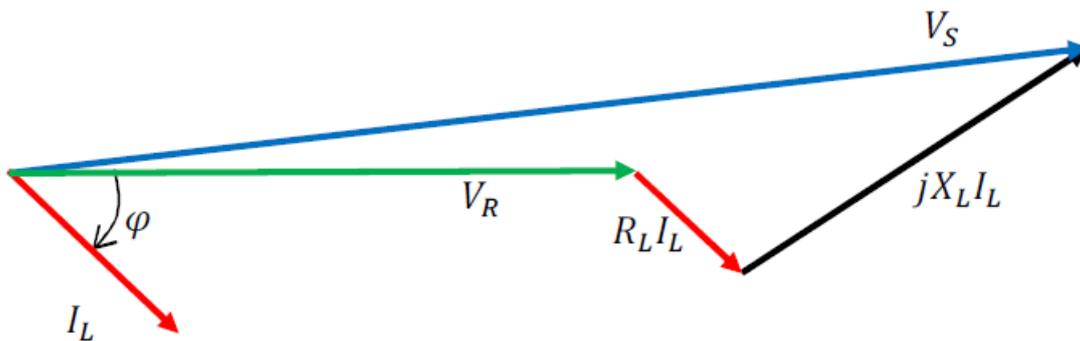


Figura 13 – Diagrama fasorial de carga tipicamente indutiva.
Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

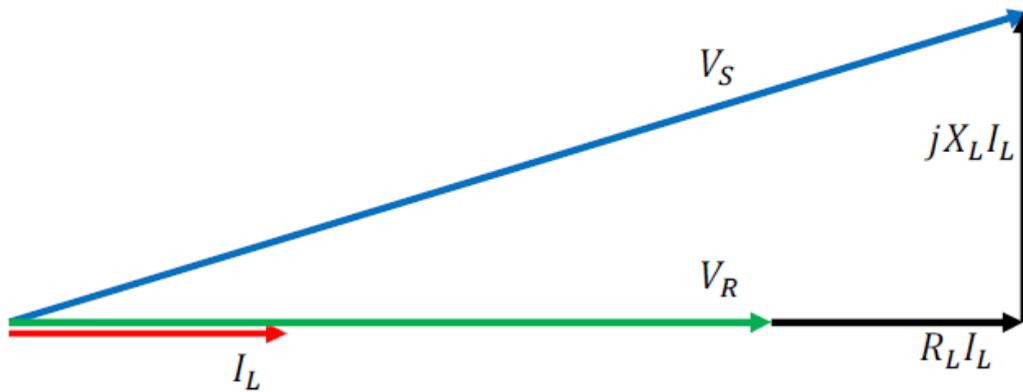


Figura 14 – Diagrama fasorial de carga tipicamente resistiva.
Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

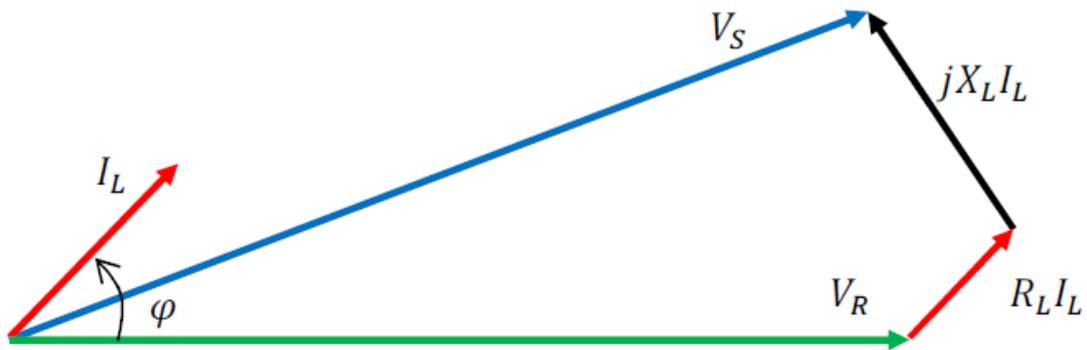


Figura 15 – Diagrama fasorial de carga tipicamente capacitiva.
Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

Analisando as figuras 13, 14 e 15, conclui-se que:

Cargas indutivas e resistivas são responsáveis por diminuir a tensão na carga (V_R).
E as cargas capacitivas podem provocar aumento na tensão até a carga.

4.2 Condições Da Tensão Com Capacitor Série

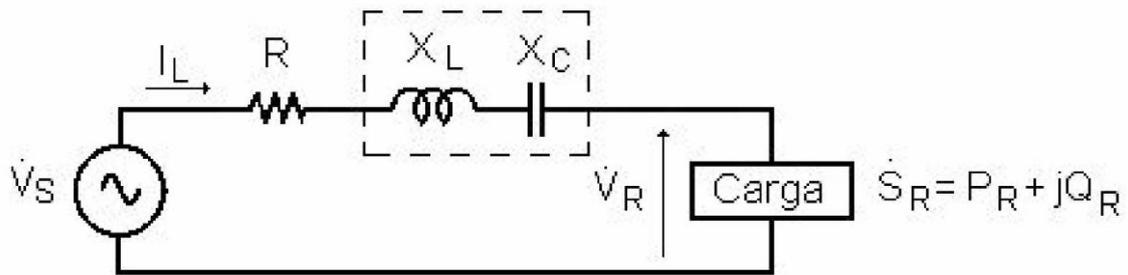


Figura 16 – Circuito radial com compensação série.
 Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

Com a compensação série, a reatância do circuito é reduzida para:

$$X = X_L - X_C$$

E sua queda de tensão por fase da fonte até a carga é:

$$\Delta V = V_S - V_R \cong R_L I_L \cos \varphi + X I_L \sin \varphi = R_L I_L + (X_L + X_C) I_L \sin \varphi$$

$$\therefore \Delta V \cong \frac{P_R R_L + Q_R (X_L - X_C)}{V_R}$$

As figuras 17, 18 e 19 os diagramas fasoriais de cada carga usando o capacitor série.

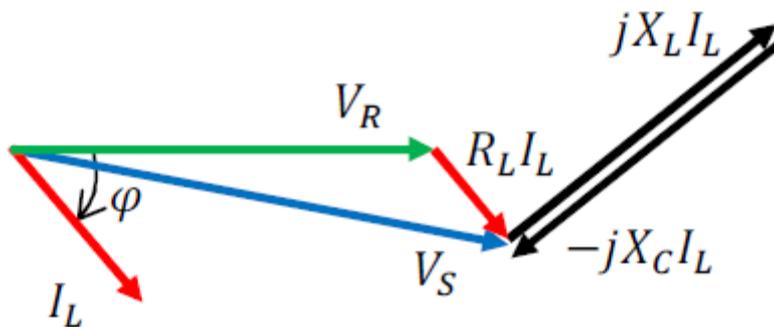


Figura 17 – Diagrama fasorial da carga indutiva com compensação série ($X_L = X_C$).
 Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

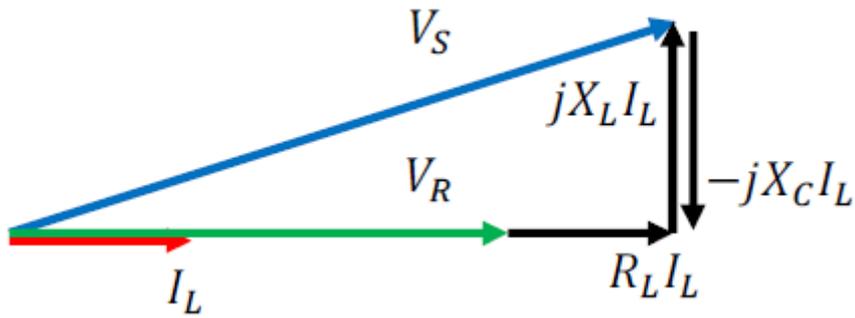


Figura 18 – Diagrama fasorial da carga resistiva com compensação série ($X_L = X_C$).
Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

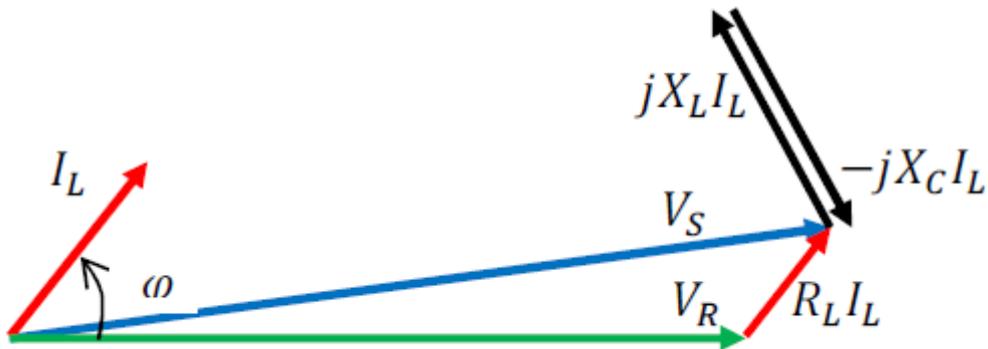


Figura 19 – Diagrama fasorial da carga capacitiva com compensação série ($X_L = X_C$).
Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

Analisando as figuras 17, 18 e 19, conclui-se que:

O capacitor série promove um aumento significativo na tensão da carga, quando o lado da carga for tipicamente indutivo. Quanto menor o fator de potência da carga, mais relevante será este aumento.

Se a carga for tipicamente resistiva, com o fator de potência unitário, o aumento de tensão não será relevante. A tensão na carga é sempre menor que a tensão do gerador. Este caso ocorre também em sistemas sobre-compensados.

Se a carga for tipicamente capacitiva, o capacitor série diminui a tensão na carga.

4.3 Relações De Compensação

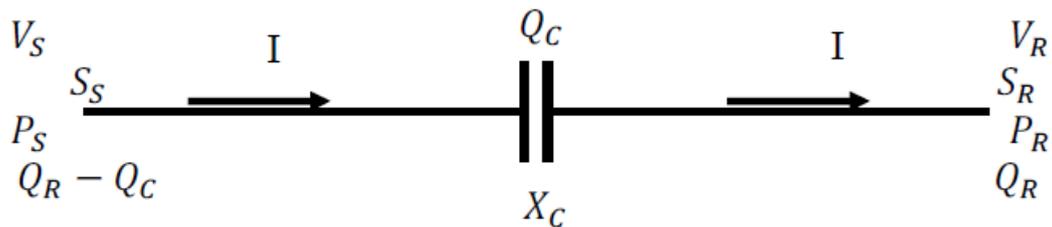


Figura 20 – Circuito somente com capacitor série entre gerador e carga.
Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

Na figura 20 tem-se:

$$S_R = V_R I$$

$$S_S = V_S I$$

Com a relação entre a tensão na carga e a tensão do gerador tem-se:

$$\frac{V_R}{V_S} = \frac{S_R}{S_S} = \frac{\sqrt{P_R^2 + Q_R^2}}{\sqrt{P_R^2 + (Q_R - Q_C)^2}}$$

A máxima elevação de tensão, considerando carga indutiva, ocorre quando $Q_C = Q_R$.

Com isso tem-se:

$$\left. \frac{V_R}{V_S} \right|_{MAX} = \frac{S_R}{P_R} = \frac{1}{\cos\varphi}$$

Na prática, devem-se levar em considerações parâmetros inerentes do sistema que inviabilizam alcançar o valor obtido por essa expressão.

4.4 Grau De Compensação

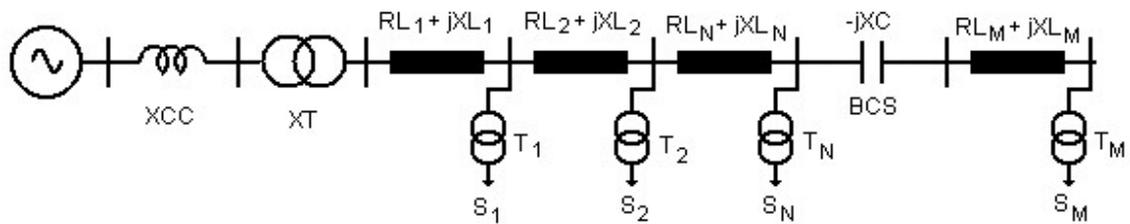


Figura 21 – Circuito com a inserção de banco de capacitores série.
 Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

O grau de compensação adquirido com a inserção de um banco de capacitores série é dado pela equação abaixo:

$$k = \frac{X_c}{X_{eq}} 100\%$$

Onde:

X_c = Reatância capacitiva do banco série (Ω).

$X_{eq} = XCC + XT + XL_1 + XL_2 + XL_N$ (Ω) = Reatância equivalente (indutiva) desde o gerador até o ponto de instalação do banco de capacitores série.

4.5 Relação De Tensão Na Carga De Acordo Com As Características Do Circuito

A relação entre a tensão no gerador e a tensão na carga pode ser expressa com a seguinte equação:

$$V_S^2 = \left[V_R + \frac{1}{V_R} (P_R R + Q_R X) \right]^2 + \frac{1}{V_R^2} (P_R X - Q_R R)^2$$

Ou,

$$V_R = \sqrt{A + \sqrt{A^2 - B}}$$

Onde:

$$A = \frac{V_S^2}{2} - P_R R - Q_R X$$

$$B = (P_R^2 + Q_R^2)(R^2 + X^2)$$

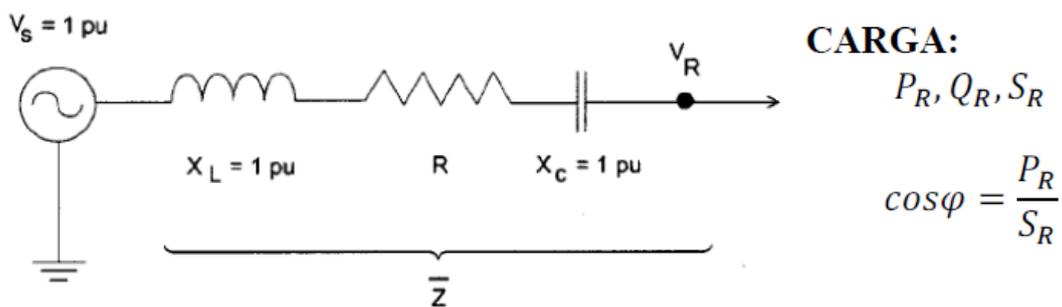


Figura 22 – Relação de tensão no gerador e tensão na carga.
Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

Os gráficos abaixo ilustram valores da tensão na carga em função da potência ativa – considerações sem e com capacitores de compensação, considerando 100% de compensação.

- $X/R = 1$, e $FP = 0,2$

Abaixo gráfico que representa esta condição.

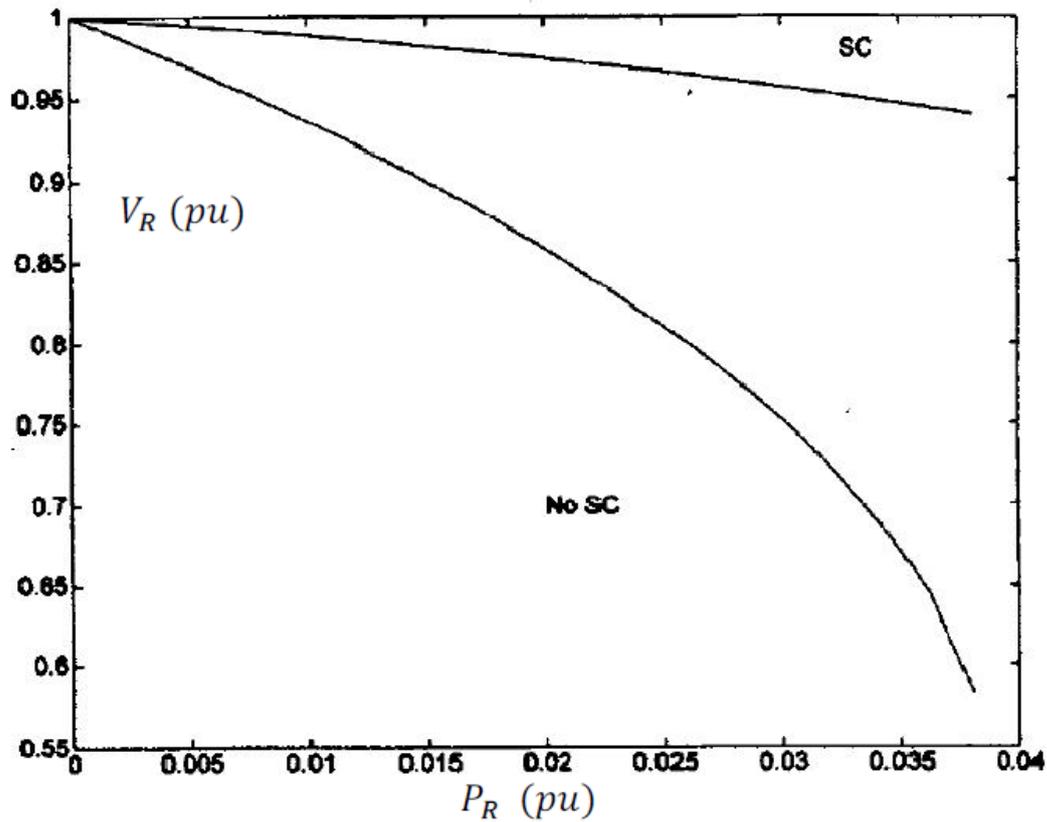


Figura 23 – Gráfico tensão na carga em função da potência ativa com e sem capacitor
 Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

- $X/R = 5$, e $FP = 0,2$

Abaixo o gráfico que representa esta condição.

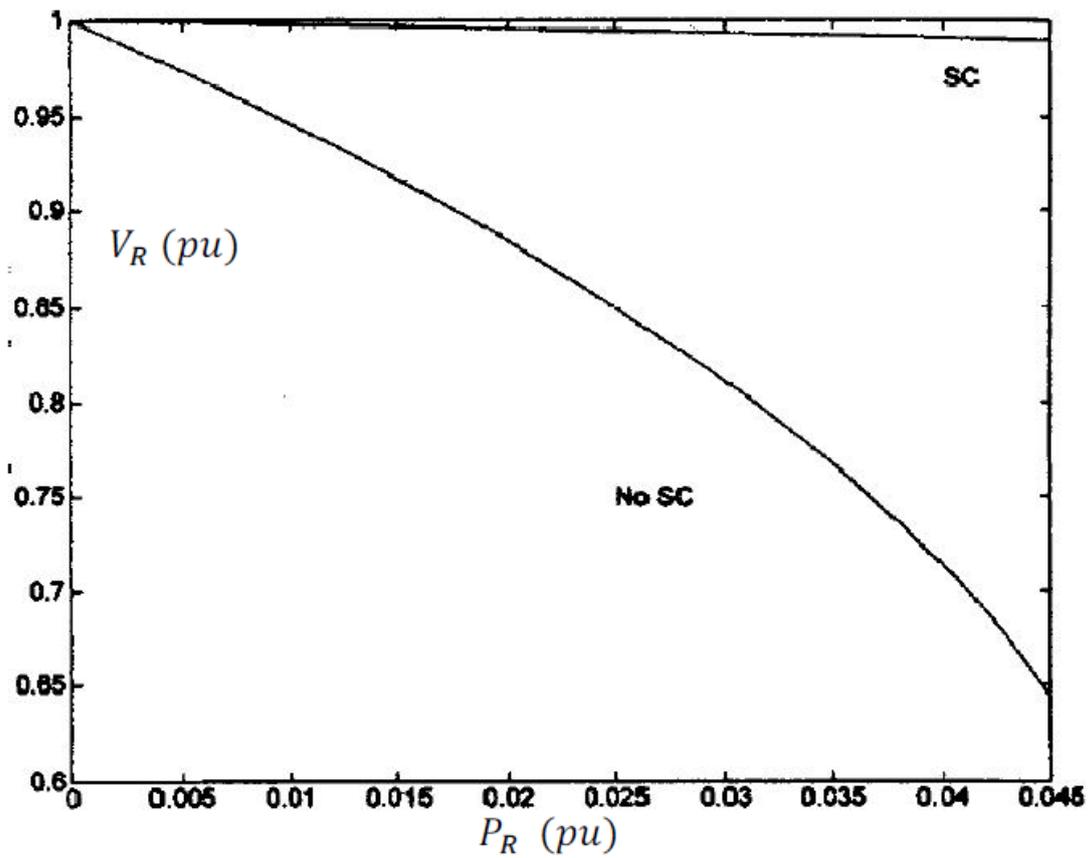


Figura 24 – Gráfico tensão na carga em função da potência ativa com e sem capacitor
 Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

- $X/R = 1$, e $FP = 0,8$

Abaixo o gráfico que representa esta condição.

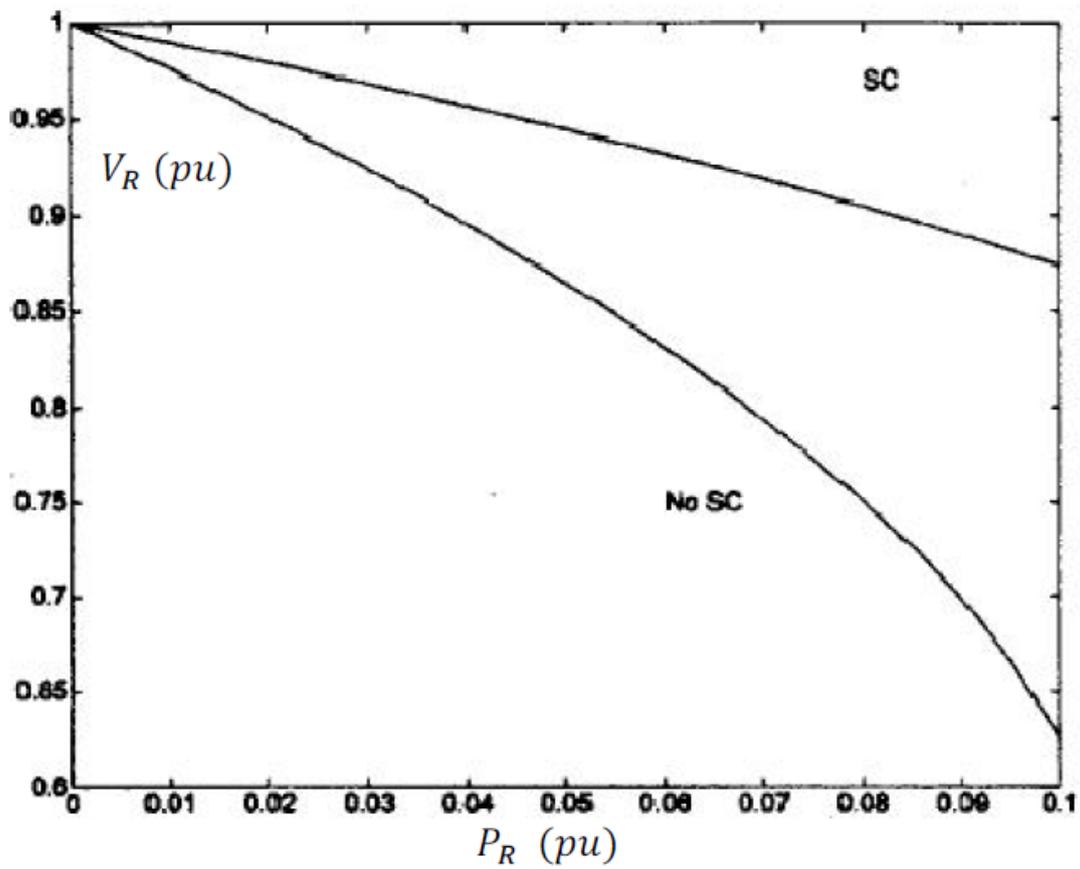


Figura 25 – Gráfico tensão na carga em função da potência ativa com e sem capacitor
 Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

- $X/R = 5$, e $FP = 0,8$

Abaixo o gráfico que representa esta condição.

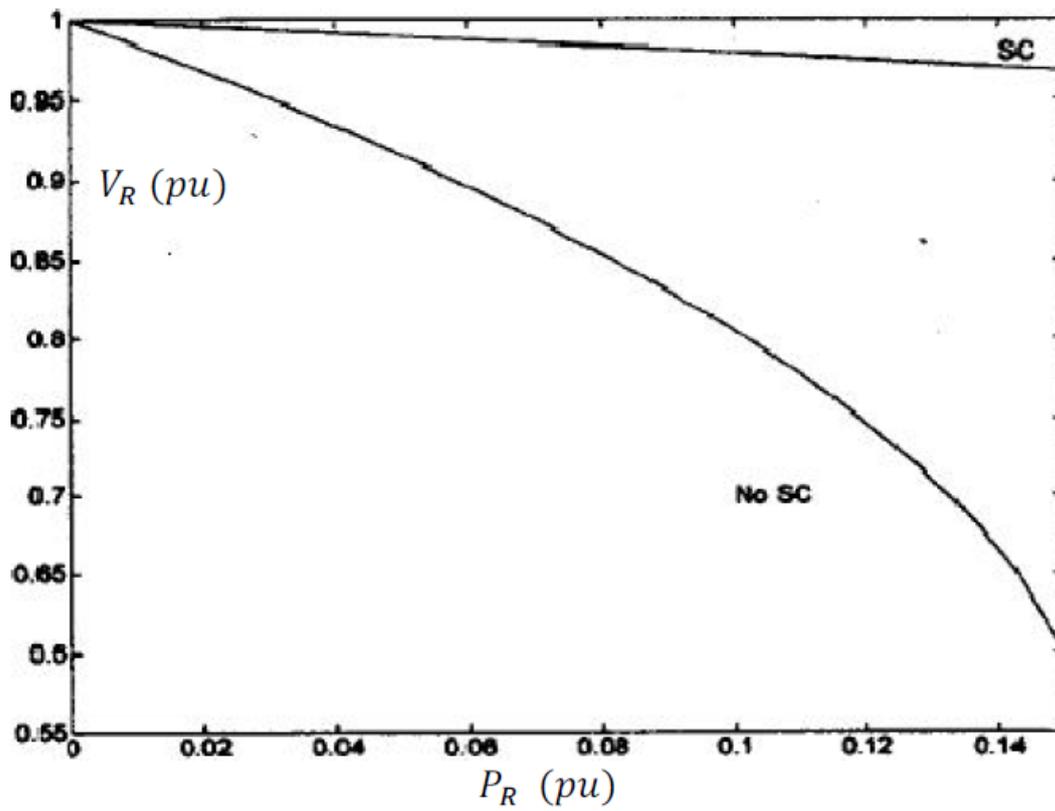


Figura 26 – Gráfico tensão na carga em função da potência ativa com e sem capacitor
Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

- $X/R = 1$, e $FP = 1,0$

Abaixo o gráfico que representa esta condição.

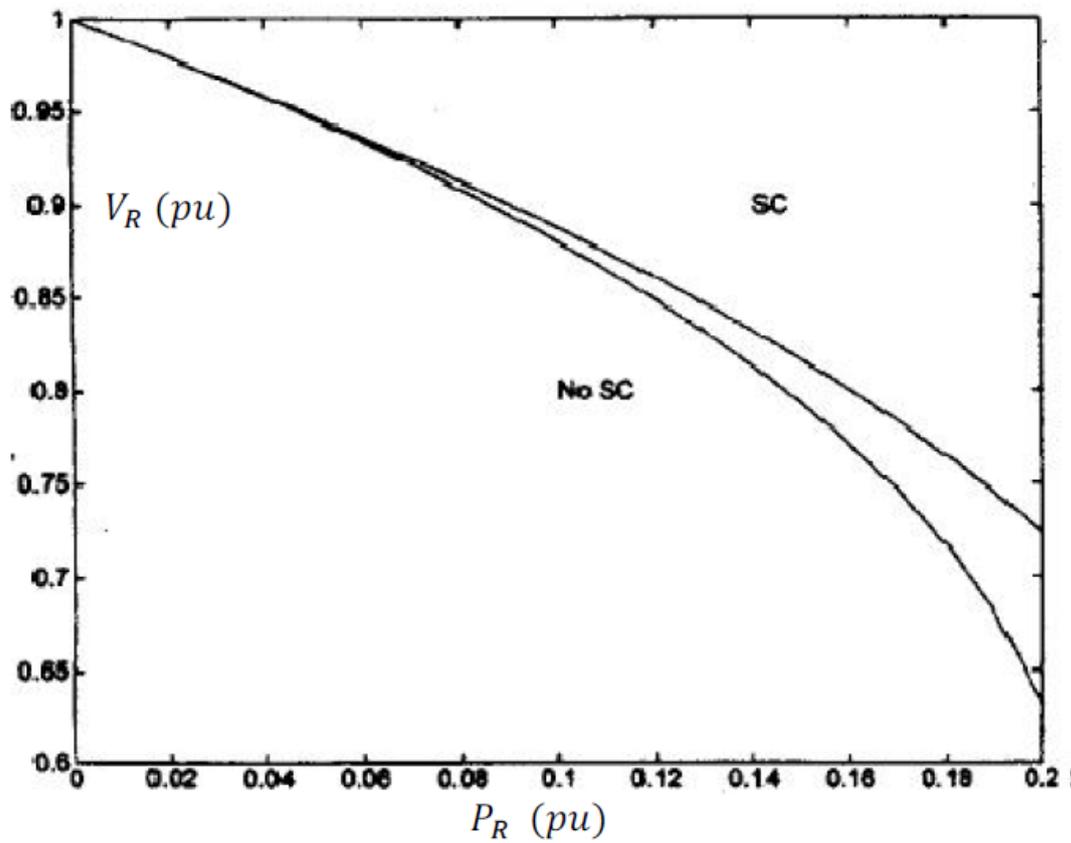


Figura 27 – Gráfico tensão na carga em função da potência ativa com e sem capacitor
 Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

- $X/R = 5$, e $FP = 1,0$

Abaixo o gráfico que representa esta condição.

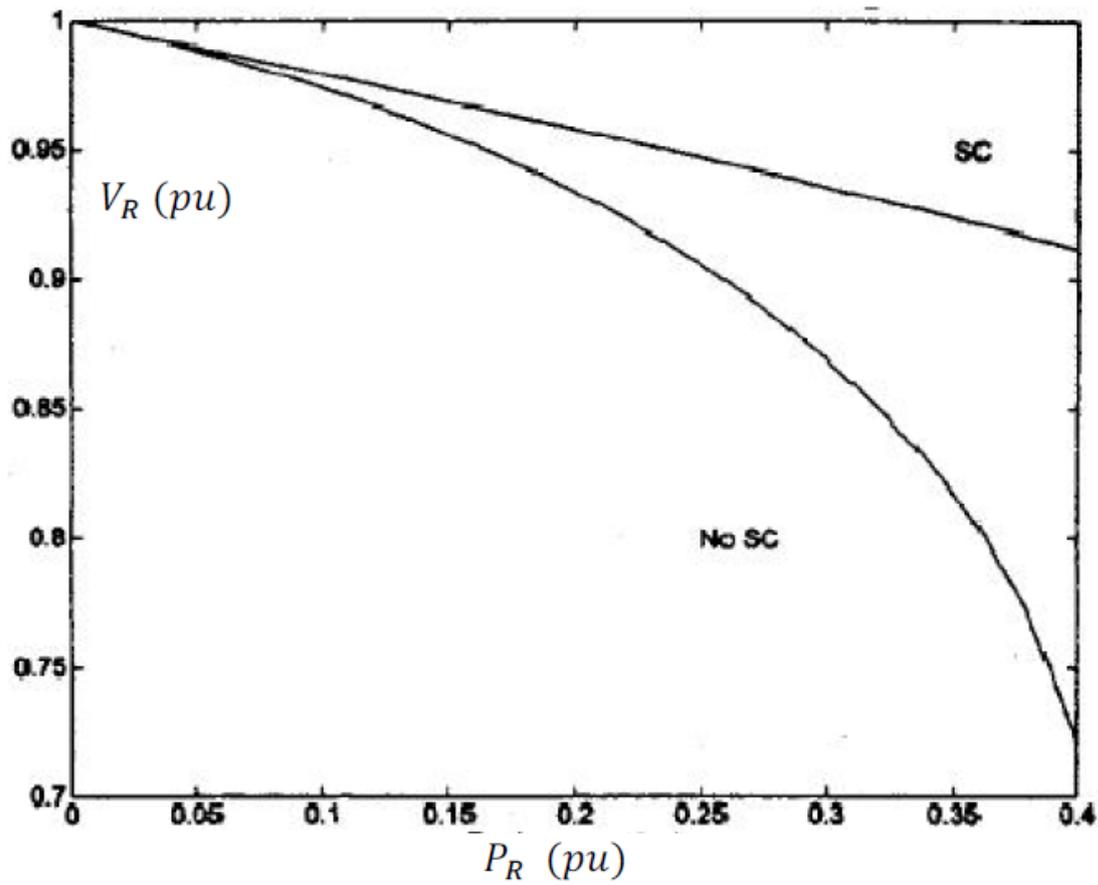


Figura 28 – Gráfico tensão na carga em função da potência ativa com e sem capacitor
 Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

4.6 Perfil De Tensão Ao Longo Do Circuito

O perfil típico da tensão ao longo da linha, com e sem capacitores está ilustrado na figura 28.

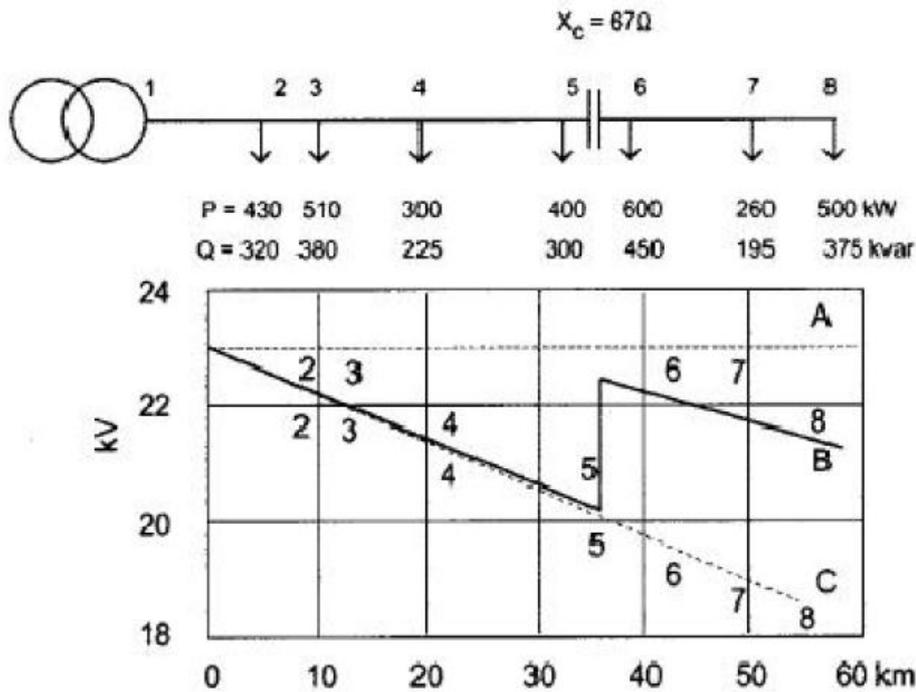


Figura 29 – Perfil da tensão ao longo da linha com e sem capacitores.
Fonte: Compensação Série de Reativos (2010)

Onde:

Linha A – tensão na linha sem carga;

Linha B – tensão na linha com carga máxima, e com compensação série;

Linha C – tensão na linha com carga máxima, e sem compensação série;

Observa-se uma pequena elevação no perfil da tensão a partir do capacitor em direção ao transformador, provocada pela diminuição da corrente que alimenta a carga.

A instalação do banco de capacitores se apresenta como uma das possíveis alternativas para solucionar problemas relacionados com variações de tensão, corrigindo o fator de potência quase que instantaneamente. Capacitores em paralelo (*shunt*) ou reguladores de tensão também poderiam ser utilizados para esse propósito, desde que as variações de tensão ocorressem em intervalos de algumas horas, mostrando que os capacitores série é uma alternativa altamente viável e com resultados muito superiores ao de outros equipamentos.

CONCLUSÃO

O trabalho apresentou algumas maneiras para controlar os excessos de reativos, mais cada um dos métodos para este controle apresentam características diferentes em relação a outro equipamento. O que deve ser levado em conta é o quanto pode-se disponibilizar de recursos, sendo que o mais indicado é a construção de uma subestação para alimentadores muito longos com problemas de queda de tensão e excesso de reativos na rede.

Caso não seja possível verificar também a possibilidade da substituição de condutores por outros de bitolas mais adequadas e outros tipos de materiais que sejam mais eficazes que os condutores do atual alimentador.

Mais estes meios normalmente são inviáveis tanto para concessionária, como para os consumidores, pois exigem investimentos altos e um grande planejamento, pois num recondutoramento de rede, exigem-se vários desligamentos deste alimentador, e dependendo do alimentador há vários clientes que não se podem ser desligados, o que prejudica indicadores das concessionárias de energia elétrica, podendo gerar multas se ficar muito abaixo de uma meta estipulada.

No entanto, um dos métodos mais viáveis em relação ao custo benefício é a instalação de bancos de capacitores em série em sistemas de distribuição de energia elétrica, pois além de ter uma resposta quase que instantânea em relação as quedas de tensões, possibilita a entrada de grandes cargas no sistema elétrico, como motores de indução de grande porte, agindo instantaneamente conforme demonstrados nos gráficos e estudos acima.

A instalação dos bancos de capacitores é um método muito mais rápido para controlar a queda de tensão do que reguladores de tensão, que tem uma resposta muito lenta, podendo até mesmo levar horas, para compensar a queda de tensão, e muito mais rápido que bancos de capacitores em paralelo também, pois demoram mais para ter uma resposta.

Além de ser muito eficaz, este método é o mais perigoso e polêmico. Perigoso porque se não for feito um grande estudo para instalação deste equipamento na rede de distribuição de energia elétrica, o mesmo gerará ressonância na rede causando diversos prejuízos a todos que estão ligados no mesmo alimentador, e em casos mais graves, ocorre explosão do equipamento. E ainda não há uma norma padrão para a instalação do mesmo, como ocorre em reguladores de tensão por exemplo. Esta é uma de suas desvantagens, e por isso que existem poucas instalações deste tipo no Brasil.

Diante de todos os prós e contras do banco de capacitor em série fica evidente que, mesmo sendo muito complexa sua instalação em sistemas de distribuição, suas vantagens superam e muito todas suas desvantagens deste equipamento, superando também todos os outros meios para compensação de reativos, pois é o meio mais rápido e eficaz para controlar os excessos de reativos de um sistema.

REFERÊNCIAS

SIGMAR, Maurer Deckmann. Compensação Estática de Reativos: Uma Solução para Problemas de Operação de Sistemas Elétricos. SBA: Controle & Automação, Campinas, 1987 v.1, n.4, p. 313-321

VALE, M. H. M.; CHAVES, F.S.; SILVA, B.A.C.; MARIANO, L. Jr.; VALADARES, J. R. Critérios e Procedimentos para compensação Reativa e Controle de Tensão. CITINEL.

OLIVEIRA, H. R. P. M. de; FIGUEIREDO, C. E. C.; JESUS, N. C. Resultados Obtidos na Operação de Sistemas de Compensação Série em Alimentadores de Média Tensão da AES Sul. In: XV SENDI. 2002, Brasília. XV Sendi. Brasília 2002 p. 1-7.

SILVA, S. M.; SILVA, M. I.; CORRÊA, T. P.; FRANÇA, G. J. Operação Dinâmica de Bancos de Capacitores com Eliminação de Correntes de Inrush. In: Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Blumenau. VIII CBQEE. 2009 p. 1-5.

CAMARGO, J.; SUZUKI, M.; FERREIRA, D. J.; CAIXETA, G. P.; BORGES, W. M. Compensador Série Modularizado para Sistemas de Distribuição até 23 KV. In: XIX SENDI. 2010, São Paulo. XIX Sendi. São Paulo 2010 v. 19. p. 1-31.

CAPAGE, Engenharia LTDA. Compensação Série de Reativos. 2010 p. 1-20

PEREIRA, Carlos Alberto Nogueira. **Alocação ótima de reguladores de tensão em redes de distribuição de energia elétrica.** 2009, 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, 2009.

SANTOS, Luís Fabiano dos. **Avaliação de algoritmos numéricos de proteção para linhas com compensação série.** 2006, 245f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, 2006.

ALCÂNTARA, Márcio Venício Pilar. **Alocação de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica.** 2005, 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

GONZÁLES, José Federico Vizcaino. **Redução de perdas em redes primárias de distribuição de energia elétrica por instalações e controle de capacitores.** 2003, 97f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, 2003.

http://www.hpeonline.com.br/imgs/imgs_upload/upload_artigos/pt_2eb0359e99a3f391b06b31b8213e625e.pdf

SAIA, Neil K.; The importance of site selection for series compensation. Entergy Services, Inc. p. 1-10, 2005.

HAMANN, J. R.; MISKE Jr, S. A.; JOHNSON, I. B.; COURTS, A. L.; A zinc oxide varistor protective system for series capacitors. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 3, p. 1-9, march 1981.

McCARREL, R. B.; FOLKESSON, A.; BÉRUBÉ, P.; Distribution series capacitor application for improved motor start and flicker mitigation. p. 1-7, 2006

MILLER, T. J. E., (1982). Reactive Power Control in Electric Systems, J. Wiley & Sons, New York.

STEINMETZ, C. P., (1917). Theory and lation of Electric Circuits, Hill, New York.