

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

PAULO CEZAR PIOVESAN VIANNA

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DOS LIMITES DE OPERAÇÃO DE UM
D-STATCOM OPERANDO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM
ELEVADA IMPEDÂNCIA**

**Alegrete
2017**

PAULO CEZAR PIOVESAN VIANNA

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DOS LIMITES DE OPERAÇÃO DE UM
D-STATCOM OPERANDO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM
ELEVADA IMPEDÂNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Guilherme Sebastião da Silva

Alegrete

2017

PAULO CEZAR PIOVESAN VIANNA

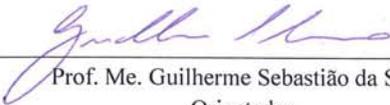
ANÁLISE E SIMULAÇÃO DOS LIMITES DE OPERAÇÃO DE UM D-STATCOM OPERANDO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM ELEVADA IMPEDÂNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletrônica de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04 de dezembro de 2017.

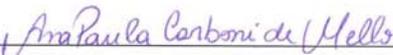
Banca examinadora:



Prof. Me. Guilherme Sebastião da Silva
Orientador



Prof. Dr. José Wagner Maciel Kaehler
UNIPAMPA



Prof(a). Me. Ana Paula Carboni de Mello
UNIPAMPA

RESUMO

O aumento da demanda de energia elétrica decorrente do crescimento dos setores industriais e de bem e serviços, bem como da classe residencial, implicam na necessidade da expansão e modernização do setor elétrico. A distribuição de energia elétrica, segmento responsável pela prestação do serviço de suprimento de energia elétrica as diversas classes de consumidores, tem como uma de suas obrigações manter não só os níveis de tensão e o fator de potência dentro de faixas adequadas, como também cumprir as normativas e regulamentações impostas pelo Módulo 8 do PRODIST. Níveis de tensão fora dos limites adequados comprometem o funcionamento de diversos equipamentos eletrônicos, muitos deles sensíveis a leves variações de tensões e a outras formas de interferência. A possibilidade do uso de novos equipamentos com capacidade de promoverem o controle do nível de tensão diretamente no ponto de acoplamento da rede se tornou real a partir dos avanços nos estudos dos *Flexible Alternating Current Transmission System* (FACTS) de segunda geração, que empregam maior uso de chaves semicondutoras autocomutadas. Desses equipamentos, pode-se destacar o Compensador Estático de Reativos para Distribuição (D-STATCOM), que por meio de suas estruturas, apresenta bom potencial para o controle do nível de tensão e do fator de potência no ponto de acoplamento da rede com as cargas, utilizando para isso o controle do fluxo de potência ativa e reativa a ser inserida ou retirada da rede de distribuição. A capacidade de injeção de potência ativa pode ser atribuída a conexão de uma fonte de potência ativa no barramento CC, transformando o D-STATCOM em uma Geração Distribuída (GD). Assim, um ponto importante a ser analisado nestes compensadores é a sua capacidade de transferência de potência, para isso, faz-se importante realizar os estudos de suas curvas de capacidade de potência através do equacionamento das expressões de potência ativa e reativa. A fim de avaliar tanto o nível de tensão como o comportamento do compensador, uma rede de distribuição em 13,8 kV/0,22 kV com seis barras é implementada no software OpenDSS[®], no qual os perfis de tensão foram analisados para distintos valores de potência ativa, reativa capacitiva e reativa indutiva processados quando o dispositivo é conectado nas barras cinco e seis. Os melhores casos, onde o nível de tensão se manteve dentro da faixa regulamentada pela ANEEL, foram aqueles em que o compensador realizou a injeção apenas de potência ativa ou reativa capacitiva. Os piores casos foram atribuídos à compensação puramente indutiva, onde os níveis de tensão passaram a divergir da faixa ideal. Com relação à operação com limitação de corrente o D-STATCOM apresentou uma redução da injeção de potências ativas e reativas.

Palavras-chave: Conversores Estáticos. Compensador Estático de Reativos para Distribuição. Injeção de Potência. Qualidade de Energia.

ABSTRACT

The increase in the demand for electric power due to the growth of the industrial and good sectors and services, as well as of the residential class, imply the need for the expansion and modernization of the electric sector. The distribution of electric energy, the segment responsible for supplying the electric power supply service to the different classes of consumers, has as one of its obligations to maintain not only the voltage levels and the power factor within suitable bands, but also comply with the regulations imposed by Module 8 of PRO-DIST. Voltage levels outside the appropriate limits compromise the operation of various electronic equipment, many of which are sensitive to slight voltage variations and other forms of interference. The possibility of using new equipment capable of controlling the voltage level directly at the network connection point became real from the advances in the studies of second generation Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) which employ greater use of self-commutated semiconductor keys. Of these equipments, it is possible to emphasize the Static Compensator of Reactive Power in Distribution Networks (D-STATCOM), which through its structures presents/displays good potential for the voltage level control and power factor correction at the point of common coupling (PCC), using the active and reactive power control to be inserted or absorbed from the distribution network. The active power injection capacity can be attributed to the connection of an active power source to the dc voltage bus, transforming the D-STATCOM in a Distributed Generation (DG). Thus, another important point to be analyzed in the compensators is their power transfer capacity. For this, it is important to carry out the studies of their power capacity curves by means of the equation of the expressions of active and reactive power. In order to evaluate both the voltage level and the compensator behavior, a 13.8 kV/0.22 kV six-bus distribution network is implemented in the OpenDSS[®] software, in which the voltage profiles were analyzed for different active and reactive (capacitive and inductive) powers where the compensator is connected to the bars five or six. The best cases where the voltage level remained within the range regulated by ANEEL were those in which the compensator carried out the injection only of active power or reactive power (capacitive). The worst cases were attributed to the purely inductive compensation, where the voltage levels diverged from the ideal range. With regard to the operation with current limitation, D-STATCOM presented a reduction of the injection of active and reactive powers.

Keywords: Static Converters. Distribution Reactive Power Static Compensator. Power Injection. Energy Quality.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Justificativa.....	9
1.2 Objetivos do trabalho	12
1.3 Organização do trabalho.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Transformadores de distribuição	15
2.2 Reguladores de tensão	15
2.3 Bancos de capacitores.....	15
2.4 Dispositivos eletrônicos.....	16
2.4.1 Equipamentos eletrônicos aplicados a LT's.....	17
2.4.2 STATCOM.....	18
2.4.3 D-STATCOM.....	20
3 METODOLOGIA.....	23
3.1 Modelo da capacidade de operação do D-STATCOM.....	23
3.2 Modelo para análise dos limites de operação do D-STATCOM.....	25
3.2.1 Programação dos modelos de redes simuladas.....	30
4 RESULTADOS	37
4.1 Rede de distribuição simulada.....	37
4.2.1 Operação desconsiderando a reatância de conexão do D-STATCOM	39
4.2.2 Operação considerando a reatância de conexão do D-STATCOM.....	46
4.3 Validação da operação do D-STATCOM	51
4.3.1 Limitação da injeção de potência	51
4.3.2 Confirmação das curvas de potência em função da corrente	55
5 CONCLUSÕES	58
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos conectados à rede primária e secundária de distribuição.....	14
Figura 2 - Inversor conectado a rede.	23
Figura 3 - Sistema de potência genérico.....	26
Figura 4 - Curvas de capacidade de potência para a reatância de saída do conversor.	27
Figura 5 - Região de operação considerando a reatância do filtro do D-STATCOM.....	26
Figura 6 - Curvas de capacidade de potência para o limite de tensão do conversor.	28
Figura 7 - Curvas de capacidade de potência para o limite de corrente do conversor.	29
Figura 8 - Rede de distribuição completa.....	37
Figura 9 - Curvas de injeção de potência ativa na barra 6.	40
Figura 10 - Curvas de injeção de potência reativa capacitiva na barra 6.	41
Figura 11 - Curvas de injeção de potência reativa indutiva na barra 6.	42
Figura 12 - Curvas de injeção de potência ativa e reativa capacitiva na barra 6.....	43
Figura 13 - Curvas de injeção de potência ativa na barra 5.	44
Figura 14 - Curvas de injeção de potência reativa capacitiva na barra 5.	45
Figura 15 - Curvas de injeção de potência reativa indutiva na barra 5.	45
Figura 16 - Curvas de injeção de potência ativa na barra 6.	47
Figura 17 - Curvas de injeção de potência reativa capacitiva na barra 6.	48
Figura 18 - Curvas de injeção de potência reativa indutiva na barra 6.	49
Figura 19 - Curvas de injeção de potência ativa na barra 5.	49
Figura 20 - Curvas de injeção de potência reativa capacitiva na barra 5.	50
Figura 21 - Curvas de injeção de potência reativa indutiva na barra 5.	51
Figura 22 - Curva de referência para V_{minpu}	52
Figura 23 - Potências configurada e injetada pelo D-STATCOM.	55
Figura 24 - Pontos presentes no ábaco das curvas de potência.	56

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas fontes de energia elétrica, associado à expansão da matriz energética brasileira, fazem com que as áreas de Geração, Transmissão e Distribuição busquem aperfeiçoamentos a fim de oferecer energia elétrica aos consumidores com baixo custo, qualidade e segurança. Se por um lado as cargas ganham com o passar do tempo maior grau de complexidade, expandindo suas atribuições dentro das diversas classes de consumidores, por outro, o sistema elétrico necessita se adaptar a essas mudanças de forma dinâmica, buscando ampliar sua capacidade de fornecimento no mesmo ritmo da redução de perdas de energia. Não há melhor maneira de superar esse desafio, senão por meio da modernização e do melhor aproveitamento dos recursos energéticos.

Nos últimos anos, os estudos voltados para a Qualidade de Energia Elétrica tornaram-se mais intensos, não só pelo crescente desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas a equipamentos eletrônicos, mas também pela necessidade de reformulação experimentada pelo setor elétrico para melhor atender aos consumidores, buscando cada vez mais oferecer energia elétrica com qualidade e continuidade. A Qualidade de Energia Elétrica pode ser definida como a variável que mede o bom nível de aproveitamento da energia elétrica por parte das cargas, considerando determinados parâmetros que são observados como ideais à operação do sistema como um todo. Por esse ponto de vista, a energia elétrica ofertada passa a ser um produto no mercado com alto valor agregado, já que além do custo atribuído à geração e à transmissão, a mesma também deve obedecer aos requisitos mínimos estipulados pelas normas de regulamentação na rede de distribuição em alta, média e baixa tensão.

O nível de tensão é um dos parâmetros que mais apresenta problemas de instabilidade, principalmente nos pontos mais distantes de acoplamento entre as cargas e os alimentadores, onde as perdas na transferência de potência são maiores. Níveis de tensão fora dos limites estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) representam condições precárias de operação a cargas que sejam susceptíveis a pequenas variações de amplitude de tensão, a exemplo de equipamento que empregam alto nível de eletrônica. Não apenas as cargas são prejudicadas pela operação do sistema em situações de oscilação de tensão, mas também a própria da rede elétrica de distribuição, já que o fator de potência está diretamente associado ao balanço entre a tensão e a corrente. Dependendo do nível de tensão desenvolvido, o fator

de potência pode se tornar reduzido a valores inferiores aos 0,92, implicando no aumento do fluxo de potência reativa em relação a potência ativa ao longo das linhas de transmissão (LT). Não apenas as multas por excedente de reativos são reflexos de baixos fatores de potência, mas também a subutilização da própria estrutura da rede.

Dessa maneira, pode-se utilizar métodos que sejam capazes de adequar os níveis de tensão de forma mais eficaz, diretamente no ponto onde é identificada a condição de violação das faixas de tensão pré-estabelecidas. Diferentemente das formas mais convencionais, o compensador estático síncrono agrega essa característica de correção dos níveis de tensão no ponto de acoplamento entre as cargas e os alimentadores.

Assim, esse trabalho buscará apresentar a simulação de um compensador estático síncrono para distribuição, avaliando diversos pontos de acoplamento, a fim de traçar o comportamento do nível de tensão de uma rede com elevada impedância de linha em função da utilização do equipamento compensador. Para isso, tanto o sistema de potência, como o D-STATCOM serão simulados via interface pelos softwares OpenDSS[®] e Matlab[®].

1.1 Justificativa

A Distribuição de Energia Elétrica, responsável pela prestação do serviço de atendimento em energia elétrica pelas concessionárias aos diversos grupos de consumidores também é um meio de acesso dos agentes do mercado de energia. Assim, as distribuidoras de energia elétrica procuram manter o fornecimento mediante os princípios apresentados pelos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), com regulamentação e fiscalização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

O Módulo 8 do PRODIST, aborda as diretrizes referentes à qualidade do produto e à qualidade do serviço. O produto neste caso se refere à própria energia elétrica. Os elementos que caracterizam a qualidade do produto tanto em regime permanente ou transitório são: as variações de tensão de curta duração, a variação de frequência, a tensão em regime permanente, o fator de potência, os harmônicos, além dos desequilíbrios e flutuações de tensão [1]-[2]. Entre os componentes citados, a tensão em regime permanente e o fator de potência possuem fundamental importância na análise da qualidade de energia elétrica, muito em função do impac-

to que ambos causam nas unidades de consumo, como também nos equipamentos e instalações da rede de distribuição.

No Módulo 8, são estabelecidos três diferentes limites em regime permanente, definidos como adequados, precários ou críticos, e que dependem da tensão de atendimento. O valor de tensão para fins de comparação com algum dos três limites a partir de um ponto de conexão específico é também conhecido como conformidade de tensão elétrica, e sua avaliação é dada através do conjunto de leituras que devem obedecer a metodologias e medições específicas para indicadores que sejam individuais ou coletivos. A avaliação da conformidade de tensão deve ser aplicada junto aos pontos de conexão à rede, bem como nos pontos de conexão entre distribuidoras e nas próprias unidades de consumo [1].

Ainda, segundo o Módulo 8, que faz atribuição a caracterização dos fenômenos e parâmetros, os valores de tensão nominal ou contratada medidos junto ao ponto de conexão, devem ser comparados aos valores de tensão de referência a fim de classificar o nível de tensão fornecido. É importante destacar, que o valor de tensão nominal será uma função da relação entre o planejamento do sistema de distribuição alinhado às características de projeto dos equipamentos de uso final da instalação. Com relação à regulação das tensões contratadas, seu estabelecimento se dá em função da tensão contratada e dos percentuais mínimos e máximos de tensão nominal de operação no ponto de conexão que podem ser ultrapassados [1].

O Módulo 8 do PRODIST, define também que a tensão contratada deverá ser equivalente à tensão nominal no ponto de conexão, podendo haver desvios na ordem de 5% para mais ou para menos, ou seja, a tensão contratada poderá oscilar entre 95% a 105% da tensão nominal no ponto de entrega [3]. A Tabela 1, faz uma referência a faixa de valores de tensão de leitura que podem ser classificados em adequado, precário e crítico.

Para os indicadores individuais ou coletivos, o Módulo 8, determina que o conjunto de leituras deverá compreender o registro de 1008 leituras consecutivas, com período de integração de 10 minutos cada. Os valores coletados devem ainda ser armazenados por um período mínimo de 5 anos, levando em consideração também o conjunto de leituras expurgadas. As leituras são consideradas expurgadas, quando durante o processo de obtenção dos valores ocorreram distúrbios na rede, a exemplo das interrupções, dos afundamentos e elevações de tensão [1].

Tabela 1. Faixas de valores permitidos em função do nível de tensão [1].

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231)/(117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL \leq 202 \text{ ou } 231 \leq TL \leq 233)$ $(110 \leq TL \leq 117 \text{ ou } 133 \leq TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)/$ $(TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

Fonte: ANEEL, PRODIST (2016).

Dessa forma, os níveis de tensão da rede sempre devem estar adequados e dentro dos limites impostos pela regulamentação vigente, a fim de promover benefícios tanto para os clientes como para as concessionárias. Os impactos da variação de tensão para faixas precárias e críticas se traduzem em grande parte através de distúrbios, que acabam se propagando até as cargas conectadas. Esses distúrbios podem ser caracterizados de diversas formas, sejam eles em função do intervalo de duração, das faixas de frequências, dos efeitos causados ou conforme sua intensidade [2]. Esses efeitos são agravados conforme o aumento da impedância da rede distribuição, a exemplo das redes rurais, pois além dos problemas próprios associados à estrutura dessas redes, a queda de tensão é introduzida como fator adicional.

Não apenas o nível de tensão deve ser assegurado dentro dos limites pré-determinados, mas também a capacidade de transferência de potência ativa e reativa por parte das linhas da rede de distribuição. O nível de tensão está diretamente relacionado ao fator de potência, pois as alternâncias de parcela reativa determinam o grau de equilíbrio entre tensão e corrente. O Módulo 8, traz também a regulamentação com relação ao fator de potência, estabelecendo os critérios de medição, os valores de referência, bem como a definição de excedente de reativos [1]. Assim determina, que para unidades de consumo ou pontos de conexão entre distribuidoras, atendidas em tensão inferior a 230 kV, o fator de potência deverá estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivos e capacitivos. Para cargas atendidas em tensão igual ou superior a 230 kV, a faixa de valores é definida nos Procedimentos de Rede [1]. Porém, independente da

tensão contratada pelo consumidor ou atendida pela concessionária, o não consentimento e a possível extrapolação dos limites do fator de potência pré-definidos são convertidos na forma de multas por excedente de reativos, que são calculados através de equações contidas junto ao regulamento específico da ANEEL [1].

Existem formas de realizar o controle do nível de tensão, as mais conhecidas são através da mudança do tap dos transformadores, pelo uso de reguladores de tensão, além dos bancos de capacitores. Contudo, o forte desenvolvimento de pesquisas relacionadas a equipamentos mais robustos, que empregam dispositivos semicondutores somados também a avaliação da capacidade de transmissão entre os sistemas de potência, impulsionaram o desenvolvimento dos *Flexible Alternating Current Transmission System* (FACTS). Estes equipamentos aplicados inicialmente às redes de transmissão High Voltage Direct Current (HVDC), com o passar do tempo sofreram alterações em seus componentes e na sua estrutura de controle resultando na aplicação dos mesmos as redes de distribuição, onde os níveis de tensão são precários, sendo agravados principalmente conforme o aumento da impedância da linha, já que as quedas de tensão se tornam ainda maiores. Como os problemas relacionados à sobretensão ou subtensão podem ocorrer em qualquer trecho do sistema, que compreende desde os alimentadores até as cargas, a busca por uma forma de adequação da tensão diretamente no ponto de acoplamento da carga com a rede torna-se possível através do emprego do Compensador Estático Síncrono para Distribuição (D-STATCOM), pois o mesmo tem capacidade de corrigir os níveis de tensão por meio da compensação ativa, reativa indutiva ou reativa capacitiva.

Apesar do D-STATCOM corrigir os níveis de tensão e o fator de potência nos pontos mais críticos da rede, o mesmo possui limites de processamento de potência que são diretamente ligados a corrente máxima de operação.

1.2 Objetivos do trabalho

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar a análise e simulação de um D-STATCOM acoplado a uma rede de distribuição de elevada impedância.

Os objetivos específicos são:

- Realizar a revisão bibliográfica a cerca dos FACTs, para compreender o funcionamento dos equipamentos de segunda geração, buscando compreender seu comportamento em redes de distribuição;

- Utilizar os softwares OpenDSS[®] e Matlab[®] como apoio para a simulação da operação do D-STATCOM em diversos pontos de uma rede real;

- Compreender os limites de operação do D-STATCOM, visto as curvas de capacidade de processamento de potência do inversor;

- Analisar o comportamento da rede simulada com o D-STATCOM em pontos diferentes do sistema.

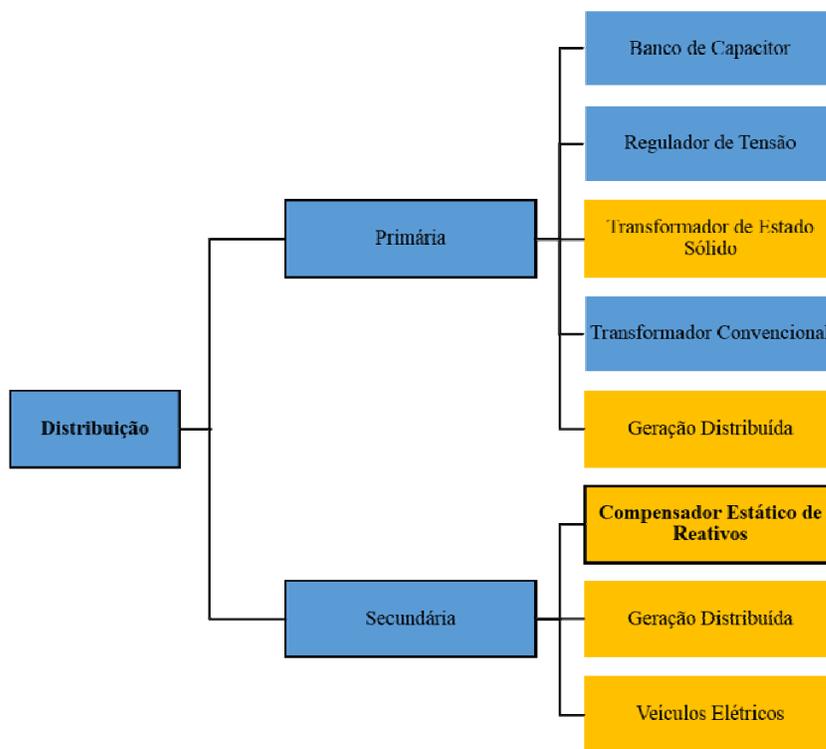
1.3 Organização do trabalho

Este Trabalho de Conclusão de Curso está organizado em 5 capítulos: O capítulo 1 descreve uma introdução sucinta relacionada a importância na necessidade de modernização das redes de distribuição em função da Qualidade de Energia Elétrica. O capítulo 2 faz uma breve revisão bibliográfica a cerca dos principais equipamentos empregados para o ajuste do nível de tensão nas redes de distribuição os componentes, o funcionamento e trabalhos atuais associados ao D-STATCOM. Já o capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para realização da simulação do D-STATCOM na rede de distribuição utilizada no trabalho. No capítulo 4 são demonstrados os resultados das simulações e por fim no capítulo 5 é realizado o fechamento do assunto através da abordagem das principais conclusões alcançadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente, existem algumas maneiras que permitem a regulação do nível de tensão, quando o mesmo é detectado fora dos limites adequados. O ajuste do tap de transformadores, o emprego de reguladores de tensão e a alocação de bancos de capacitores são as formas mais encontradas para resolver esse problema. Na Figura 1, são apontados os principais elementos associados a rede de distribuição primária e secundária. Em coloração laranja, são destacados os elementos que operam através do emprego de eletrônica de potência.

Figura 1. Elementos conectados à rede primária e secundária de distribuição.



Fonte: A autoria própria (2017)

2.1 Transformadores de distribuição

O ajuste manual por meio da mudança do tap nos transformadores de distribuição parte do princípio da relação de espiras entre o primário e o secundário, na qual, busca-se aumentar ou reduzir a tensão de saída de forma que a mesma se aproxime o máximo possível da tensão adequada de referência [4]. Grande parte desses transformadores só podem ser comutados sem carga, necessitando não só da desenergização da rede, mas também do auxílio de uma equipe especializada para a tarefa. Em sistemas de média e alta tensão, a exemplo de transformadores em subestações, a comutação sob carga é realizada através de comutadores eletromecânicos ou *on load tap changer* [5]. Esses comutadores não são aplicados à rede de distribuição em função do seu custo ser elevado [5]. Muitos estudos voltados ao desenvolvimento de comutadores eletrônicos ou *tap changer* tem sido apontados como solução para alteração do tap de transformadores [5]. Neles, o sistema mecânico é substituído por chaves eletrônicas implementadas a partir de tiristores e triacs [5].

2.2 Reguladores de tensão

Os reguladores de tensão ou autotransformadores de várias derivações no enrolamento série são equipamentos que apresentam capacidade de alteração do nível de tensão pelo ajuste automático do tap, em que através da mudança da relação entre espiras é capaz de prover o aumento ou redução da tensão na saída. Sua configuração é modificada em função da variação da tensão de entrada, sendo que o processo de comutação pode ser realizado sob carga [6]. Os principais pontos de instalação do regulador de tensão são nas saídas de alimentadores de subestações e ao longo de redes com elevadas quedas de tensão, onde podem ser associados a bancos de capacitores em derivação.

2.3 Bancos de capacitores

Os bancos de capacitores são equipamentos empregados para a correção do fator de potência. O excesso de energia reativa indutiva traz como consequência a elevação da corrente ao longo das linhas, provocando o aumento do índice de perdas ôhmicas nos condutores. Além disso, a capacidade de transferência de potência ativa, essencial a realização de trabalho útil, é reduzida. O desbalanço entre as potências ativa e reativa, afeta também o nível de tensão, que em muitos casos se mostra abaixo do perfil adequado. Assim, os bancos de capaci-

res, através da compensação de reativos, promovem o aumento do nível de tensão, melhorando não só o fator de potência, mas também o rendimento da rede.

Os bancos são arranjados através de módulos, que podem ser agrupados e adicionados conforme a necessidade da compensação requerida. Já a alocação pode ser em série ou paralelo com as cargas. Contudo, apesar da facilidade do seu emprego, é necessária a realização de estudos prévios e detalhados do ponto de compensação, verificando os perfis de carregamento do alimentador. Bancos instalados de forma fixa em períodos de carga pesada, podem ocasionar problemas relacionados à sobretensão durante períodos de carga leve, sendo necessária a substituição por bancos chaveados [7]. Dessa forma, os bancos de capacitores limitam seu uso em função da baixa flexibilidade para as oscilações de potência apresentadas pela rede, além da reduzida compensação financeira por parte das concessionárias.

2.4 Dispositivos eletrônicos

O elevado crescimento na utilização de dispositivos constituídos por elementos semicondutores como os Diodos, Tiristores, Transistores, Triacs, IGBTs e MOSFETs proporcionou uma verdadeira revolução no controle do fluxo energético dos sistemas elétricos ao final do século XX. Grande parte da aplicação desses elementos se dá na constituição de circuitos que permitem o intercâmbio de energia entre dois ou múltiplos sistemas como, por exemplo, nos Conversores Estáticos [8]. Dentro dos sistemas elétricos de transmissão e distribuição, o emprego desses elementos possibilita o controle e o uso mais eficiente da energia.

O uso de chaves semicondutoras para o transporte de grandes parcelas de potência teve seu início durante os projetos de implementação de linhas de transmissão em corrente contínua, também conhecidas como HVDC (*High Voltage Direct Current*). Estes sistemas em alta tensão necessitam do uso de grandes conversores CA/CC e CC/CA controlados por meio de chaves semicondutoras [9]. Uma das principais características das chaves semicondutoras é sua capacidade de introduzir alterações instantâneas nos sistemas elétricos, agregando maior flexibilidade e dinâmica aos mesmos. Os equipamentos que se encaixam nesses requisitos, são também conhecidos como FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*), e sua constituição se baseia na associação de conversores e chaves de alta potência capazes de atuarem no controle das características que afetam o comportamento do fluxo de potência ao longo das linhas de transmissão. Os FACTS têm como principal função atuar no controle de

tensão das barras de uma linha de transmissão, bem como na defasagem angular e na variação da compensação série das mesmas [10].

2.4.1 Equipamentos eletrônicos aplicados a LTs

Os FACTS conforme [11], podem ser divididos em dois grandes grupos, que consideram a estrutura dos equipamentos, separando assim os FACTS em equipamentos de primeira e segunda geração. De outra forma, [12] propõe a divisão dos FACTS em função de seu acoplamento a rede, ou seja, de forma paralela ou em série. Utilizando da classificação de [9], os FACTS de primeira geração e também acoplados paralelamente a rede por meio de transformadores são constituídos basicamente por tiristores associados a indutores e capacitores, mais conhecidos como TCR (*Thyristor Controlled Reactor*) e TSC (*Thyristor Switched Capacitor*), e que em função do ângulo de disparo dos tiristores realizam a inserção de reativos de natureza indutiva ou capacitiva na rede. Ainda dentro desta classificação existe o SVC (*Static Var Compensator*), ou Compensador Estático de Reativos, com acoplamento shunt, que atua disponibilizando reativos a rede em casos de alteração do perfil do nível de tensão, e sua estrutura baseia-se no acoplamento paralelo do TCR e do TSC com uma reatância capacitiva fixa [10]-[13].

Conforme a análise proposta por [10], o SVC quando conectado a uma linha de transmissão, se comporta como uma susceptância variável controlada pelo disparo dos tiristores. Quando operado em regime normal, o SVC controla a susceptância da rede em função da tensão associada a barra de conexão. Pertencendo à primeira geração, porém, em conexão série com a rede também existem o TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) e o TSSC (*Thyristor Switched Series Capacitor*), que são empregados principalmente na alteração da impedância série de linhas de transmissão, sendo que sua estrutura compõe-se de um indutor associado em série com tiristores, e paralelo a estes ainda incorpora-se um capacitor. O conjunto resultante é conectado em série na linha, onde através do chaveamento ou controle a tiristor é possível realizar o aumento ou redução da capacidade de transmissão de potência [10]-[14].

Pertencentes à segunda geração dos FATCS, e agrupados conforme [10], são encontrados um conjunto de equipamentos, sendo eles, o SSSC (*Static Synchronous Shunt Compensator*), o UPFC (*Unified Power Flow Compensator*), o IPFC (*Interline Power Flow Controller*), o

CSC (*Convertible Static Compensator*), e além destes o STATCOM (*Static Synchronous Compensator*). Os equipamentos de segunda geração diferenciam-se pelo emprego de chaves semicondutoras autocomutadas do tipo IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) e GTOs (*Gate Turn Off Thyristor*) [9]. Muitos desses equipamentos são combinações da associação de VSCs (*Voltage Source Converter*). Os VSCs são conversores CC/CA capazes de produzirem tensões senoidais na frequência fundamental e que ao mesmo tempo oferecem a possibilidade de controle da amplitude e do ângulo da tensão [10]-[12]. Apesar da semelhança entre o SVC e o STATCOM, ambos possuem diferentes formas de controle da potência reativa. O primeiro depende da comutação de tiristores, enquanto que o segundo emprega dispositivos semicondutores completamente controlados, com possibilidade de operação em regime PWM (*Pulse Width Modulation*) [15].

2.4.2 STATCOM

Segundo [9], STATCOM é um equipamento FACTS composto por elementos como inversores, transformadores, capacitor e controles, projetado para o controle de potência reativa indutiva ou capacitiva, podendo ser utilizado no controle do fator de potência e na regulação de tensão do ponto de conexão a fim de melhorar a estabilidade dinâmica do sistema elétrico.

Para [10], o STATCOM, é o equipamento composto por um transformador em derivação, um VSC e um controlador, que de acordo com um sinal de referência, mantém o nível de tensão do sistema dentro da faixa especificada, sendo que a injeção ou absorção de potência reativa é determinada pela alteração da tensão do conversor.

O trabalho de [16], define o STATCOM como um equipamento FACTS baseado em Eletrônica de Potência, e que conectado de forma paralela junto ao sistema elétrico é usado na compensação de potência reativa, promovendo o suporte de tensão ou regulação do fator de potência em áreas críticas do sistema.

De modo geral, o conjunto de definições para o STATCOM converge para uma característica em comum, a realização do controle dos níveis de tensão e do fator de potência no ponto de acoplamento da rede. Sob a perspectiva do controle do fluxo de potência reativa do equipamento, onde o sentido da compensação depende das variáveis de tensão e corrente tanto da rede, como do STATCOM, bem como também das relações angulares existentes entre ambos.

A topologia do STATCOM baseia-se em quatro estruturas básicas: inversores, transformadores, capacitor do lado de corrente contínua e um sistema de controle [9].

Os inversores são construídos a partir de chaves semicondutoras autocomutadas que cumprem o papel de converter a tensão de corrente contínua da saída do capacitor CC em tensão de corrente alternada no ponto de conexão com a rede. O regime de chaveamento pode ser definido a partir de técnicas de modulação em baixas frequências, a exemplo da modulação PAM (*Pulse Amplitude Modulation*), ou em altas frequências, por meio da modulação PWM [9].

O capacitor do lado CC é responsável por prover a atuação do inversor no equipamento, além de servir como fonte temporária de armazenamento de energia ao longo das trocas de potência com a rede [9].

Os transformadores podem ser separados em duas diferentes estruturas levando em consideração suas funções específicas. A primeira estrutura de transformador tem como função realizar a conexão do equipamento à rede, e por isso, é conhecido também como transformador de acoplamento, e sua função limita-se apenas a relação entre primário e secundário. A segunda estrutura, ou transformador da estrutura magnética de redução de harmônicos, como o próprio nome, tem como função diminuir o conteúdo harmônico ou a THD (*Total Harmonic Distortion*) produzida pelo equipamento. A estrutura desse transformador é mais complexa, pois diferente das ligações comuns em estrela ou triângulo, o mesmo requer ligações em zigue-zague a fim de gerar a defasagem nas tensões de saída, que resultam no efeito de cancelamento harmônico [9].

A estrutura de controle é composta essencialmente por um controlador de sincronismo e um controlador de reativos, além da lógica de disparo das chaves semicondutoras [9].

Em [9] é proposto o estudo e a análise do STATCOM operando em sistemas elétricos com tensões desbalanceadas sob a influência de componentes de sequência negativa. As topologias, simulações e estruturas foram desenvolvidas através do programa de simulação de transitórios eletromagnéticos ATP-EMP. O modelo do STATCOM compôs-se de um único capacitor para o lado CC, transformadores conectados em estrela-delta ou estrela-estrela, além de inversores trifásicos em ponte completa. O regime de chaveamento dos inversores é aplicado em função da modulação PAM, tendo como referência a frequência da rede.

Para o controle das potências reativas indutivas e capacitivas, os estudos mostraram a necessidade da inclusão de estruturas para o controle de sincronismo e amplitude de tensão. O sinal de controle de sincronismo entre as tensões do sistema e as tensões geradas pelos inversores é viável por meio do uso de um PLL (*Phase Locked Loop*). Já o sentido do fluxo de potência reativa indutiva ou capacitiva dependerá da amplitude das tensões geradas no STATCOM, além da relação destas tensões com as tensões do lado CC do capacitor. Assim, a tensão gerada no STATCOM pode ser gerida pelo controle da tensão CC no capacitor.

Os resultados mostraram que para as condições de desbalanço de tensão por sequência negativa, o STATCOM PWM não teve sua operação prejudicada, principalmente com relação aos harmônicos de tensão e corrente que não sofreram alterações. Se por um lado, o equipamento passa a oferecer uma melhor resposta diante da utilização da comutação dos inversores pela modulação PWM, por outro, a alta frequência de chaveamento se traduz em elevadas perdas.

No trabalho desenvolvido por [10], é apresentada a modelagem completa dos equipamentos FACTS baseados em conversores CC-CA aplicados ao problema de fluxo de potência ótimo. Antes de iniciar o processo de modelagem, o autor realiza a abordagem inicial relacionada aos limites de operação e seus problemas na operação em regime permanente, além dos limites de operação em regime dinâmico, conduzindo esses estudos aos sistemas de potência.

Quando destaca a modelagem do STATCOM apresenta suas vantagens em relação ao SVC de primeira geração, das quais pode-se citar: reduzidos problemas relacionados a harmônicas de baixa frequência, a alta velocidade de resposta e a independência da tensão da barra de acoplamento para a injeção ou absorção de potência reativa.

Ainda segundo [10], durante a modelagem do STATCOM inicialmente são realizados os equacionamentos das equações de potências ativa e reativa em regime permanente, além das análises do desempenho do sistema de potência em função de suas curvas de estabilidade. Em sequência o STATCOM é aplicado ao estudo do fluxo ótimo de potência

2.4.3 D-STATCOM

Em [15], é realizado a análise, o projeto e a implementação de um regulador de tensão D-STATCOM para redes monofásicas de baixa tensão, caracterizadas pela elevada impedância

de linha. Inicialmente, o trabalho inicialmente faz a análise de um sistema de potência simplificado, a fim de investigar o comportamento da tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) para situações de variação das cargas e da própria impedância da rede. Para cargas de característica resistiva e indutiva com amplitude próxima a um valor nominal, a tensão no PAC passou a violar os limites estabelecidos pela norma de regulamentação, enquanto que para cargas capacitivas, amplitude da tensão é superior à amplitude de tensão em pu da rede. Uma segunda situação também foi avaliada, porém, ao invés da alteração da amplitude de tensão das cargas, a impedância de linha e seu ângulo é quem são variados, mantendo-se uma carga resistiva com valor constante. Conforme os valores de impedância de linha são aumentados, decorrente do aumento em distância, a queda de tensão no PAC é elevada. Assim, o D-STATCOM é acoplado paralelamente ao PAC.

Ainda em [15], a estrutura do D-STATCOM é composta por um inversor monofásico em ponte completa com alimentação em tensão e modulado por largura de pulso (PWM), conectado ao PAC através de um filtro LC de segunda ordem. Assim, a tensão no PAC passa a ser imposta pelo D-STATCOM, de forma que o sistema de controle do inversor é responsável pela aplicação da tensão, para que a mesma permaneça em limites aceitáveis, sendo adequada caso ocorram variações nas cargas ou na própria impedância da linha. O D-STATCOM deve operar somente em função do fluxo de energia reativa para realizar a regulação do nível de tensão, contudo, pode processar pequenas parcelas de potência ativa para compensar as perdas no conversor, utilizando para isso a variação do ângulo de defasagem entre a tensão no PAC e a tensão da rede. O trabalho realiza também uma análise do ângulo de defasagem da tensão do PAC e da potência reativa atribuída ao inversor, considerando diferentes situações de rede e carga.

Em [17], é realizado o projeto e a análise de um D-STATCOM multinível para melhorar a qualidade de energia de uma rede através da compensação de potência reativa e harmônicos, utilizando para isso a ferramenta Simulink do Matlab®. Neste artigo, inicialmente o D-STATCOM é apresentado como dispositivo com capacidade correção do fator de potência, compensação harmônica e o balanceamento de carga. Ainda segundo [17], quando acoplado a rede de distribuição, o D-STATCOM funciona como elemento trocador de potências ativas e reativas através da variação da amplitude e do ângulo de tensão do conversão em função da tensão no ponto de acoplamento. Neste caso, o inversor multinível é empregado para reduzir a tensão e os harmônicos de saída do equipamento.

O projeto do D-STATCOM multinível foi baseado em um VSC de dois níveis, um elemento armazenador de energia DC e um transformador de acoplamento. O sistema de controle foi desenvolvido com o objetivo de manter a magnitude de tensão constante para os pontos em que uma carga qualquer apresente problemas relacionados às anomalias do sistema. Para isso o sistema de controle mede apenas a tensão rms no ponto. Já a técnica de comutação do elemento VSC se baseia em uma estratégia PWM sinusoidal, em função da maior flexibilidade e redução de perdas durante a comutação nos chaveamentos.

No trabalho desenvolvido por [18], é realizada a modelagem e a simulação de um D-STATCOM para regulação de tensão. O D-STATCOM é composto por um VSC, reatores de acoplamento e um controlador. O processo de transferência de potência ativa e reativa entre o sistema de potência e o D-STATCOM é resultado da diferença de potencial empregada pela reatância de acoplamento. Para a modelagem do D-STATCOM é utilizada a técnica de espaço de estados. Com relação ao controle da tensão no barramento para a injeção de potência ativa e reativa, o mesmo é realizado por meio de dois reguladores de tensão, o primeiro para a regulação de tensão no barramento CA e o segundo para regulação de tensão no capacitor, no lado CC. Nos dois reguladores os controladores são proporcionais integrais (PI).

A partir do sinal senoidal disponível, o mesmo é comparado com o sinal de uma onda triangular com elevada frequência para a geração do sinal PWM aplicado ao regime de comutação. Para a simulação do D-STATCOM acoplado a rede utilizou-se do ambiente de Simulink levando em consideração os intervalos de resposta e os valores de potência ativa e reativa inseridos. Os resultados apontaram para a alta capacidade do D-STATCOM fornecer tensão constante, passando a funcionar como um regulador de tensão.

3 METODOLOGIA

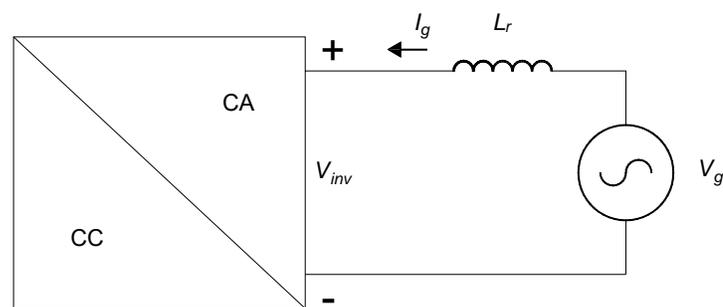
A primeira etapa contempla a análise teórica para definição dos limites de potência de um inversor conectado a rede, além da limitação da capacidade de potência do inversor em função da corrente, devido à limitação de corrente dos dispositivos semicondutores [19].

Em um segundo momento é apresentado um sistema de distribuição de referência, onde diferentes valores de potência ativa e reativa foram inseridas no sistema a fim de verificar o comportamento do nível de tensão nas barras mais distantes do transformador de distribuição.

3.1 Modelo da capacidade de operação do D-STATCOM

É importante reconhecer que apesar de favorecer o comportamento da tensão, para os casos em que o D-STATCOM processa potência ativa e reativa capacitiva, ou de forma combinada, o mesmo apresenta certas limitações que comprometem sua operação, sendo que a principal se refere à operação do conversor. A Figura 3 apresenta um inversor CC/CA conectado a uma rede de impedância L_r alimentada por uma fonte V_g , a qual é utilizada para exemplificar o modelo da capacidade de operação do D-STATCOM.

Figura 2 - Inversor conectado a rede.



Fonte: Autoria própria (2017)

Conforme os estudos realizados por [19], a tensão de saída de um conversor depende de dois parâmetros principais, sendo eles a tensão do barramento CC e a estratégia empregada na modulação.

Considerando o fasor de corrente entre as tensões do inversor $V_i \angle \theta_i$ e da rede V_g através da reatância X_d , pode-se estabelecer a seguinte relação:

$$I = \frac{V_i - V_g}{X_d}. \quad (1)$$

Neste caso, utilizando das propriedades e escrevendo a equação (1) na forma retangular, chega-se as seguintes definições:

$$I = \frac{V_i \cos(\theta_i) + jV_i \text{sen}(\theta_i) - V_g}{jX_d}. \quad (2)$$

Separando a equação (2) em parte real e imaginária chega-se a:

$$I = \frac{V_i \text{sen}(\theta_i)}{X_d} + j \frac{V_g - V_i \cos(\theta_i)}{X_d}. \quad (3)$$

Sabendo que a potência aparente da rede pode ser expressa pelo produto da tensão da rede pelo conjugado da corrente:

$$S = V_g I^* = P + jQ = \frac{V_g V_i \text{sen}(\theta_i)}{X_d} - j \frac{V_g V_i \cos(\theta_i) - V_g^2}{X_d}. \quad (4)$$

Assim, as potências ativa e reativa são expressas como:

$$P = \frac{V_g V_i \text{sen}(\theta_i)}{X_d}, \quad (5)$$

$$Q = \frac{V_g V_i \cos(\theta_i) - V_g^2}{X_d}.$$

De maneira semelhante, a equação (6) pode ser obtida através da expressões em (5):

$$P^2 + \left(Q + \frac{V_g^2}{X} \right)^2 = \left(\frac{V_g}{X} V_i \right)^2. \quad (6)$$

A solução é dada por um círculo em um plano PQ, que representam diferentes curvas de capacidade de potência em função da variação da reatância de saída, da tensão e também da corrente do conversor.

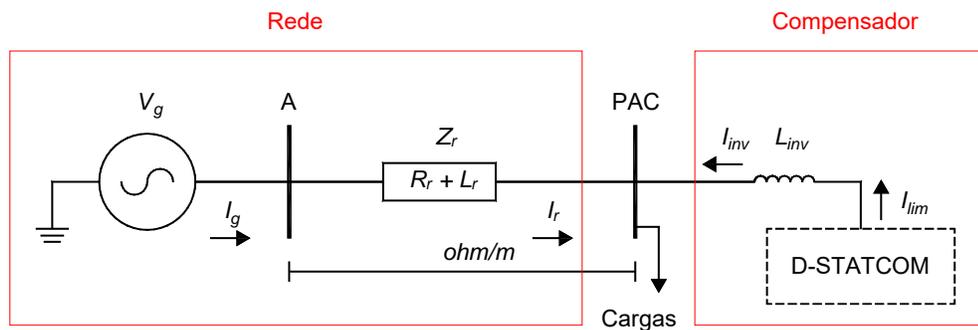
Os testes serão realizados a partir da implementação de rede de distribuição no software OpenDSS[®], utilizando para isso suas ferramentas específicas. As curvas PQ, servirão como meio para a verificação das condições operativas do D-STATCOM, com ênfase no ábaco de curvas de capacidade de potência em função da corrente.

3.2 Modelo para análise dos limites de operação do D-STATCOM

A operação limitada dos conversores é também consequência da reatância existente nos filtro de saída. Quanto maior o valor desta reatância, menor é a taxa de transferência de potência para a rede. Para avaliar o comportamento dos conversores, considere um conversor conectado à rede com $V_g = 1$ p.u. e $V_i = 1,2$ p.u. O valor da reatância $X_d (L_{inv})$ é variada de 0,3 à 0,7 p.u. [17].

A Figura 4 representa o modelo reduzido do sistema de potência genérico, nele é representado o PAC (Ponto de Acoplamento Comum), duas barras A e B conectadas através de uma impedância de rede Z_r em ohm/m percorrida por uma corrente I_r . Além destes, o sistema é alimentado por um gerador com tensão V_g e corrente I_g . Os retângulos em vermelho destacam os elementos pertencentes a rede e os elementos pertencentes ao D-STATCOM, ambos conectados em comum ao PAC.

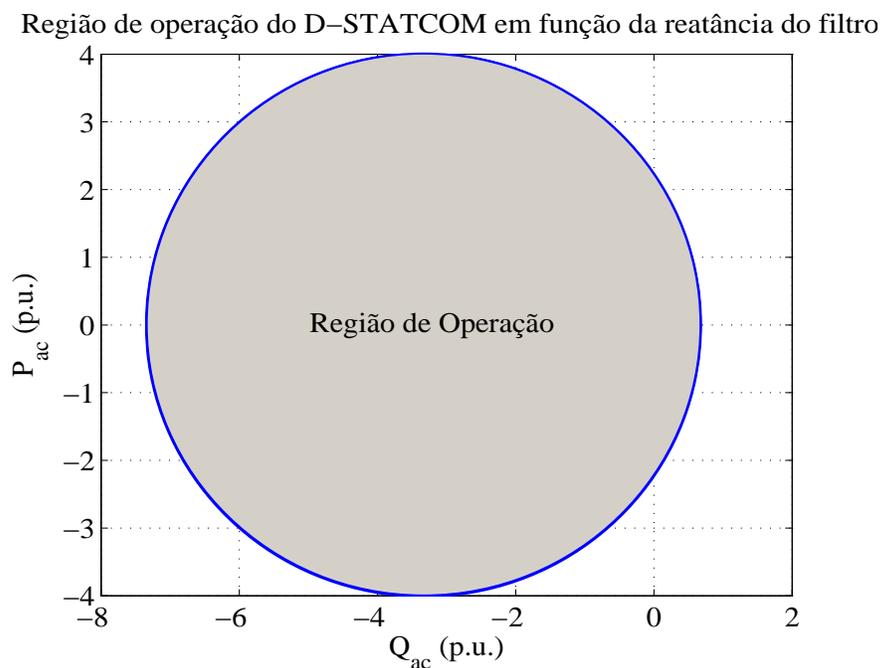
Figura 3 - Sistema de potência genérico.



Fonte: Autoria própria (2017)

Para melhor exemplificar, na Figura 4, é demonstrada a curva para a reatância de 0,3 p.u. Nela todos os valores de potência ativa e reativa localizadas na região em cinza representam a condição de operação do D-STATCOM. Por outro lado os pontos localizados fora do círculo que descreve o limite de operação representam a região de não operação do D-STATCOM.

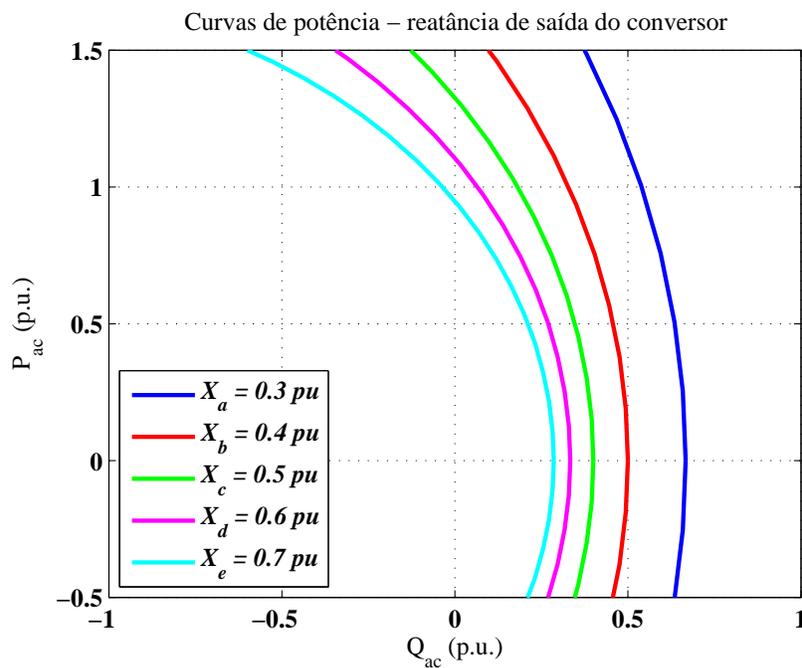
Figura 4. Região de operação considerando a reatância do filtro do D-STATCOM.



Fonte: Autoria própria (2017)

Os resultados das curvas de capacidade de potência são expressos pela Figura 4. Neste ábaco é possível verificar os limites de operação máximos para diferentes valores de reatância do filtro de saída do conversor. Desta forma, na medida em que o valor de X_d é reduzido, aumentam-se os limites de operação do conversor, devido à redução da queda de tensão sobre o mesmo.

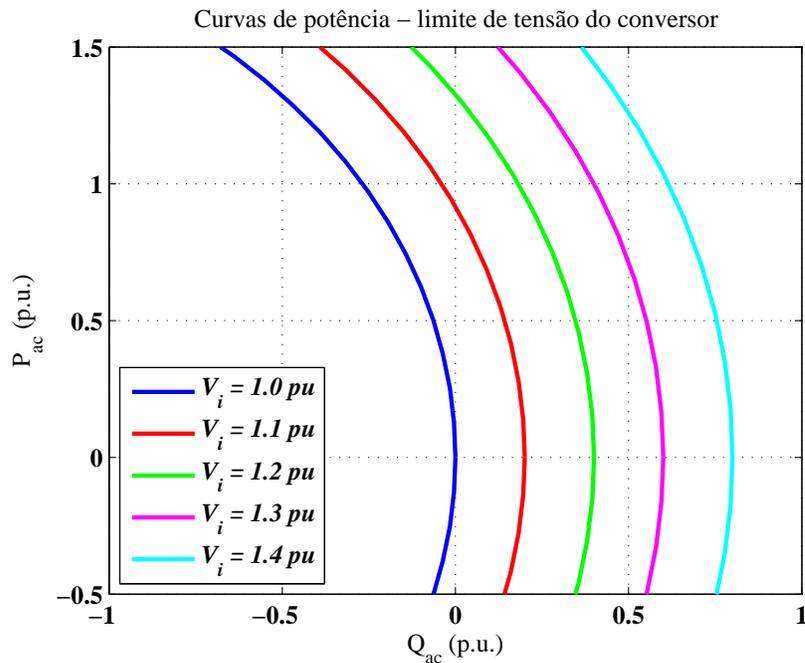
Figura 5 - Curvas de capacidade de potência para a reatância de saída do conversor.



Fonte: A autoria própria (2017)

Buscando compreender o comportamento das curvas de potência dos conversores, a situação descrita anteriormente é realizada novamente, porém, agora a reatância é fixada em 0,5 p.u., $V_g = 1$ p.u. e V_i é variada de 1,0 à 1,5 p.u. Os resultados das curvas de capacidade de potência são expressos pela Figura 6.

Figura 6 - Curvas de capacidade de potência para o limite de tensão do conversor.



Fonte: Autoria própria (2017).

O comportamento das curvas de capacidade de potência do D-STATCOM são semelhantes ao caso anterior. Exceto, que ao invés da reatância do filtro, neste caso a tensão de conexão do D-STATCOM é alterada. Pegando como exemplo a curva de tensão em 1,0 p.u., para todos os valores de potência ativa e reativa externos a essa curva, a condição de operação do D-STATCOM não é válida.

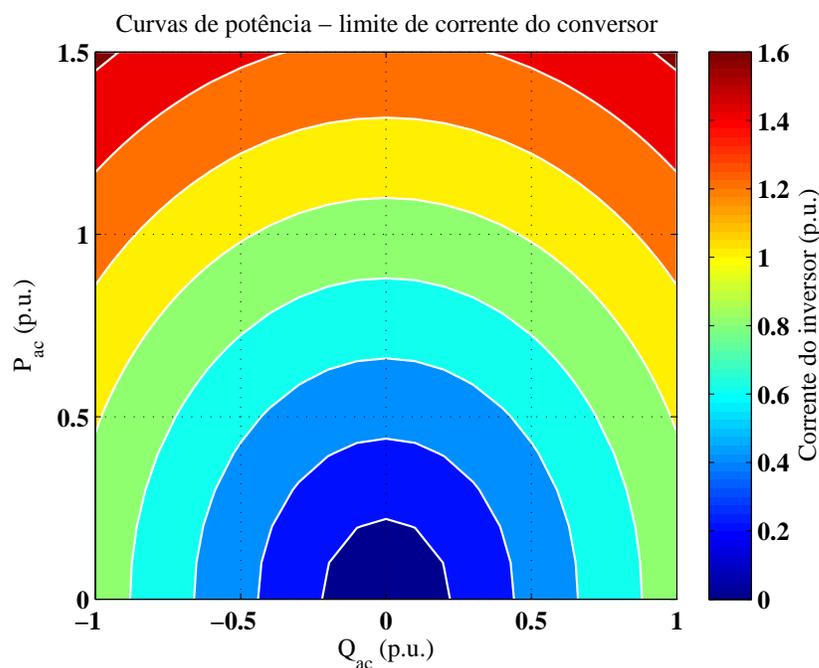
Não apenas a tensão deve ser levada em consideração para avaliar a capacidade de transferência de potência do conversor, mas principalmente sua corrente, já que o mesmo poderá apresentar problemas resultado da limitação térmica dos elementos semicondutores [17]. Para compreender melhor este caso, a partir da equação (6), com devidas simplificações chega-se a expressão (7).

$$P^2 + Q^2 = (V_g I_{\text{lim}})^2. \quad (7)$$

Onde I_{lim} representa a máxima corrente na saída do inversor. Para a obtenção das curvas de capacidade de potência utilizou-se da expressão (7), onde $I_{\text{lim}} = 1,1$ p.u. e V_g foi variada de 0,8 à 1,2 p.u. Os resultados das curvas de capacidade de potência são expressos pelo Figura 7.

Neste caso, quanto maior o valor de tensão da rede, maior a capacidade de transferência de potência ativa e reativa para a rede e vice-versa.

Figura 7 - Curvas de capacidade de potência para o limite de corrente do conversor.



Fonte: A autoria própria (2017).

Este ábaco de curvas obtido através das equações de potência tem fundamental importância na análise da operação do D-STATCOM com limitação de corrente, pois o mesmo permite realizar a obtenção do valor prévio de corrente a partir de um valor de potência ativa e reativa a ser processado pelo equipamento, além disso, estas curvas apresentam como vantagem sua aplicabilidade a qualquer rede de distribuição, uma vez que os valores trabalhados são dados por unidade.

Para melhor entender a análise das curvas de capacidade de potência presentes no ábaco, utiliza-se do seguinte exemplo. Sabendo que para cada faixa de cores, os valores de corrente variam em 0,2 p.u. são fixados dois pontos conforme a Figura 7. Para o primeiro ponto considera-se que $P_{ac} = 0,5$ p.u. e $Q_{ac} = -0,5$ p.u., assim para considerando a faixa em azul claro, a

corrente processada no D-STATCOM, varia de 0,6 à 0,8 p.u. Para um segundo exemplo, considere-se agora um ponto em $P_{ac} = 1,5$ p.u. e $Q_{ac} = 0,5$ p.u., dessa forma o valor de amplitude de corrente processada pelo D-STATCOM varia ao longo de toda a faixa em vermelho, ou seja, de 1,4 à 1,6 p.u.

O D-STATCOM apesar de ser um compensador de reativos, o mesmo também possui a capacidade de injetar ou absorver determinadas quantias de potência ativa. Para isso, a potência ativa quando injetada pelo compensador no PAC, necessariamente uma GD (Geração Distribuída) deve ser acoplada ao barramento CC do equipamento a fim de fornecer a potência ativa. Essa GD pode ser resultado da geração solar fotovoltaica (FV), eólica, hidráulica, biomassa ou qualquer unidade de geração que seja classificada como microgeração.

3.2.1 Programação dos modelos de redes simuladas

A realização das simulações foi resultado da manipulação dos softwares Matlab® e OpenDSS®. No OpenDSS®, através de suas ferramentas, as redes empregadas nas simulações foram implementadas por meio de linhas de comandos e parâmetros próprios de cada ferramenta presente. A utilização do Matlab® foi essencial, pois através do mesmo, realizou-se a compilação e a obtenção das curvas de nível de tensão exploradas nos resultados.

Para a simulação do acoplamento do D-STATCOM, utilizou-se da ferramenta *Generator*, presente em *PCelements*. Essa ferramenta apresenta sete modelos de operação que podem ser usados para a geração de tensão constante em função do ponto de conexão na rede. O modelo 7, tem como característica aproximar a operação do *Generator* de um inversor com capacidade de injeção de potência ativa e reativa de forma constante. Assim, seu comportamento se assemelha ao D-STATCOM. Os parâmetros necessários na programação do *Generator* são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros da ferramenta Generator.

Generator		
Parâmetro	Valor	Descrição
<i>Balanced</i>	No	Balancear corrente
<i>Basefreq</i>	60	Frequência base
<i>Bus1</i>	Nº Bus	Nº conexão da barra
<i>Conn</i>	Wye	Conexão estrela
<i>D (Damping)</i>	1,0	Amortecimento
<i>Enabled</i>	Yes	Ativação
<i>H (Unit mass)</i>	1,0	Unidade de massa
<i>Phases</i>	3,0	Fases do sistema
<i>Vminpu</i>	0,9	Tensão mínima
<i>Model</i>	7,0	Modelo de operação

Fonte: Autoria própria (2017).

O OpenDSS® não faz distinção entre palavras escritas de forma maiúscula ou minúscula durante a programação das linhas de comando. A seguir é representado o exemplo de um dos trechos da programação da ferramenta *Generator* para injeção de potência reatância capacitiva.

Programação do *Generator*:

```

New Generator.G1 D=1.0 H=1.0 phases=3.0 balanced=No bus1=6
~ basefreq=60.0 kV=0.127 kW=0.0 kVAr=4.0 conn=wye
~ model=7 enabled=yes Vminpu=0.90

```

O OpenDSS® permite seu controle por meio do software Matlab®, entretanto, é necessário que sejam executadas algumas diretivas em .DSS no editor.

Código das diretivas no editor do Matlab:

```

DSSobj = Actxserver('OpenDSSEngine.DSS');

DSSText = DSSobj.Text;

DSSCircuit = DSSobj.ActiveCircuit;

DSSSolution = DSSCircuit.Solution;

DSSText.Command = 'Especificar comando'

```

A última diretiva "*DSSText.Command*" é responsável por executar comandos específicos dentro do ambiente do editor, nela o arquivo em .DSS é compilado a partir da pasta onde o mesmo foi salvo. Essa diretiva também realiza a função de inserção de elementos na rede implementada, bem como a exportação de dados em .CSV e exibição dos parâmetros de tensão e potência do sistema.

Extensão do arquivo no software OpenDSS:

O OpenDSS permite a modelagem de qualquer rede, desde que sejam conhecidos os elementos que pertencerão a rede, bem como os parâmetros de cada ferramenta. Parâmetros como a potência aparente, a tensão, os valores de reatância das linhas, as características das cargas e dos *Elements*, além da ordem de conexão das barras, são essenciais ao pleno fluxo de potência estabelecido da fonte às cargas.

A programação do modelo de rede de distribuição apresenta estrutura de comandos para a rede primária de distribuição até o transformador em 13,8 kV/0,22 kV. O alimentador da subestação faz a transformação de tensão de 69 kV para 13,8 kV considerando uma potência aparente de 25 MVA.

Programação do elemento *circuit*:

```
New Circuit.Redel phases=3 basefreq=60 basekv=69.0
```

```
~ bus1=sourcebus angle=30 pu=1.0
```

O elemento *Circuit* tem como função criar um novo sistema, onde os demais elementos adicionados em sequência no código são associados ao mesmo circuito. Nesse elemento são definidas também as bases de frequência e tensão a serem adotadas pelo sistema de potência.

Programação dos elementos *transformer*:

```
New Transformer.Subestacao phases=3 windings=2 xhl=0.0001
```

```
~ wdg=1 bus=sourcebus kV=69.0 kVA=25000 conn=delta %r=0.00005
```

```
~ wdg=2 bus=1 kV=13.8 kVA=25000 conn=wye %r=0.00005
```

```
New Transformer.Transformador1 phases=3 windings=2
```

```
~ wdg=1 bus=2 kV=13.8 kVA=30 conn=wye %r=0.55
```

```
~ wdg=2 bus=3 kV=0.22 kVA=30 conn=wye %r=0.55
```

O elemento *Transformer* é empregado com a finalidade de simular a operação de um transformador através da modificação da razão entre as espiras do primário e do secundário, realizando a elevação ou o abaixamento de tensão. Neste caso, não há distinção entre o transformador de força da subestação e o transformador de distribuição com relação ao emprego da ferramenta. Além da tensão e da potência aparente, este elemento necessita que os parâmetros dos enrolamentos sejam definidos, especificando o tipo de conexão, bem como o valor percentual das perdas resistivas.

Programação do elemento *linecode* para o cabo ACSR 4/0:

```
New Linecode.602 nphases=3 basefreq=60 units=km
~ rmatrix = (0.4676 | 0.0982 0.4645 | 0.0969 0.0954 0.4621)
~ xmatrix = (0.7341 | 0.2632 0.7446 | 0.3117 0.2392 0.7526)
~ cmatrix = (9.3931 | -1.7828 8.5369 | -2.7862 -1.0859 8.9508)
```

A ferramenta *Linecode* permite realizar a otimização da programação no software, armazenando as características com relação à resistência e a reatância, além da unidade base e frequência base. A *Linecode.602* descreve as características do cabo ACSR 4/0 conforme os modelos presentes nos manuais de apoio do software.

Programação do elemento *line*:

```
New Line.Linha12 phases=3 bus1=1.1.2.3 bus2=2.1.2.3
~ Linecode=602 length=15 units=km
New Line.Linha102103 phases=3 bus1=3.1.2.3.0 bus2=4.1.2.3.0
~ Linecode=2/0awg length=150 units=m
New Line.Linha103104 phases=3 bus1=4.1.2.3.0 bus2=5.1.2.3.0
~ Linecode=2/0awg length=150 units=m
New Line.Linha104105 phase=3 bus1=5.1.2.3.0 bus2=6.1.2.3.0
~ Linecode=2/0awg length=150 units=m
```

O elemento *Line* permite que o fluxo de energia elétrica percorra todo o circuito, assim entre duas barras é necessário à existência de uma linha. Para este sistema, uma vez que as *linecodes* já foram configuradas, é necessário apenas chama-lás dentro de cada *Line*. É neces-

sário definir também o número de fases, as barras para a conexão da linha e seu comprimento, que poderá ser dado em quilômetros ou metros.

Programação do elemento *linecode* para o cabo AWG 2/0:

```
New Linecode.2/0awg nphases=3 BaseFreq=60
```

```
~ r1=0.822 x1=0.2682 r0=1.381 x0=1.992 units=km normamps=112
```

A *Linecode.2/0awg* faz atribuição as características do cabo AWG 2/0, suas características foram obtidas através de [20].

Programação do elemento *load*:

```
New Load.Carga1 phases=3 conn=wye bus1=4
```

```
~ kW=8.0 kVAr=0.3 kV=0.22
```

```
New Load.Carga2 phases=3 conn=wye bus1=5
```

```
~ kW=8.0 kVAr=0.3 kV=0.22
```

```
New Load.Carga3 phases=3 conn=wye bus1=6
```

```
~ kW=8.0 kVAr=0.3 kV=0.22
```

O elemento *load* é empregado na configuração das cargas a serem acopladas ao sistema de potência a ser simulado. As cargas devem apresentar parâmetros como o número de fases, o tipo de conexão, a barra de acoplamento, o nível de tensão, além das características de consumo de potência ativa e reativa.

Programação do elemento *Generator* na barra 6:

New Generator.G2 bus1=6 D=1.0 H=1.0 phases=3 balanced=no

~ basefreq=60 kV=0.127 kW=0.0 kVAr=4.0 conn=wye

~ model=7 enabled=yes Vminpu=0.90

O modelo do sistema apresentado é essencial para compreender a dinâmica do fluxo de potência existente entre a rede e o D-STATCOM no PAC, podendo ser representado genericamente conforme a Figura 3.

As equações básicas de potências ativas e reativas são aplicadas com a finalidade de obter as curvas de capacidade de potência, considerando a reatância de saída do filtro, a tensão de acoplamento e a corrente do D-STATCOM. O ábaco de correntes representa a importante relação da corrente de operação para cada nível de potência ativa e reativa processada pelo D-STATCOM.

Assim, a operação do D-STATCOM nos pontos mais críticos refletirá na melhoria dos níveis de tensão em função do processamento das potências ativas e reativas.

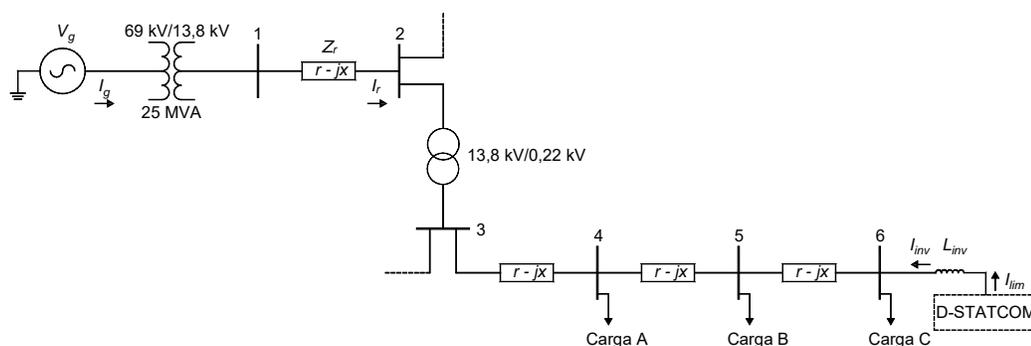
4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para a validação da metodologia de operação do D-STATCOM, nas condições em que o mesmo opera injetando potências ativas e reativas nas barras 5 e 6 do sistema de distribuição implementado.

4.1 Rede de distribuição simulada

Buscando obter resultados mais próximos da realidade para a análise dos perfis de tensão, uma rede de distribuição foi implementada no ambiente do software OpenDSS®, sendo descrita pela Figura 8.

Figura 8 - Rede de distribuição completa.



Fonte: Autoria própria (2017).

A rede compõe-se de um gerador com tensão V_g conectado a um transformador de força localizado em uma subestação 69 kV/13,8 kV, conectado a barra 1. A rede primária de distribuição é compreendida entre as barras 1 e 2, com uma distância total de 15 km e impedância equivalente a *linecode* para o cabo ACSR 4/0 em Ω/m . Para a conexão entre as barras 2 e 3 e posterior início da rede secundária de distribuição, um transformador de distribuição em 13,8 kV/0,22 kV de 30 kVA é acoplado. A conexão entre as barras subsequentes 4, 5 e 6, é reali-

zada por uma impedância equivalente a *linecode* para o cabo AWG 2/0 em Ω/m . Cada trecho entre barras apresenta distância equivalente a 150 m, sendo que em cada barra são acopladas cargas de igual natureza ativa e reativa. No ponto mais crítico é acoplado o elemento responsável pela compensação de reativos para a melhoria dos perfis de tensão, ou seja, o D-STATCOM. Os elementos e os respectivos parâmetros da rede de distribuição simulada são apresentados na Tabela 3. Já os parâmetros do elemento *Generator* são expressos pela Tabela 4.

Tabela 3 - Parâmetros da rede simulada.

Transformadores				
Elemento	kV	kVA	X	
Alimentador	69	-	-	
Transformador SE	69/13,8	25000	0,0001	
Transformador MT/BT	13,8/0,22	30	2,5000	
Linhas				
Elemento	Cabo	Distância	R	X
Linha 1-2	ACSR 4/0	15000 m	-	-
Linha 3-4	AWG 2/0	150 m	0,822	0,2682
Linha 4-5	AWG 2/0	150 m	0,822	0,2682
Linha 5-6	AWG 2/0	150 m	0,822	0,2682
Cargas				
Elemento	kV	kW	kVAr	
Carga A	0,22	8.0	0,3	
Carga B	0,22	8.0	0,3	
Carga C	0,22	8.0	0,3	

Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 4 - Parâmetro do D-STATCOM.

D-STATCOM (<i>Generator</i>)			
kV	kW	kVAr	Vminpu
0,22	Variável	Variável	1,1

Fonte: Autoria própria (2017).

Os demais parâmetros do D-STATCOM empregado nas simulações são apresentados na Tabela 2. Os valores de potências ativas e reativas são inseridos como variáveis, pois dependendo do ponto de acoplamento, esses valores de injeção de potência serão distintos. Apenas V_{minpu} , com a operação de limitação de corrente não sofreu alterações.

4.2.1 Operação desconsiderando a reatância de conexão do D-STATCOM

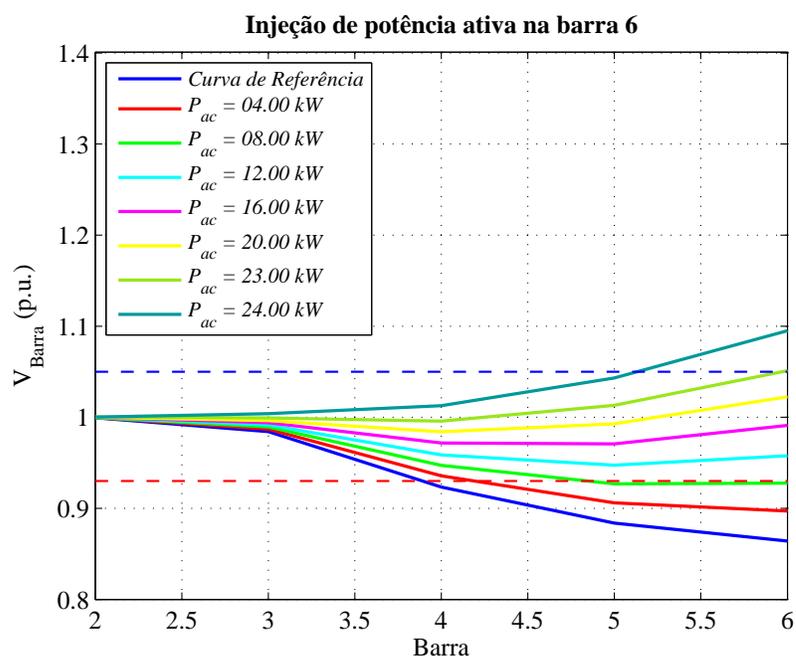
Deve-se levar em consideração que para o modelo inicial de simulação, a reatância de conexão do D-STATCOM não foi desconsiderada, dessa forma, inicialmente acoplou-se o D-STATCOM na barra 6 sem a presença de qualquer valor de impedância, seja ela real ou imaginária.

Assim, o D-STATCOM foi conectado em um primeiro momento nos pontos mais críticos do sistema, ou seja, na barra 6 e posteriormente na barra 5, a fim de avaliar sua contribuição para a melhoria dos níveis de tensão, por meio do processamento de potências ativas e reativas, levando em consideração apenas o comportamento em regime permanente. É importante ressaltar, que nenhum outro equipamento foi adicionado ao sistema com a finalidade de melhorar os níveis de tensão e o fator de potência, a exemplo de reguladores de tensão e bancos de capacitores.

O processamento de potência ativa por parte do D-STATCOM é suprido por fontes renováveis de energia, a exemplo de painéis fotovoltaicos, que neste caso são acoplados diretamente ao barramento CC.

Para a primeira simulação, o D-STATCOM foi configurado para operar injetando potência ativa na barra 6. Os valores de potência ativa processados variaram de 4,0 kW à 24,0 kW, sendo reproduzidas oito diferentes curvas de níveis de tensão expressas pela Figura 9.

Figura 9 - Curvas de injeção de potência ativa na barra 6.

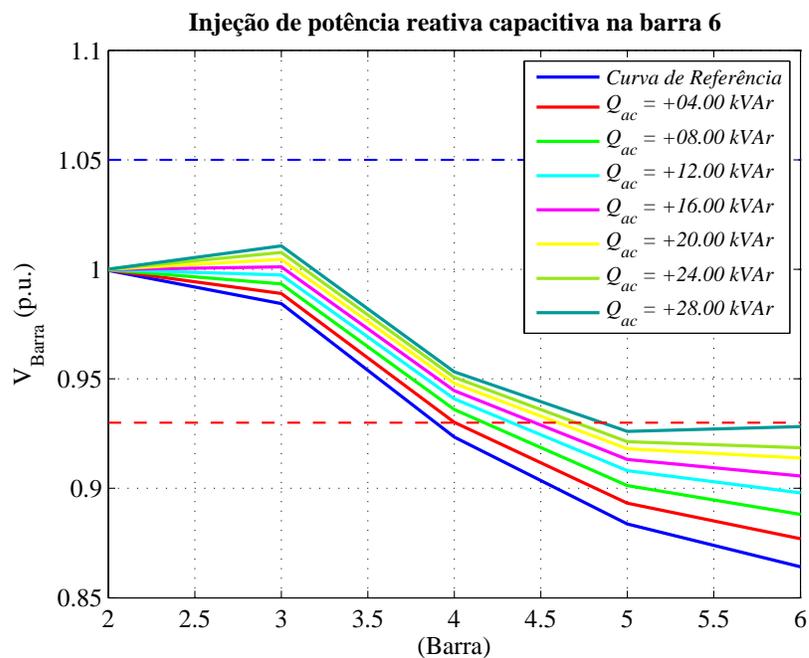


Fonte: Autoria própria (2017).

A curva azul representa o nível de tensão desconsiderando o acoplamento do D-STATCOM. As quedas de tensão associadas às distâncias entre as barras e a própria característica dos condutores, fazem com que o nível de tensão fique abaixo dos 0,93 p.u. a partir da barra 4. Para a barra 6, o valor de tensão p.u. chega a 0,8641 p.u. Valores inferiores aos 0,93 p.u. são considerados precários. Ou seja, para uma tensão em 0,22 kV na barra 3 que é conectada ao secundário do transformador, a mesma tensão no ponto de conexão para a última carga é reduzida ao valor equivalente a 0,190 kV. Para a potência de 12 kW, 16 kW e 20 kW, o nível de tensão é assegurado dentro da faixa adequada. Para os demais valores de potência ativa processados, o nível de tensão ultrapassa o limite superior.

O D-STATCOM também foi configurado para processar potências reativas capacitivas e indutivas. Os valores de potência reativa capacitiva foram alternados de +4,00 kVAr à +28,00 kVAr, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Curvas de injeção de potência reativa capacitiva na barra 6.



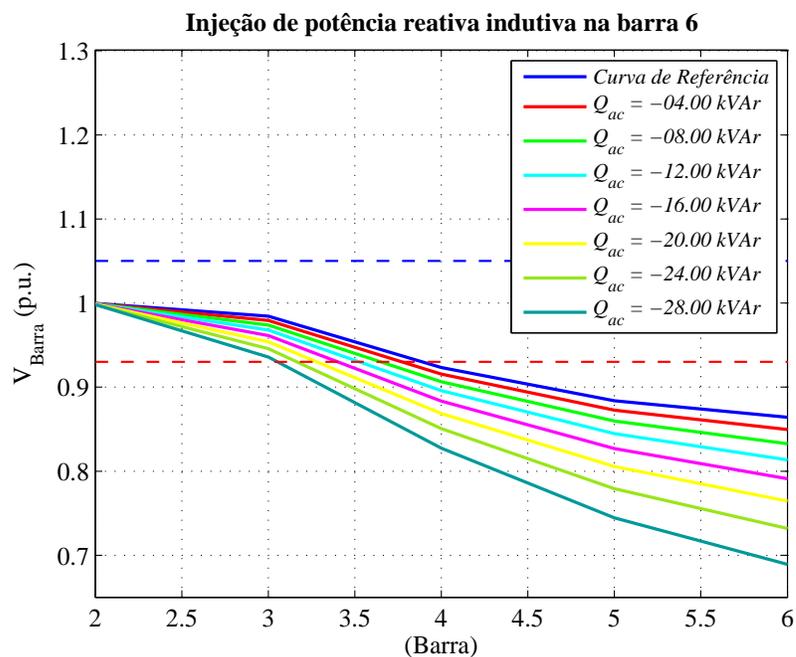
Fonte: Autoria própria (2017).

O acoplamento na barra 6 e a posterior elevação da tensão p.u. para a faixa de limite inferior ocorrem no processamento de +28,00 kVAr, ou seja, para a última curva de nível de tensão, em verde escuro. O nível de tensão para este valor de potência reativa capacitiva foi de 0,9300 p.u., semelhante ao limite inferior.

O D-STATCOM foi configurado novamente, agora para processar potência reativa indutiva com acoplamento também na barra 6. A injeção de reativos de natureza indutiva traz como resultado a elevação da corrente que circula pelos condutores, ocasionando no aumento das quedas de tensão. Dessa forma, os níveis de tensão são reduzidos a valores inferiores a faixa ideal. Esse tipo de comportamento poderá apresentar benefícios para casos em que o

níveis de tensão sejam superiores aos 1,05 p.u., ou também para casos em que cargas de natureza indutiva sejam desconectadas. As curvas para esta situação são descritas pela Figura 11.

Figura 11 - Curvas de injeção de potência reativa indutiva na barra 6.

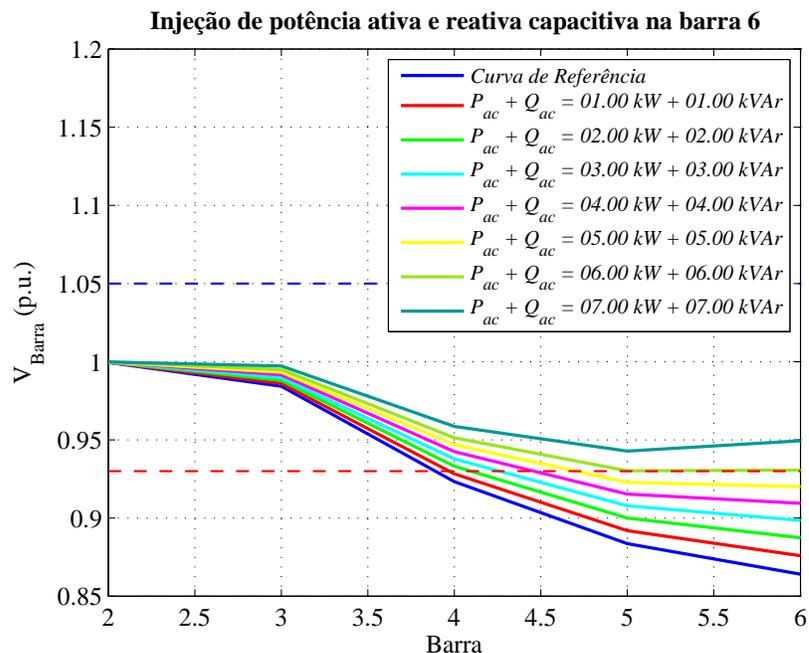


Fonte: Autoria própria (2017).

A exemplo do caso anterior, os valores de potência reativa indutiva injetados variaram de -4,00 kVAr à -28,00 kVAr.

Considerando que as curvas de níveis de tensão são favorecidas quando o D-STATCOM realiza o processamento de potência ativa e de potência reativa capacitiva, as mesmas foram novamente avaliadas considerando a injeção de ambas potências de forma simultânea através de simulação. Os valores de potência tanto ativa como reativa capacitiva foram variados na mesma proporção. Para a potência ativa os valores foram alternados de 1,00 kW à 7,00 kW, Da maneira semelhante, os valores de potência reativa capacitiva foram variados de +1,00 kVAr à +7,00 kVAr. Os resultados da simulação são apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Curvas de injeção de potência ativa e reativa capacitiva na barra 6.



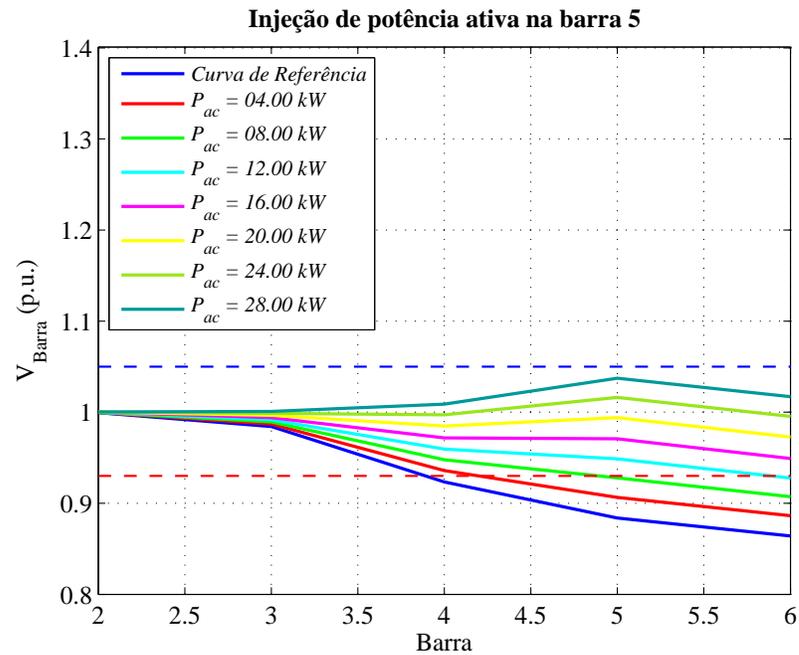
Fonte: Autoria própria (2017).

Através das curvas da Figura 12 é possível observar que a injeção de 6,00 kW e 6,00 kVAr elevam o nível de tensão da barra 6 para 0,93 p.u. Para a curva de injeção de 7,00 kW e 7,00 kVAr, o nível de tensão se aproxima de 0,95 p.u., resultado satisfatório se comparado ao caso teste em que apenas a potência reativa capacitiva é injetada.

A operação do D-STATCOM e a análise das curvas de nível de tensão na barra 5 foram avaliadas sob a mesma perspectiva de valores de potências ativa, reativa capacitiva e reativa indutiva aplicadas a barra 6. Assim como no caso anterior, a reatância de conexão não foi considerada.

O processamento de potência ativa na barra 5 resultou na elevação dos níveis de tensão em todas as barras após o transformador de distribuição, com incremento mais acentuado na barra de acoplamento. Os valores de tensão variaram de 0,8837 p.u. à 1,037 p.u. na barra 5, já para a barra 6 esses valores foram de 0,8614 p.u. à 1,017 p.u. As curvas resultantes da simulação são expressas pela Figura 13.

Figura 13 - Curvas de injeção de potência ativa na barra 5.

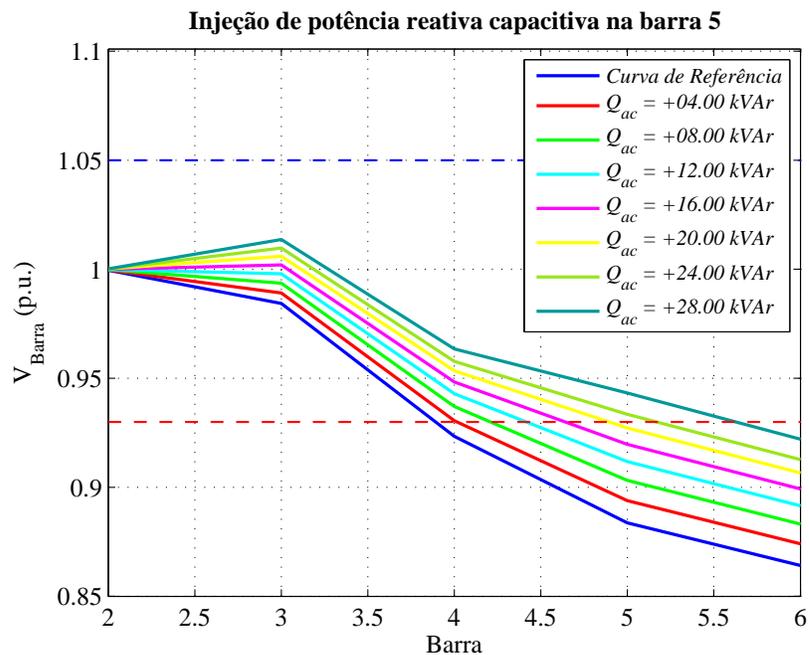


Fonte: Autoria própria (2017).

A partir da curva que representa a injeção de 12,00 kW, mostrada observa-se que os níveis de tensão p.u. são assegurados dentro da faixa mínima de tensão para as barras 5 e 6 do sistema.

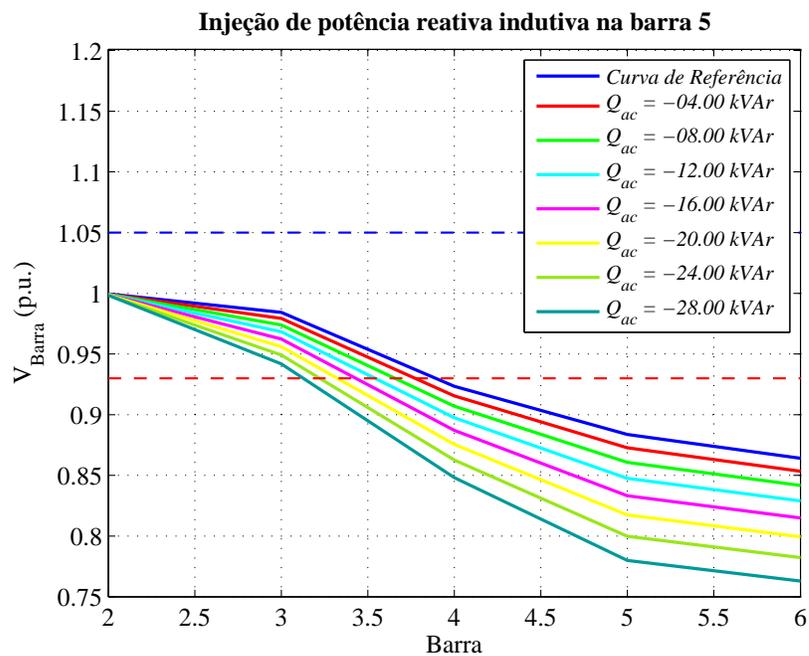
Utilizando da mesma metodologia anterior, o D-STATCOM foi configurado para operar em regime de injeção de potência reativa capacitiva e indutiva, conforme as Figuras 14 e 15.

Figura 14 - Curvas de injeção de potência reativa capacitiva na barra 5.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 15 - Curvas de injeção de potência reativa indutiva na barra 5.



Fonte: Autoria própria (2017).

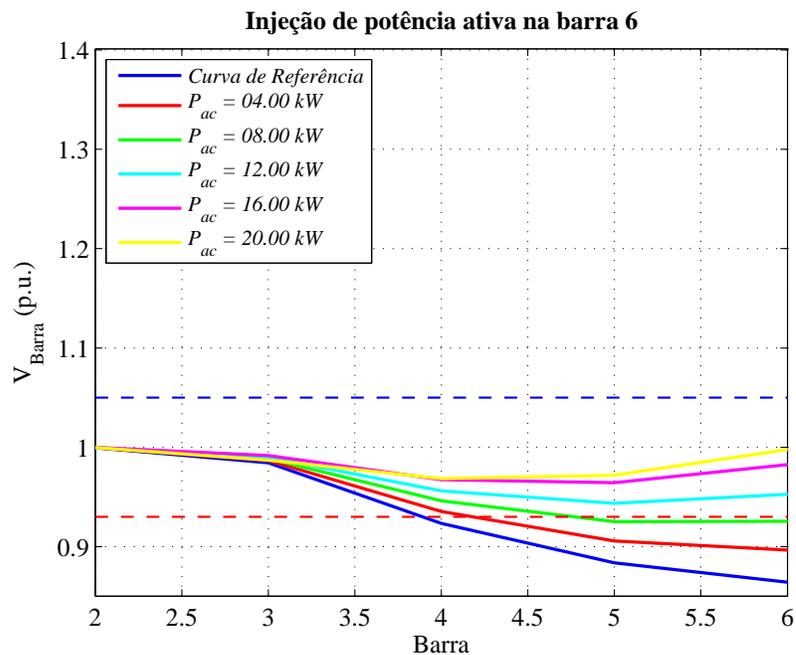
As tensões em p.u. para a curva de +28,00 kVAr para as barras 5 e 6 foram respectivamente de 0,9433 p.u. e 0,9221 p.u. Com relação a injeção de potência reativa indutiva, para a curva de -28,00 kVAr, os níveis de tensão p.u. nas barras 5 e 6 foram assegurados em 0,7800 e 0,7630 p.u.

4.2.2 Operação considerando a reatância de conexão do D-STATCOM

Para simular a influência da reatância de conexão do D-STATCOM uma linha e uma barra virtual foram inseridas entre os dois elementos do sistema. A reatância de valor reduzido aplicada foi de $0,3 \Omega/\text{m}$ para uma distância equivalente a 1 m. Como uma barra adicional foi necessária para a validação da simulação, as curvas de nível de tensão são apresentadas até a barra virtual. Entretanto, o nível de tensão é analisado nas barras 5 e 6, considerando que a barra virtual, a linha adicional para representar a impedância do inversor e o D-STATCOM constituem um mesmo elemento.

Considerando os mesmos parâmetros relacionados as quantidades de potências ativas e reativas injetadas do item 4.2.1, foram obtidas também as curvas de nível de tensão a fim de avaliar a contribuição do D-STATCOM sob a influência de reatância de conexão.

Figura 16 - Curvas de injeção de potência ativa na barra 6.

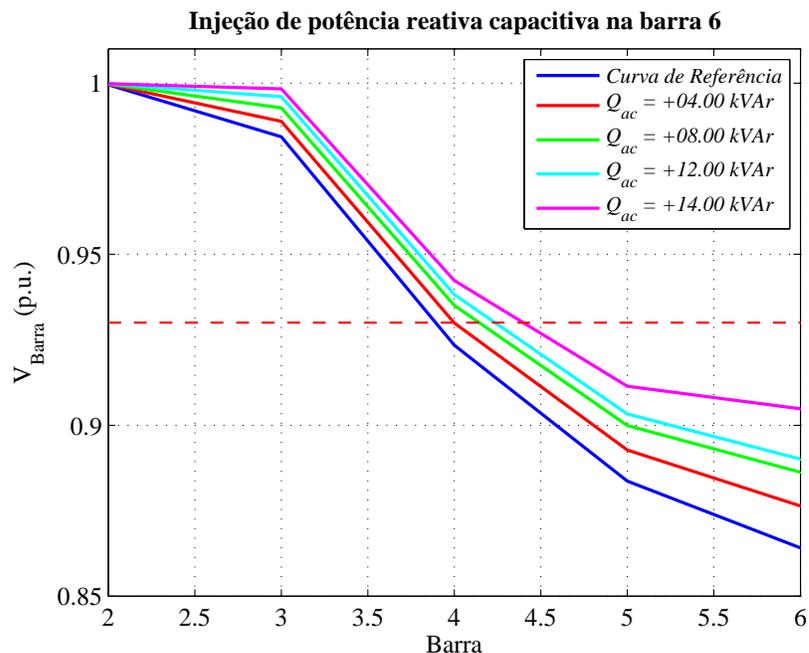


Fonte: Autoria própria (2017).

Para a variação de potência ativa aplicada na barra cinco as curvas de nível de tensão apresentaram limitação a partir dos 20 kW (curva em amarelo) da Figura 16. Acima deste valor as curvas apresentam comportamento superior a faixa máxima de 1,05 p.u., divergindo das faixas ideais de tensão p.u. Para a curva de 20 kW o nível de tensão foi de aproximadamente 0,99 p.u., bem próximo de 1,00 p.u.

A simulação foi também aplicada considerando o processamento de potência reativa capacitiva na mesma barra de conexão. Os valores de potência reativa capacitiva foram alternados de 4,00 kVAr à 14,00 kVAr. Para valores superiores aos 14,00 kVAr injetadas, as curvas posteriores passaram a apresentar comportamento de nível de tensão inferiores. O nível de tensão demonstrou elevação de 0,8641 p.u. para 0,9048 p.u., conforme a Figura 17.

Figura 17 - Curvas de injeção de potência reativa capacitiva na barra 6.



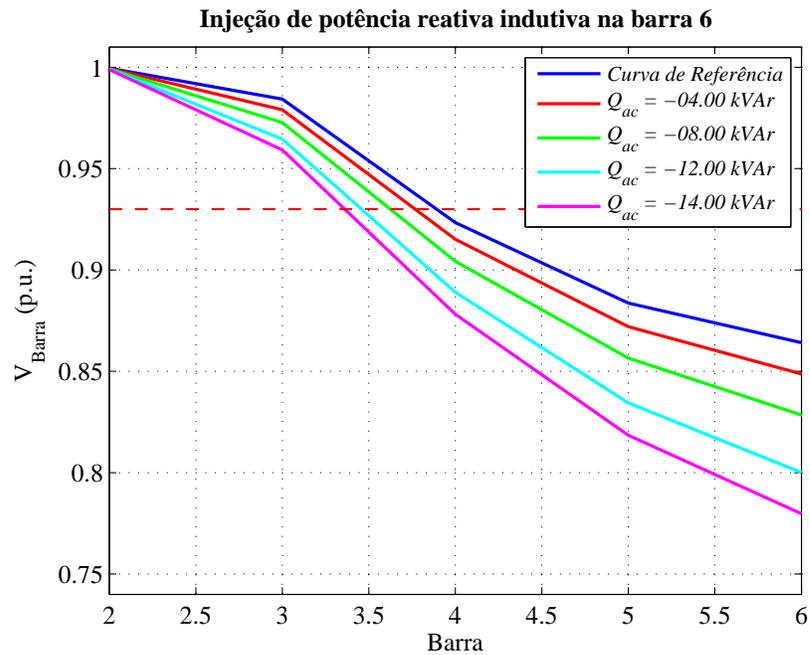
Fonte: Autoria própria (2017).

Partindo do mesmo princípio, para o ponto de acoplamento na barra 6, o D-STATCOM foi novamente configurado para operar injetando agora potência reativa indutiva com valores de -4,00 kVAr à -14,00 kVAr conforme a Figura 18. Assim como para a injeção de potência ativa, a reatância de conexão do D-STATCOM interfere também no processamento de potências reativas capacitivas e indutivas, causando um efeito de limitação.

Buscando avaliar o último ponto de acoplamento, ou seja, na barra 5, o D-STATCOM foi configurado de maneira semelhante no acoplamento a barra 6. Neste caso, a reatância de conexão também interferiu nos valores máximos de potência processados.

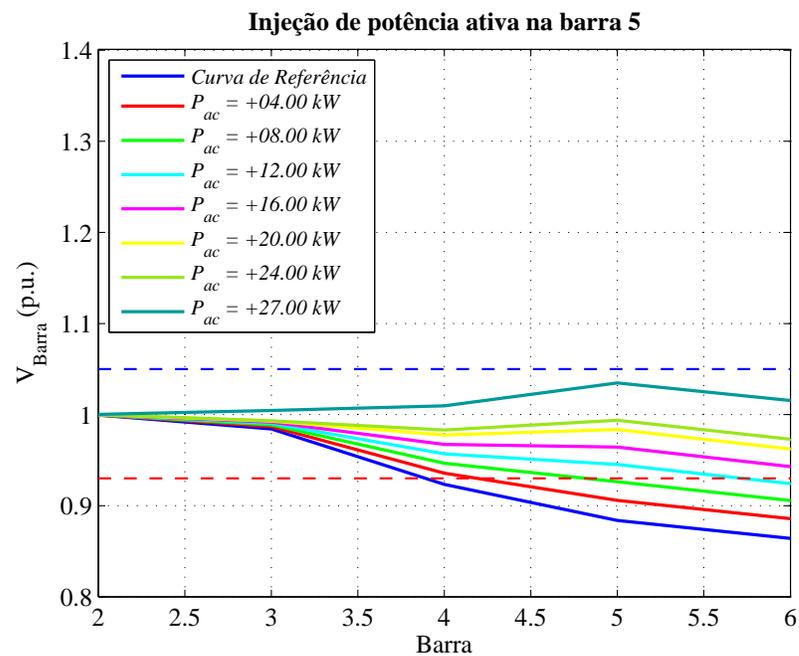
Para a curva de 27,00 kW da Figura 19, a tensão p.u. se aproximou dos 1,04 para a barra 5, enquanto que para a barra 6, esse valor foi equivalente a 1,015. A partir da injeção de 16,00 kW, o nível de tensão antes precário passou a estar dentro das faixas adequadas.

Figura 18 - Curvas de injeção de potência reativa indutiva na barra 6.



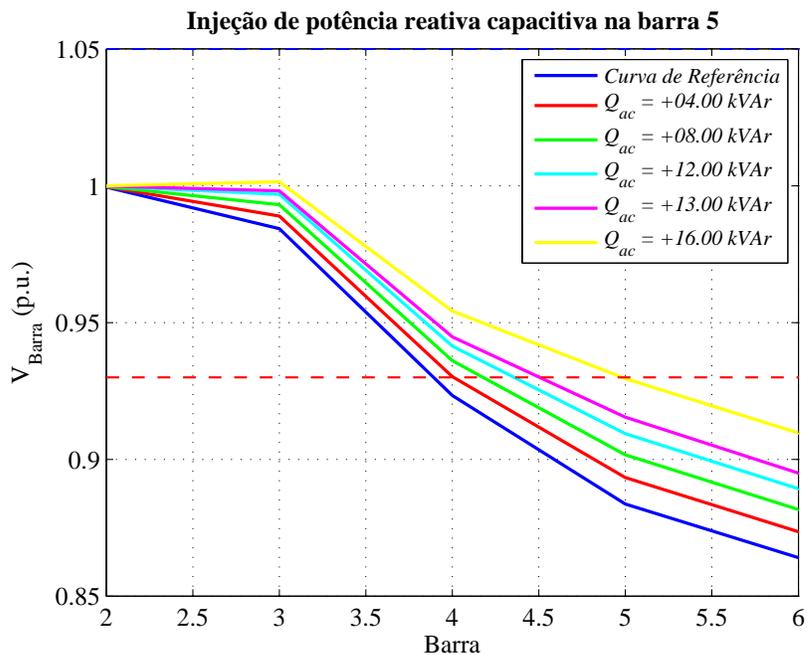
Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 19 - Curvas de injeção de potência ativa na barra 5.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 20 - Curvas de injeção de potência reativa capacitiva na barra 5.

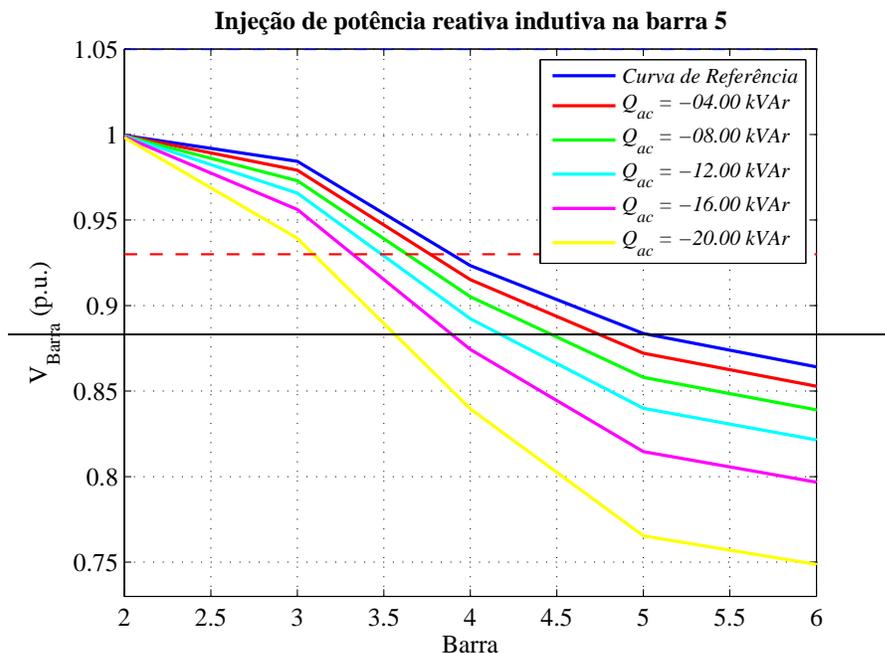


Fonte: Autoria própria (2017).

No processamento de potência reativa capacitiva, as curvas de nível de tensão apresentaram acréscimo, sendo que para a curva de +16,00 kVAr o nível de tensão alcançado na barra 5 foi de 0,9300 p.u., ou seja, no limite inferior da faixa ideal de operação para a tensão. Para valores de potência acima dos +16,00 kVAr, as curvas passaram a demonstrar comportamentos distintos fora dos padrões esperados dentro da simulação. Na barra 6, para o mesmo valor de potência reativa capacitiva, o valor de tensão obtido foi de 0,9097 p.u.

Avaliando o último caso de injeção de potência, o D-STATCOM foi configurado para operar na variação de potência reativa indutiva de -4,00 kVAr à -20,00 kVAr. O resultado para a simulação é apresentado na Figura 21. Para a curva em -20,00 kVAr, os níveis de tensão atingidos foram de 0,7653 p.u. para a barra 5 e de 0,7487 p.u. para a barra 6.

Figura 21 - Curvas de injeção de potência reativa indutiva na barra 5.



Fonte: Autoria própria (2017).

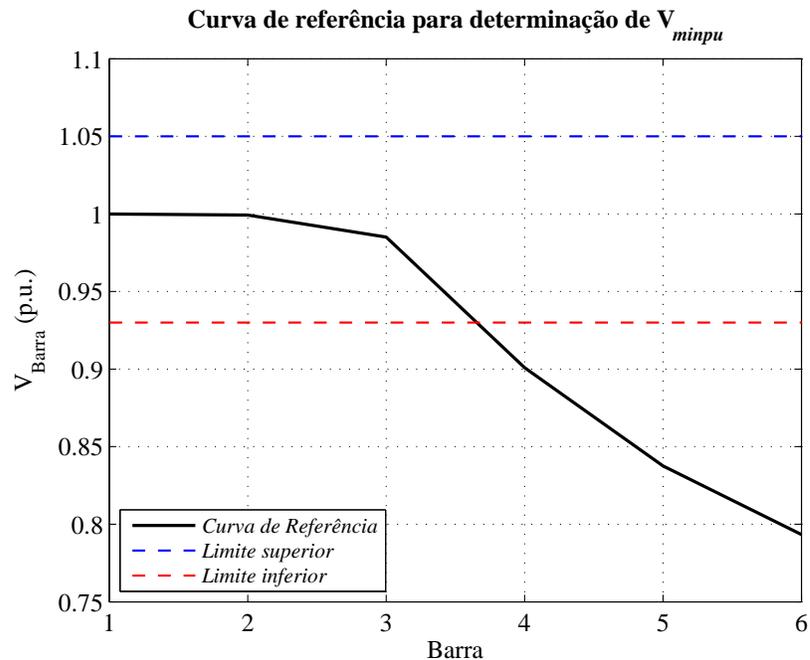
4.3 Limite da operação do D-STATCOM

4.3.1 Limitação da injeção de potência

Conhecendo o comportamento do nível de tensão nas barras localizadas ao final da rede de distribuição simulada em função da conexão do D-STATCOM, bem como a capacidade do mesmo em promover e melhorar nos níveis de tensão, principalmente quando configurado para operar injetando potências ativas e reativas capacitivas, faz-se importante conhecer seu limite de operação em função da definição do nível de corrente. Dessa forma, este tópico busca realizar a validação do ábaco das curvas de potência de acoplamento em função da corrente do inversor do D-STATCOM sob o regime de operação limitada por meio do parâmetro “*Vminpu*” da ferramenta “*Generator*” do OpenDSS®. Segundo a própria definição no software, “*Vminpu*” influencia na mudança do modelo de carga para um modelo de impedância constante. Assim, caso o ajuste de “*Vminpu*” seja superior ao valor da tensão p.u. na barra de acoplamento, então tanto o nível de corrente como o de potência processada passam a ser li-

mitados no D-STATCOM. Dessa forma, conhecendo os níveis de potência a serem injetadas é possível estabelecer a máxima corrente de operação do D-STATCOM. A Figura 22 representa a curva de referência para o sistema de distribuição sem a contribuição do D-STATCOM.

Figura 22 - Curva de referência para V_{minpu} .



Fonte: Autoria própria (2017).

Para a barra 6, o valor de tensão p.u. é verificado, e a partir do mesmo V_{minpu} é configurado a fim de limitar a corrente de operação do D-STATCOM. Neste caso o valor de V_{minpu} foi alterado para um valor mais significativo acima do valor de tensão na barra 6. A tensão p.u. no ponto se aproxima de 0,80, sendo assim, V_{minpu} foi ajustado para 1,1. Para comprovar o funcionamento deste parâmetro de limitação, os valores de corrente do D-STATCOM foram comparados com o modelo das equações de V_{minpu} do elemento *Generator* obtidos nos manuais da EPRI (*Electric Power Research Institute*). Para o cálculo da máxima corrente é importante realizar o cálculo da corrente base, para que a mesma seja utilizada na obtenção do valor em amperes de máxima corrente, já que a equação de V_{minpu} retorna o valor em p.u. da corrente. Assim, a obtenção da máxima corrente é dada em função das equações 8, 9 e 10.

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}}. \quad (8)$$

$$I_{m\acute{a}x.pu} = \left(\frac{\sqrt{(P_{ac}^2 + Q_{ac}^2)}}{\sqrt{3} \cdot V_{m\acute{i}n.pu}} \right). \quad (9)$$

$$I_{m\acute{a}x} = I_{m\acute{a}x.pu} \cdot I_{base}. \quad (10)$$

Buscando analisar o comportamento da corrente em função da limitação por V_{minpu} , o sistema de distribuição foi simulado novamente para a variação de injeção de potências ativas e reativas capacitivas. Os valores foram alternados de 1,00 kW à 5,00 kW para potência ativa e de +1,00 kVAr à +5,00 kVAr para potência reativa capacitiva, mantendo-se fixo o valor de V_{minpu} . O resultado dos valores de corrente, das potências ativas e reativas capacitivas são verificadas por meio da Tabela 5.

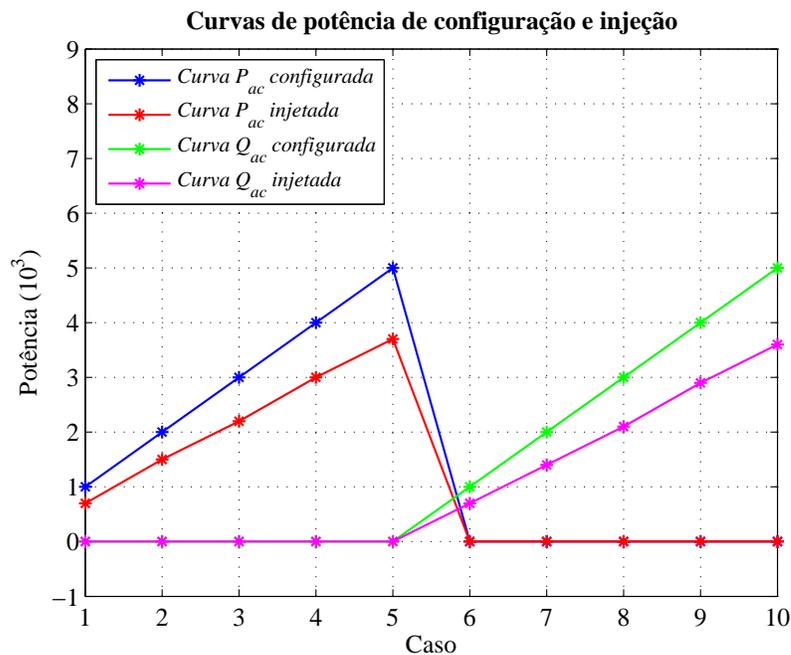
Tabela 5 - Simulação para V_{minpu} fixo em 1,10.

Caso	Potências configuradas		Potências injetadas		Correntes analisadas	
	P_{ac} (kW)	Q_{ac} (kVAr)	$P_{medição}$ (kW)	$Q_{medição}$ (kVAr)	$I_{medição}$ (A)	$I_{equação}$ (A)
1	1,00	0,00	0,70	0,00	2,3857	2,3857
2	2,00	0,00	1,50	0,00	4,7715	4,7715
3	3,00	0,00	2,20	0,00	7,1572	7,1572
4	4,00	0,00	3,00	0,00	9,5430	9,5430
5	5,00	0,00	3,70	0,00	11,9290	11,9290
6	0,00	+1,00	0,00	+0,70	2,3857	2,3857
7	0,00	+2,00	0,00	+1,40	4,7715	4,7715
8	0,00	+3,00	0,00	+2,10	7,1572	7,1572
9	0,00	+4,00	0,00	+2,90	9,5430	9,5430
10	0,00	+5,00	0,00	+3,60	11,9290	11,9290

Fonte: Autoria própria (2017).

Assim, pode-se observar que na configuração de operação limitada à potência configurada apresenta uma restrição se comparada ao valor de potência realmente injetada pelo D-STATCOM. Com relação, a equivalência do modelo através da comparação entre as correntes mensuradas no conversor e calculadas por equacionamentos, ambas apresentam valores exatos, validando assim o limite das correntes de operação do D-STATCOM.

Figura 23 - Potências configurada e injetada pelo D-STATCOM.



Fonte: Autoria própria (2017).

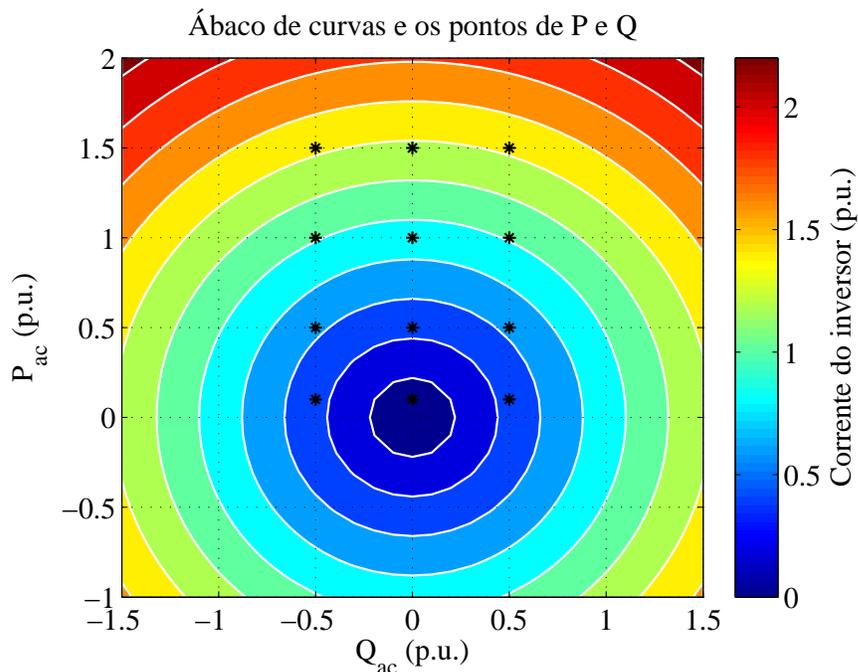
Os valores de potências ativas e reativas capacitivas configuradas e injetadas são apresentados graficamente através da Figura 23. Pelas análises das curvas de potência desenvolvidas, pode-se observar que a limitação de corrente interfere diretamente nas injeções de potências ativa e reativa capacitiva.

4.3.2 Confirmação das curvas de potência em função da corrente

A operação do D-STATCOM sob o parâmetro de V_{minpu} permitiu observar o comportamento das curvas de potência ativa e reativa capacitivas configuradas e injetadas, bem como a obtenção da máxima corrente de operação do D-STATCOM.

Para confirmar a modelagem do D-STATCOM através da ferramenta *Generator* utilizou-se da comparação dos valores de corrente obtidos pelas equações de V_{minpu} com os valores de correntes presentes no ábaco de curvas de capacidade de potência da Figura 24.

Figura 24. Pontos presentes no ábaco das curvas de potência.



Fonte: Autoria própria (2017).

Cada ponto presente na Figura 24 remete a um valor de potência ativa e reativa, que respectivamente se referem a um valor específico de amplitude de corrente p.u. de operação do D-STATCOM.

Assim, conforme os valores de correntes presentes na Tabela 6, pode-se perceber que ambas são semelhantes, confirmando o modelo de operação do D-STATCOM em função da sua corrente de operação. A última coluna remete ao valor da corrente em amplitude considerando uma potência aparente base de 10 kVA e tensão de 0,22 kV, assim para obter o mesmo valor de corrente do ábaco, basta dividir a corrente de operação pela base. A comparação dos resultados é demonstrada na Tabela 6, onde são apresentados os 12 pontos analisados no ábaco.

Tabela 6. Comparação dos valores de corrente.

Caso	P_{ac} (p.u.)	Q_{ac} (p.u.)	$I_{\text{ábaco}}$ (p.u.)	$I_{\text{operação}}$
1	0,10	-0,50	0,4635	21,0700
2	0,50	-0,50	0,6428	29,2190
3	1,00	-0,50	1,0164	46,2000
4	1,50	-0,50	1,4374	65,3360
5	0,10	0,00	0,0909	4,1322
6	0,50	0,00	0,4545	20,6610
7	1,00	0,00	0,9090	41,3220
8	1,50	0,00	1,3636	61,9830
9	0,10	+0,50	0,4635	21,0700
10	0,50	+0,50	0,6428	29,2190
11	1,00	+0,50	1,0164	46,2000
12	1,50	+0,50	1,4374	65,3360

Fonte: Aatoria própria (2017).

Os resultados encontrados através da operação do D-STATCOM para diferentes valores de potência ativas e reativas, demonstram que dependendo do tipo de injeção de potência, os níveis de tensão para PAC são elevados a valores que pertencem a faixa ideal de operação independente do tipo de carga.

Por meio do parâmetro V_{minpu} é possível realizar a operação com limitação de corrente do D-STATCOM, onde os valores de injeção de potência ativa e reativa passam a ser limitados.

O ábaco das curvas de capacidade de potência em função da corrente de operação proporcionam uma análise prévia do comportamento do compensador no PAC, possibilitando a aplicação deste ábaco a qualquer sistema de forma genérica.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a simulação de um D-STATCOM operando em uma rede de distribuição modelo com 6 barras, propondo a análise dos níveis de tensão em função da injeção de potências ativas e reativas, bem como sua operação limitada de corrente em função das curvas de capacidade de potência.

As primeiras simulações demonstraram que a utilização do D-STATCOM para a melhoria dos níveis de tensão apresenta larga vantagem se o processamento de potência ativa e reativa capacitiva for aplicado aos pontos específicos de acoplamento comum entre a carga e a rede, onde os níveis encontraram-se abaixo do mínimo estabelecido pelas normas. Para as barras mais próximas do ponto de acoplamento, pode-se observar uma leve contribuição para a melhoria dos níveis de tensão. Com relação ao processamento de potência reativa indutiva, em todos os pontos, o nível de tensão foi reduzido a valores críticos entre 0,70 e 0,90 p.u. de tensão.

Pode-se observar também que através da operação limitada, as curvas de potência também são modificadas, passando a reduzir a capacidade de injeção de potências pelo D-STATCOM. Sendo que os valores da corrente limitada, obtidas nos resultados de simulação, foram semelhantes ao ábaco das curvas de capacidade de potência, validando a operação do conversor. Assim, o correto projeto do inversor é essencial para que o mesmo possa atender os requisitos de regulação de tensão.

Os limites de operação do conversor foram analisados em regime permanente, pois os limites em regime transitório são garantidos pelo sistema de controle, que apresenta rápida velocidade de resposta quando comparado à dinâmica do sistema elétrico de potência.

A construção do ábaco de correntes em p.u. do D-STATCOM permite sua aplicação a qualquer rede, possibilitando a análise da operação do compensador em função da injeção de potência ativa e reativa.

Para trabalhos futuros são indicadas a inclusão da análise de curvas de carga por meio da ferramenta *loadshape*, verificando a influência das distorções harmônicas e a possibilidade de substituição das equações básicas por equações da eletrônica de potência.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, de 01 de janeiro de 2010.
- [2] DECKMAN, S. M.; POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade de Energia**. Universidade Estadual de Campinas. 2016. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdffiles/qualidade/a1.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2016.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução nº 505, de 26 de novembro de 2001. Conformidade dos níveis de tensão em regime permanente nos sistemas de energia elétrica**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 03 out. 2016.
- [4] DA ROSA, D. L.; SIMAS, H.; TEIVE, R. C. G. **Ajuste de tap de transformadores para controle de tensão de subestações de energia elétrica usando controlador fuzzy**. Disponível em: <http://www.sba.org.br/rsv/SBAI/SBAI2007/docs/31022_1.pdf>. Acesso em: 10 out. 2016.
- [5] SCHUCH, L. et al. **Comutador eletrônico de taps aplicado a um transformador de distribuição monofásico**. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/anais/sbse2012/PDFS/ARTIGOS/96769.PDF>>. Acesso em: 10 out. 2016.
- [6] PADILHA, L. N. **Análise Comparativa de Estratégias para Regulação de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica na Presença de Geradores Distribuídos**. Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 2010.
- [7] FELBER, L. A. **Regulação de Tensão em Subestações de Distribuição de Energia Elétrica**. Universidade Federal de Itajubá, Dissertação de Mestrado, 2010.
- [8] BARBI, I. **Eletrônica de Potência**, Florianópolis: Editora da UFSC, 2000.
- [9] CAVALIERE, C. A. C. **Análise de STATCOM Operando em Sistemas Desbalanceados**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 2001.
- [10] SILVA, D. D. **Modelagem de Equipamentos FACTS de Segunda Geração no Problema de Fluxo de Potência Ótimo**. Universidade Federal de Santa Catarina, Dissertação de Mestrado, 2008.
- [11] GYUGYI, L. **Converter-Based FACTS Technology: Electric Power Transmission in 21st Century**, Proceedings of IPEC 2000, Vol. 1, pp. 15-26, Tokyo, 2000.
- [12] HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. **Understanding FACTS**. IEEE Press. 2000.
- [13] MACHADO, R. L. **Aplicação de Equipamentos FACTS no Sistema de Transmissão da Eletrosul**. Universidade Federal de Santa Catarina, Dissertação de Mestrado, 2003.

- [14] ALMEIDA, K. C.; SILVEIRA, A. S. **Relatório 1: Levantamento do Uso de Equipamentos FACTS**. Projeto ONS-UFSC GAT-CT-177/06: Aplicação de Dispositivos FACTS para Ampliação da Capacidade de Transmissão do SIN. 2006.
- [15] ENDERLE, T. P. **Análise, Projeto e Implementação de um D-STATCOM para Redes de Distribuição Monofásica**. Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado, 2013.
- [16] ENCARNAÇÃO, L. F. **Compensador Síncrono Estático Multinível em Média Tensão para Sistemas de Distribuição**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 2009.
- [17] BADAVATH, D.; SASTRY, S. **Design and Analysis of Multi Level D-STATCOM to Improve the Power Quality**. IEEE Xplore. 2014.
- [18] MURUGESAN, K.; MUTHU, R. **Modeling and Simulation of D-STATCOM for Voltage Regulations**. IEEE Xplore. 2011.
- [19] GRIGOLETTO, F. B. **Análise, Projeto e Implementação de um Arranjo Flexível de Conversores Estáticos para Sistemas de Conversão de Energia Eólica Conectados à Rede**. Universidade Federal de Santa Maria, Tese de Doutorado, 2013.
- [20] DE FREITAS, P. R. R. **Modelos Avançados de Análise de Redes Elétricas Inteligentes Utilizando o Software OpenDSS**. Universidade de São Paulo, Graduação em Engenharia Elétrica, 2015.