

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

RAFAEL DA SILVA TELES

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE D-STATCOM PARA A
REGULAÇÃO DE TENSÃO EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

RAFAEL DA SILVA TELES

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE D-STATCOM
PARA A REGULAÇÃO DE TENSÃO EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO
RURAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica – COELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Cardoso

PATO BRANCO

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE D-STATCOM PARA A REGULAÇÃO DE TENSÃO EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS**, do aluno **Rafael da Silva Teles** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **139** de 2017.

Fizeram parte da banca os professores:

Prof. Dr. Rafael Cardoso

Prof. Dr. Jean Patric da Costa

Prof. Dr. Ricardo Vasques de Oliveira

A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

A memória de minha avó Elíxia Damásio Teles.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Dr. Rafael Cardoso pela orientação nesse trabalho de conclusão de curso, pelo compartilhamento de conhecimentos e incentivo à pesquisa.

Aos demais professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Pato Branco, em especial aos professores da Coordenação do curso de Engenharia Elétrica que também contribuíram imensamente na construção de meu conhecimento técnico e científico, permitindo-me assim evoluir.

E por fim, agradeço aos colegas de curso pela amizade que partilharam nesse espaço de tempo.

“A engenharia não é apenas uma profissão aprendida, ela também é uma profissão de aprendizagem, na qual os praticantes iniciam-se estudantes e nessa condição permanecem ao longo de suas carreiras” William L. Everitt.

RESUMO

TELES, Rafael da S. Estudo de Viabilidade Técnica do Uso de D-Statcom para Regulação de Tensão em Linhas de Distribuição Rurais. 2017. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

Este trabalho apresenta um estudo de viabilidade técnica do uso do compensador estático de reativos D-Statcom em redes de distribuição rurais. Para se atingir esse objetivo são apresentados conceitos básicos acerca dos parâmetros e potências nos sistemas elétricos, bem como são utilizados modelos matemáticos para analisar o comportamento da tensão frente às variações paramétricas de cargas e rede de distribuição. Apresenta-se também, modelagens e análises com a inserção do compensador de reativos no sistema elétrico em estudo, principalmente para avaliar as capacidades e limitações do dispositivo, bem como as partes principais que o compõem. Com a finalidade de realizar o controle do nível de tensão, malhas de controle são projetadas a partir da obtenção das plantas, cita-se que o controlador proporcional ressonante é projetado para malha em corrente alternada e o controle proporcional integral para malha em corrente contínua. Finalmente, são realizadas simulações para avaliar os projetos executados, e também para atestar a viabilidade da compensação de reativos em linhas de distribuição.

Palavras-chave: D-Statcom. Conversores Estáticos. Filtro LC. Modulação SPWM. Retroação de Estados. Controle Proporcional Ressonante Discreto. Controle Proporcional Integral Discreto.

ABSTRACT

This work presents a technical feasibility study of the use of the D-Statcom compensators in low voltage rural distribution networks. In order to reach this objective, basic concepts about the parameters and powers in the electric systems are presented, as well as mathematical models to analyze the behavior of the voltage due to parametric variations of loads and distribution network. It also presents modeling and analysis with the insertion of the compensator in the electrical system under study, mainly to evaluate the capacities and limitations of the device, as well as the main parts that compose it. In order to control the voltage level, control loops are designed from the plants, it is mentioned that the resonant proportional controller is designed for alternating current loops and the integral proportional control for continuous current loop. Finally, simulations are performed to evaluate the design, as well as to certify the viability of reactive compensation in distribution lines.

Keywords: D-Statcom. Static Converters. LC filter. SPWM modulation. Feedback states. Discrete Resonating Proportional Control. Discrete Integral Proportional Control.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Impedância entre as barras de geração e recepção.	19
Figura 2: Circuito por fase de uma linha curta.....	22
Figura 3: Potência ativa e reativa em uma linha sem perdas.....	24
Figura 4: Compensador paralelo ideal.	24
Figura 5: Representações fasoriais de tensões e correntes.....	25
Figura 6: Sistema elétrico rural.....	28
Figura 7: Circuito para análise da variação de tensão no PAC.	28
Figura 8: Variação da tensão no PAC em função do módulo da potência aparente e fator de potência da carga ($V_r = 1$ p.u).	30
Figura 9: Variação da tensão no PAC em função do módulo da potência aparente e fator de potência da carga ($V_r = 1,03$ p.u).	31
Figura 10: Variação da tensão no PAC em função do módulo da potência aparente e fator de potência da carga ($V_r = 0,93$ p.u).	31
Figura 11: Sistema elétrico com o regulador de tensão baseado no D-Statcom.....	33
Figura 12: Variação do ângulo da tensão no PAC em função do módulo da potência aparente e fator de potência da carga ($V_{pac} = 1$ p.u; $V_r = 1$ p.u).	37
Figura 13: Variação da potência reativa do inversor em função do módulo da tensão no PAC para uma carga resistiva nominal ($V_r = 1$ p.u; $S_0 = 1$ p.u; $FP_0 = 1$).....	39
Figura 14: Variação da potência reativa do inversor em função do módulo da tensão no PAC para cargas indutivas nominais ($V_r = 1$ p.u; $S_0 = 1$ p.u).	39
Figura 15: Variação da potência reativa do inversor em função do módulo da tensão no PAC para cargas capacitivas nominais ($V_r = 1$ p.u; $S_0 = 1$ p.u). ..	40
Figura 16: Inversor monofásico de tensão em ponte completa.	42
Figura 17: Modulação SPWM bipolar.....	43
Figura 18: Modulação SWPM unipolar.....	43
Figura 19: Primeira etapa de operação.	45
Figura 20: Segunda etapa de operação.	46
Figura 21: Terceira etapa de operação.	46
Figura 22: Tensão V_{ab} entre os braços do conversor e acionamentos dos interruptores.	47

Figura 23: Circuito para modelagem do sistema CA.	49
Figura 24: Circuito equivalente do sistema CA.	50
Figura 25: Circuito simplificado para análise do sistema CC.	52
Figura 26: Comparação entre planta amortecida e não amortecida.	59
Figura 27: Comparação entre planta contínua e discreta.	62
Figura 28: Resposta em frequência do controlador com a planta do sistema CA.	63
Figura 29: Diagrama de blocos simplificado do sistema de controle CA.	63
Figura 30: Comportamento da tensão no PAC e corrente na rede para desregulação de 8% com carga resistiva de 1 p.u (D-Statcom sendo acionado após primeiro ciclo de onda).	64
Figura 31: Comportamento da corrente no filtro, corrente na rede e tensão no PAC para desregulação de 8% com carga resistiva de 1 p.u (D-Statcom sendo acionado após primeiro ciclo da tensão).	65
Figura 32: Potência ativa e reativa no sistema para desregulação de tensão no PAC de 8% (D-Statcom sendo acionado em 1,6ms).	66
Figura 33: Comparação entre planta CC contínua e discreta.	67
Figura 34: Resposta em frequência do controlador PI em cascata com filtro rejeita faixa e planta CC.	68
Figura 35: Diagrama de blocos simplificado do sistema de controle CC.	69
Figura 36: Comportamento da tensão no capacitor CC e ângulo de defasagem δ após a conexão de uma carga resistiva de 1 p.u e desregulação de 8% da tensão no PAC.	70
Figura 37: Tensão V_{ab} entre os braços do conversor para modulação SPWM.	81
Figura 38: Curva de ondulação de corrente em ampères.	83
Figura 39: Corrente e tensão no capacitor.	84
Figura 40: Curva de ondulação de tensão em volts.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos níveis de tensões nominais iguais ou inferiores a 1 kV	14
Tabela 2: Comprimento máximo e níveis de tensão para linhas curtas	22
Tabela 3: Parâmetros das linhas de distribuição rural.....	27
Tabela 4: Valores base para parametrização por unidade (p.u).....	29
Tabela 5: Dados da impedância de rede Z_r em p.u	30
Tabela 6: Parâmetros para simulação dos sistemas	56
Tabela 7: Polos e zeros para projeto da matriz de ganhos k	58
Tabela 8: Matriz de ganhos k	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO GERAL	16
1.1.1	Objetivos Específicos	16
1.2	IMPORTÂNCIA DO TRABALHO	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	CONCEITOS BÁSICOS	19
2.1	POTÊNCIA ATIVA, REATIVA E APARENTE	19
2.2	REDES DE DISTRIBUIÇÃO	21
2.3	COMPENSADOR PARALELO IDEAL	24
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	26
3	COMPORTAMENTO DA TENSÃO NO PONTO DE ACOPLAMENTO COMUM	27
3.1	VARIAÇÃO DE TENSÃO NO PAC	27
3.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
4	EQUACIONAMENTOS E ANÁLISES DO REGULADOR DE TENSÃO	33
4.1	EQUACIONAMENTO DAS CORRENTES	33
4.2	EQUACIONAMENTO DA POTÊNCIA DA REDE	34
4.3	EQUACIONAMENTO DA POTÊNCIA DA CARGA	35
4.4	EQUACIONAMENTO DA POTÊNCIA NA IMPEDÂNCIA DA LINHA	35
4.5	EQUACIONAMENTO E ANÁLISE DO ÂNGULO DE DEFASAGEM DA TENSÃO NO PAC	36
4.6	EQUACIONAMENTO E ANÁLISE DA POTÊNCIA REATIVA DO COMPENSADOR	37
4.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
5	COMPOSIÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO	41
5.1	INVERSOR MONOFÁSICO DE TENSÃO EM PONTE COMPLETA	41
5.2	ESTRATÉGIA DE MODULAÇÃO	42
5.3	ETAPAS DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR EM PONTE COMPLETA PARA MODULAÇÃO SPWM	44
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
6	SISTEMAS DE CONTROLE DO REGULADOR DE TENSÃO	48
6.1	MODELAGEM DO SISTEMA EM CORRENTE ALTERNADA	48
6.1.1	Modulador por Largura de Pulso	49

6.1.2	Inversor de Tensão em Ponte Completa	49
6.1.3	Filtro LC e Rede de Distribuição	50
6.2	MODELAGEM DO SISTEMA EM CORRENTE CONTÍNUA.....	51
6.3	PROJETO DOS CONTROLADORES	55
6.3.1	Controle por Realimentação de Estados	56
6.3.2	Estratégias de Controle	59
6.3.3	Projeto do Controlador de Tensão CA.....	61
6.3.3.1	Validação do Projeto de Controle da Malha CA	63
6.3.4	Projeto do Controlador de Tensão CC.....	66
6.3.4.1	Validação do Projeto de Controle da Malha CC.....	68
6.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
7	CONCLUSÕES	72
	REFERÊNCIAS.....	74
	ANEXOS	81
	Anexo A - Projeto do Filtro LC para Modulação SPWM Unipolar.....	81
	Projeto do Valor de Indutância.....	81
	Projeto do Valor de Capacitância	83

1 INTRODUÇÃO

O setor de energia elétrica brasileiro é composto pelos segmentos de produção, transmissão, distribuição e comercialização, sendo esses regulados e fiscalizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) (BRASIL, 1996). Tendo como foco o sistema de distribuição, um dos objetivos principais da Aneel é: “normatizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica” (ANEEL, 2015a). Nesse sentido, a Aneel publicou em dezembro de 2008, os Procedimentos de Distribuição (Prodist), que são compostos de seis módulos técnicos reguladores e dois integradores. Em especial o módulo oito do Prodist, referente à qualidade da energia elétrica (QEE), impõe as organizações do setor as diretrizes de qualidade do produto e qualidade dos serviços prestados. Assim, para qualidade do produto, o módulo oito “define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão”, possibilitando assim a padronização de indicadores de QEE. E para a qualidade dos serviços prestados, este módulo estabelece “a metodologia para apurações dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades” (ANEEL, 2015b).

Dentro da seção de qualidade de produto, cita-se o subitem referente a tensão em regime permanente, onde indica que a distribuidora de energia deve acompanhar a tensão no sistema de distribuição, e possuir “recursos e técnicas modernas para tal acompanhamento, atuando de forma preventiva para que a tensão em regime se mantenha dentro dos padrões adequados” (ANEEL, 2015b). Os níveis de tensão são classificados dependendo da tensão nominal (TN) de atendimento, em nível adequado, precário ou crítico. A Tabela 1 mostra essa classificação para os atendimentos nominais iguais ou inferiores a 1 kV, com sua faixa de variação de tensão de leitura (TL) em relação à tensão nominal.

Tabela 1: Classificação dos níveis de tensões nominais iguais ou inferiores a 1 kV

Tensão de Atendimento	Faixa de variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão Nominal (TN)
Adequada	$0,92TN \leq TL \leq 1,05TN$
Precária	$0,87TN \leq TL < 0,92TN$ ou $1,05TN < TL \leq 1,06TN$
Crítica	$TL < 0,87TN$ ou $TL > 1,06TN$

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2015b).

Portanto, se os níveis de tensão aferidos no sistema de distribuição estiverem em níveis precários ou críticos, a distribuidora tem a responsabilidade de regularizar a situação dentro dos prazos estabelecidos pela Aneel, ou ainda se a situação não for corrigida, a distribuidora é penalizada a compensar os prejuízos causados (ANEEL, 2015b).

As estratégias comumente utilizadas para manter os níveis de tensão são “comutadores automáticos dos *taps* em transformadores localizados na subestação da concessionária, transformadores reguladores de tensão inseridos nos alimentadores e instalação de banco de capacitores e indutores para provimento de potência reativa” (PADILHA, 2010). Esses dispositivos de compensação são excelentes, sendo largamente utilizados nos sistemas de potência, devido principalmente a confiabilidade, custo-benefício e robustez, porém, possuem níveis de regulação discretos de tensão e tempos de resposta de algumas dezenas de segundos, não sendo adequados a variações de tensão de curta duração.

Para consumidores distantes dos reguladores, como é o caso de cargas nas zonas rurais, ligadas por linhas de distribuição monofásicas, o regulador pode não ter a efetividade esperada (ENDERLE, 2012), (PADILHA, 2010). Tendo em vista a problemática da manutenção da qualidade no nível de tensão em linhas monofásicas de distribuição rurais, o presente trabalho de conclusão de curso, concentra-se no estudo da viabilidade técnica do uso de um dispositivo com maior flexibilidade, capaz de efetuar a regulação de tensão com maior efetividade, denominado D-Statcom (*Distribution Static Synchronous Compensator*). Esse dispositivo faz parte da família Facts (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*), que são equipamentos baseados em conversores eletrônicos de potência estáticos de alta capacidade, com rápida resposta dinâmica e efetuam o controle das variáveis de um sistema elétrico (MADHUSUDAN; RAMAMOCHAN RAO, 2012). Conceitualmente o termo viabilidade técnica pode compreender muitos aspectos, desde as ferramentas disponíveis para análise física e matemática do problema até a implementação do dispositivo, em especial ao uso do D-Statcom em uma linha de distribuição rural, o trabalho estará focado em análises básicas desse sistema, com elementos ideais a fim de facilitar a compreensão com intenção de apresentar e analisar a quantidade de potência reativa processada pelo D-Statcom frente a desregulação do nível de tensão.

O D-Statcom é um compensador de reativos *shunt* que controla a corrente de saída em adianto ou atraso em relação a tensão da rede (HINGORANI, 2007). O equipamento é composto basicamente pelo sistema de controle, um inversor PWM (*Pulse Width Modulation*) que controla a amplitude e a fase do sinal de saída, alimentado por capacitores que atuam como uma fonte de corrente contínua, além de um filtro passivo na saída para atenuar componentes harmônicas indesejáveis. Destaca-se que o D-Statcom pode operar de duas formas distintas para compensação reativa, como uma fonte de corrente controlada, efetuando o

controle indireto de tensão, ou como fonte de tensão controlada, realizando o controle direto de tensão no barramento. Ambos os tipos de controles possuem ótima resposta dinâmica na regulação de tensão e fator de potência, contudo, possuem algumas diferenças (SINGH, *et al.*, 2009).

Comparativamente o controle do tipo fonte de tensão é um pouco mais oscilatório, com resposta mais lenta que o controle do tipo fonte de corrente, entretanto, quando há presença de harmônicos oriundos das cargas, o controle do tipo fonte de tensão apresenta sua maior vantagem, pois o controle por tensão atua como um filtro, drenando as correntes harmônicas e reduzindo as distorções na onda de tensão (CAMPINHOS, 2009).

É importante mencionar que o estudo se baseia em partes no trabalho de (ENDERLE, 2012) que mostra a implementação real de um D-Statcom para uma linha de distribuição rural.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é o estudo de viabilidade técnica e simulação de um regulador com controle direto de tensão por reativos, baseado no D-Statcom, aplicado a uma rede de distribuição monofásica de baixa tensão.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para se atingir o objetivo geral descrito acima, os seguintes objetivos específicos serão abordados:

- Analisar o compensador paralelo ideal;
- Apresentar um sistema de distribuição rural.
- Apresentar a estrutura do regulador de tensão;
- Modelar matematicamente as plantas;
- Aplicar técnicas de controle;
- Simular os sistemas projetados;
- Avaliar os resultados obtidos.

1.2 IMPORTÂNCIA DO TRABALHO

O trabalho se destaca pelo estudo de viabilidade técnica do regulador de tensão com a finalidade de compensação em uma linha de distribuição rural, além da utilização do controle direto de tensão que se apresenta como menos usual na literatura.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado em 7 capítulos, iniciando efetivamente pelo capítulo 2 onde são apresentados os conhecimentos prévios dos elementos principais dos sistemas de potência, que são inerentes à compreensão do compensador de reativos baseado no D-Statcom, como a conceituação das potências ativa, reativa e aparente, a apresentação de uma linha de distribuição curta e o compensador paralelo ideal.

No capítulo 3, é apresentado o sistema de distribuição rural em estudo com seus principais componentes, como a linha de distribuição rural curta e seus parâmetros de resistência e reatância em função do comprimento. São realizadas análises quanto à variação da tensão no ponto de acoplamento comum (PAC) em função da potência e fator de potência de uma carga e também em função da tensão no início da rede rural.

É realizado no capítulo 4 os equacionamentos e análises do regulador de tensão ligado ao barramento do PAC, para verificar matematicamente o comportamento do ângulo de defasagem no PAC e a quantidade de potência reativa processada pelo compensador em função da variação de tensão no PAC para cargas resistivas, indutivas e capacitivas.

No capítulo 5 são apresentadas as partes básicas do regulador de tensão baseado no D-Statcom, como a topologia adotada do inversor monofásico em ponte completa, o filtro passivo de saída e a comparação entre estratégias de modulação bem como suas etapas de operação.

No capítulo 6 são realizadas as modelagens matemáticas dos sistemas em corrente alternada (CA) e em corrente contínua (CC), necessárias ao dimensionamento e projeto dos controladores. O controlador Proporcional Ressonante é projetado para o controle do nível de tensão no PAC, ao passo que o controlador Proporcional Integral (PI) é projetado para manter constante o nível de tensão no barramento CC. E para avaliar o desempenho dos sistemas projetados,

simulações computacionais através da ferramenta Simulink matlab são apresentadas.

Ao final, no capítulo 7 é realizada a conclusão final do trabalho, avaliando a viabilidade técnica do uso de D-Statcom para regulação de tensão em linhas de distribuição rurais.

2 CONCEITOS BÁSICOS

Os sistemas elétricos de potência possuem a propriedade de transferir grandes quantidades de energia desde o ponto de geração até o ponto de consumo, e devem satisfazer critérios de capacidade, qualidade, confiabilidade e economia. Um dos fatores principais para satisfazer esses critérios é o controle da energia reativa no sistema de potência, estando essa adequada à demanda das cargas para que não ocorram violações dos níveis de tensão (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007). Nesse sentido, essa seção aborda através do fluxo de potência entre duas barras a caracterização básica das potências ativa, reativa e aparente. No segundo tópico são apresentados alguns conceitos em relação às redes de distribuição, juntamente com modelo de uma linha curta, para expressar os parâmetros presentes nesse elemento. Ao final é mostrado através do compensador paralelo ideal, como é possível realizar o controle dos níveis de tensão por compensação de reativos.

2.1 POTÊNCIA ATIVA, REATIVA E APARENTE

Considere o diagrama simplificado de uma impedância, ilustrado na Figura 1, conectada entre as barras de geração e recepção, submetidas a uma tensão e corrente expressas por (1) e (2), respectivamente

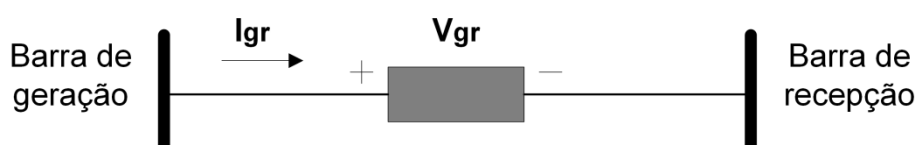


Figura 1: Impedância entre as barras de geração e recepção.

$$v_{gr} = V_{\max} \cos(\omega t), \quad (1)$$

$$i_{gr} = I_{\max} \cos(\omega t - \theta). \quad (2)$$

A potência instantânea é dada pelo produto entre (1) e (2), conforme equação (3)

$$p = v_{gr} i_{gr} = V_{\max} I_{\max} \cos(\omega t) \cos(\omega t - \theta). \quad (3)$$

A fase na equação da corrente acima se torna positiva quando a onda de corrente está atrasada da onda de tensão, e negativa quando a onda de corrente está adiantada. Para um valor de potência instantânea positiva, significa que há um fluxo de energia no tempo sendo consumida entre as barras de geração e recepção. Quando o ângulo de fase é igual a zero, ou seja, a onda de corrente está em fase com a onda de tensão, a potência instantânea sempre será positiva, que é caso para uma carga estritamente resistiva, entretanto, para uma defasagem de 90° , que é o caso de uma carga estritamente indutiva ou capacitiva, a equação da potência instantânea terá semiciclos alternados positivos e negativos com um valor médio igual a zero.

Utilizando-se de identidades trigonométricas a equação (3) pode ser reescrita como:

$$p = \frac{V_{\max}I_{\max}}{2} \cos \theta (1 + \cos 2\omega t) + \frac{V_{\max}I_{\max}}{2} \operatorname{sen}\theta \operatorname{sen}(2\omega t), \quad (4)$$

onde $(V_{\max}I_{\max})/2$ pode ser reescrito como o módulo da tensão e da corrente eficazes $|V||I|$.

O primeiro termo da equação (4) é sempre positivo, possui um valor constante e uma parcela que oscila com o dobro da frequência angular do sistema de valor médio nulo. Esse termo da potência instantânea é expresso na equação (5), que apresenta seu valor médio, e é conhecida como a potência ativa que flui em um sistema elétrico. A unidade de medida para potência ativa e instantânea é o Watt (W)

$$P = |V||I| \cos \theta. \quad (5)$$

O segundo termo da equação (4) possui somente um termo oscilante de valor médio igual a zero. Esse termo é chamado de potência reativa instantânea e representa fisicamente o fluxo de energia em direção a carga e para fora dela. A equação (6) apresenta o valor de pico dessa parcela oscilante, sua unidade é o Volt-Ampère Reativo (Var) (STEVENSON, 1986)

$$Q = |V||I| \operatorname{sen}\theta. \quad (6)$$

Para (AKAGI; KANAZAWA; NABAE, 1983), essa parcela de potência é reconhecida como aquela que não realiza trabalho e também a energia trocada

entre as fases sem contribuição para o fluxo ativo de energia entre as barras de geração e de carga. A potência reativa desempenha um papel significativo em sistemas de potência, existem estudos bem estabelecidos na literatura que a indicam como requisito básico para manutenção da estabilidade de tensão e segurança de operação nesses sistemas (QIN, *et al.*, 2011).

Conhecendo as variáveis fasoriais de tensão e corrente em um sistema é possível se obter as componentes de potência ativa e reativa, assim pode-se expressar uma terceira grandeza, denominada de potência aparente ou complexa, mostrada na forma retangular pela equação (7)

$$S = P + jQ = |V||I| \cos \theta + j|V||I| \sin \theta. \quad (7)$$

O cosseno do ângulo de fase θ entre a onda de tensão e a onda de corrente é denominado de fator de potência. É a proporção de potência ativa consumida por uma carga da potência aparente. O termo fator de potência sempre deve ser acompanhado de uma segunda designação, em adianto ou atraso.

Para (STEVENSON, 1986, p. 17), “um circuito indutivo tem um fator de potência em atraso e um circuito capacitivo tem um fator de potência adiantado, isso indica, respectivamente, que a corrente está em atraso ou adiantada à tensão aplicada”.

2.2 REDES DE DISTRIBUIÇÃO

As redes de distribuição são compostas por linhas de alta, média a baixa tensão, sendo responsáveis pelo transporte de energia até os consumidores finais, contudo, por possuírem comprimentos variados apresentam modelos matemáticos distintos, para linhas curtas adotam-se os modelos de impedâncias série, para linhas médias é usual os modelos π ou T, e para linhas longas as representações são mais complexas, porém, podem-se aproxima-las pelo modelo π das linhas médias com fatores de correção para as impedâncias e admitâncias (KINDERMANN, 1997), (ABRADEE, 2017).

Em (KUNDUR, 1994) e (STEVENSON, 1986), é mostrado que as linhas podem ser caracterizadas por quatro parâmetros que modelam matematicamente seu comportamento nos sistemas de potência. O primeiro termo é a resistência série R devido à resistividade do condutor, o segundo é a condutância *shunt* B entre os condutores ou entre condutor e terra, que representa as perdas devido às correntes de fuga nos isoladores, salienta-se que a condutância assume valores pequenos em

sistemas de potência e é comumente desprezada. O terceiro parâmetro é a indutância série L , que dependente da tensão induzida por variação de fluxo com a taxa de variação da corrente, a indutância série e a resistência série distribuídas uniformemente compõem a impedância série. O quarto parâmetro é a capacitância *shunt* C , determinada como a carga armazenada em um condutor pela diferença de potencial entre os mesmos.

O comprimento e o nível de tensão caracterizam os tipos de linhas, em especial para uma linha curta, que é o modelo adotado nesse trabalho, a Tabela 2 mostra o comprimento máximo em função do nível de tensão da linha (KINDERMANN, 1997).

Tensão de linha V_L	Comprimento máximo (km)
$V_L < 150 \text{ kV}$	80
$150 \text{ kV} \leq V_L < 400 \text{ kV}$	40
$V_L \geq 400 \text{ kV}$	20

Fonte: Adaptado de (KINDERMANN, 1997).

Na Figura 2, é apresentado o circuito por fase de uma linha curta que é representado pelo modelo de impedâncias série. É importante mencionar que as redes de distribuição rurais são caracterizadas por linhas curtas de média e baixa tensão, linhas de média tensão são aquelas com tensões entre 2,3 e 44 kV, e as linhas de baixa tensão possuem níveis que variam entre 110 e 440 V (ABRADEE, 2017).

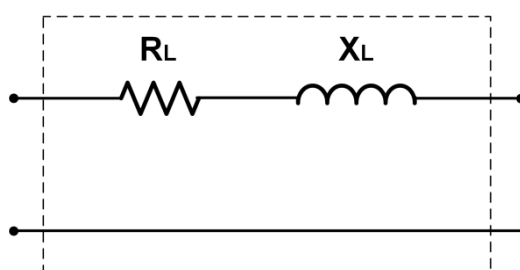


Figura 2: Circuito por fase de uma linha curta.

No modelo de linha apresentado na Figura 2, a componente resistiva não é desprezada por possuir valor significativo no modelo, porém, para um melhor entendimento do compensador paralelo ideal, que é apresentado no próximo tópico, considere uma linha ideal sem perdas ligada entre duas barras, analogamente ao circuito apresentado na Figura 1, onde a impedância é representada por uma

reatância indutivas X_L , a tensão na barra de geração por V_g , a tensão na barra de recepção por V_r e a diferença angular entre as tensões nas barras por δ . Dessa maneira pode-se escrever a equação (8) que representa a potência aparente na barra de geração, e de maneira simplificada em (9) e (10) a potência ativa e reativa

$$\vec{S}_g = \frac{V_g V_r \text{sen} \delta}{X_L} + j \frac{V_g^2 - V_g V_r \text{cos} \delta}{X_L}, \quad (8)$$

$$P_g = \frac{V_g V_r \text{sen} \delta}{X_L}, \quad (9)$$

$$Q_g = \frac{V_g^2 - V_g V_r \text{cos} \delta}{X_L}. \quad (10)$$

A partir das equações de potência ativa e reativa na barra de geração é possível se construir o gráfico da Figura 3, onde mostra o comportamento dessas variáveis em função do ângulo de transmissão, para valores normalizados de 1 p.u para as tensões nas barras de geração e recepção, bem como para a reatância indutiva. Observa-se de forma básica na Figura 3, considerando tensão e impedância constante, a transferência de potência é influenciada somente pelo ângulo de transmissão, com o limite máximo de transferência de potência ativa em $\delta = 90^\circ$ e $\delta = 180^\circ$ para potência reativa (ZHANG; REHTANZ; PAL, 2012).

Outra conclusão importante que se pode chegar através das equações (9) e (10), é que quanto maior a linha de transmissão, maior será sua impedância série e conseqüentemente haverá um limite de potência que poderá ser transmitida na linha em regime (KUNDUR, 1994).

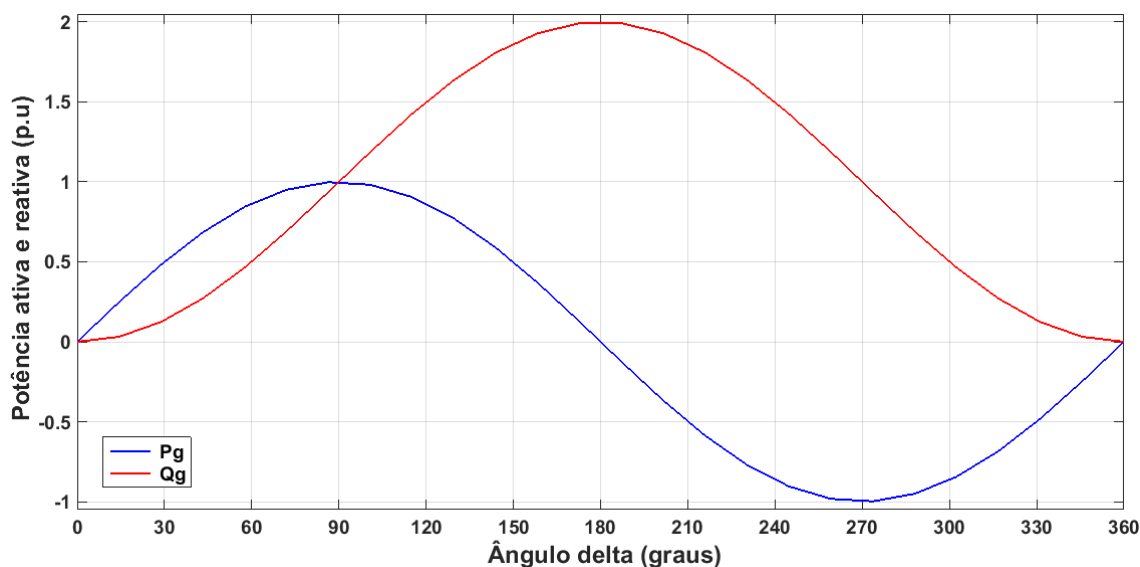


Figura 3: Potência ativa e reativa em uma linha sem perdas.

2.3 COMPENSADOR PARALELO IDEAL

A regulação de tensão por compensação de potência reativa em um sistema elétrico pode ser entendida a partir do compensador paralelo ideal, ilustrado na Figura 4.

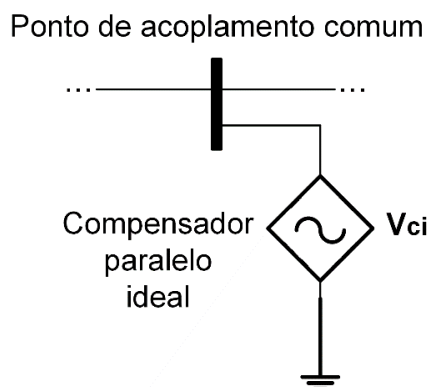


Figura 4: Compensador paralelo ideal.

Note que o compensador ideal é representado por uma fonte de tensão variável e está conectado a um ponto do sistema elétrico de potência. Porém em aplicações práticas os compensadores são geralmente conectados ao ponto médio de linhas de transmissão, que é a localização mais efetiva para interconexão entre sistemas de potência, ou no final de linhas de distribuição em sistemas radiais, onde ocorre as maiores variações de tensão (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

Considere o circuito elétrico da Figura 1, com o compensador paralelo ideal conectado na barra de recepção e interligado à barra de geração por uma linha ideal. Através desse sistema, das equações (9) e (10) para as potências ativa e reativa em função do ângulo de transmissão, juntamente com as representações fasoriais de tensões e correntes na Figura 5, se obtém importantes informações quanto à regulação de tensão por reativos.

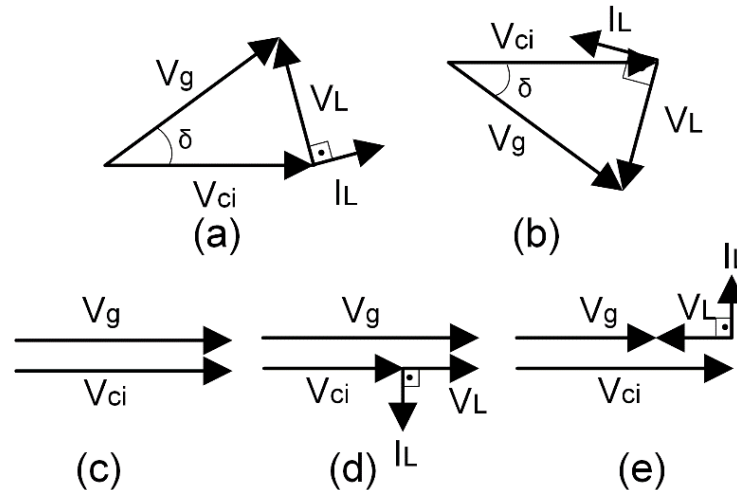


Figura 5: Representações fasoriais de tensões e correntes.

Na Figura 5 (a) o fasor \vec{V}_g , que representa a tensão na barra de geração está adiantado do fasor \vec{V}_{ci} , que representa a tensão na barra onde o compensador ideal está conectado, e para um ângulo de transmissão $0^\circ < \delta < 90^\circ$ há um fluxo de potência ativa em direção à barra do compensador. O fasor \vec{V}_L representa a queda de tensão na impedância da linha.

O item (b) mostra o caso onde o fasor \vec{V}_g está em atraso em relação ao fasor \vec{V}_{ci} e para um ângulo de transmissão $-90^\circ < \delta < 0^\circ$ há um fluxo de potência ativa em direção à barra de geração.

Para a letra (c) o $|\vec{V}_g| = |\vec{V}_{ci}|$ e $\delta = 0^\circ$, ou seja, as tensões com mesmo módulo e em fase, não há nenhuma queda de tensão no circuito, logo não há corrente fluindo e conseqüentemente não há potência sendo transferida.

Para o caso (d), $|\vec{V}_g| > |\vec{V}_{ci}|$ e $\delta = 0^\circ$, não há fluxo de potência ativa entre a barra de geração e o compensador, mas há fluxo de potência reativa indutiva nos terminais do compensador visto pelo sistema elétrico, caracterizada pelo atraso do fasor de corrente da linha. Analogamente, no caso (e) onde $|\vec{V}_g| < |\vec{V}_{ci}|$ e $\delta = 0^\circ$, indica que não há fluxo de potência ativa, entretanto, a corrente da linha está em adianto o que caracteriza a potência reativa capacitiva nos terminais do compensador.

Conclui-se assim, que o compensador paralelo ideal pode assumir duas funções, o de controle do fluxo de potência em um sistema elétrico, bem como a potência reativa no ponto de acoplamento do compensador (CAVALIERE; WATANABE; AREDES, 2002).

Em aplicações práticas o controle da potência reativa é realizado ao se manter o módulo da tensão constante em seu valor nominal nos terminais do D-Statcom e em fase com o sinal de tensão da rede de distribuição, para que não ocorra troca de potência ativa, e quando o sistema é perturbado, a tensão da rede pode oscilar acima do valor nominal de referência, fazendo com que o compensador opere como um banco de indutores com potência reativa indutiva, ou se a tensão oscilar abaixo do valor nominal o compensador atua como um banco de capacitores com potência reativa capacitiva. Salienta-se que uma parcela de potência ativa é consumida pelos componentes internos do conversor e pelo elemento de armazenamento de energia (IEEE POWER & ENERGY SOCIETY, 2011) (GRBOVIC, 2014) (SARADVA, *et al.*, 2016) (PAULRAJ; SHERIN; PRAKASH, 2016).

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo, foram mostrados alguns conhecimentos básicos em relação à potência ativa, reativa e aparente utilizando-se do fluxo de potência entre duas barras. Em relação às redes de distribuição foram abordados conceitos relacionados às linhas curtas, além da apresentação do modelo dessa linha. Ao final, através da análise vetorial entre tensões e correntes foi mostrado o princípio de operação do compensador ideal de reativos, que é peça fundamental nesse trabalho.

3 COMPORTAMENTO DA TENSÃO NO PONTO DE ACOPLAMENTO COMUM

A tensão em uma rede de distribuição deve permanecer dentro de níveis adequados, visto que esse é um dos requisitos impostos pelo Prodlist para preservar o adequado funcionamento dos dispositivos alimentados por esse sistema (ANEEL, 2015b). Em linhas de distribuição rurais, onde os consumidores estão distantes dos dispositivos de regulação usuais, o nível de tensão pode permanecer abaixo ou acima do valor de referência (MAJUMDER, 2013).

Para verificar essa hipótese, é apresentada uma análise normalizada da variação de tensão no ponto de acoplamento comum (PAC) em função da potência e fator de potência de uma carga, e também uma análise da variação de tensão no PAC em função da tensão no início da rede rural.

3.1 VARIAÇÃO DE TENSÃO NO PAC

O sistema elétrico rural em estudo é apresentado na Figura 6, onde se considerou uma linha de distribuição rural monofásica de 10 km de comprimento em 13,8 kV, composta por um cabo CAA AWG 4 com resistência no valor de 1,632 Ω /km e reatância indutiva de 0,3276 Ω /km, e trecho de 100 metros de comprimento em 220 V, composta por um cabo CAA AWG 2 com resistência no valor de 1,065 Ω /km e reatância indutiva de 0,3271 Ω /km, os parâmetros dessas linhas são mostrados na Tabela 3. Ambas as linhas são interligadas por um transformador de 25 kVA com impedância percentual de 2,5% e ao final do circuito é apresentada a carga. Vale lembrar que linhas de distribuição rurais iniciam no ponto final de linhas urbanas, dessa maneira considerou-se a tensão V_r como a tensão nesse ponto de ligação (PRYSMIAN CABLES&SYSTEMS, 2017), (COPEL, 2016).

Tabela 3: Parâmetros das linhas de distribuição rural

Linha em 13,8 kV		Linha em 220 V	
Resistência R_{L1} (Ω)	Reatância X_{L1} (Ω)	Resistência R_{L2} (Ω)	Reatância X_{L2} (Ω)
16,32	3,276	0,1065	0,03271

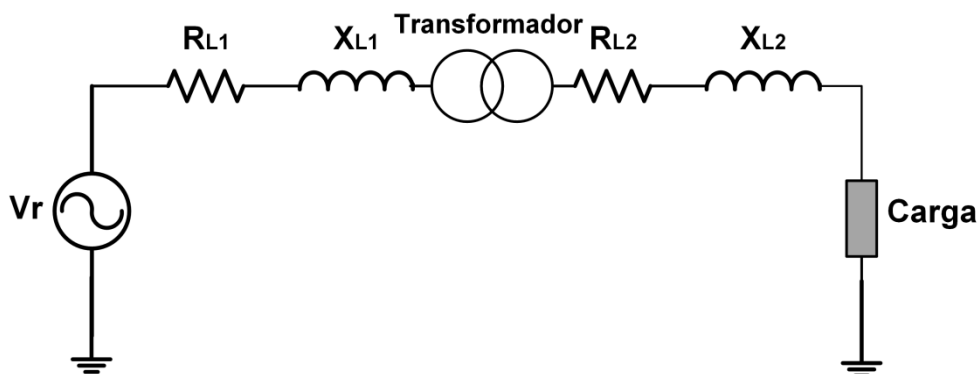


Figura 6: Sistema elétrico rural.

O sistema da Figura 6 pode ser simplificado através da representação por unidade (p.u), resultando no circuito da Figura 7, onde as impedâncias do transformador, das linhas de média e baixa tensão são somadas e representadas somente por uma impedância de rede $\vec{Z}_r = R_r + jX_r$. A fonte de tensão de referência é \vec{V}_r e ao final é apresentado o barramento do PAC onde está conectada a carga de potência $\vec{S}_0 = P_0 + jQ_0$, para que se possa analisar o comportamento da tensão no PAC em função da potência aparente da carga.

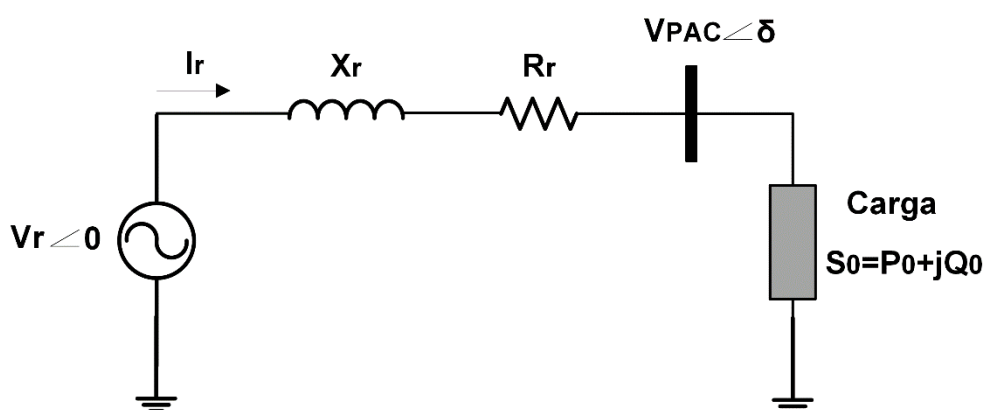


Figura 7 Circuito para análise da variação de tensão no PAC.

O circuito elétrico apresentado na Figura 7 é muito simples. Porém, a determinação da magnitude da tensão \vec{V}_{PAC} em função da potência aparente da carga \vec{S}_0 não é imediata. Analisando o circuito, pode-se vincular a tensão \vec{V}_{PAC} a corrente \vec{I}_r que percorre a linha de distribuição, como mostra a equação (11)

$$\vec{V}_{PAC} = \vec{V}_r - \vec{Z}_r \vec{I}_r, \quad (11)$$

onde $\vec{Z}_r = R_r + jX_r$.

Por outro lado, a corrente da rede \vec{I}_r é função da tensão na barra \vec{V}_{PAC} , pois a potência aparente \vec{S}_0 demandada pela carga é conhecida, então pode-se apresentar essa relação em (12)

$$\vec{I}_r = \left(\frac{\vec{S}_0}{\vec{V}_{PAC}} \right)^* \quad (12)$$

substituindo (12) em (11), se obtém (13)

$$\vec{V}_{PAC} = \vec{V}_r - \vec{Z}_r \left(\frac{\vec{S}_0}{\vec{V}_{PAC}} \right)^* \quad (13)$$

Sabendo-se que $\vec{Z}_r = R_r + jX_r$, $\vec{S}_0 = P_0 + jQ_0$, e efetuando as interações algébricas entre as variáveis complexas, pode-se representar a equação (13) pela equação (14) (KINDERMANN, 1997), (STEVENSON, 1986)

$$V_{PAC}^4 + (2(R_r P_0 + X_r Q_0) - V_r^2) V_{PAC}^2 + (R_r Q_0 + X_r P_0)^2 + (R_r P_0 + X_r Q_0)^2 = 0. \quad (14)$$

A partir de (14) e sabendo-se das relações entre as potências ativa, reativa e aparente, $P_0 = S_0 \cos(\theta)$ e $Q_0 = S_0 \sin(\theta)$, pode-se traçar os gráficos mostrados nas Figura 8, Figura 9 e Figura 10 para realizar a análise da variação da tensão no ponto de acoplamento comum V_{PAC} em função da variação do módulo da potência aparente e fator de potência da carga para tensão da rede V_r em seu valor nominal de 1 p.u e para desregulação percentual de +3% e -7%.

Na Tabela 4 são apresentados os valores base de potência aparente e tensão utilizados e na Tabela 5 são mostrados os dados da impedância de rede Z_r .

Tabela 4: Valores base para parametrização por unidade (p.u)

Potência aparente base	25 kVA
Tensão base	13,8 kV

Tabela 5: Dados da impedância de rede Z_r em p.u

Resistência R_r (p.u)	Reatância X_r (p.u)
$2,1564 \times 10^{-3}$	$25,4344 \times 10^{-3}$

Tendo como base os valores especificados pelo Prodist na Tabela 1, que classificam os níveis de tensão e analisando a variação da tensão no ponto de acoplamento mostrada na Figura 8, onde a tensão da rede V_r está regulada em 1 p.u, ou seja, a tensão no início da rede rural está regulada em seu valor nominal, verifica-se que para todos os valores de potência aparente das cargas a tensão no PAC permanece dentro do nível considerado como adequada entre 0,92 e 1,05 p.u, com maior queda de tensão em torno de 2,5% causada pelas cargas com fatores de potência indutivos à potência aparente nominal.

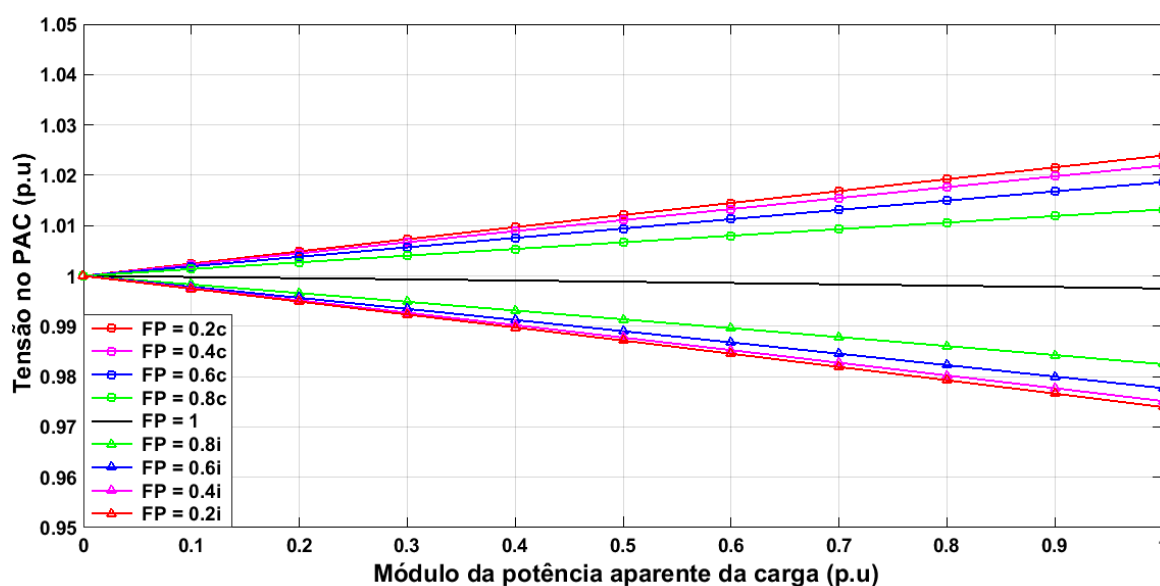


Figura 8: Variação da tensão no PAC em função do módulo da potência aparente e fator de potência da carga ($V_r = 1$ p.u).

Porém, sabe-se que no final de linhas de distribuições radiais ocorrem as maiores oscilações de tensão, para o caso da linha de distribuição rural em estudo essas variações podem ser ainda maiores, pois as linhas rurais iniciam no trecho final de linhas urbanas, nesse sentido, a Figura 9 obtida através de (14), apresenta a variação de tensão no PAC para uma elevação de 3% da tensão da rede V_r , onde se observa que as cargas com fatores de potência 0,2c e 0,4c ficam acima de 1,05 p.u à potência aparente nominal, ou seja, fora do limite de tensão adequado.

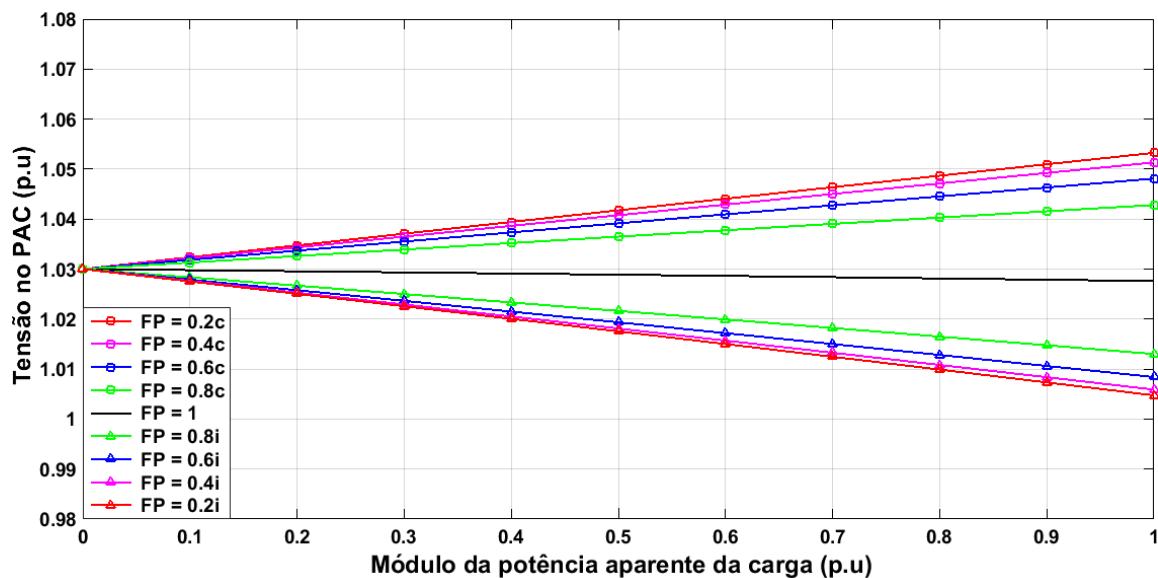


Figura 9: Variação da tensão no PAC em função do módulo da potência aparente e fator de potência da carga ($V_r = 1,03$ p.u.).

Para uma queda de tensão da rede V_r de 7%, se observa na Figura 10 obtida através de (14), que todas as cargas com fatores de potência indutivos ficam abaixo da tensão adequada de 0,92 p.u em aproximadamente 0,4 p.u do módulo da potência aparente.

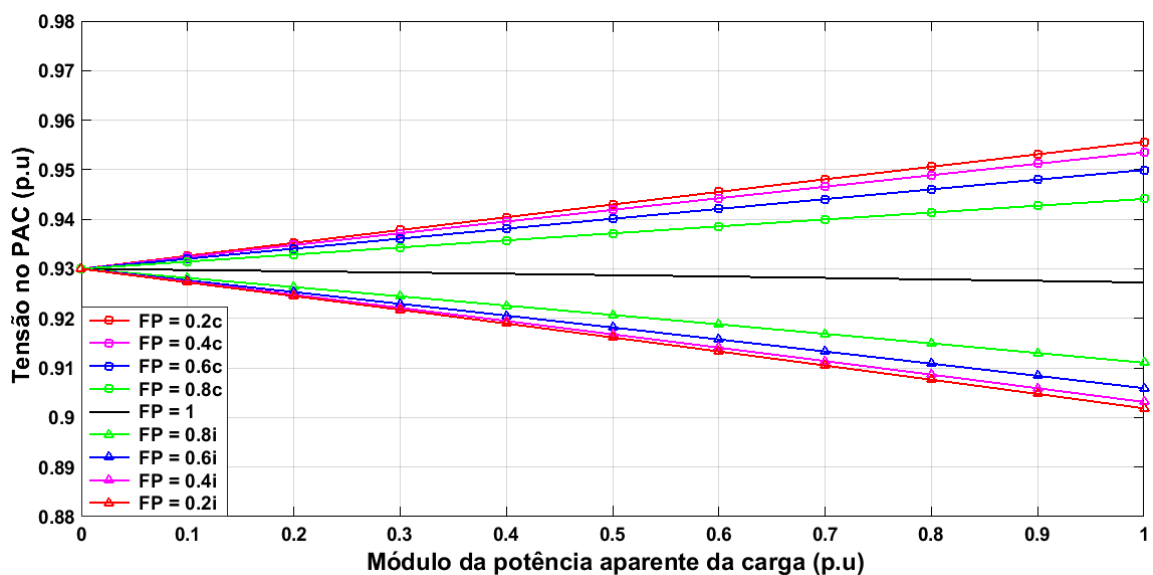


Figura 10: Variação da tensão no PAC em função do módulo da potência aparente e fator de potência da carga ($V_r = 0,93$ p.u.).

Fica evidente ao analisar as curvas dos gráficos para as desregulações de tensão da rede que a tensão na barra V_{PAC} pode ficar abaixo ou acima dos valores de referência adequados para alguns tipos de cargas, mostrando que as

cargas e o nível de tensão no início da rede de distribuição rural influenciam diretamente nos níveis de tensão no PAC.

3.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo, foi apresentado um sistema elétrico rural simples composto por uma linha monofásica curta com dois trechos, o primeiro em média tensão com 10 km de comprimento e o segundo em baixa tensão com comprimento de 100 metros, juntamente com os tipos de cabos e as impedâncias em função do comprimento desses condutores.

Avaliou-se o comportamento da tensão na barra no PAC em função do módulo da potência aparente e fator de potência das cargas, para a tensão na rede regulada em 1 p.u, onde verificou-se que se a tensão imposta no início da rede de distribuição rural estiver regulada em seu valor nominal, não ocorre violações nos níveis de tensões, porém, com aumento de 3% ou redução de 7% da tensão V_r foi verificado que o nível de tensão no PAC pode ficar acima ou abaixo dos níveis considerados adequados, mostrando para esse cenário a necessidade de um dispositivo de controle de tensão.

4 EQUACIONAMENTOS E ANÁLISES DO REGULADOR DE TENSÃO

Conforme mostrado na seção anterior, a tensão no PAC varia em função das variáveis do sistema para alguns tipos de cargas e do nível de tensão no início da rede rural. Nesse sentido, a Figura 11 mostra o circuito do sistema elétrico em estudo com a adição do regulador de tensão baseado no D-Statcom, representado por uma fonte de tensão controlada inserida em paralelo no PAC. O objetivo principal desse capítulo é equacionar o ângulo de defasagem δ em função de tensões e impedâncias, e também a potência reativa processada pelo compensador através da análise do circuito. Sendo assim, as correntes na carga, na rede e no inversor devem ser inicialmente modeladas e após as potências na rede, na carga e na linha.

São apresentados também, gráficos que mostram o comportamento do ângulo δ , bem como da potência reativa processada pelo compensador em função da variação de tensão no PAC, juntamente suas respectivas análises.

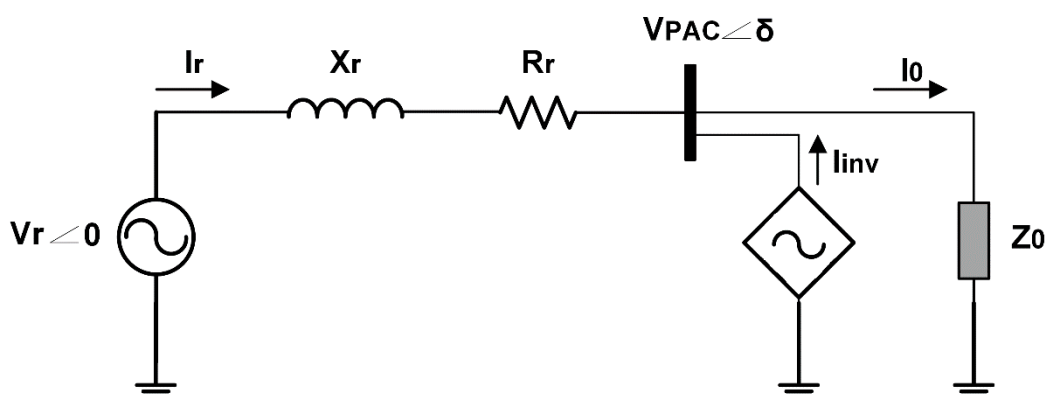


Figura 11: Sistema elétrico com o regulador de tensão baseado no D-Statcom.

4.1 EQUACIONAMENTO DAS CORRENTES

A corrente na carga pode ser representada pela equação (15)

$$\vec{I}_0 = \frac{\vec{V}_{PAC}}{Z_0}. \quad (15)$$

E a corrente que percorre a linha de distribuição é dada pela equação (16)

$$\vec{I}_r = \frac{\vec{V}_r - \vec{V}_{PAC}}{Z_r}, \quad (16)$$

onde $Z_r = R_r + jX_r$.

Ao aplicar a lei das correntes pode-se obter a relação mostrada em (17)

$$\vec{I}_{inv} = \vec{I}_0 - \vec{I}_r. \quad (17)$$

Ao substituir (15) e (16) em (17), se obtém a equação (18) que representa a corrente do regulador de tensão em função dos parâmetros de tensão e impedâncias do circuito

$$\vec{I}_{inv} = \frac{\vec{V}_{PAC}(Z_0 + Z_r) - Z_0\vec{V}_r}{Z_0Z_r}. \quad (18)$$

4.2 EQUACIONAMENTO DA POTÊNCIA DA REDE

A potência da rede de distribuição é representada pela equação (19)

$$\vec{S}_r = \vec{V}_r \vec{I}_r^*. \quad (19)$$

Substituindo (16) em (19) pode-se obter (20), onde apresenta a potência aparente da rede de distribuição em função das impedâncias do circuito, tensões nas suas formas retangulares e do ângulo da tensão no PAC

$$\vec{S}_r = \frac{V_r(V_r - V_{PAC} \cos \delta + jV_{PAC} \sin \delta)(R_r + jX_r)}{R_r^2 + X_r^2}. \quad (20)$$

De (20), separando-se a parte real e imaginária, obtém-se as potências ativa e reativa da rede, apresentadas por (21) e (22)

$$\vec{P}_r = \frac{V_r(R_r V_r - R_r V_{PAC} \cos \delta - X_r V_{PAC} \sin \delta)}{R_r^2 + X_r^2}, \quad (21)$$

$$\vec{Q}_r = \frac{V_r(X_r V_r - X_r V_{PAC} \cos \delta + R_r V_{PAC} \sin \delta)}{R_r^2 + X_r^2}. \quad (22)$$

4.3 EQUACIONAMENTO DA POTÊNCIA DA CARGA

A potência da carga é representada por (23)

$$\vec{S}_0 = \vec{V}_0 \vec{I}_0^* \quad (23)$$

Substituindo (15) em (23) pode-se obter a representação (24)

$$\vec{S}_0 = \frac{V_{PAC}^2 R_0}{R_0^2 + X_0^2} + j \frac{V_{PAC}^2 X_0}{R_0^2 + X_0^2} \quad (24)$$

Separando-se a parte real e imaginária obtêm-se as equações (25) e (26) que representam a potência ativa e reativa da carga

$$\vec{P}_0 = \frac{V_{PAC}^2 R_0}{R_0^2 + X_0^2} \quad (25)$$

$$\vec{Q}_0 = \frac{V_{PAC}^2 X_0}{R_0^2 + X_0^2} \quad (26)$$

4.4 EQUACIONAMENTO DA POTÊNCIA NA IMPEDÂNCIA DA LINHA

A potência aparente na linha de distribuição é apresentada em (27)

$$\vec{S}_L = \vec{V}_L \vec{I}_L^* \quad (27)$$

onde $\vec{V}_L = \vec{V}_r - \vec{V}_{PAC}$ é a queda de tensão na linha de distribuição. E ainda, substituindo (16) em (27), tem-se uma nova representação para potência aparente na linha de distribuição dada em (28)

$$\vec{S}_L = \frac{R_r(V_r^2 + V_{PAC}^2 - 2V_rV_{PAC} \cos \delta)}{R_r^2 + X_r^2} + j \frac{X_r(V_r^2 + V_{PAC}^2 - 2V_rV_{PAC} \cos \delta)}{R_r^2 + X_r^2}. \quad (28)$$

Separando a parte real e imaginária, se tem as equações para as potências ativa e reativa na linha de distribuição, apresentadas em (29) e (30) (ENDERLE, 2012)

$$\vec{P}_L = \frac{R_r(V_r^2 + V_{PAC}^2 - 2V_rV_{PAC} \cos \delta)}{R_r^2 + X_r^2}, \quad (29)$$

$$\vec{Q}_L = \frac{X_r(V_r^2 + V_{PAC}^2 - 2V_rV_{PAC} \cos \delta)}{R_r^2 + X_r^2}. \quad (30)$$

4.5 EQUACIONAMENTO E ANÁLISE DO ÂNGULO DE DEFASAGEM DA TENSÃO NO PAC

Para equacionar o ângulo de defasagem da tensão no PAC, parte-se da condição de que o compensador ideal de reativos não processa potência ativa, portanto, pode-se utilizar do princípio da conservação de energia no sistema em estudo em que a potência ativa proveniente da rede é integralmente consumida na linha de distribuição e na carga, conforme mostra a equação (31)

$$P_r - P_L - P_0 = 0. \quad (31)$$

Substituindo (21), (25) e (29) em (31) se obtém a equação (32) para determinação do ângulo de defasagem da tensão no PAC para as variações dos parâmetros do circuito que se desejar, onde o compensador processa essencialmente potência reativa (ENDERLE, 2012), (ZIMANN; MEZAROBA; BATSCHAUER, 2016)

$$\frac{R_r V_r \cos \delta - X_r V_r \sin \delta - R_r V_{PAC}}{R_r^2 + X_r^2} - \frac{R_0 V_{PAC}}{R_r^2 + X_r^2} = 0. \quad (32)$$

A partir de (32) pode-se construir o gráfico mostrado na Figura 12 para analisar o comportamento do ângulo de defasagem da tensão no PAC em função do módulo da potência aparente e fator de potência das cargas. É importante mencionar que as cargas do tipo indutivas e capacitivas compartilham das mesmas curvas.

Verifica-se na Figura 12, que a defasagem aumenta a partir das cargas puramente indutivas ou capacitivas em direção as cargas com características resistivas e também com o acréscimo do módulo da potência aparente. A maior defasagem é de aproximadamente $1,5^\circ$ para carga resistiva à potência nominal, lembrando que esses valores são considerados quando a tensão no início da rede rural está regulada em seu valor nominal.

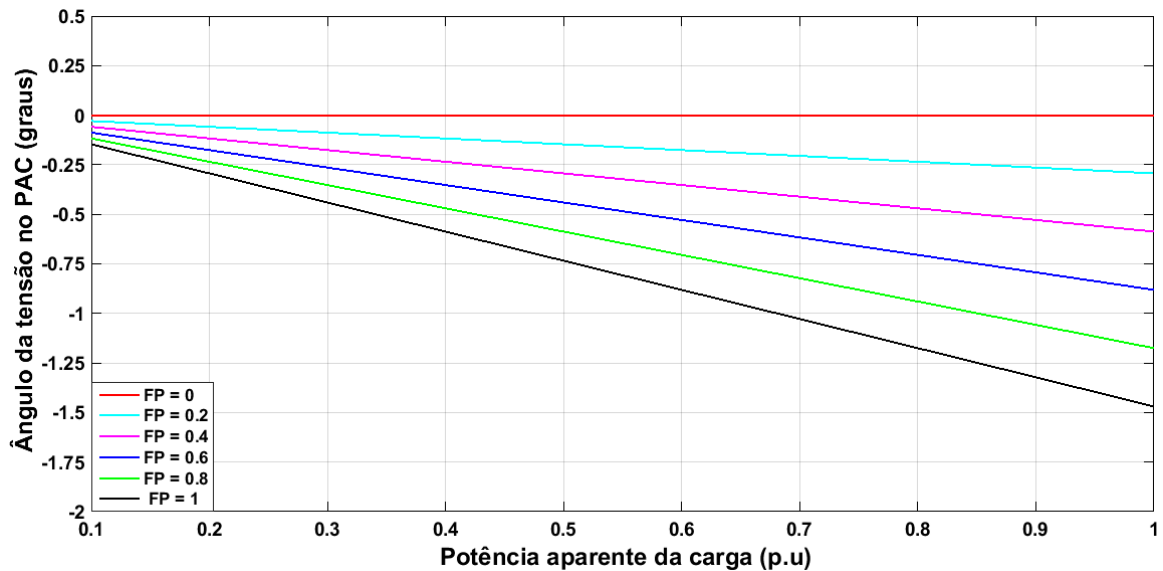


Figura 12: Variação do ângulo da tensão no PAC em função do módulo da potência aparente e fator de potência da carga ($V_{pac} = 1$ p. u.; $V_r = 1$ p. u.).

4.6 EQUACIONAMENTO E ANÁLISE DA POTÊNCIA REATIVA DO COMPENSADOR

Partindo da equação da potência aparente dada em (33)

$$\vec{S}_{inv} = \vec{V}_{PAC} \vec{I}_{inv}^* \quad (33)$$

Substituindo (18) em (33), e após a realização das operações algébricas entre as variáveis complexas se tem a equação (34) que representa a potência reativa processada pelo compensador

$$Q_{inv} = \frac{V_{PAC}^2 (X_0(R_r^2 + X_r^2) + X_r(R_0^2 + X_0^2)) - V_r V_{PAC} (R_0^2 + X_0^2) (X_r \cos \delta + R_r \sin \delta)}{(R_r^2 + X_r^2)(R_0^2 + X_0^2)}. \quad (34)$$

Para se analisar os valores de potência reativa processada pelo compensador, através da equação (34), faz-se necessário primeiramente o uso da equação (32), onde se obtém os ângulos de defasagens da tensão no PAC, que garante o processamento exclusivo de potência reativa em função da variação dos parâmetros do circuito que se desejar.

É importante salientar que o ângulo de defasagem no PAC é necessário para se analisar matematicamente o fenômeno físico da potência reativa processada, não sendo necessária sua aferição no sistema de controle do D-Statcom.

Essas duas equações, (32) e (34), são essenciais para comprovar sobre um aspecto a viabilidade técnica do controle de tensão por compensação de reativos no sistema em estudo, por apresentar a quantidade de reativos processados pelo compensador, onde se verifica se são valores reais e implementáveis utilizados também no dimensionamento do compensador. Os gráficos mostrados nas Figura 13, Figura 14 e Figura 15, obtidas através de (32) e (34), representam o comportamento da potência reativa processada pelo compensador para condições variáveis de tensão no PAC quando cargas à potência aparente nominal estão conectadas no PAC.

A potência reativa processada pelo compensador mostrada na Figura 13, para uma carga resistiva nominal conectada no PAC, se mantém próxima de zero quando a tensão no PAC está regulada em 1 p.u, porém, quando ocorre uma elevação de 5%, que é o limite superior do nível adequado de tensão, a potência reativa indutiva que deve ser processada pelo compensador, para manter a tensão no PAC em 1 p.u, se eleva para aproximadamente 0,27 p.u, e para o limite inferior de tensão adequada de 0,92 p.u, a potência reativa capacitiva processada é de aproximadamente 0,27 p.u. Essas informações mostram que o controlador de tensão em paralelo deve processar uma quantidade considerável de potência reativa para manter regulada a tensão no barramento do PAC, contudo, a utilização do dispositivo pode ser programada para os momentos em que a tensão ultrapassa o limite superior ou inferior para economizar energia e reduzir o desgaste do equipamento.

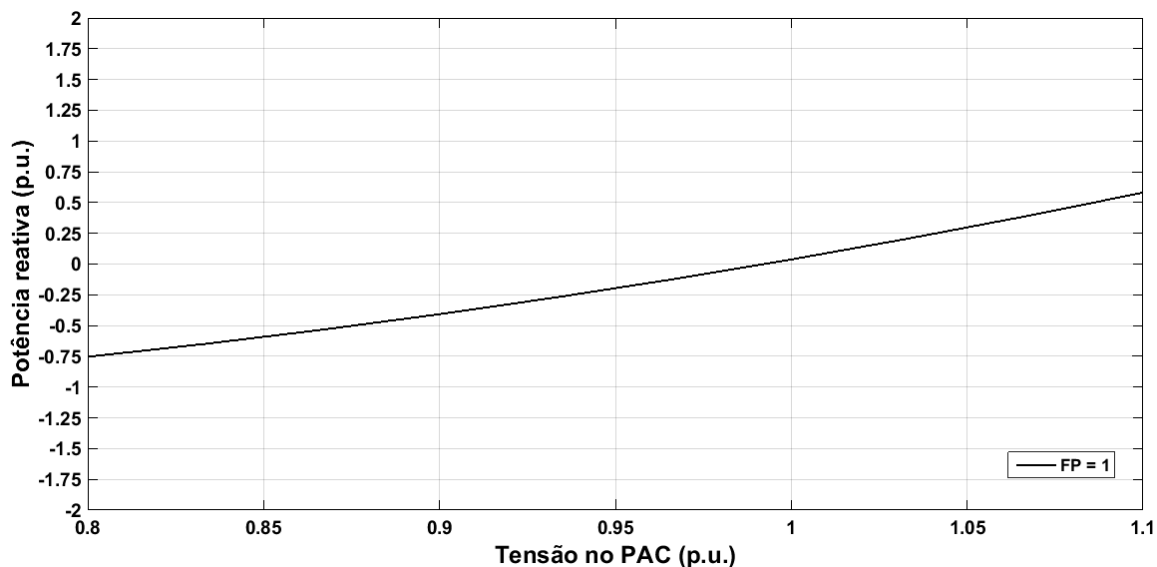


Figura 13: Variação da potência reativa do inversor em função do módulo da tensão no PAC para uma carga resistiva nominal ($V_r = 1$ p.u.; $S_0 = 1$ p.u.; $FP_0 = 1$).

A potência reativa processada pelo compensador em função da variação de tensão no PAC quando cargas com fatores de potência indutivos são conectadas ao PAC é apresentado na Figura 14, onde se observa que a potência a ser processada pelo controlador se mantém entre 0,30 e 1,20 p.u para todos os valores de tensão, sendo menor que a potência reativa processada para a carga resistiva.

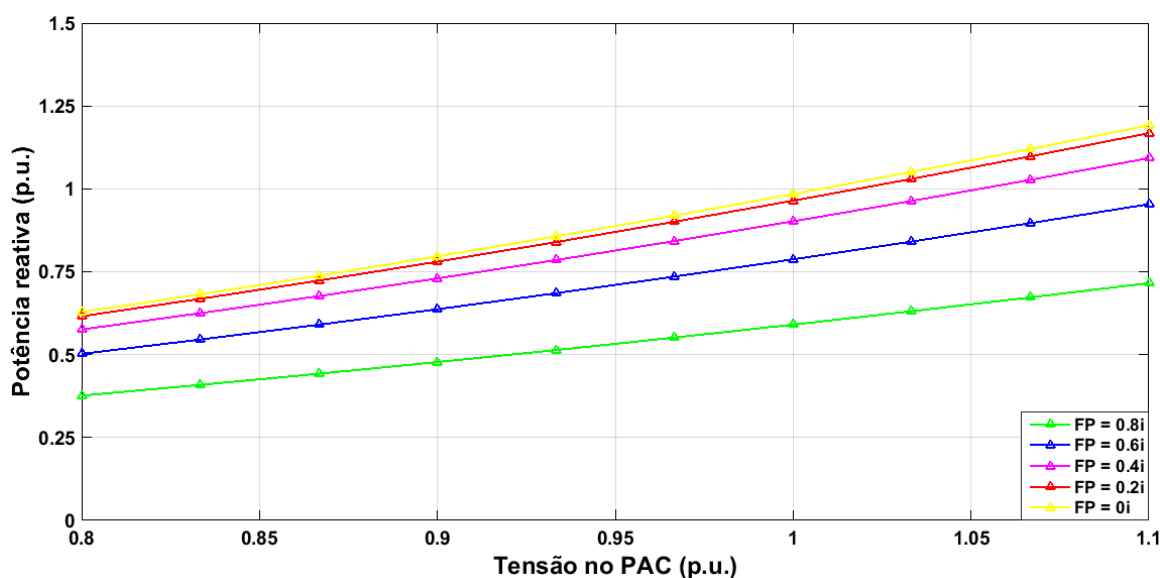


Figura 14: Variação da potência reativa do inversor em função do módulo da tensão no PAC para cargas indutivas nominais ($V_r = 1$ p.u.; $S_0 = 1$ p.u.).

Da mesma maneira, para cargas com fatores de potência capacitivos a potência reativa a ser processada pelo regulador se mantém entre 0,30 e 1,20 p.u para todos os valores de tensão no PAC apresentados. É possível se concluir a

princípio, que o modelo de compensação por reativos em paralelo demanda elevada quantidade de potência para manter a tensão regulada, principalmente quando a carga é puramente resistiva.

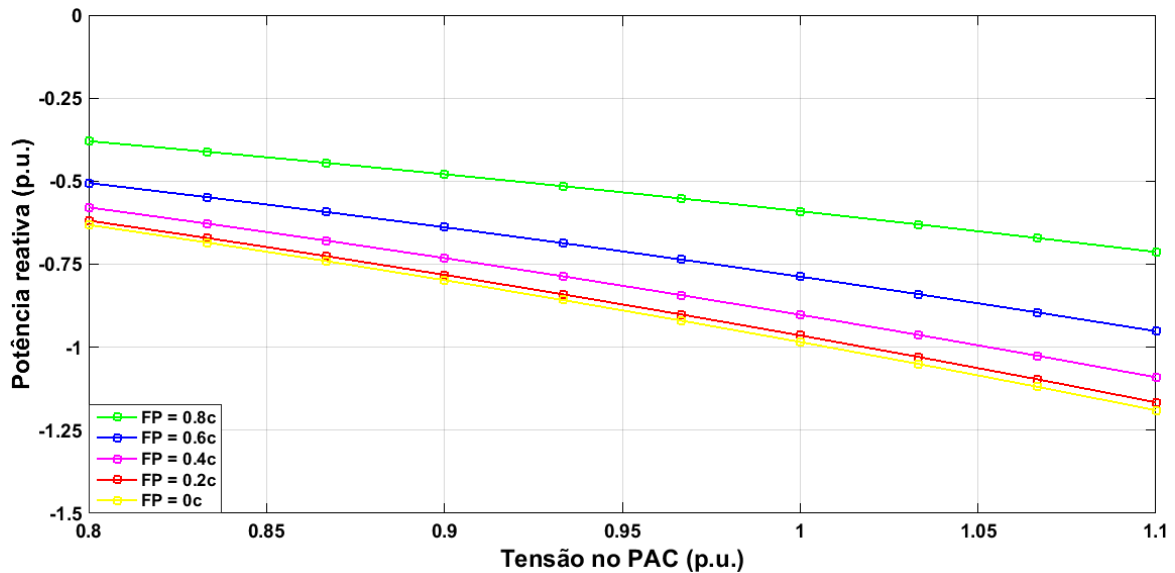


Figura 15: Variação da potência reativa do inversor em função do módulo da tensão no PAC para cargas capacitivas nominais ($V_r = 1$ p.u.; $S_0 = 1$ p.u.).

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo foram realizados os equacionamentos matemáticos do circuito de potência com a adição do regulador de tensão paralelo, e análises sobre esse sistema, como o comportamento do ângulo de defasagem da tensão no PAC em função da potência aparente e fator de potência das cargas, bem como a análise da variação da potência reativa processada pelo compensador para cargas resistivas, indutivas e capacitivas a potencia aparente nominal.

Esse capítulo concentrou-se nos conceitos fundamentais sobre a capacidade e viabilidade de aplicação do D-Stacom no sistema de distribuição monofásico rural sobre o aspecto da quantidade de potência reativa a ser processada para o controle de tensão. Mostrou-se que a compensação paralela demanda muita energia, e também que o compensador deve possuir capacidade de compensação da ordem máxima de requisição da carga. Também foi evidenciado que o controle de tensão do tipo *shunt* utiliza grande quantidade de energia de compensação para a carga do tipo resistiva.

5 COMPOSIÇÃO DO REGULADOR DE TENSÃO

O regulador baseado no D-Statcom é basicamente um inversor monofásico de tensão em ponte completa. Portanto, nessa seção serão apresentadas suas principais características, as etapas de operação, formas de onda e a estratégia de controle das chaves semicondutoras.

5.1 INVERSOR MONOFÁSICO DE TENSÃO EM PONTE COMPLETA

Conversores de energia elétrica são conhecidos como inversores e possuem a propriedade de converter tensões em CC em CA. Geralmente a tensão CA de saída é senoidal e controlada em simetria de amplitude e frequência, na grande maioria dos dispositivos, pela modulação por largura de pulso PWM (do inglês *Pulse Width Modulation*) (RASHID, 1999).

Entre os tipos de inversores para a mesma aplicação, o inversor de tensão em ponte completa apresenta algumas vantagens em relação a outras estruturas, como os reduzidos esforços de corrente e tensão nos interruptores, o que o classifica para aplicações em potências acima de 1 kVA. Entre as desvantagens está o custo de implementação mais elevado, pois necessita de quatro chaves estáticas e ainda os sinais de controle devem ser isolados por não possuírem a mesma referência no circuito (BARBI; MARTINS, 2001).

A Figura 16 apresenta a configuração do inversor monofásico de tensão em ponte completa. O inversor é composto basicamente por uma fonte CC (V_{cc}), para prover e armazenar energia, e pelos interruptores que são acionados conforme a estratégia de modulação. É importante salientar que a estratégia de modulação deve restringir o acionamento simultâneo dos interruptores S1 e S2 ou S3 e S4, para que não haja um curto circuito na fonte CC.

Os diodos de roda livre junto aos interruptores garantem o correto funcionamento do dispositivo, pois há necessidade da bidirecionalidade no sentido da corrente. Os componentes L_f e C_f representam o indutor e o capacitor que compõem o filtro passivo de saída, juntamente com a carga (RASHID, 1999), (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003), (LEDWICH; GHOSH, 2002).

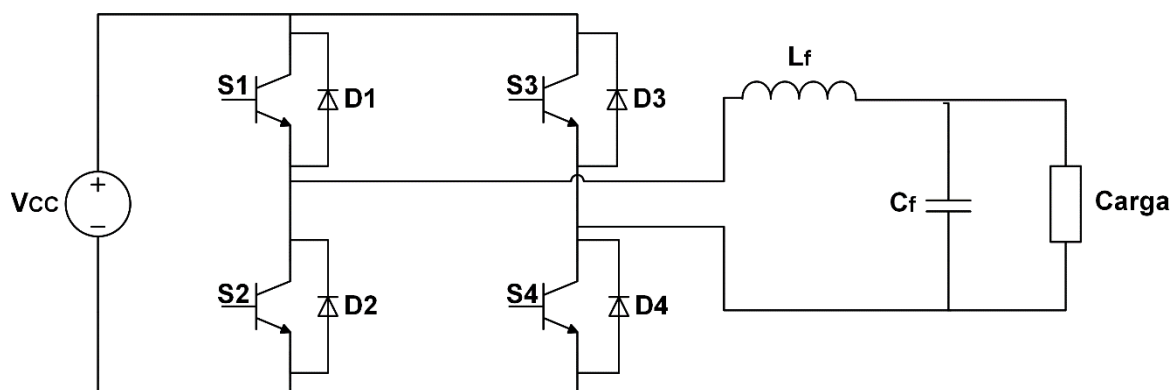


Figura 16: Inversor monofásico de tensão em ponte completa.

5.2 ESTRATÉGIA DE MODULAÇÃO

A modulação por largura de pulso PWM é uma das técnicas mais amplamente utilizadas para o controle do sinal de saída CA em conversores eletrônicos de potência (HOLMES; LIPO, 2003). E para RASHID (1999, p. 456), “o método mais eficiente de controle do ganho, e tensão de saída, consiste em incorporar o controle de modulação por largura de pulso (PWM) dentro do inversor”.

Desde a década de 1970 e até o presente momento, o assunto ainda é objeto de estudo e pesquisa em diversos trabalhos, com foco no desenvolvimento de conceitos e estratégias de modulação para se adequar a diferentes topologias de conversores. Essas estratégias consistem em variar a razão cíclica aplicada aos interruptores em alta frequência de comutação, para se obter uma sequência de pulsos, que possui a componente fundamental desejada de tensão ou corrente em baixa frequência na saída do dispositivo. O maior inconveniente que se tem com o chaveamento é a presença de componentes harmônicas que devem ser minimizadas (HOLMES; LIPO, 2003).

Entre as diversas estratégias de modulação, cita-se em especial a modulação PWM senoidal ou somente SPWM (do inglês *Sinusoidal Pulse Width Modulation*), por apresentar algumas vantagens em relação às demais e ainda por ser frequentemente utilizada em aplicações industriais (RASHID, 1999). Essa técnica consiste em comparar uma onda senoidal com uma portadora triangular. Com isso a largura dos pulsos é variada de forma proporcional à amplitude da onda senoidal, e o número de pulsos por semiciclo é dependente da frequência da

portadora. Como a frequência da portadora é elevada, os componentes harmônicos são deslocados para as altas frequências, e para aplicações em frequência fixa, promove o aprimoramento no projeto de filtros passivos, e ainda se reduz as dimensões e custos dos elementos magnéticos (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003). Existem dois modelos de modulação SPWM, a bipolar e a unipolar. A Figura 17 apresenta as formas de onda para a SPWM bipolar e a Figura 18 para a SPWM unipolar. Embora essas duas modulações se apresentem muito semelhantes, há algumas diferenças que devem ser detalhadas, onde mostra-se que a SPWM unipolar é mais vantajosa em relação a bipolar.

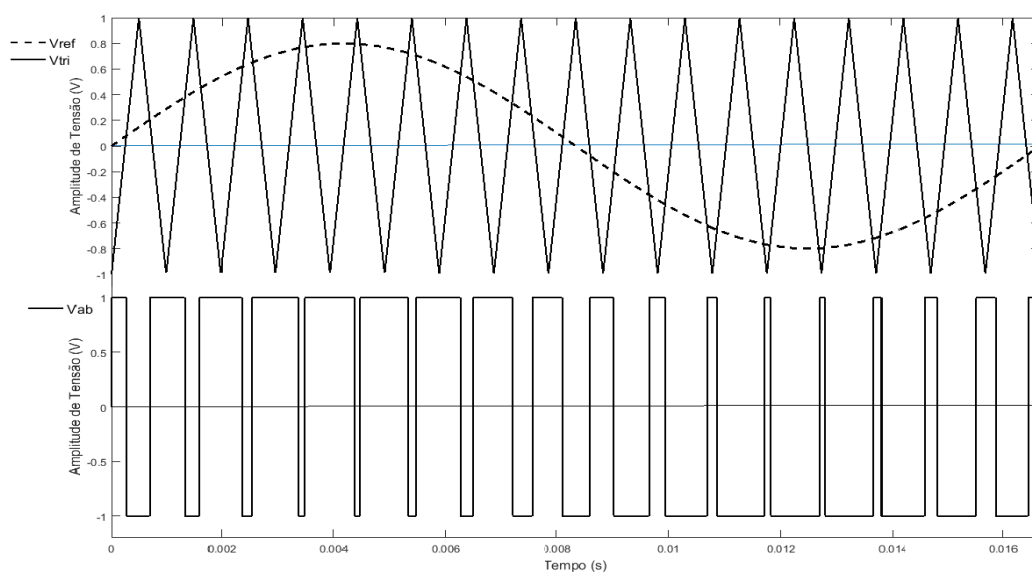


Figura 17: Modulação SPWM bipolar.

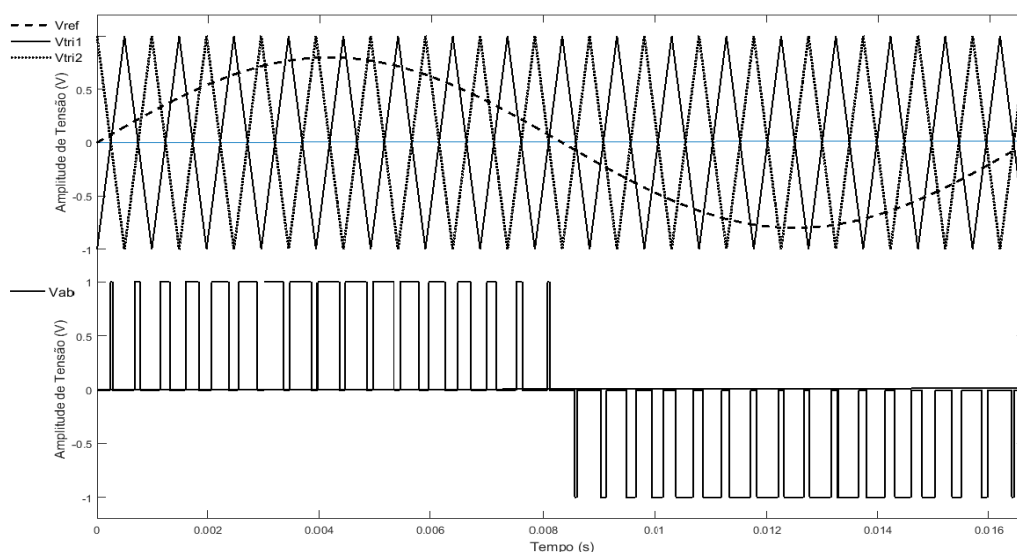


Figura 18: Modulação SWPM unipolar.

A partir da Figura 18, que representa as formas de onda da modulação unipolar, pode-se conferir que a onda senoidal de referência é comparada com duas portadoras triangulares, diferentemente da Figura 17 onde a comparação é realizada com uma única onda triangular. Percebe-se que dessa forma o número de pulsos em V_{ab} na modulação unipolar é o dobro do que na modulação bipolar para uma mesma frequência de comutação. Essa característica da modulação unipolar melhora o desempenho do espectro harmônico, o que acarreta em filtros passivos de saída reduzidos e ondulações de corrente e tensões menores. Salienta-se ainda que com menores ondulações de tensão e corrente, as suas derivadas também serão menores, o que melhora o desempenho quanto à emissões eletromagnéticas e perdas nos interruptores.

A modulação bipolar tem como característica o comando único para cada duas chaves, uma em cada braço do conversor, e para as outras é utilizado um comando complementar. A tensão imposta nos interruptores a cada transição é duas vezes a tensão da fonte CC, ou seja, $2 V_{cc}$, que também é a mesma tensão aplicada sobre o filtro de saída.

Com relação a modulação unipolar, o comando dos braços do conversor é independente, por exemplo, os interruptores S1 e S3 ou S2 e S4 podem conduzir simultaneamente. Essa particularidade é obtida ao se comparar as duas portadoras triangulares para gerar os sinais de controle independentes para cada braço.

A tensão nos interruptores varia V_{cc} em cada transição, sendo assim se obtém menores esforços nas chaves semicondutoras. E a tensão V_{ab} sobre o filtro de saída possui três níveis, $+V_{cc}$, zero e $-V_{cc}$ (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003) (ABOADLA; KHAN; HABAEBI, 2016).

5.3 ETAPAS DE OPERAÇÃO DO CONVERSOR EM PONTE COMPLETA PARA MODULAÇÃO SPWM

O modo de operação do conversor eletrônico de potência está diretamente ligado à estratégia de modulação. Nessa seção serão analisados os passos de operação do conversor para a modulação SPWM unipolar, por se apresentar mais vantajosa em relação a SPWM bipolar, conforme mostrado no tópico anterior.

Para essa análise considerou-se ideais todos os elementos do circuito, com uma carga entre os braços do conversor com característica tipo de fonte de corrente e ainda um índice de modulação arbitrário.

O circuito do conversor apresenta oito etapas de operação para esse tipo de modulação, sendo quatro etapas referentes ao semiciclo positivo e quatro ao semiciclo negativo. Por simplicidade será apresentado somente a operação do semiciclo positivo que é equivalente ao semiciclo negativo.

Na primeira etapa de operação que está representada na Figura 19, os interruptores S1 e S4 estão em condução e S2 e S3 permanecem bloqueados. As setas sobre as linhas indicam o caminho percorrido pela corrente no circuito.

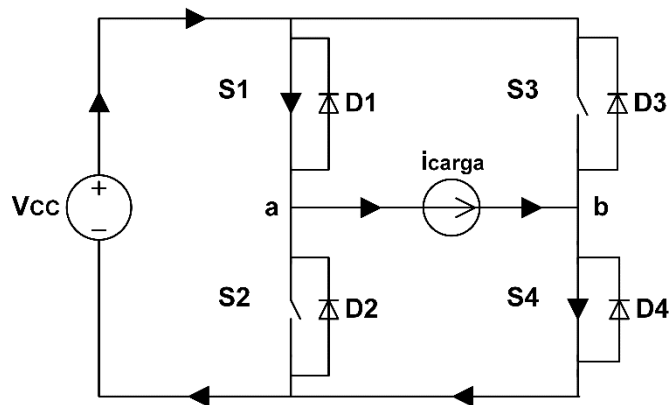


Figura 19: Primeira etapa de operação.

Na segunda etapa o interruptor S4 é bloqueado em t_1 , habilitando o diodo D3, que está preenchido nesse momento, a entrar em condução. Devido ao sentido da corrente o interruptor S3 mesmo estando acionado em t_2 não chega a conduzir. Verifica-se que nesse momento que há roda livre na carga. A Figura 20 representa o passo dois.

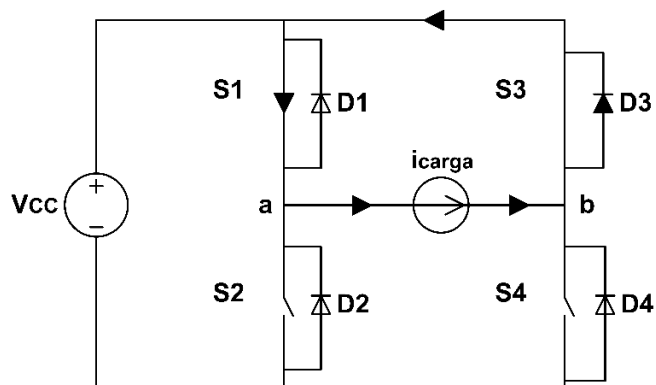


Figura 20: Segunda etapa de operação.

Na terceira etapa o interruptor S3 é bloqueado em t_3 , e em t_4 o interruptor S4 entra em condução assumindo a corrente que circulava em D3. Esse passo é igual ao passo 1, representado na Figura 19.

Na quarta etapa o interruptor S1 é bloqueado em t_5 e o diodo D2 entra em condução assumindo a corrente de carga. Nesse passo também se tem roda livre na carga através da condução da corrente pelo diodo D2. Apesar de o interruptor S2 estar ativo no instante t_6 este não chega a conduzir devido ao sentido da corrente. O quarto passo está representado na Figura 21.

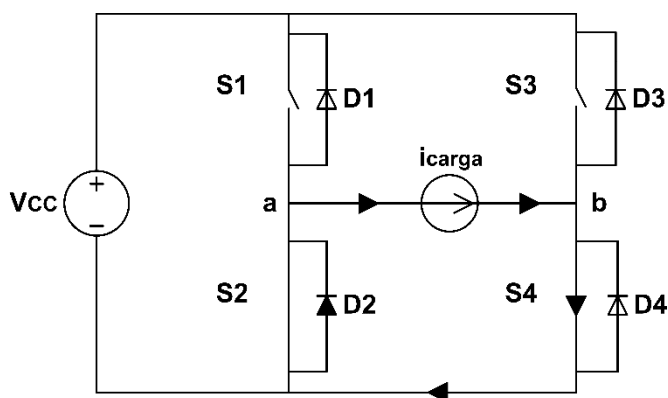


Figura 21: Terceira etapa de operação.

No instante t_7 o interruptor S2 entra em bloqueio e em t_8 o interruptor S1 entra em condução assumindo a corrente de carga que circulava em D2, e então se tem novamente a primeira etapa.

É importante salientar que para uma carga com características indutivas, as etapas de funcionamento do conversor deve possuir a regeneração de energia, o que muda os passos de operação. A Figura 22 apresenta os acionamentos dos

interruptores nos oito instantes, juntamente com a tensão V_{ab} entre os braços do conversor (BARBI, *et al.*, 2007).

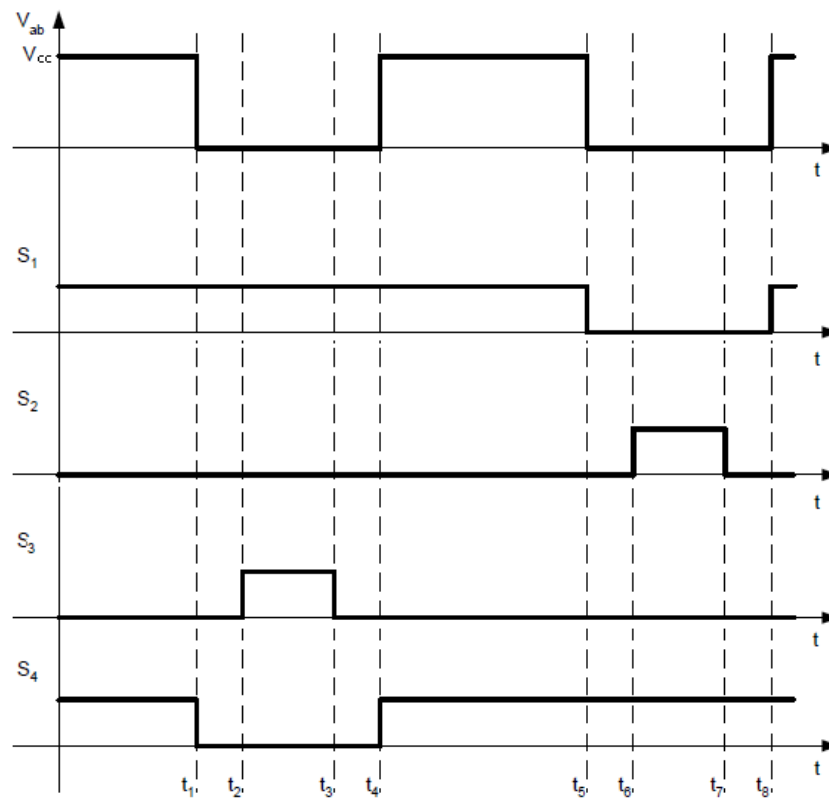


Figura 22: Tensão V_{ab} entre os braços do conversor e acionamentos dos interruptores.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse capítulo apresentou os principais componentes físicos do D-Statcom tipo fonte de tensão, como seus interruptores, sua fonte de energia, o filtro passivo de saída, bem como o seu princípio de funcionamento com as etapas de operação. Mostrou-se também a vantagem da modulação SPWM unipolar quanto ao seu desempenho, mostrando de forma simples que o sinal de saída possui o dobro da frequência de comutação dos interruptores do inversor, propiciando assim filtros passivos menores.

6 SISTEMAS DE CONTROLE DO REGULADOR DE TENSÃO

Para um D-Statcom baseado em um conversor tipo fonte de tensão, a saída CA é controlada pelo fluxo de corrente reativa processada pelos interruptores do conversor e a energia para essa operação é proveniente da troca entre o barramento CC e a rede. Portanto, para o funcionamento adequado do dispositivo, dadas as perturbações no ponto de acoplamento com o sistema de distribuição, o sistema de controle deve manter regulada a tensão CA e também o seu barramento CC (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

Nesse sentido, essa seção abordará os sistemas de controle das malhas CA e CC. Para isso, é necessário efetuar a modelagem matemática de ambos os subsistemas para projetar adequadamente os controladores. Salienta-se que a análise será realizada através dos modelos médios dinâmicos. A modelagem do sistema CA relaciona o sinal de controle de tensão do conversor com as variáveis do sistema de potência, como a tensão no ponto de acoplamento, corrente da rede e corrente do conversor. Já a modelagem do sistema CC relaciona o ângulo de defasagem δ com a tensão no barramento CC.

6.1 MODELAGEM DO SISTEMA EM CORRENTE ALTERNADA

Para realizar a aproximação dinâmica média do sistema CA, algumas hipóteses devem ser consideradas, como a tensão no barramento CC constante no seu valor nominal, os interruptores são considerados como elementos ideais, as cargas conectadas ao sistema de distribuição são vistas como distúrbios do sistema CA, e ainda os sinais de alta frequência gerados pela comutação dos interruptores são desprezados.

A Figura 23 representa o circuito CA em estudo. Note que o circuito é composto por três partes básicas, o modulador por largura de pulso, o conversor em ponte completa e o circuito formado pelo filtro LC com a rede de distribuição. Para encontrar o modelo matemático desse sistema, pode-se dividi-lo nas três partes mencionadas anteriormente.

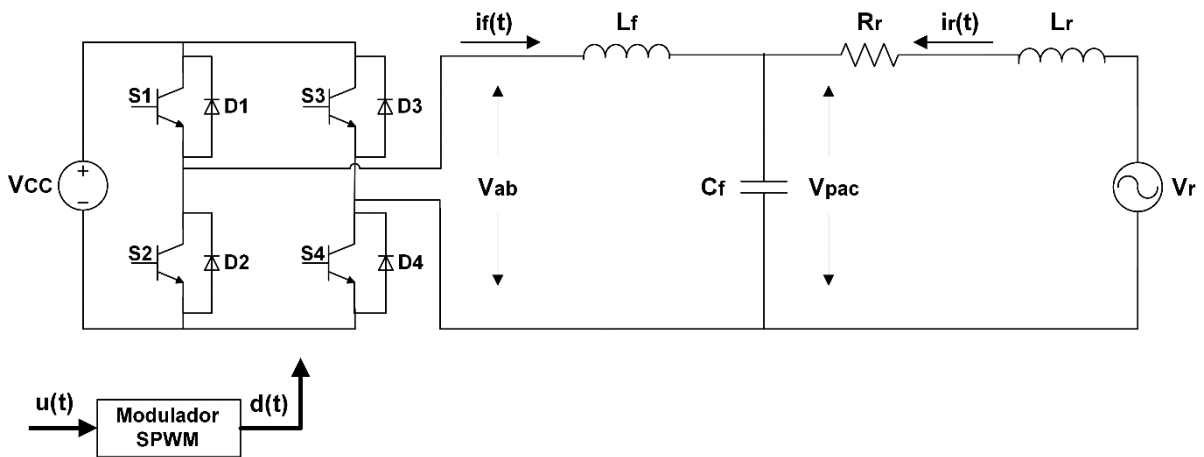


Figura 23: Circuito para modelagem do sistema CA.

6.1.1 Modulador por Largura de Pulso

O modelo matemático do modulador relaciona o sinal de referência $u(t)$ com a razão cíclica $d(t)$ imposta aos interruptores. Levando-se em consideração que o conversor de tensão em ponte completa utiliza a estratégia de modulação SPWM, que já foi descrita anteriormente em outra seção, e opera na região linear, a equação (35) pode descrever o modelo dinâmico médio do modulador. Nessa equação $V_{tri_m\acute{a}x}$ é o valor pico a pico da portadora triangular

$$d(t) = \frac{1}{V_{tri_m\acute{a}x}} u(t). \quad (35)$$

6.1.2 Inversor de Tensão em Ponte Completa

O valor médio da tensão dos braços do inversor V_{ab} em um período de comutação é dado pelas equações (36) e (37)

$$V_a(t) = d(t)V_{CC}, \quad (36)$$

$$V_b(t) = [1 - d(t)]V_{CC}. \quad (37)$$

Portanto, o valor médio da tensão de saída pode ser expresso por (38) e (39)

$$V_{ab}(t) = V_a(t) - V_b(t), \quad (38)$$

$$V_{ab}(t) = [2d(t) - 1]V_{cc}. \quad (39)$$

E o modelo médio dinâmico do conversor em ponte completa, que descreve a relação entre tensão de saída $V_{ab}(t)$ e razão cíclica $d(t)$, pode ser representado pela equação (40) ao desprezar a componente CC da equação (39)

$$\frac{V_{ab}(t)}{d(t)} = 2V_{cc}. \quad (40)$$

6.1.3 Filtro LC e Rede de Distribuição

Sabendo-se que a tensão V_{ab} entre os braços do conversor é controlado pela razão cíclica $d(t)$, pode-se aproximar o conversor como uma fonte de tensão controlada. A Figura 24 apresenta esse circuito equivalente.

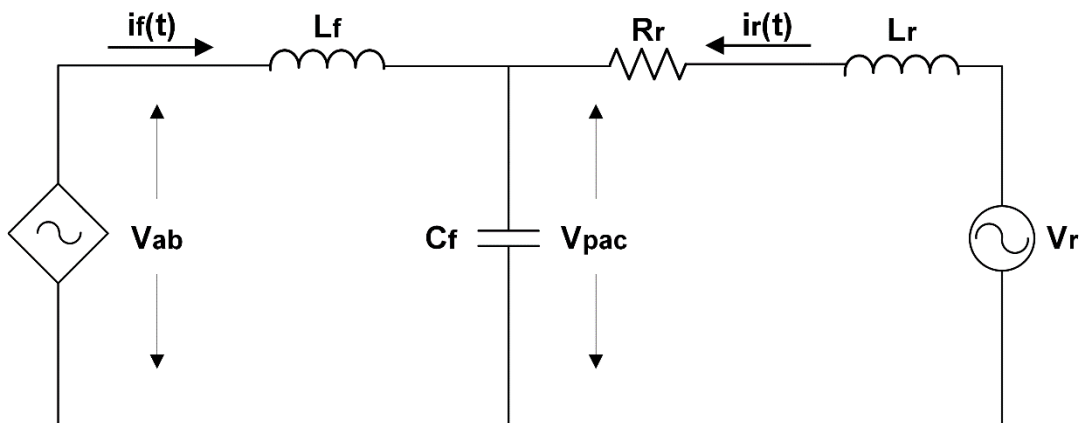


Figura 24: Circuito equivalente do sistema CA.

A partir desse circuito, pode-se obter o modelo médio dinâmico do sistema CA, representado pelas equações (41) e (42) em espaço de estados. Nesse modelo $\mathbf{x}(t) = [i_f(t) \quad i_r(t) \quad V_{pac}(t)]^T$ é o vetor das variáveis de estado, V_{ab} é a entrada da planta, $w(t) = V_r(t)$ é o distúrbio na rede de distribuição, $y(t) = V_{pac}(t)$ é a saída do sistema. Logo abaixo são apresentadas as matrizes das equações de estado

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}V_{ab}(t) + \mathbf{B}_w w(t), \quad (41)$$

$$y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t), \quad (42)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_f} \\ 0 & -\frac{R_r}{L_r} & -\frac{1}{L_r} \\ \frac{1}{C_f} & \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{L_f} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{1}{L_r} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [0 \quad 0 \quad 1],$$

usualmente, não se conhece R_r e L_r da impedância da rede, podendo ser tratadas como perturbações. Contudo, quanto mais completo for o modelo, mais efetivo pode ser o sistema de controle aplicado ao sistema real, por isso se considero esses elementos.

E ainda, substituindo (35) e (40) em (41), é possível se obter o modelo médio dinâmico CA, quando se considera como a entrada do sistema o sinal de controle $u(t)$. A equação de estados (43) apresenta essa relação e logo abaixo o novo vetor \mathbf{B}_u (ZHANG; REHTANZ; PAL, 2012), (ENDERLE, 2012), (RYAN; BRUMSICKLE; LORENZ, 1997)

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_u u(t) + \mathbf{B}_w w(t), \quad (43)$$

$$\mathbf{B}_u = \begin{bmatrix} \frac{2V_{cc}}{V_{tri_m\acute{a}x}L_f} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

6.2 MODELAGEM DO SISTEMA EM CORRENTE CONTÍNUA

Para efetuar a modelagem do sistema CC é necessário realizar o estudo do fluxo de potência entre o compensador e a rede de distribuição, pois o acúmulo de energia para manter a tensão no capacitor do barramento CC é dependente da transferência de potência ativa da rede (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 2003).

Duas condições são impostas para aproximar o modelo médio dinâmico do sistema CC. A primeira se refere as cargas conectadas ao sistema de distribuição que são desprezadas e a segunda restringe a linha de distribuição a um elemento puramente indutivo. É importante mencionar que a análise inicial do modelo CC é equivalente a aquela realizado na seção do compensador paralelo ideal, portanto, um ponto chave dessa análise compreende a relação entre o ângulo δ e a potência ativa para manter adequado o nível de tensão no barramento CC. Em outras palavras, o sistema de controle do compensador irá inserir pequenas defasagens angulares entre a sua tensão de saída e a tensão da rede, para que haja um fluxo de potência ativa para dentro do compensador, a fim de carregar o capacitor (CAMPINHOS, 2009).

A Figura 25 mostra o circuito simplificado utilizado nessa análise.

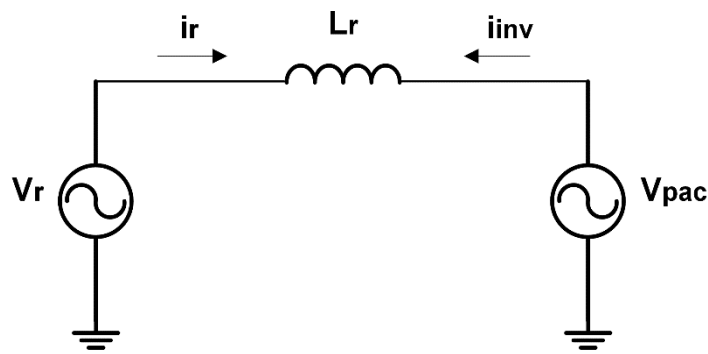


Figura 25: Circuito simplificado para análise do sistema CC.

Partindo da equação (44) e (45), pode-se encontrar a relação da potência aparente em função das tensões e impedância do circuito, expressa em (46), onde ω é a frequência angular da rede

$$\vec{S}_r = \vec{V}_r (\vec{I}_r)^*, \quad (44)$$

$$\vec{I}_r = \frac{\vec{V}_r - \vec{V}_{pac}}{j\omega L_r}, \quad (45)$$

$$\vec{S}_r = \vec{V}_r \left(\frac{\vec{V}_r^* - \vec{V}_{pac}^*}{j\omega L_r^*} \right). \quad (46)$$

As tensões da rede e do ponto de acoplamento podem ser expressas na forma retangular, conforme as equações abaixo

$$\vec{V}_r = V_r \cos(0) + jV_r \text{sen}(0) = V_r, \quad (47)$$

$$\vec{V}_{\text{pac}} = V_{\text{pac}} \cos(\delta) + jV_{\text{pac}} \text{sen}(\delta), \quad (48)$$

$$\vec{V}_r^* = V_r \cos(0) + jV_r \text{sen}(0) = V_r, \quad (49)$$

$$\vec{V}_{\text{pac}}^* = V_{\text{pac}} \cos(\delta) + jV_{\text{pac}} \text{sen}(\delta). \quad (50)$$

Substituindo (47) e (50) em (46), se tem a equação (51), que representa a potência aparente em função dos parâmetros do circuito e do ângulo δ

$$\vec{S}_r = -\frac{V_r V_{\text{pac}} \text{sen}(\delta)}{\omega L_r} + j \frac{V_r^2 - V_r V_{\text{pac}} \cos(\delta)}{\omega L_r}. \quad (51)$$

Da expressão (51) que também mostra a potência ativa e reativa, em suas componentes real e imaginária da potência aparente da rede e ao desprezar a queda de tensão sobre a linha de distribuição, ou seja, considerando $V_r \approx V_{\text{pac}}$, encontra-se as equações simplificadas (52) e (53)

$$\vec{P}_r = -\frac{V_r^2 \text{sen}(\delta)}{\omega L_r}, \quad (52)$$

$$\vec{Q}_r = \frac{V_r^2 [1 - \cos(\delta)]}{\omega L_r}. \quad (53)$$

A expressão da potência ativa da rede em função do ângulo δ não é linear, porém, a função seno pode ser linearizada em torno de $-30^\circ < \delta < 30^\circ$, o que garante uma transferência estável de potência ativa entre o compensador e a rede de distribuição.

Assim ao aproximar $\text{sen}(\delta) \approx \delta$ na equação (52) se obtém (54)

$$P_r = -\frac{V_r^2}{\omega L_r} \delta. \quad (54)$$

Aplicando a Transformada de Laplace em (54), se tem a função de transferência (55), que relaciona a potência ativa fornecida pela rede de distribuição com o ângulo δ da tensão no ponto de acoplamento.

$$\frac{\hat{P}_r(s)}{\hat{\delta}(s)} = -\frac{V_r^2}{\omega L_r}. \quad (55)$$

Entretanto, o objetivo principal dessa seção é obter o modelo que descreve como a tensão do barramento CC é influenciada pela variação do ângulo δ , para isso a equação (56) apresenta a relação entre a energia armazenada no capacitor do barramento CC com sua tensão e capacitância

$$E_c = \frac{1}{2} C V_{cc}^2. \quad (56)$$

E através da potência ativa fornecida pelo inversor pode-se encontrar outra relação para a energia, dada em (57)

$$E_c = - \int P_{inv} dt. \quad (57)$$

Igualando (56) e (57), com a inclusão de pequenas perturbações em torno da potência do inversor e da tensão do capacitor, se tem (58)

$$\frac{1}{2} C (V_{cc} + \hat{v}_{cc}(t))^2 = - \int (P_{inv} + \hat{p}_{inv}(t)) dt. \quad (58)$$

Ao aplicar a Transformada de Laplace em (58), após desprezar os termos CC e os termos de segunda ordem, é possível se obter a função de transferência que relaciona a tensão do barramento CC com a potência ativa do inversor, mostrado em (59)

$$\frac{\hat{v}_{cc}(s)}{\hat{p}_{inv}(s)} = -\frac{1}{C V_{cc} s}. \quad (59)$$

Assumindo que o circuito sob análise na Figura 25 esteja operando a vazio, pode-se afirmar que $P_r = -P_{inv}$, ou seja, toda a potência proveniente da rede é

absorvida pelo compensador com o objetivo de manter o nível de tensão V_{cc} . Portanto, utilizando-se dessa afirmação, pode-se relacionar (55) e (59), resultando na função de transferência que rege o modelo CC apresentada em (60) (ZHANG; REHTANZ; PAL, 2012), (ENDERLE, 2012), (TADROS; KHALDI, 2016)

$$\frac{\hat{v}_{cc}(s)}{\hat{\delta}(s)} = -\frac{V_r^2}{\omega L_r C V_{cc} S}. \quad (60)$$

Note que a planta CC apresenta uma característica do tipo integrador puro, ou puramente capacitivo, indicando que as relações e aproximações realizadas anteriormente estão adequadas, visto que o barramento CC é composto unicamente por capacitores (OGATA, 2010).

6.3 PROJETO DOS CONTROLADORES

Após o levantamento dos modelos CA e CC, é possível se projetar os controladores. E partindo da premissa que o compensador possui duas funções principais, a de controle do nível de tensão no ponto de acoplamento à rede de distribuição, e o controle do nível de tensão em seu barramento CC, dois controladores deverão ser projetados para tal fim.

Porém, no início dessa seção é apresentada uma noção básica do controle por realimentação de estados por alocação de polos, para realizar o amortecimento ativo da ressonância entre o filtro LC e a indutância L_r da rede de distribuição. Logo após é realizada uma síntese básica de algumas estratégias de controle comumente utilizadas em conversores, como o controle *deadbeat*, controle Proporcional Derivativo Integral (PID), controle por histerese, controle repetitivo e de forma mais aprofundada o controlador ressonante, que será a técnica utilizada na malha CA.

Optou-se por conveniência, projetar os controladores das malhas CA e CC diretamente no domínio discreto, portanto, é mostrado também as comparações entre as plantas no domínio do tempo e discretas. Salienta-se que foi utilizada a ferramenta *sisotool* do matlab para os projetos. Adicionalmente, cita-se que um sistema de sincronismo deve fazer parte do compensador, pois é um dos requisitos a conexão com a rede de distribuição. Um sistema de sincronismo do tipo malha de

captura de fase, mais conhecido como PLL (do inglês *Phase Locked Loop*), será empregado junto ao compensador para que esse possa operar na mesma frequência e fase da onda de tensão da rede. Em linhas gerais, o PLL estima a diferença existente entre o ângulo de fase de um sinal de referência, que é a tensão da rede, com um sinal gerado por ele mesmo, com o intuito de levar a diferença a zero por meio de uma malha de controle (SHI; CROW, 2010).

Os parâmetros utilizados para os projetos e simulações são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Parâmetros para simulação dos sistemas

Variável	Valor
Tensão no barramento do PAC (V_{CA})	220 Vrms
Tensão no barramento CC (V_{CC})	420 Vcc
Tensão pico a pico do modulador SPWM ($V_{tri_m\acute{a}x}$)	2 V
Resistência da rede em 13,8 kV	16,32 Ω
Indutância da rede em 13,8 kV	8,69 mH
Resistência da rede em 220 V	0,11 Ω
Indutância da rede em 220 V	86,77 μ H
Potência do transformador	25 kVA
Indutância do transformador	505,16 mH
Indutância do filtro (L_f)	5,4363 mH
Capacitância do filtro (C_f)	3,8789 μ F
Período de amostragem (T_S)	50 μ s

Salienta-se que os valores do filtro LC foram obtidos através das equações apresentadas no anexo A, e da especificação de ondulação máxima de corrente no indutor $\Delta i_{L_f} = 15\%$, e ondulação máxima de tensão no capacitor $\Delta V_{C_f} = 0,5\%$ da tensão de pico da rede.

6.3.1 Controle por Realimentação de Estados

A fim de amortecer ativamente a ressonância LCL do conjunto, filtro LC e indutância L_r da rede, pode-se utilizar da técnica de retroação de estados. Essa

técnica permite alocar os polos de malha fechada do sistema em qualquer posição desejada, através de uma realimentação de estados, utilizando-se de uma matriz de ganhos que deve ser projetada. A condição necessária para aplicação do método é que o sistema deve ser totalmente controlável e as variáveis de estados possam ser medidas ou observadas.

Para se demonstrar de forma básica a finalidade da retroação de estados considere o sistema em espaço de estados em (61) e o sinal de controle em (62), onde a matriz de ganho de realimentação \mathbf{K} possui ordem $1 \times n$, e n é o número de variáveis de estados

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ y(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + Du(t),\end{aligned}\tag{61}$$

$$u(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t).\tag{62}$$

Sabendo-se que a função do sistema regulador é levar os estados para zero, substitui-se (62) em (61), como mostra (63)

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{x}(t).\tag{63}$$

A solução de (63) pode ser representada por (64)

$$\mathbf{x}(t) = e^{(\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})t} \mathbf{x}(0),\tag{64}$$

onde $\mathbf{x}(0)$ é o estado inicial causado por distúrbios externos, e através dos autovalores da matriz $\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}$, avalia-se a estabilidade e tipo de resposta temporal. De maneira prática, para se encontrar a matriz de ganhos \mathbf{K} monta-se uma igualdade, como $\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}$, onde a matriz $\hat{\mathbf{A}}$ contém os autovalores desejados em malha fechada. Se a matriz \mathbf{K} for projetada adequadamente, a matriz $\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K}$ será assintoticamente estável e $\forall \mathbf{x}(0) \neq 0$, possibilitará $\mathbf{x}(t) \rightarrow 0$ na medida que $t \rightarrow 0$ (OGATA, 2010). Essa é a noção básica da retroação de estados por alocação de polos, que complementarmente o sistema de controle CA. O projeto da matriz de ganho de realimentação \mathbf{K} foi realizado através da função *place* do matlab.

Os polos e o zeros de malha fechada do sistema e os polos desejados em malha fechada são apresentados na Tabela 7, e a matriz de realimentação \mathbf{K} na

Tabela 8. Os polos complexos de malha fechada do sistema não amortecido possuem uma frequência de $\omega = 1,42 \times 10^5$ rad/s com um amortecimento próximo de zero, logo foram alocados em posições mais amortecidas, e o polo real foi alocado sobre o zero de malha fechada para reduzir a ordem do sistema. Adicionalmente, cita-se que o controle por realimentação de estados possui a propriedade de amortecer ou aumentar o modo de resposta de uma planta em uma determinada frequência, pois, teoricamente pode-se alocar os polos em qualquer posição do plano complexo, a alocação foi realizada visando-se o maior amortecimento possível sem saturar a ação de controle.

Tabela 7: Polos e zeros para projeto da matriz de ganhos k

Malha Fechada	Localização	ζ	ω (rad/s)
Polos	$-0,71 \pm 142206i$	$4,96 \times 10^{-6}$	$1,42 \times 10^5$
	-109	1	-109
Zero	-111	1	111
	$5120 \pm 4515i$	0,75	6827
Polos desejados	-111	1	111

Tabela 8: Matriz de ganhos k

$$\mathbf{K} = [0,132543 \ 0,131111 \ -0,012985]$$

Para mostrar a efetividade do controle por realimentação de estados com a finalidade de reduzir a ressonância presente na planta do sistema, a Figura 26 apresenta as respostas em frequência do sistema não amortecido e amortecido através da técnica de realimentação de estados, onde verifica-se o total amortecimento da planta.

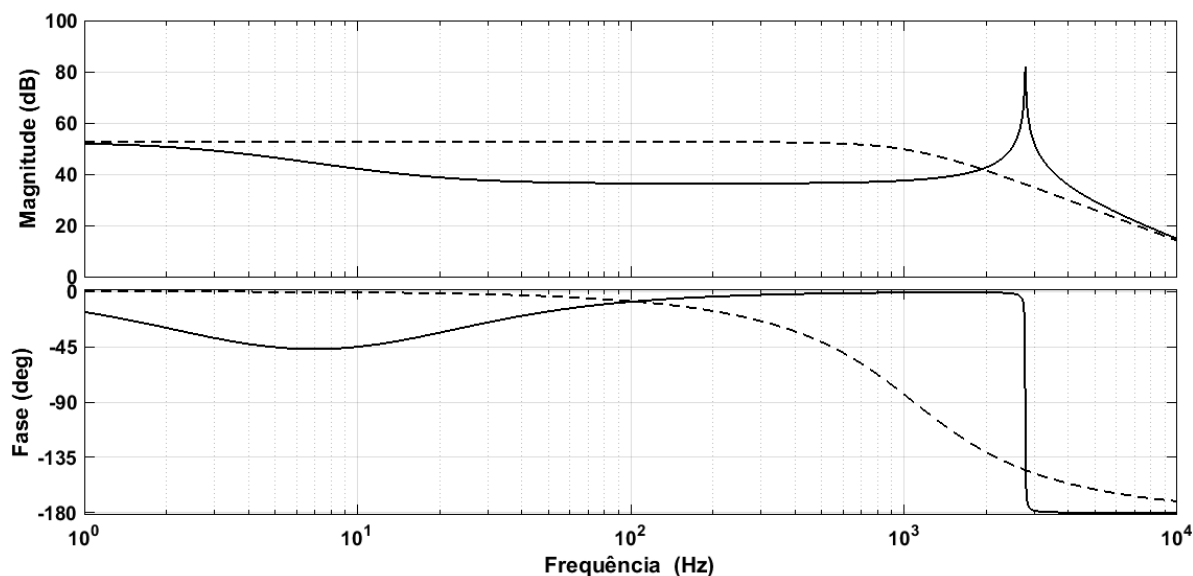


Figura 26: Comparação entre planta amortecida e não amortecida.

6.3.2 Estratégias de Controle

Uma das funções principais do D-Statcom é manter o nível de tensão no ponto de acoplamento dentro dos parâmetros estipulados em norma, independente dos distúrbios causados pelas cargas e também manter o nível de tensão em seu barramento CC próximo do valor de referência.

Portanto, o sistema de controle deve ser capaz de rejeitar distúrbios, e ainda como o sinal de referência da rede de distribuição é senoidal, a estratégia de controle deve garantir erro nulo em regime permanente para esse tipo de entrada.

Entre as estratégias de controle utilizadas para a mesma aplicação, nota-se que na literatura técnica ocorre a combinação entre as seguintes estratégias: controle *deadbeat*, controle Proporcional Derivativo Integral (PID), controle por histerese, controle repetitivo e controle ressonante.

O controle *deadbeat* ou preditivo é de fácil implementação e possui a característica de poder ser aplicado somente em sistemas digitais. O objetivo dessa técnica é fazer com que a variável controlada seja forçada a ser igual a referência no intervalo de tempo do período de amostragem. Possui rápida resposta dinâmica, entretanto, quando as variações paramétricas da planta ultrapassam aquelas modeladas, o desempenho desse controlador é prejudicado e ainda esse

controlador não compensa os harmônicos produzidos pelo conversor (BORUP; ENJETI; BLAABJERG, 2001) (BUSO; FASOLO; MATTAVELLI, 2001).

O PID é um controlador clássico, composto pelas parcelas proporcional, integral e derivativa. Sua ação de controle é gerada a partir dos ganhos ajustáveis aplicados ao erro gerado entre a variável controlada com sua referência. Essa técnica apresenta uma grande variedade de aplicações principalmente na área industrial. Sua estrutura simples facilita o projeto, e ainda apresenta boa resposta dinâmica e robustez a diferentes perfis de carga. Como desvantagem pode-se citar que a ação de controle integral não apresenta erro nulo em regime para uma referência periódica, entretanto, esse obstáculo pode ser superado ao se utilizar das transformações de coordenadas (OGATA, 2010).

O controle por histerese é comumente utilizado para regulação de corrente. A ação de controle para o chaveamento dos interruptores do conversor é gerada a partir da comparação de uma referência e o sinal de realimentação. A frequência de comutação é imposta aos interruptores para manter a corrente dentro de uma faixa de histerese, que é determinada a partir da referência. Portanto, quanto menor for a banda de histerese, maior será a frequência de chaveamento. Como vantagens dessa técnica pode-se citar a simplicidade de implementação, boa resposta dinâmica e apresenta rapidez de resposta superior em comparação a modulação PWM. A desvantagem é a dependência da frequência de chaveamento com a banda de histerese, isso torna o projeto dos filtros mais complexa (STEFANUTTI; MATTAVELLI, 2006) (RAHMAN, *et al.*, 1997).

O controlador repetitivo tem a característica de rastrear uma referência e compensar distúrbios de cargas que se repetem com uma frequência constante. A ação repetitiva desse controlador melhora a resposta em regime, pois reduz os erros periódicos que ocorrem no sistema (RECH, *et al.*, 2003).

Essa metodologia de controle repetitivo e para o controle ressonante, é dividida em duas modalidades, aquela baseada no modelo externo e no modelo interno (ZIMMERMANN, *et al.*, 2014).

No modelo externo o distúrbio é alocado externamente à malha de básica de realimentação, possuindo sintonia adaptativa, resultando em um controle semelhante ao de malha aberta. Portanto, não sendo necessário um elevado ganho em malha aberta o que aumenta a robustez em malha fechada. O projeto e

implementação do modelo externo apresenta maior complexidade em relação ao modelo interno (GNOATTO; SCARMIN; CARATI, 2010).

O controlador baseado no modelo interno propõe que, para um sistema apresentar erro nulo em regime permanente na presença de qualquer referência ou distúrbio de carga, é necessário e suficiente que os modelos desses sinais estejam inclusos no sistema estável em malha fechada (FRANCIS; WONHAM, 1976).

Portanto, para o controle repetitivo, o modelo é um gerador de sinais periódicos incluso no controlador em malha fechada. Deste modo se tem um controlador linear, que facilita a análise e garante uma boa resposta transitória na ordem de alguns ciclos (GNOATTO; SCARMIN; CARATI, 2010). Uma desvantagem desse controlador ocorre quando há a presença de sinais não periódicos na entrada do sistema de controle, como conexão e desconexão de cargas, perturbações aleatórias na rede, ou ainda as comutações de conversores podem fazer com que a ação integradora repetitiva gere sinais de compensação que podem aumentar a taxa de distorção harmônica (ZIMMERMANN, *et al.*, 2014).

O controle ressonante é comumente utilizado em sistemas onde se deseja obter erro nulo em regime permanente e rejeição de distúrbios em sinais senoidais como por exemplo, em conversores, retificadores e sistemas conectados à rede elétrica (LOH, *et al.*, 2003). A vantagem dessa técnica de controle é a fácil implementação, pois sua dinâmica de atuação se assemelha ao controlador Proporcional Integral. Como desvantagem, o controlador ressonante apresenta baixo desempenho para sinais com frequências diferentes daquela para o qual foi projetado (LISERRE; TEODORESCU; BLAABJERG, 2006).

6.3.3 Projeto do Controlador de Tensão CA

Para realizar o projeto do controlador da malha CA diretamente no domínio discreto, há necessidade da discretização da planta, obtidas através de (43) e dos valores presentes na Tabela 6.

A Figura 27 apresenta de forma comparativa a planta contínua e discretizada através do segurador de ordem zero (*Zero Order Hold*), onde pode-se verificar que o modelo discreto apresenta atraso de fase em altas frequências.

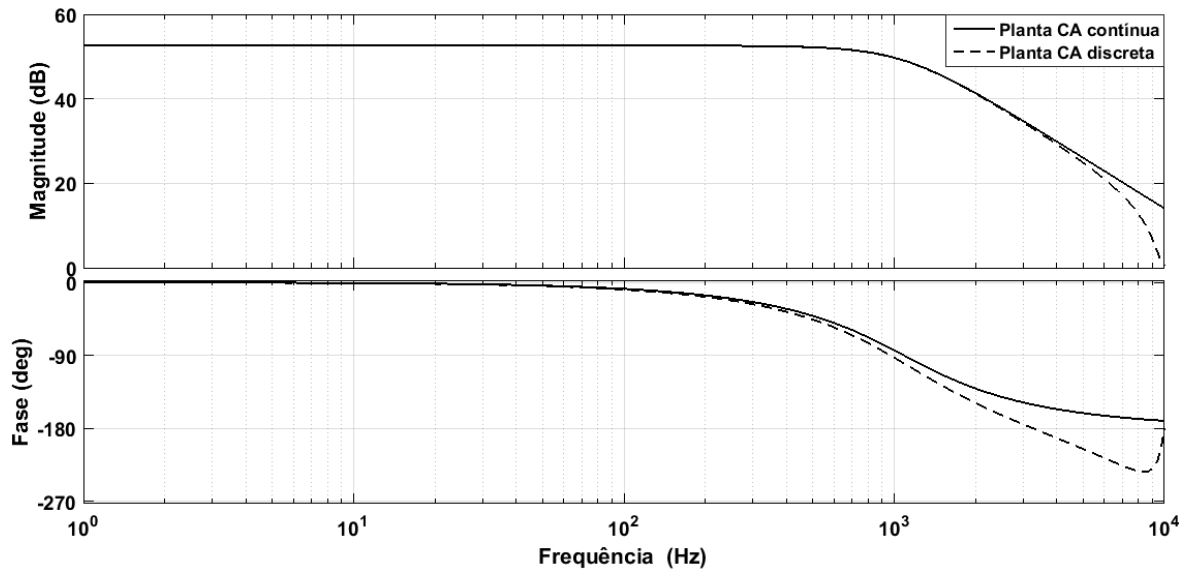


Figura 27: Comparação entre planta contínua e discreta.

Após a obtenção do modelo discreto da planta, o controlador pode ser projetado, e como a referência a ser seguida é do tipo senoidal, o sistema de controle escolhido para a malha CA é o controlador Proporcional Ressonante sintonizado na frequência fundamental da rede, garantindo erro nulo em regime e rejeição de distúrbios nessa frequência, cuja função transferência discreta é apresentada em (65) (ROHTEN, *et al.*, 2016)

$$C_r(z) = k_r \frac{(z^2 - 2e^{-\zeta\omega_{n1}T_s} \cos(\omega_{n1}T_s)z + e^{-2\zeta\omega_{n1}T_s})}{(z^2 - 2\cos(\omega_{n2}T_s)z + 1)}, \quad (65)$$

onde os zeros conjugados do controlador foram alocados em $\omega_{n1} = 80\text{Hz}$ com um coeficiente de amortecimento $\zeta = 0,7$, já os polos são alocados exatamente na frequência do sinal de referência, ou seja, $\omega_{n2} = 60\text{Hz}$.

A Figura 28 mostra a resposta em frequência do controlador ressonante em conjunto com a planta do sistema CA em malha aberta. Para essa situação o controlador projetado é apresentado em (66), onde se obteve uma margem de ganho de 12 dB em aproximadamente 3167 Hz e margem de fase de 45° em 1591 Hz

$$C_r(z) = 0,005409 \frac{(z^2 - 1,9645z + 0,9654)}{(z^2 - 1,9996z + 1)}. \quad (66)$$

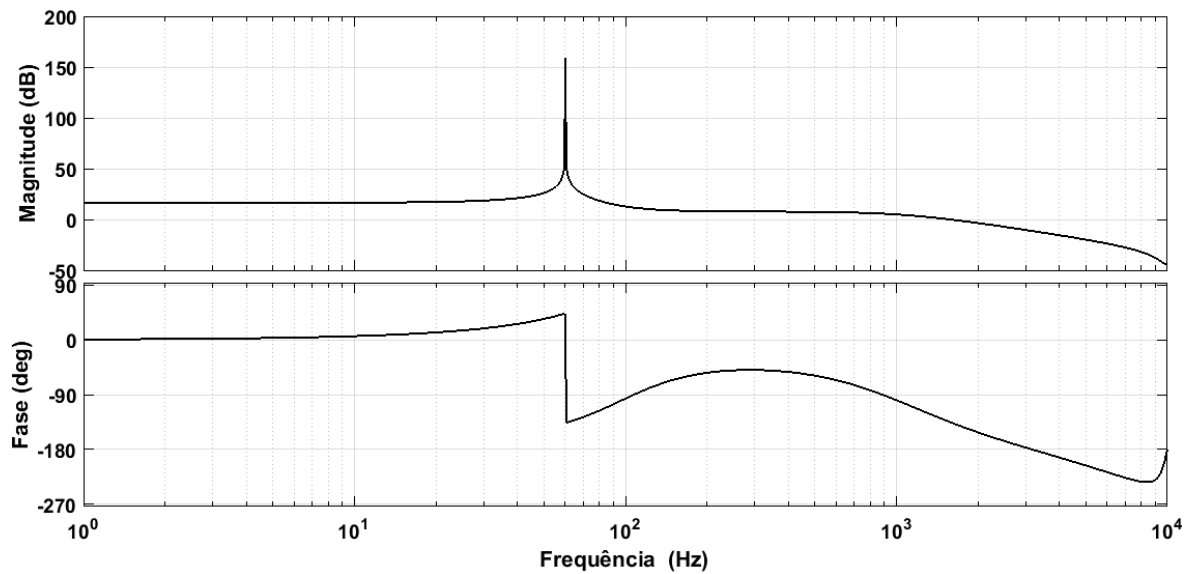


Figura 28: Resposta em frequência do controlador com a planta do sistema CA.

6.3.3.1 Validação do Projeto de Controle da Malha CA

Implementou-se virtualmente os sistemas em estudo no Simulink matlab a fim de validar os projetos dos controladores, dos sistemas de realimentação de estados e do filtro LC.

A Figura 29 apresenta o diagrama de blocos simplificado de simulação para a malha CA, onde mostra o sistema de realimentação de estados responsável pelo amortecimento ativo da planta, bem como controle ressonante em malha fechada com a planta amortecida.

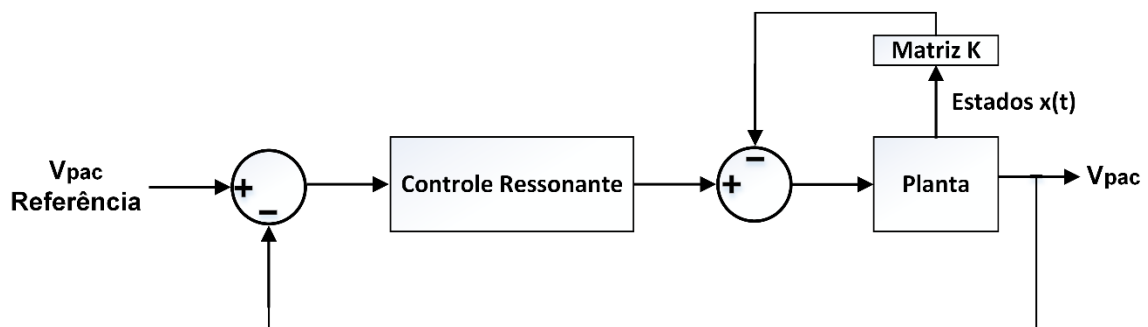


Figura 29: Diagrama de blocos simplificado do sistema de controle CA.

Já na Figura 30, é mostrado o comportamento da tensão no PAC e corrente na rede, quando ocorre uma desregulação de 8% na tensão do PAC. O D-Statcom é configurado para iniciar o processo de controle da tensão por reativos após o primeiro ciclo de onda da rede após sua sincronização. Verifica-se que o compensador eleva rapidamente a tensão no PAC através da compensação de reativos capacitiva, caracterizada pelo adianto da corrente da rede em relação a tensão no PAC.

Um fato importante que deve ser mencionado é que se o início da operação do D-Statcom for sincronizado quando a onda de tensão passa por zero, o nível de distorção apresentado é menor. Outra informação pertinente é que o filtro LC e o sistema de retroação de estados também cumpriram o seu papel, demonstrado pela baixa distorção na onda de tensão.

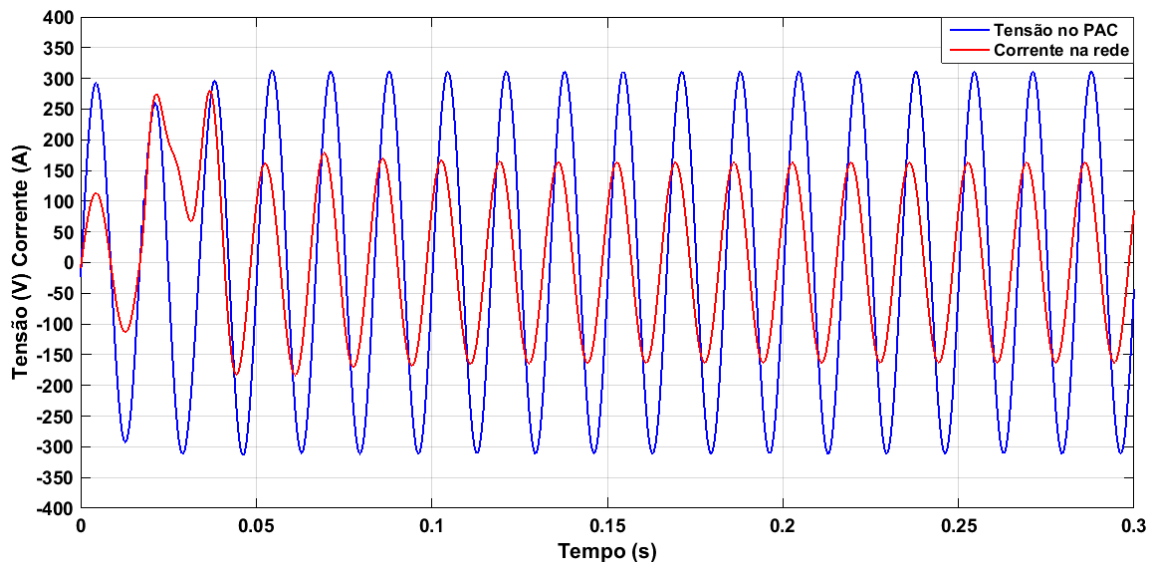


Figura 30: Comportamento da tensão no PAC e corrente na rede para desregulação de 8% com carga resistiva de 1 p.u (D-Statcom sendo acionado após primeiro ciclo de onda).

Na Figura 31 é mostrado, a critério de comparação e melhor visualização, o comportamento da corrente no filtro LC, corrente na rede e tensão no PAC para o sistema com desregulação de 8% da tensão no PAC, onde pode-se observar durante o transitório o sistema de controle adiantando a corrente da rede e também que há um aumento no módulo dessa corrente, fazendo com que a tensão no PAC retorne para seu valor nominal.

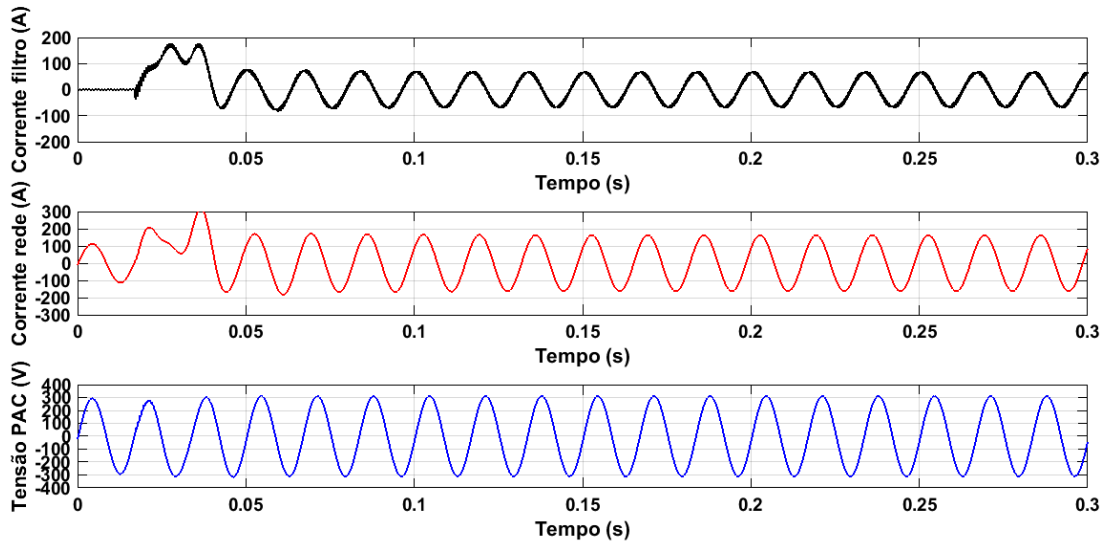


Figura 31: Comportamento da corrente no filtro, corrente na rede e tensão no PAC para desregulação de 8% com carga resistiva de 1 p.u (D-Statcom sendo acionado após primeiro ciclo da tensão).

A potência ativa consumida pela carga e pelo D-Statcom para manter controlado o nível de tensão no barramento CC, quando é imposta uma desregulação de 8% na tensão do PAC, bem como a potência reativa injetada na rede é apresentada na Figura 32. Onde se observa que após o transitório a potência ativa consumida é de aproximadamente 21 kW e a potência reativa injetada na rede para controlar o nível de tensão no PAC é de aproximadamente 8 kVAr, confirmando a previsão do elevado valor de reativos necessários para compensar a queda de tensão nesse tipo de carga.

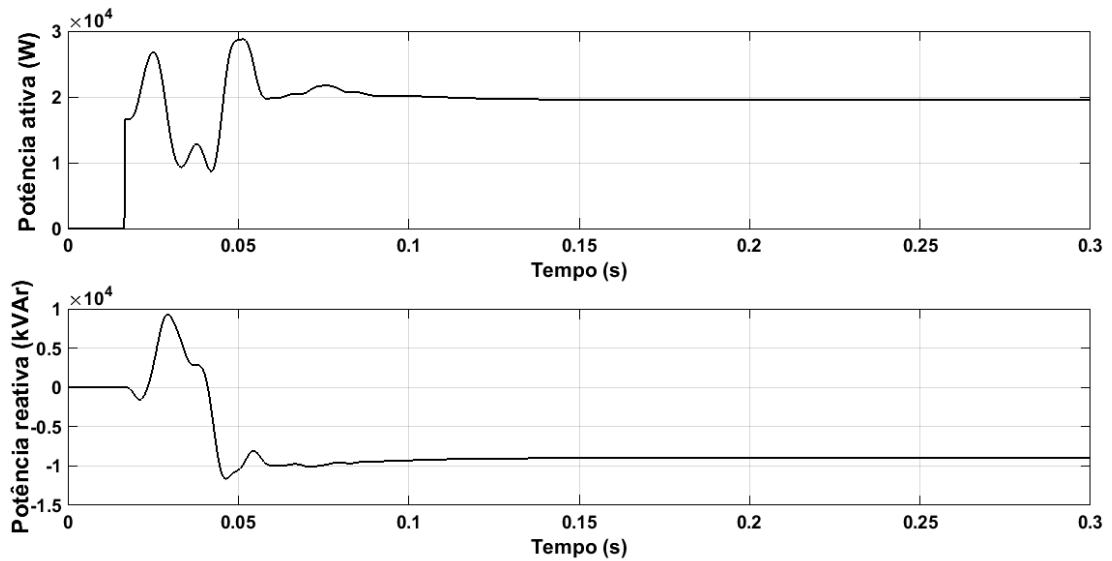


Figura 32: Potência ativa e reativa no sistema para desregulação de tensão no PAC de 8% (D-Statcom sendo acionado em 1,6ms).

6.3.4 Projeto do Controlador de Tensão CC

Para realizar os projetos dos sistemas de controle de tensão CC é necessário a discretização das plantas CC, obtidas a partir do modelo de função de transferência (60) e dos dados apresentados na Tabela 6, sendo assim a Figura 33 mostra a comparação entre a planta contínua e discretizada no tempo através do segurador de ordem zero (*Zero Order Hold*), onde verifica-se que em altas frequências o modelo discreto apresenta grande atraso de fase.

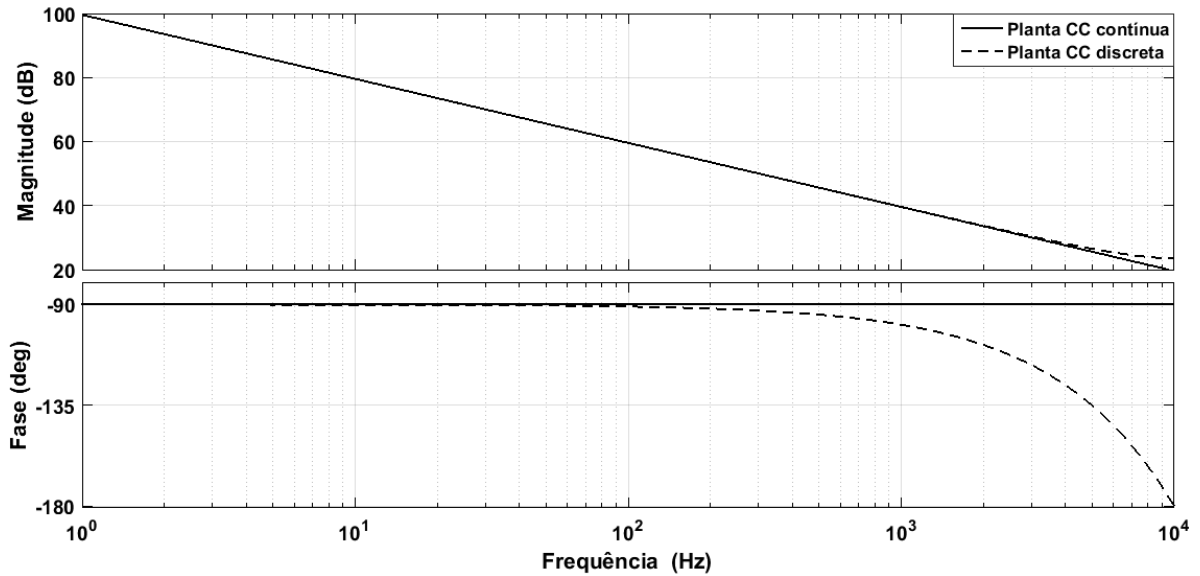


Figura 33: Comparação entre planta CC contínua e discreta.

A função principal desse sistema de controle é manter estável a tensão no capacitor CC, que atua como fonte de energia para o D-Stacom. Como a referência a ser seguida nesse sistema é do tipo constante, um controlador Proporcional Integral (PI) pode ser utilizado para garantir erro nulo em regime permanente.

A equação (67) apresenta a função de transferência discreta desse controlador. Para o projeto, alocou-se o zero do controlador em 5 Hz, para permitir uma frequência de corte de ganho baixa, para evitar a interação entre as malhas de controle CC e CA e ter uma boa margem de fase (YAO, *et al.*, 2017)

$$C_{PI}(z) = k_{PI} \frac{(z - e^{\omega_z T_s})}{(z - 1)}. \quad (67)$$

Além disso, sabe-se que há presença de ondulações com o dobro da frequência fundamental da rede no capacitor CC, devido a bidirecionalidade de energia do conversor em ponte completa, que atua como retificador controlado. Sendo assim, utilizou-se um filtro rejeita faixa, mostrado em (68), sintonizado em 120 Hz para atenuar essa componente (YAO, *et al.*, 2017)

$$C_{RF}(z) = \frac{z^2 - 2 \cos(\omega_n T_s) + 1}{z^2 - 2e^{-\zeta \omega_n T_s} \cos(\omega_n T_s) z + e^{-2\zeta \omega_n T_s}}. \quad (68)$$

A função de transferência do controlador PI em cascata o filtro rejeita faixa é apresentado em (69), e na Figura 34 é mostrada a resposta em frequência desse sistema juntamente com a planta CC, onde pode-se conferir o ganho negativo que o filtro rejeita faixa introduz em 120 Hz. A margem de ganho obtida nesse sistema é de 30 dB em aproximadamente 9995 Hz e margem de fase de 43,8° em 80 Hz

$$C_{PI}(z)C_{RF}(z) = 0,0093414 \frac{(z - 0,9984)(z^2 - 1,9986z + 1)}{(z - 1)(z^2 - 1,9465z + 0,9485)} \quad (69)$$

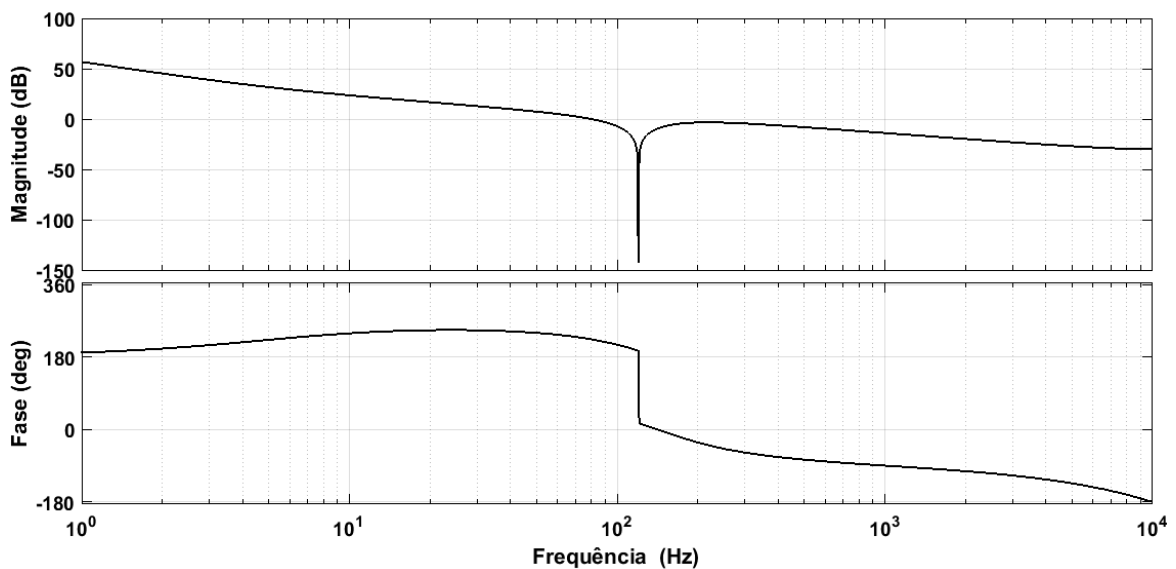


Figura 34: Resposta em frequência do controlador PI em cascata com filtro rejeita faixa e planta CC.

6.3.4.1 Validação do Projeto de Controle da Malha CC

Para validar o projeto de controle da malha CC, também foram necessárias suas implementações em ambiente computacional através da ferramenta Simulink matlab, a Figura 35 apresenta o diagrama de blocos simplificado do sistema simulado. É importante salientar que é apresentado também na Figura 35, o bloco da função senoidal $\text{sen}(\omega t \pm \delta)$, que é elo de ligação entre as malhas CA e CC e responsável pela geração da referência de tensão para a malha

CA. Essa função é alimentada pelo sistema de controle CC, que introduz pequenos incrementos ou decrementos no ângulo δ , para ajustar a tensão no capacitor CC, absorvendo ou injetando potência na rede. A outra parcela ωt é proveniente do PLL, responsável pelo sistema de sincronismo com a tensão no PAC.

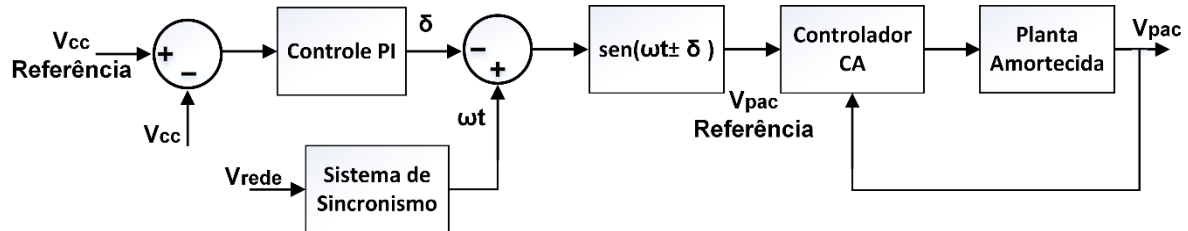


Figura 35: Diagrama de blocos simplificado do sistema de controle CC.

O resultando da simulação do sistema é apresentado no gráfico da Figura 36, onde pode-se verificar o comportamento da tensão no barramento CC e o ângulo de defasagem δ quando há uma desregulação de 8% na tensão do PAC e uma carga resistiva de 1 p.u está conectada nesse barramento.

O compensador é configurado para iniciar sua operação exatamente em 1,6 ms, quando o sistema de controle reconhece a queda de tensão no barramento CC causada pela requisição de potência reativa da malha CA, iniciando assim o processo de defasamento no ângulo δ no sistema de geração de referência, fazendo com que energia ativa da rede seja drenada para o seu interior, a fim de manter regulado o nível de tensão CC em 420 V. Na Figura 36 também pode-se verificar o transitório causado pela perturbação no sistema e sua estabilização, em especial para essa condição de rede e carga o ângulo de defasamento δ converge para aproximadamente 5° .

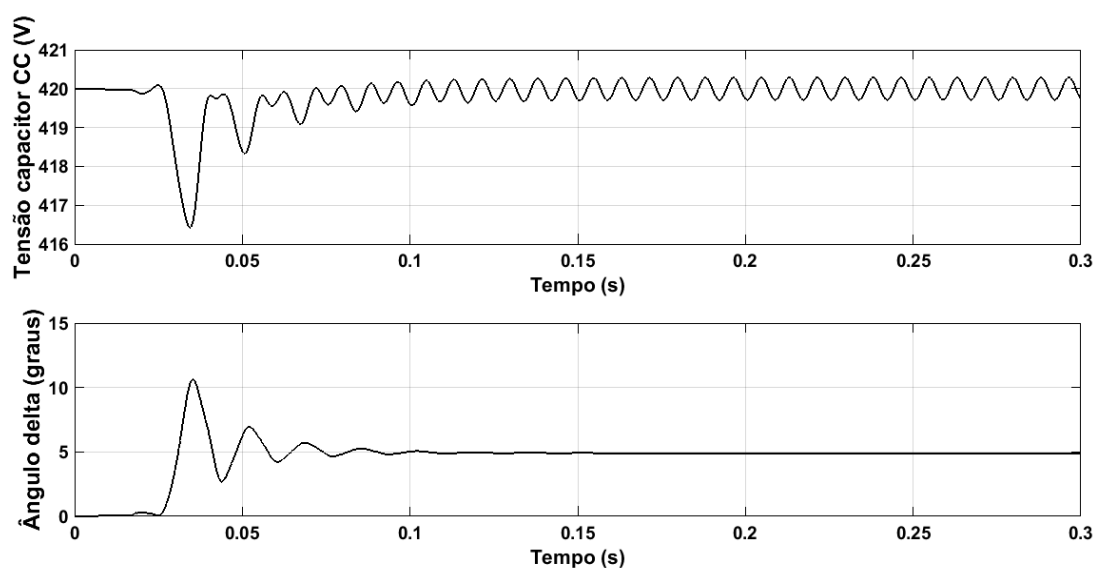


Figura 36: Comportamento da tensão no capacitor CC e ângulo de defasagem δ após a conexão de uma carga resistiva de 1 p.u e desregulação de 8% da tensão no PAC.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse capítulo apresentou a modelagem matemática dos sistemas CA e CC em estudo, a fim de se obter as funções que descrevem seus comportamentos, com o objetivo de realizar os projetos dos controladores. Uma breve síntese é realizada sobre as principais técnicas de controle utilizadas em conversores estáticos. Após isso, partiu-se para o projeto de controle das malhas CA, porém, devido a ressonância apresentada pelo conjunto filtro LC e indutância L_r da rede de distribuição, houve a necessidade de se utilizar de uma técnica de amortecimento, sendo a retroação de estados por alocação de polos a escolhida.

O controlador selecionado para a malha CA é o Proporcional Ressonante, devido as suas características de seguimento da referência periódica com erro nulo em regime e rejeição de distúrbios. A malha CA foi implementada em ambiente virtual, a fim de se validar todos os elementos modelados e também o projeto dos sistemas de controle, onde pôde-se concluir através da simulação, que o sistema de controle direto de tensão corrige rapidamente o declínio de 8% na tensão no PAC através da compensação por reativos.

Por outro lado, na malha de controle CC, utilizou-se de um controlador PI para seguir a referência do tipo constante, em cascata com um filtro rejeita faixa

para reduzir as ondulações com o dobro da frequência da onda fundamental da rede. Também foi apresentado a função seno responsável pelo elo de ligação entre as malhas de controle CA e CC. E finalmente, através da simulação total do sistema, pôde-se conferir o desempenho dos controladores projetados, que responderam de forma coerente ao que era anunciado.

7 CONCLUSÕES

O objetivo principal desse trabalho se concentra no estudo de viabilidade técnica do controle da tensão em uma linha de distribuição rural por compensação de reativos baseando no compensador estático D-Statcom. Para isso, conceitos básicos em relação as variáveis elétricas envolvidas no processo físico foram demonstradas, como as potências ativa, reativa e aparente bem como a apresentação de conceitos referentes as linhas de distribuição curtas e o modelo para esse tipo de linha. Em especial ao compensador ideal de reativos, foram desenvolvidas análises imprescindíveis ao entendimento da troca de energia entre o dispositivo e a rede em função do ângulo de transmissão.

Com a intenção de apresentar a necessidade de dispositivos reguladores de tensão na rede rural, transcorreram algumas análises técnicas do impacto sofrido no nível de tensão no PAC com diferentes tipos de cargas e variações no nível de tensão no início da rede rural, de forma a comparar com aqueles normalizados pelo Prodist, ficando assim evidente a sensibilidade da tensão frente as variações paramétricas.

Tendo em vista a problemática da regulação de tensão, análises matemáticas se fizeram necessárias para modelar o sistema elétrico rural em conjunto com o regulador de tensão. Onde se obteve informações da quantidade de potência reativa processada pelo compensador para manter regulado a tensão, em função dos parâmetros do sistema elétrico. Verificou-se que o dispositivo deve ser dimensionado para possuir capacidade superior a potência das cargas, e também que o sistema de compensação em paralelo consome uma quantidade considerável de energia.

De forma mais específica, foi apresentado as principais partes que integram o D-Statcom, como o sistema conversor em ponte completa e sua estratégia de modulação.

Modelagens dos sistemas físicos foram necessárias para realizar os projetos dos controladores, ou seja, a obtenção das plantas a serem controladas. A planta CA apresentou elevada ressonância devido ao sistema LCL formado pelo filtro LC do conversor e a indutância da linha, fazendo com que um sistema de amortecimento ativo se fizesse útil para poder controlar a planta. O controlador Proporcional Ressonante foi escolhido para as malhas CA pela característica apresentar erro nulo para uma referência do tipo periódica, e rejeição de distúrbios na frequência em que for sintonizado. Na sequência, o controlador PI em conjunto com um filtro rejeita faixa, necessário para atenuar a ondulação com o dobro da frequência fundamental da rede, foi projetado para controlar a malha CC, responsável pela manutenção da tensão no barramento CC.

Após essas etapas, simulações foram apresentadas para avaliar o desempenho dos sistemas projetados para desregulação de 8% na tensão no PAC, onde mostrou-se que o compensador de reativos efetua o controle do nível de tensão com rapidez e baixa distorção na onda de tensão, porém consome uma

quantidade considerável de potência reativa. E por fim, tendo em vista todos os assuntos abordados nesse estudo, desde a composição do sistema rural, a apresentação ideal do regulador de tensão, as demonstrações matemáticas do problema, a aplicação de técnicas de controle nas plantas modeladas e a apresentação dos resultados obtidos, pode-se conferir a viabilidade técnica do uso do D-Stacom em sistemas rurais de baixa tensão sobre esses aspectos, contudo, outras análises de viabilidade podem ser compostas para aprofundar ainda mais o estudo.

REFERÊNCIAS

ABOADLA, Ezzidin H. E.; KHAN, Sheroz; HABAEBI, Mohamed H. **Effect of modulation index of pulse width modulation inverter on Total Harmonic Distortion for Sinusoidal**. 2016. International Conference on Intelligent Systems Engineering (ICISE). Islamabad, 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7475119&isnumber=7475106>>. Acesso em: 01 Outubro 2016.

ABRADEE. **Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica. Redes de Distribuição**. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 17 Junho 2017.

AKAGI, Hirofumi; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. **Generalized Theory of Instantaneous Reactive Power and its Applications**. 1983. 483-490p. Transactions of the IEEE - IEEE., 1983.

AKAGI, Hirofumi; WATANABE, Edson H.; AREDES, Mauricio. **Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning**. New Jersey, USA: John Wiley, 2007.

ANEEL. **Agencia Nacional de Energia Elétrica PRODIST Módulo 1**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/PRODIST%20-%20Módulo%201_Revisao_7.pdf>. Acesso em: 13 Setembro 2015.

ANEEL. **Agencia Nacional de Energia Elétrica PRODIST Módulo 8**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8_Revisão_6_Retificação_1.pdf>. Acesso em: 13 Setembro 2015.

BARBI, Ivo et al. **Projetos de Inversores Monofásicos**. 2007. 110p.[s.n.]. Florianópolis, 2007. Disponível em: <<http://ivobarbi.com/novo/wp-content/uploads/downloads/2015/08/PROJETOS-DE-INVERSORES.pdf>>. Acesso em: 07 Julho 2016.

BARBI, Ivo; MARTINS, Denizar C. **Teoria Fundamental da Eletrônica de Potência**. Florianópolis: Edição dos Autores, 2001.

BORUP, Uffe; ENJETI, Prasad N.; BLAABJERG, Frede. **A new space-vector-based control method for UPS systems powering nonlinear and unbalanced loads**. 2001. 1864-1870p. IEEE Transactions on Industry Applications., 2001. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=968202&isnumber=20886>>. Acesso em: 12 Setembro 2016.

BRASIL. Presidência da República Casa Civil Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Palácio do Planalto**, 1996. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9427compilada.htm>. Acesso em: 13 Setembro 2015.

BUSO, S.; FASOLO, S.; MATTAVELLI, P. **Uninterruptible power supply multiloop control employing digital predictive voltage and current regulators**. 2001. 1846-1854p. IEEE Transactions on Industry Applications., 2001. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=968200&isnumber=20886>>. Acesso em: 12 Setembro 2016.

CAMPINHOS, RAFAEL M. **Estudo comparativo entre o DSTATCOM operando como fonte de corrente controlada e como fonte de tensão controlada**. 2009. 97p. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro - RJ, 2009. Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2009-1/2009062601-2009062601/file>>. Acesso em: 30 Abril 2017.

CAVALIERE, Carlos A. C.; WATANABE, Edson H.; AREDES, Maurício. **Multi-pulse STATCOM Operation Under**. 2002. 567-572p. vol.1 - Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE., 2002. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=985066&isnumber=21228>>. Acesso em: 16 Março 2016.

COPEL. **NTC 910020 - Transformadores de distribuição**. 2016. 7p.[s.n.]. Curitiba, 2016. Disponível em: <[https://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcarquivos.nsf/2B5631324EE27EE203257FF5004FD36A/\\$FILE/NTC%20910020%20Transformadores%20de%20Distribui%C3%A7%C3%A3o.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcarquivos.nsf/2B5631324EE27EE203257FF5004FD36A/$FILE/NTC%20910020%20Transformadores%20de%20Distribui%C3%A7%C3%A3o.pdf)>. Acesso em: 21 Julho 2017.

ENDERLE, Taciana P. **Análise, projeto e implementação de um D-Statcom para redes de distribuição monofásica**. 2012. 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2012. Disponível em: <http://cascavel.ufsm.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=4982>. Acesso em: 10 Setembro 2015.

FARIA, Adriana F. D. **Método para Análise e Avaliação de Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Comercial e do Impacto Ambiental e Social**. 2014. 12p. XXIV Seminário Nacional de Parques Tecnológicos e Incubadoras de Empresas. Belém - PA, 2014. Disponível em: <<http://www.anprotec.org.br/Relata/ArtigosCompletos/ID%2096.pdf>>. Acesso em: 13 Abril 2016.

FRANCIS, B. A.; WONHAM, W. M. **The Internal Model Principle of Control Theory**. 1976. 457-465p. Vol. 12 - Automática. Pergamon Press., 1976. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/profile/Walter_Wonham/publication/223996193_The_internal_model_principle_of_control_theory._Automatica/links/5488b5610cf289302e30b828.pdf>. Acesso em: 15 Setembro 2016.

FUCHS, Rubens D. **Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas**. Itajubá: Livros Técnicos e Científicos, 1977.

GNOATTO, C. L.; SCARMIN, A.; CARATI, E. G. **Repetitive control techniques applied to uninterruptible power supplies**. 2010. 1-6p. Industry Applications (INDUSCON), 2010 9th IEEE/IAS International Conference on, Sao Paulo., 2010. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5740009&isnumber=5739850>>. Acesso em: 15 Setembro 2016.

GRBOVIC, Petar J. **Power Conversion and Energy Storage Applications in Ultra-Capacitors in Power Conversion Systems: Analysis, Modeling and Design in Theory and Practice**. 2014. 78-148p. Wiley-IEEE Press., 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/ebooks/bookPdfWithBanner.jsp?fileName=6671233.pdf&bkn=6670812&pdfType=chapter>>. Acesso em: 2 Outubro 2016.

HINGORANI, N.G. **FACTS Technology - State of the Art, Current Challenges and the Future Prospects**. 2007. 4p. IEEE., 2007. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4275798&isnumber=4275199>>. Acesso em: 14 Setembro 2015.

HINGORANI, Narain G.; GYUGYI, Lazlo. **Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems**. New York, NY: IEEE Press, 2000.

HOCK JÚNIOR, RUBENS T. **REGULADOR DE TENSÃO MÓVEL CONTROLADO EM TENSÃO COM RASTREAMENTO DO PONTO DE MÍNIMA POTÊNCIA APARENTE**. 2015. 197p. Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC. Joinville, 2015. Disponível em: <<http://tede.udesc.br/handle/handle/2082>>. Acesso em: 15 Janeiro 2017.

HOLMES, D. G.; LIPO, Thomas A. **Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice**. USA: John Wiley - IEEE Press, 2003.

IEEE POWER & ENERGY SOCIETY. **IEEE Guide for the Functional Specification of Transmission Static Var Compensators**. 2011. 1-89p. IEEE Std 1031-2011(Revision of IEEE Std 1031-2000)., 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5936078&isnumber=5936077>>. Acesso em: 3 Outubro 2016.

KINDERMANN, Geraldo. **Curto-circuito**. 2ª. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.

KUNDUR, Prabha. **Power System Stability and Control**. [S.l.]: McGraw-Hill, Inc, 1994.

LEDWICH, G.; GHOSH, A. **A flexible DSTATCOM operating in voltage or current control mode**. 2002. 215-224p. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution., 2002. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=998023&isnumber=21531>>. Acesso em: 25 Agosto 2016.

LISERRE, M.; TEODORESCU, R.; BLAABJERG, F. **Multiple harmonics control for three-phase grid converter systems with the use of PI-RES current controller in a rotating frame**. 2006. 836-841p. IEEE Transactions on Power Electronics., 2006. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1629027&isnumber=34172>>. Acesso em: 28 Fevereiro 2017.

LOH, Poh C. et al. **A comparative analysis of multiloop voltage regulation strategies for single and three-phase UPS systems**. 2003. 1176-1185p. IEEE Transactions on Power Electronics., 2003. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1224474&isnumber=27491>>. Acesso em: 07 Fevereiro 2017.

MADHUSUDAN, R.; RAMAMOCHAN RAO, G. **Modeling and simulation of a distribution STATCOM (D-STATCOM) for power quality problems-voltage sag and swell based on Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)**. 2012. 436-441p. International Conference in Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM)., 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6216154&isnumber=6215562>>. Acesso em: 12 Julho 2016.

MAJUMDER, Ritwik. **Reactive Power Compensation in Single-Phase Operation of Microgrid**. 2013. 1403-1416p. IEEE Transactions on Industrial Electronics., 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6179533&isnumber=6361304>>. Acesso em: 11 Janeiro 2017.

MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William P. **Power Electronics: Converters, Applications and Design**. 3ª. ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 2003.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5ª. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2010.

PADILHA, Lucas N. **Análise comparativa de estratégias para regulação de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica na presença de geradores distribuídos**. 2010. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos,

2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-10082010-141601/publico/Lucas.pdf>>. Acesso em: 14 Setembro 2015.

PAULRAJ, T.; SHERIN, I. S.; PRAKASH, M. A. **Mitigation of power loss in transmission and distribution line using STATCOM**. 2016. 432-435p. International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT). Ramanathapuram, 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7831676&isnumber=7831584>>. Acesso em: 23 Janeiro 2017.

PRYSMIAN CABLES&SYSTEMS. **Cabos nus para eletrificação rural**. 2017. 8p.[s.n.], 2017. Disponível em: <www.prysmian.com.br/catalogos/caboseletrificacao.pdf>. Acesso em: 22 Julho 2017.

QIN, Wenping et al. **Reactive Power Aspects in Reliability Assessment of Power Systems**. 2011. 8p. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 26 - IEEE., 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5491275&tag=1>>. Acesso em: 2 Fevereiro 2016.

RAHMAN, K. M. et al. **Variable-band hysteresis current controllers for PWM voltage-source inverters**. 1997. 964-970p. IEEE Transactions on Power Electronics., 1997. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=641494&isnumber=13905>>. Acesso em: 12 Agosto 2016.

RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e aplicações**. São Paulo: Makron, v. XXVI, 1999.

RECH, C. et al. **Comparison of digital control techniques with repetitive integral action for low cost PWM inverters**. 2003. 401-410p. IEEE Transactions on Power Electronics., 2003. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1187459&isnumber=26626>>. Acesso em: 12 Setembro 2016.

RIQUELME, Abnery J. O. **CONTRIBUIÇÕES AO CONTROLE DO STATCOM**. 2007. 132p. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro - RJ, 2007. Disponível em: <www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2007103101.pdf>. Acesso em: 02 Fevereiro 2017.

ROHTEN, J. et al. **Resonant control for power converters connected to weak and micro grid systems with variant frequency**. 2016. 1-6p. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Milwaukee, WI, 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7855400&isnumber=7854636>>. Acesso em: 18 Fevereiro 2017.

RYAN, M. J.; BRUMSICKLE, W. E.; LORENZ, R. D. **Control topology options for single-phase UPS inverters**. 1997. 493-501p. IEEE Transactions on Industry Applications., 1997. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=568015&isnumber=12339>>. Acesso em: 25 Agosto 2016.

SARADVA, P. M. et al. **Application of D-STATCOM to control power flow in distribution line**. 2016. 479-484p. 2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS). Nagercoil, 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7583802&isnumber=7582888>>. Acesso em: 7 Janeiro 2017.

SHI, L.; CROW, M. L. **A novel phase-locked-loop and its application in STATCOM system**. 2010. 1-5p. IEEE. North American Power Symposium (NAPS), Arlington, TX, 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5619968&isnumber=5618939>>. Acesso em: 10 Agosto 2016.

SINGH, B. et al. **Static synchronous compensators (STATCOM): a review**. 2009. 297-324p. 4 - IET Power Electronics., 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5160799&isnumber=5160798>>. Acesso em: 16 Setembro 2015.

STEFANUTTI, W.; MATTAVELLI, P. **Fully digital hysteresis modulation with switching-time prediction**. 2006. 763-769p. IEEE Transactions on Industry Applications., 2006. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1634682&isnumber=34279>>. Acesso em: 13 Setembro 2016.

STEVENSON, William D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2ª. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

TADROS, Amanda; KHALDI, Mohamad. **STATCOM dynamic modeling and integration in power flow**. 2016. 62-66p. IEEE. 3rd International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA), Beirut, 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7560113&isnumber=7560097>>. Acesso em: 7 Junho 2016.

YAO, W. et al. **Design and Analysis of Robust Active Damping for LCL Filters Using Digital Notch Filters**. 2017. 2360-2375p. IEEE Transactions on Power Electronics., 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7467545&isnumber=7779205>>. Acesso em: 12 Março 2017.

ZHANG, Hao et al. **The study on the application of repetitive control in STATCOM**. 2010. 502-506p. Intelligent Computing and Intelligent Systems (ICIS),

2010 IEEE International Conference on, Xiamen., 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5658467&isnumber=5658258>>. Acesso em: 15 Julho 2016.

ZHANG, Xiao-Ping; REHTANZ, Christian; PAL, Bikash. **Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control**. Berlin, DE: Springer, 2012.

ZHONG, Qing-Chang; HORNIK, Tomas. **Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration: Voltage and Current Repetitive Control**. 1ª. ed. [S.I.]: Wiley-IEEE Press, 2012.

ZIMANN, Felipe J.; MEZARROBA, Marcello; BATSCHAUER, Alessandro L. **istema de Controle de Potência Ativa e Reativa na Regulação de Baixa Tensão em Redes de Distribuição**. 2016. 6p.Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC. Joinville, 2016. Disponível em: <https://sites.google.com/a/dee.ufcg.edu.br/gse/anais-xi-cbqee/139585_1.pdf?attredirects=0>. Acesso em: 21 Janeiro 2017.

ZIMMERMANN, Cristiano P. et al. **Controle repetitivo adaptativo com controle de lógica de reinicialização para filtros ativos de potência**. 2014. 3689-3696p.Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática. Belo Horizonte, MG, 2014. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/anais/cba/2014/PDF/1569935603.pdf>>. Acesso em: 15 Setembro 2016.

ANEXOS

Anexo A - Projeto do Filtro LC para Modulação SPWM Unipolar

O anexo A aborda o projeto do filtro indutivo capacitivo, a fim de atenuar componentes harmônicas presentes na saída do conversor.

Deve-se ressaltar que na modulação SPWM a frequência imposta ao filtro é o dobro da frequência de comutação dos interruptores, portanto, esse é um dado relevante no projeto do filtro.

O projeto visa se obter os valores de indutância e capacitância a partir da especificação de ondulação máxima de corrente no indutor e ondulação máxima de tensão no capacitor.

Projeto do Valor de Indutância

A partir da Figura 37 e considerando a tensão de saída senoidal com valor de pico V_{op} , se obtém as equações (70) e (71), que mostram a tensão sobre o indutor durante o semiciclo positivo da referência de tensão nos intervalos de tempo Δt_1 e Δt_2

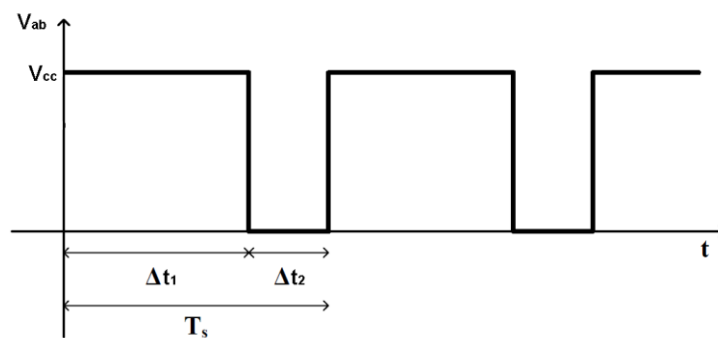


Figura 37: Tensão V_{ab} entre os braços do conversor para modulação SPWM.

$$L_f \frac{di_{L_f}(t)}{dt} = V_{cc} - V_{op} \text{sen}(w_r t), \quad (70)$$

$$L_f \frac{di_{L_f}(t)}{dt} = -V_{op} \text{sen}(w_r t), \quad (71)$$

onde w_r é a frequência angular da rede.

Considerando a frequência de comutação muito alta, pode-se simplificar as equações (70) e (71), obtendo as equações (72) e (73), onde Δi_{Lf} é o valor pico a pico da ondulação de corrente no indutor

$$L_f \frac{\Delta i_{Lf}(t)}{\Delta t_1} = V_{cc} - V_{op} \text{sen}(w_r t), \quad (72)$$

$$L_f \frac{\Delta i_{Lf}(t)}{\Delta t_2} = -V_{op} \text{sen}(w_r t). \quad (73)$$

Isolando os termos Δt_1 e Δt_2 nas equações (72) e (73), temos as expressões (74) e (75)

$$\Delta t_1 = L_f \frac{\Delta i_{Lf}}{V_{cc} - V_{op} \text{sen}(w_r t)}, \quad (74)$$

$$\Delta t_2 = L_f \frac{\Delta i_{Lf}}{V_{op} \text{sen}(w_r t)}. \quad (75)$$

Com o auxílio da equação (76), pode-se obter a relação entre a indutância do filtro com a ondulação de corrente no indutor em função da frequência de comutação, expressa na equação (77)

$$T_s = \Delta t_1 + \Delta t_2, \quad (76)$$

$$\Delta i_{Lf}(w_r t) = \frac{T_s (V_{cc} - V_{op} |\text{sen}(w_r t)|) (V_{op} |\text{sen}(w_r t)|)}{L_f 2V_{cc}}. \quad (77)$$

A equação (77) é equivalente para o semiciclo negativo da onda de referência. E a curva de ondulação de corrente em função do argumento da onda referência $w_r t$, representada na Figura 38.

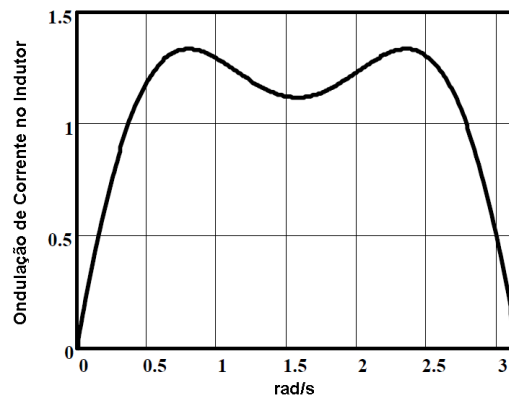


Figura 38: Curva de ondulação de corrente em ampères.

Da Figura 38 pode-se constatar que o valor máximo de ondulação de corrente se encontra em $\omega_r t = \pi/4$. Assim é possível se obter o valor da indutância para uma determinada ondulação de corrente, conforme expresso na equação (78) (BARBI, *et al.*, 2007)

$$L_f = \frac{\pi V_{op} (\sqrt{2} V_{cc_{m\acute{a}x}} - V_{op})}{\Delta i_{L_f_{m\acute{a}x}} 2 V_{cc_{m\acute{a}x}} \omega_s} \quad (78)$$

Projeto do Valor de Capacitância

Para especificação do valor de capacitância é necessário levar em consideração a ondulação de corrente no indutor, pois esse parâmetro é responsável pela ondulação de tensão no capacitor. Sendo assim, parte-se da Figura 65 onde mostra a variação de corrente e tensão no capacitor, em um dado instante em alta frequência. A variação de tensão pode ser relacionada com a quantidade de carga (q) contida na porção positiva de $i_{cf}(t)$, conforme mostra a equação (79), e também pelo valor da área dessa porção, expressa pela equação (80).

Considera-se nessa análise que a componente contínua em baixa frequência da corrente do indutor passa pela carga, enquanto as componentes em altas frequências passam pelo capacitor

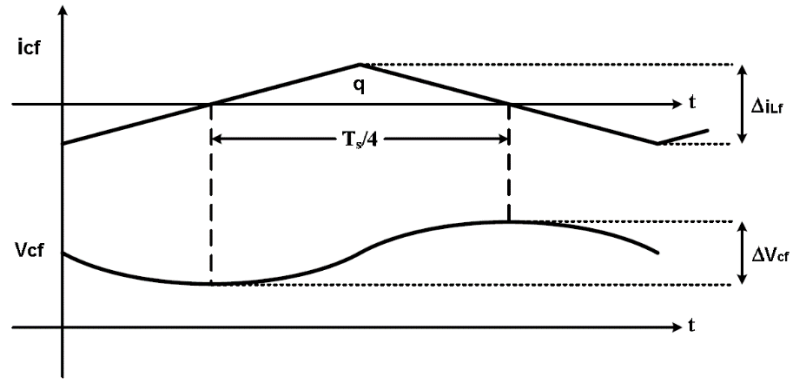


Figura 39: Corrente e tensão no capacitor.

$$q = C_f \Delta V_{Cf}, \quad (79)$$

$$q = \frac{1}{2} \frac{\Delta i_{Lf} T_s}{2} \frac{T_s}{4}. \quad (80)$$

Igualando (79) e (80), pode-se obter a equação (81) para a variação de tensão no capacitor

$$\Delta V_{Cf} = \frac{\Delta i_{Lf} T_s}{16 C_f}. \quad (81)$$

Substituindo (77) em (81), se tem a relação descrita pela equação (82), onde a variação de tensão no capacitor está em função dos parâmetros do circuito

$$\Delta V_{Cf}(w_r t) = \frac{(V_{cc} - V_{op} \text{sen}(w_r t))(V_{op} \text{sen}(w_r t) T_s^2)}{32 L_f C_f V_{cc}}. \quad (82)$$

A máxima ondulação de tensão no capacitor em função de $w_r t$ é encontrada em $w_r t = \pi/4$, conforme pode-se verificar pela Figura 40.

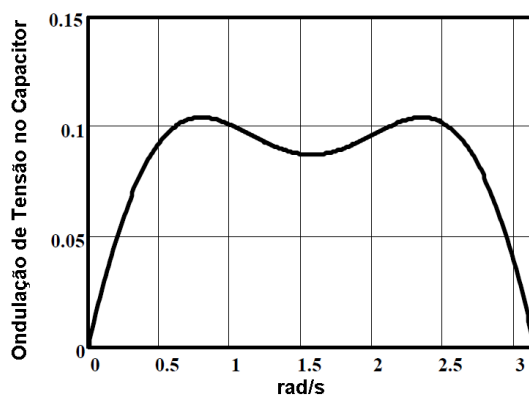


Figura 40: Curva de ondulação de tensão em volts.

Assim é possível se obter o valor de capacitância para uma dada especificação de ondulação máxima de tensão, conforme mostra a equação (83) (BARBI, *et al.*, 2007)

$$C_f = \frac{\pi^2 V_{op} (\sqrt{2} V_{cc_{m\acute{a}x}} - V_{op})}{16 L_f \Delta V_{Cf_{m\acute{a}x}} V_{cc_{m\acute{a}x}} \omega_s^2} \quad (83)$$