

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
ENGENHARIA ELÉTRICA

LEANDRO OLIVEIRA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC :
REGULADOR DE TENSÃO “LINE-INTERACTIVE” COM PROCESSAMENTO
PARALELO PARA UTILIZAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

JOINVILLE, SC

2014

LEANDRO OLIVEIRA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC:

**REGULADOR DE TENSÃO “LINE-INTERACTIVE” COM PROCESSAMENTO
PARALELO PARA UTILIZAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA**

Trabalho de conclusão de curso sobre o desenvolvimento de um regulador de tensão “Line-Interactive” com processamento paralelo para utilização em redes de distribuição de energia.

Orientador: Marcello Mezaroba

JOINVILLE, SC

2014

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à minha família pelo apoio durante o período de realização do trabalho e pela compreensão às minhas ausências em alguns momentos familiares.

Agradeço ao Professor Doutor Marcello Mezaroba pelo conhecimento transmitido, pelo incentivo e pela orientação que permitiram a realização deste trabalho.

Especialmente aos mestrandos que contribuíram muito com discussões, opiniões, conselhos e pelas diversas vezes que se prontificaram em ajudar disponibilizando seu tempo para que este trabalho pudesse ser concluído.

À Supplier Indústria e Comércio de Eletro-Eletrônicos LTDA pela oportunidade de realização de estágio e pela flexibilização dos horários de trabalho que contribuiu para o término deste trabalho e aos colegas que lá trabalham por compartilharem conhecimento que foi de grande importância não só para a realização do TCC mas também para minha carreira profissional.

À Universidade do Estado de Santa Catarina por disponibilizar infraestrutura para a realização do trabalho.

E aos amigos que de uma forma ou de outra contribuíram dando seu apoio durante o período de realização do TCC.

RESUMO

OLIVEIRA, Leandro. **Regulador de Tensão “Line-Interactive” com Processamento Paralelo para Utilização em Redes de Distribuição de Energia.**

TCC (Graduação em Engenharia Elétrica – Área: Automação de Sistemas) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica, Joinville, 2014

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um conversor capaz de regular a tensão em redes de distribuição de energia elétrica. Este conversor deverá corrigir as tensões que estão classificadas como críticas ou precárias, mantendo-as em níveis adequados, esta regulação se dará pela injeção de energia reativa no ponto de acoplamento de carga.

O regulador é concebido por um inversor monofásico meia-ponte conectado à rede e controlado em tensão. Para controlar a tensão do barramento, a tensão no ponto de acoplamento de carga é defasada até que não haja processamento de energia ativa, impondo que a tensão do barramento permaneça com a tensão estabelecida em projeto e o regulador processe apenas energia reativa.

Foi implementado um regulador capaz de processar até 1.500 VA e os resultados obtidos demonstram que o regulador é capaz de corrigir a tensão do ponto de acoplamento de carga sem que haja registro de tensão inadequada.

Palavras chave: Qualidade de energia, regulação de tensão, conversores estáticos de energia.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Leandro. **Line-Interactive Voltage Regulator with Parallel Processing for Use in Power Distribution Networks.** TCC (Electrical Engineering Undergraduate - Area: Automation Systems) - University of the State of Santa Catarina. Degree in Electrical Engineering, Joinville, 2014

This paper proposes the development of a converter capable of regulating the voltage distribution networks for electricity. This converter should correct voltages that are classified as critical or poor, keeping them at adequate levels, this adjustment will be made by injecting reactive power at the point of coupling load.

The regulator is designed for a single-phase half-bridge inverter connected to the network and voltage controlled. To control the bus voltage, the voltage at the point of coupling load is lagged until no processing active power, requiring that the bus voltage remains with the voltage set at project and the regulator process only reactive power.

A regulator capable of handling up to 1500 VA was implemented and the results show that the regulator is capable of correcting the voltage of the coupling point load without any improper registration voltage.

Key-words: Power quality, voltage regulation, static power converters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Topologia do regulador de tensão.....	17
Figura 2 Tensão e corrente na saída do conversor.....	18
Figura 3 Etapas de operação para o 1º setor.....	19
Figura 4 Etapas de operação para o 2º setor.....	20
Figura 5 Esforços nos semicondutores.....	21
Figura 6 Sistema analisado.....	22
Figura 7 Variação do ângulo de defasagem com o fator de potência e a potência aparente: (a) $V_{pac}=0,92$ pu (b) $V_{pac}=1,05$ pu.....	24
Figura 8 Energia reativa processada pelo inversor em função o fator de potência e a potência aparente: (a) $V_{pac}=0,92$ pu (b) $V_{pac}=1,05$ pu.....	26
Figura 9 Corrente média normalizada nos interruptores.....	28
Figura 10 Corrente eficaz normalizada nos interruptores.....	28
Figura 11 Corrente média nos diodos.....	29
Figura 12 Corrente eficaz nos diodos.....	30
Figura 13 Tensão no indutor.....	30
Figura 14 Variação da razão cíclica em função de ωt e da razão de modulação.....	31
Figura 15 Arranjo do filtro de alta frequência.....	35
Figura 16 Circuito analisado para projetar o filtro de alta frequência do inversor.....	35
Figura 17 Circuito considerado para o projeto do filtro de saída.....	35
Figura 18 Diagrama de Bode do Filtro LC.....	37
Figura 19 Diagrama de blocos completo do sistema de controle.....	39
Figura 20 Circuito do inversor.....	40
Figura 21 Tensão instantânea no ponto A.....	40
Figura 22 Circuito simplificado.....	41
Figura 23 Circuito simplificado.....	46
Figura 24 Circuito para encontrar corrente no indutor do filtro.....	46
Figura 25 Diagrama de bode do módulo de G_{dif} e G_{dif_s}	47
Figura 26 Tensão diferencial dos modelos físico e matemático.....	48
Figura 27 Portadora e sinal de baixa frequência.....	48
Figura 28 Sensor de tensão.....	49
Figura 29 Malha de controle da tensão no PAC.....	51
Figura 30 Função de transferência de laço aberto do PAC sem o compensador.....	52

Figura 31 Resposta em frequência do compensador e FTLA compensada e não compensada.....	54
Figura 32 Controlador analógico da tensão no PAC	55
Figura 33 Malha de controle da tensão total do barramento CC	56
Figura 34 Função de transferência de laço aberto da tensão total do barramento sem compensador.....	57
Figura 35 Resposta em frequência do compensador e FTLA compensada e não compensada.....	59
Figura 36 Controlador analógico da tensão total do barramento.....	59
Figura 37 Malha de controle da tensão diferencial do barramento CC	60
Figura 38 Função de transferência de laço aberto da tensão diferencial do barramento sem compensador.....	61
Figura 39 Resposta em frequência do compensador e FTLA compensada e não compensada.....	63
Figura 40 Diagrama unifilar do sistema simulado.....	65
Figura 41 Tensão no PAC com carga resistiva sem compensação	66
Figura 42 Tensão no PAC com carga indutiva sem compensação	67
Figura 43 Estrutura de potência simulada.....	68
Figura 44 Rede de distribuição e geração de referências simuladas	68
Figura 45 Controlador da tensão no PAC.....	69
Figura 46 Controlador da tensão total do barramento	69
Figura 47 Controlador da tensão diferencial do barramento	69
Figura 48 Tensão no PAC e corrente na saída do conversor antes e depois da compensação para carga resistiva.....	70
Figura 49 Tensão no PAC e corrente na saída do regulador em regime	71
Figura 50 Tensão total do barramento	71
Figura 51 Ângulo de defasagem do PAC	72
Figura 52 Tensão eficaz do PAC para carga resistiva	72
Figura 53 Tensão no PAC e corrente na saída do conversor antes e depois da compensação para carga indutiva.....	73
Figura 54 Tensão no PAC e corrente na saída do regulador em regime para carga RL.....	74
Figura 55 Tensão no barramento para carga RL	74
Figura 56 Ângulo de defasagem da tensão do PAC com carga RL	75

Figura 57 tensão eficaz no PAC para carga indutiva	75
Figura 58 Protótipo implementado	78
Figura 59 Driver utilizado para acionamento dos interruptores	79
Figura 60 Placa de comando.....	79
Figura 61 Placa de controle da tensão total do barramento CC.....	80
Figura 62 Módulo digital utilizado	80
Figura 63 Esquemático simplificado da fonte auxiliar.....	81
Figura 64 Fonte auxiliar.....	81
Figura 65 Diagrama unifilar do sistema implementados.....	82
Figura 66 Tensão e corrente na rede e tensão no PAC (100V/div, 10A/div 5ms/div)	83
Figura 67 Tensão no PAC e corrente no conversor (100V/div, 5A/div, 5ms/div).....	84
Figura 68 Tensão e corrente na rede (100 V/div, 10 A/div, 5 ms/div).....	84
Figura 69 Tensão e corrente na carga após a compensação (100 V/div, 10 A/div, 5 ms/div).....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1KV (220/127)	13
Tabela 2 Limites de distorção da corrente para sistemas de distribuição (120 V a 69 kV).....	14
Tabela 3 Parâmetros do inversor	36
Tabela 4 Parâmetros do projeto dos controladores.....	51
Tabela 5 Parâmetros da simulação	65
Tabela 6 Cargas simuladas.....	66
Tabela 7 Tensões no PAC sem compensação	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	NORMAS PARA QUALIDADE DE ENERGIA	12
1.2	SOLUÇÕES PARA REGULAÇÃO DE TENSÃO	14
1.3	APRESENTAÇÃO DO CONVERSOR	16
2	ANÁLISE QUALITATIVA	17
3	ANÁLISE QUANTITATIVA	22
3.1	ÂNGULO DE DEFASAGEM E POTÊNCIA REATIVA PROCESSADA PELO INVERSOR	22
3.2	ESFORÇOS NOS SEMICONDUTORES	27
3.3	DEFINIÇÃO DA RAZÃO CÍCLICA	30
3.4	CÁLCULO DA INDUTÂNCIA MÍNIMA DE FILTRAGEM	31
3.5	CÁLCULO DA CAPACITÂNCIA MÍNIMA DE BARRAMENTO	32
3.6	CÁLCULO DO FILTRO DE ALTA FREQUÊNCIA	34
3.7	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	37
4	MODELAGEM E CONTROLE	38
4.1	MODELAGEM MATEMÁTICA	39
4.1.1	Modelo da planta de tensão CA	40
4.1.2	Modelo da planta de tensão total do barramento CC	43
4.1.3	Modelo da planta de tensão diferencial do barramento CC	45
4.1.4	Validação do modelo da planta de tensão diferencial do barramento CC	47
4.1.5	Modelo do modulador PWM	48
4.1.6	Modelo do sensor de tensão	49
4.2	PROJETO DOS CONTROLADORES	50
4.2.1	Projeto do controlador da tensão no PAC	51
4.2.2	Projeto do controlador da tensão total do barramento CC	55
4.2.3	Projeto do controlador da tensão diferencial do barramento CC	60
5	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	64
5.1	ESTRUTURA SIMULADA	64
5.1.1	Especificação da queda de tensão	66
5.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO REGULADOR DE TENSÃO	67
5.3	CONCLUSÕES GERAIS DO CAPÍTULO	76
6	IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	77

6.1	CIRCUITOS ELETRÔNICOS IMPLEMENTADOS	77
6.1.1	Módulo de potência.....	78
6.1.2	Driver	78
6.1.3	Comando do regulador	79
6.1.4	Controle da tensão diferencial do barramento CC	80
6.1.5	Módulo digital	80
6.1.6	Fonte auxiliar	81
6.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	81
7	CONCLUSÕES GERAIS.....	86
	REFERÊNCIAS.....	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 NORMAS PARA QUALIDADE DE ENERGIA

A energia elétrica é um insumo básico para o país e, como tal, verifica-se a necessidade de haver a regulamentação da qualidade da energia elétrica e dos serviços prestados pelas concessionárias. Visando esta regulamentação, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com a participação dos agentes de distribuição e de outras entidades e associações do setor elétrico nacional criou os Procedimentos de Distribuição (PRODIST), que são documentos que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

O PRODIST contém nove módulos e o módulo 8 tem como objetivo estabelecer os procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica – QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado.

No que tange a qualidade do produto, o módulo 8 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, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE.

Em relação à qualidade do serviço, o módulo 8 estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.

O objetivo do presente trabalho está relacionado com a qualidade do serviço de fornecimento de energia, mais especificamente, a amplitude da tensão em regime permanente e as harmônicas de corrente. [1]

Fazendo um estudo do módulo 8 do PRODIST é possível constatar que a distribuidora de energia elétrica precisa realizar alguns procedimentos para corrigir o problema na qualidade de tensão do consumidor reclamante. O módulo 8 determina que a distribuidora deve fazer uma inspeção técnica para verificar se a reclamação procede, procedendo a reclamação, a distribuidora deve instalar um equipamento de medição no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) para apurar os indicadores de tensão precária e crítica. Estes indicadores são chamados de DRP (duração relativa da transgressão de tensão precária) e DRC (duração relativa da transgressão de

tensão crítica). As faixas de tensão adequada, crítica e precária são definidos de acordo com o nível de tensão de referência ou fornecimento. A Tabela 1 demonstra as faixas de tensão para a tensão de fornecimento de 220V/127V.

Tabela 1 Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1KV (220/127)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa da Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(201 \leq TL \leq 231) / (116 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(189 \leq TL < 201 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) / (109 \leq TL < 116 \text{ ou } 133 < TL \leq 140)$
Crítica	$(TL < 189 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 109 \text{ ou } TL > 140)$

Fonte: ANEEL – PRODIST – Módulo 8 (2012)

Para apurar os indicadores de qualidade de tensão (DRP e DRC), o módulo 8 do PRODIST determina que seja feito um conjunto de leituras que deve compreender o registro de 1.008 leituras válidas, obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos, devendo ser expurgados registros de valores referentes à interrupção de energia elétrica, afundamentos ou elevações momentâneas de tensão e substituídos por valores válidos. A partir dos resultados obtidos com os 1.008 registros, devem ser utilizadas as seguintes fórmulas para o cálculo de DRP e DRC:

$$DRC = \frac{n_{lc}}{1.008} \times 100[\%] \quad (1)$$

$$DRP = \frac{n_{lp}}{1.008} \times 100[\%] \quad (2)$$

sendo n_{lc} e n_{lp} o maior número de leituras, entre as fases, de tensão crítica e precária respectivamente. O módulo 8 ainda determina que a duração relativa da transgressão máxima de tensão precária (DRP_M) seja de 3% e que a duração relativa da transgressão máxima de tensão crítica (DRC_M) seja de 0,5%.

Com o DRC e o DRP apurados deve-se observar se ultrapassam os valores máximos, se o DRP ultrapassar o DRP_M a distribuidora deverá adotar procedimentos para regularizar a tensão de atendimento em até noventa dias, sendo o DRC que ultrapassa o DRC_M a distribuidora deverá adotar medidas que regularizem a tensão de atendimento em até 15 dias.

Transcorridos os prazos normais para a regularização da não conformidade, e não ter ocorrido a regularização dos níveis de tensão nos prazos acima descritos, a

distribuidora deve compensar as unidades consumidoras que estiveram submetidas a uma tensão de atendimento com transgressão dos indicadores DRP ou DRC.

Para determinar os limites de corrente foi utilizada, como parâmetro para este trabalho, a norma IEEE 519-1992, que tem por objetivo estabelecer metas para projetos de sistemas elétricos que contenham cargas lineares e não-lineares, determina também como devem ser as formas de onda de tensão e corrente PAC [2]. A norma ainda apresenta os principais causadores de harmônicos, os efeitos dos harmônicos em diferentes tipos de carga e limites na distorção de corrente e tensão. Os limites de distorção recomendados pela IEE519-1992 visam um índice chamado Distorção Total da Demanda (TDD), que é a distorção harmônica da corrente em porcentagem da máxima corrente de carga demandada (em um intervalo de 15min a 30min).

A Tabela 2 lista os limites de harmônicos de corrente de acordo com a tensão e com a carga do consumidor. O parâmetro I_{sh}/I_L é a razão entre a corrente de curto circuito disponível no PAC pela fundamental da máxima corrente de carga demandada

Tabela 2 Limites de distorção da corrente para sistemas de distribuição (120 V a 69 kV).

Valores máximos dos harmônicos de corrente em percentual de I_L

Ordem dos harmônicos (harmônicos ímpares)						
I_{sh}/I_L	<11	11<h≤17	17<h≤23	23<h≤35	35≤h	TDD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,5	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	2,0	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	0,7	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Fonte: IEEE Std. 519 (1992)

1.2 SOLUÇÕES PARA REGULAÇÃO DE TENSÃO

Dispositivos para regular a tensão e controlar o fluxo de potência são chamados de FACTS (Flexible AC Transmission Systems) e receberam este nome após a publicação de Hingorani em 1988 que propôs o uso extensivo da eletrônica de potência para o controle de potência. O desenvolvimento de dispositivos FACTS se deve ao fato da complexidade do planejamento e operação de sistemas de potência que possuem problemas. Esses problemas poderiam ser solucionados, em

sistemas de pequeno porte, pelo superdimensionamento dos projetos, porém os custos e as restrições ambientais tornaram impossíveis estas práticas e dificultou a construção de novas unidades geradoras e linhas de transmissão. Porém, a demanda pelo uso da energia elétrica só tem aumentado ao longo dos anos, tornando necessário o desenvolvimento de novos dispositivos FACTS para controlar o fluxo de potência [3].

Os dispositivos FACTS podem ser separados em três categorias, compensador em derivação, compensador série ie compensador de ângulo de fase

No compensador em derivação a corrente de compensação está em quadratura com a tensão de compensação, fazendo com que não exista potência ativa fluindo através do compensador.

Para o compensador série a tensão de compensação está em quadratura com a corrente de compensação, ou seja, também não há fluxo de potência ativa nos terminais do compensador, porém há a necessidade de abrir a linha para colocar o compensador em série.

O compensador de ângulo de fase ideal controla a diferença do ângulo de fase entre dois sistemas distintos, controlando o fluxo de potência ativa entre os dois sistemas. A tensão nos terminais deste compensador pode assumir qualquer defasagem em relação a corrente de linha, o resulta que ele pode processar potência ativa e reativa. Este compensador pode ser estudado como um caso específico do compensador série ideal.

O objetivo do presente trabalho é desenvolver um equipamento que possa ser instalado facilmente na rede de distribuição para corrigir problemas com a regulação de tensão de consumidores, por isso os estudos dos FACTS se concentrará em dispositivos de compensação em derivação, por não haver a necessidade da abertura da linha para a instalação do equipamento.

Os dispositivos FACTS foram criados inicialmente para resolver problemas de transmissão e as soluções empregadas são a alteração de taps dos transformadores, banco de capacitores, reguladores de tensão baseados em tiristores, compensadores estáticos, compensadores síncronos ou até mesmo a alteração na estrutura de transmissão ou distribuição. Mas apesar de várias, as soluções citadas são lentas, pois ou dependem de técnicos ou possuem tempo de resposta limitado devido a tecnologia dos semicondutores utilizados, porque quanto mais alta a potência ou a tensão, mais lento é o semicondutor. Além disso, como a

maioria desses dispositivos foi desenvolvida inicialmente para sistemas de transmissão e com tiristores, GTOs ou IGCTs, que comutam em baixa frequência, possuem um tempo de resposta elevado, mas que para este fim, o tempo de resposta é aceitável[4].

Outros dispositivos, como os compensadores estáticos (STATCOMs) e os compensadores estáticos de distribuição (D-STATCOMs) utilizam IGBTs, que são semicondutores que comutam em frequências mais altas e podem ser utilizados em topologias de conversores multiníveis permitindo trabalhar com tensões ou potências mais elevadas, tornando realizável a solução do problema da regulação, se causado pela circulação de reativos.

Encontra-se na literatura duas técnicas de controle dos D-STATCOMs, principalmente no modo de controle de tensão, ambos processam potência reativa, porém, em um deles para a produção de potência reativa a corrente de saída do conversor deverá ser mantida em quadratura com a tensão no PAC e naturalmente, na frequência da rede. Assim a estratégia para a produção de potência reativa é utilizar o conversor como uma fonte de corrente senoidal, na frequência da rede, em quadratura com a tensão do PAC e com amplitude definida pela necessidade de potência reativa [5]. Em outro o funcionamento o controle do regulador baseia-se no ajuste de potência ativa processada pelo próprio regulador para manter a tensão de barramento CC regulada, e isto pode ser realizado através do ângulo de defasagem entre as tensões da rede e do PAC [6-8].

1.3 APRESENTAÇÃO DO CONVERSOR

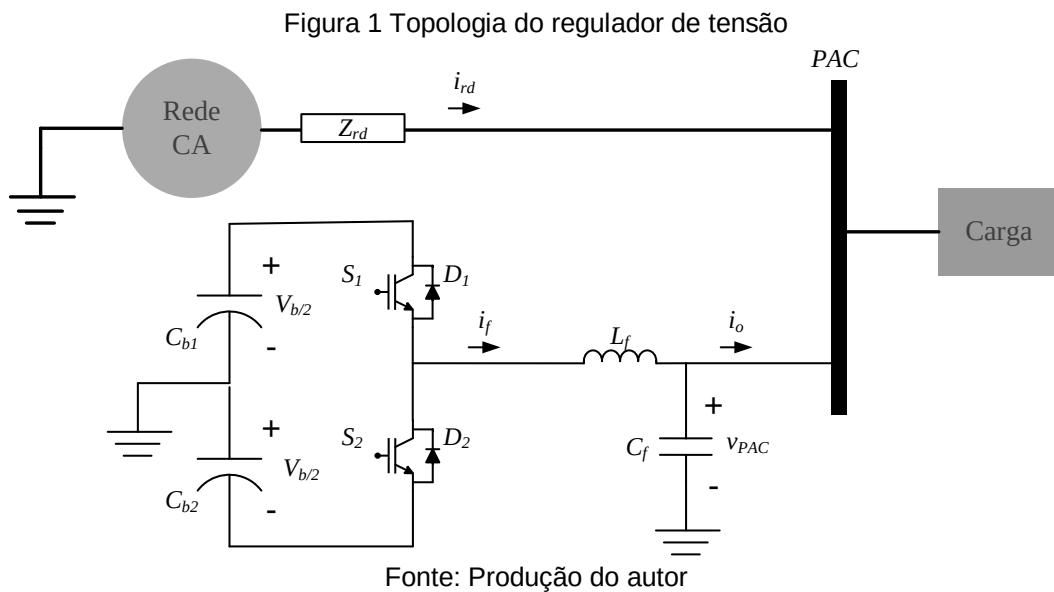
O presente trabalho de conclusão de curso visa a construção de um protótipo, que objetiva a regulação de tensão e redução de harmônicos aos consumidores da rede de distribuição das concessionárias de energia elétrica, para que a tensão disponibilizada no PAC esteja dentro dos níveis determinados pelo Módulo 8 do PRODIST, e os harmônicos dentro dos níveis sugeridos pelo padrão IEEE519-1992.

Para que estes objetivos sejam alcançados, o conversor proposto deve processar apenas potência reativa, sendo a potência ativa processada pelo conversor referente às perdas do conversor. A quantidade de energia reativa processada será determinada pelo controle de tensão do barramento de tensão CC do conversor, pois se a tensão do barramento ultrapassar os valores de referência,

significa que a tensão do PAC está fora dos níveis adequados, assim se a tensão no barramento ficar fora dos valores de referência, o controle do conversor irá defasar a tensão no PAC para que a tensão no barramento fique dentro dos valores de referência e a tensão no PAC seja regulada.

2 ANÁLISE QUALITATIVA

A seguir será apresentada a análise qualitativa de um inversor meia-ponte utilizado para a elaboração deste trabalho de conclusão de curso. O inversor proposto é monofásico e possui um filtro de alta frequência na saída a fim de evitar circulação de correntes de alta frequência na rede. A estrutura básica do conversor é mostrada na Figura 1.



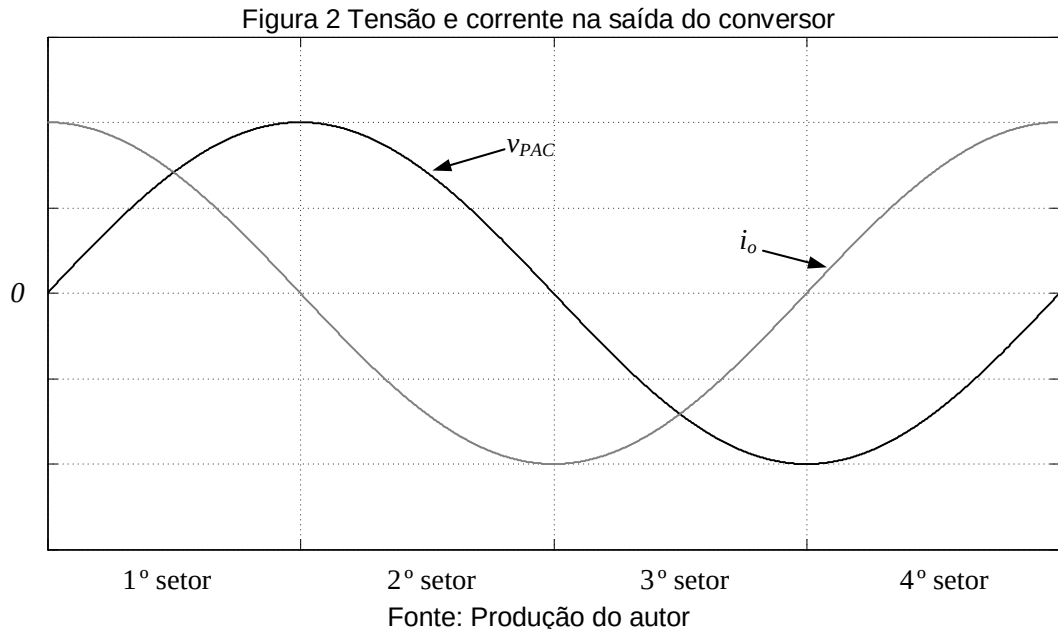
A corrente e a tensão na saída do conversor podem ser descritas como as equações que seguem:

$$i_o(\omega t) = I_{pk} \sin(\omega t - \varphi) \quad (1)$$

$$v_{PAC}(\omega t) = V_{pk} \sin(\omega t) \quad (2)$$

O conversor irá operar com a corrente defasada em relação à tensão, podendo a corrente estar adiantada ou atrasada dependendo da necessidade de elevar ou diminuir a tensão no PAC, e será analisado o comportamento do conversor para um período de rede. Na Figura 2, foi considerado que a corrente está adiantada em relação à tensão sendo possível perceber que há quatro setores de

operação, cada setor com uma combinação entre tensão e corrente, ambas positivas, negativas ou uma delas positiva e outra negativa. E em cada setor há duas etapas de operação como será demonstrado.

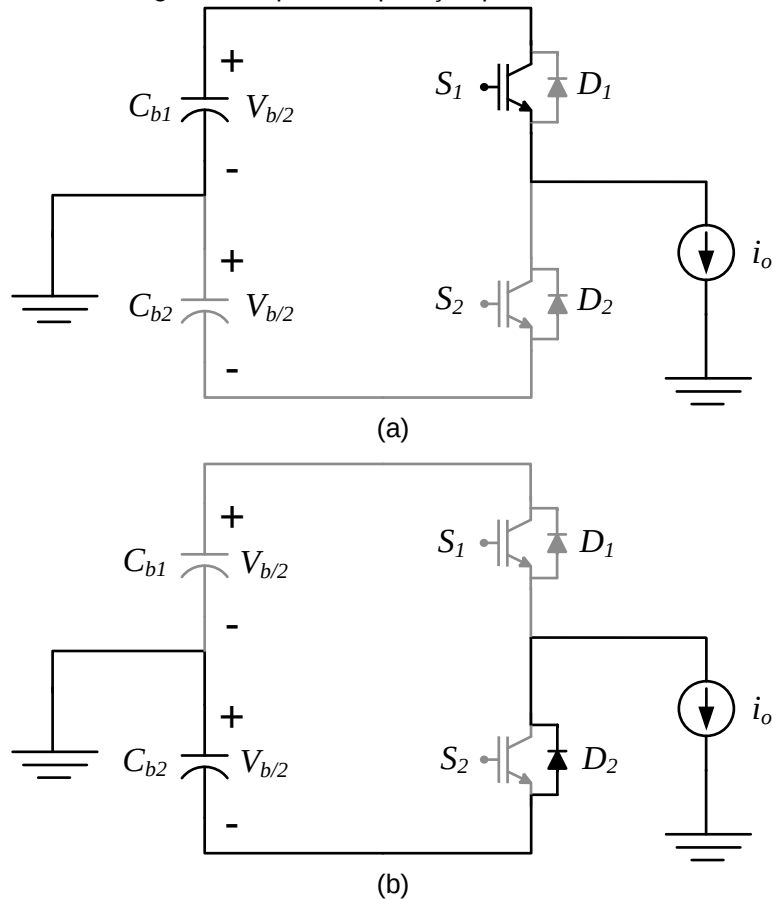


Para fazer a análise qualitativa será considerado que para um período de chaveamento a corrente nos semicondutores é contínua e que o conversor já está trabalhando em regime permanente. Abaixo são apresentadas as etapas de operação do primeiro setor, onde a corrente e tensão são positivas.

1ª etapa ($0 < t < t_1$): Nesta etapa de operação o interruptor S_1 é comandado a conduzir e o capacitor C_{b1} fornece energia para a carga circulando corrente por S_1 até que o interruptor S_1 seja bloqueado.

2ª etapa ($t_1 < t < Ts$): Na segunda etapa o interruptor S_2 é comandado a conduzir, porém como a corrente no indutor L_f é positiva, o interruptor S_2 não pode conduzi-la e, portanto, o diodo D_2 é responsável pela condução da corrente e o capacitor C_{b2} absorve energia para a carga.

Figura 3 Etapas de operação para o 1º setor

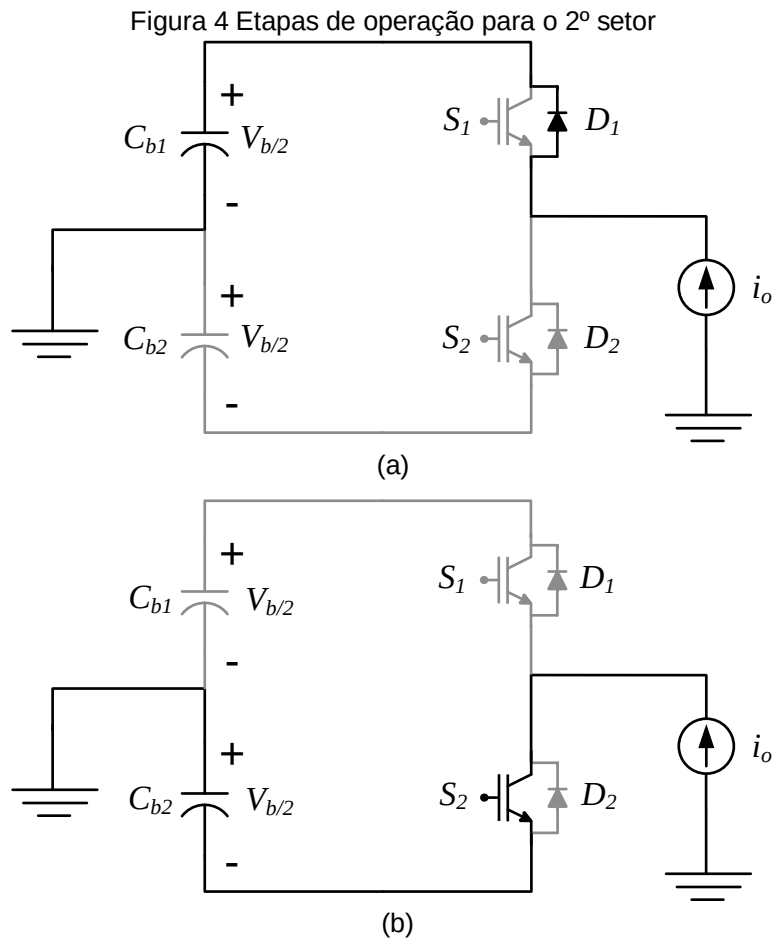


Fonte: Produção do autor

No segundo setor a corrente é negativa e a tensão é positiva, este setor também possui duas etapas de operação, porém os semicondutores responsáveis pela condução da corrente são diferentes dos semicondutores responsáveis pela condução no primeiro setor.

1ª etapa ($0 < t < t_1$): Como citado anteriormente, a primeira etapa de operação inicia com o comando para o interruptor S_1 conduzir, porém a corrente está em outro sentido, impossibilitando a condução da mesma pelo interruptor, ficando o diodo D_1 responsável pela condução da corrente, o capacitor C_{b1} absorve energia para a carga.

2ª etapa ($t_1 < t < Ts$): Na segunda etapa o interruptor S_2 é comandado a conduzir e o capacitor C_{b2} é responsável por fornecer energia para a carga. A etapa se encerra quando o interruptor S_2 é bloqueado.

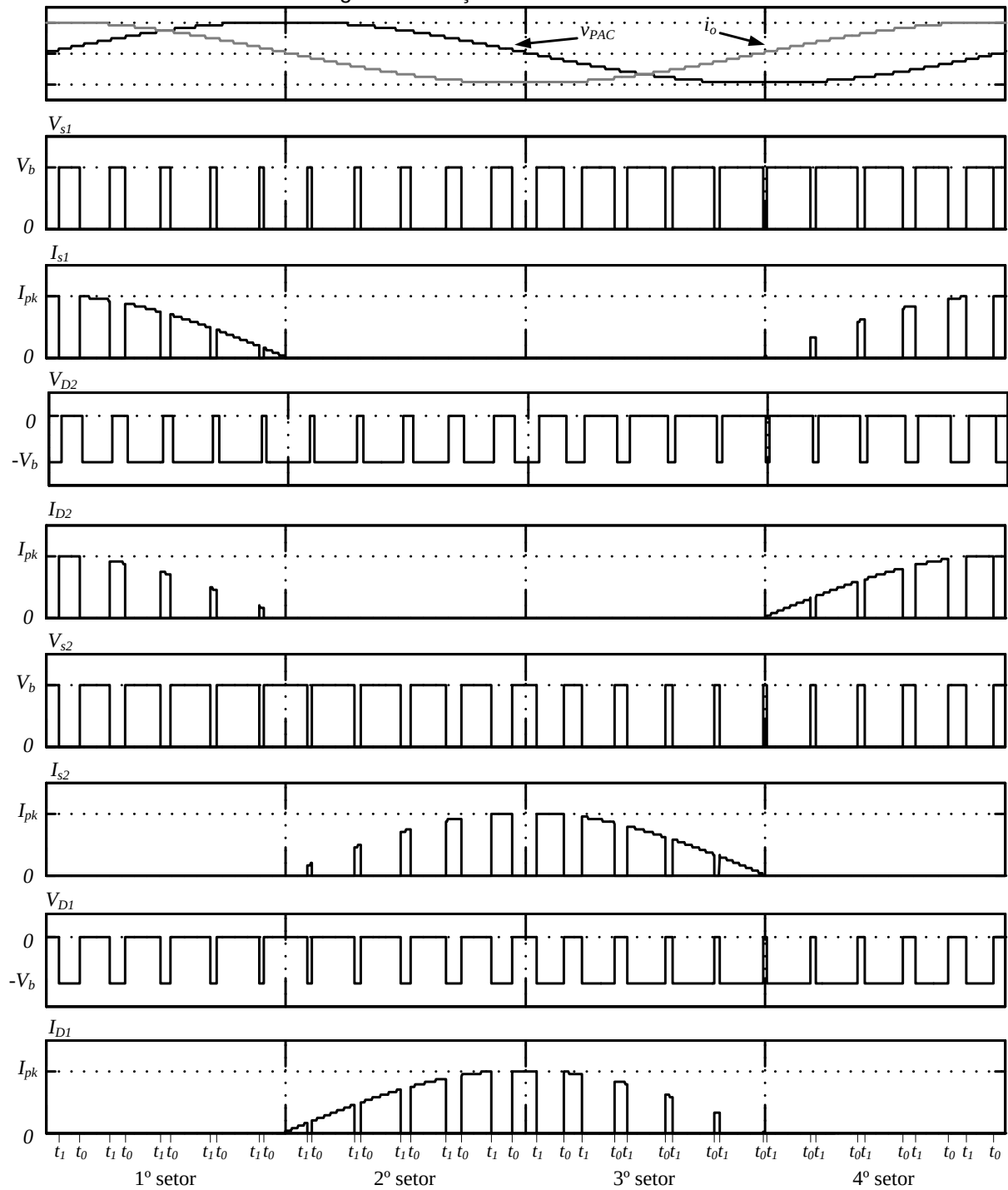


Fonte: Produção do autor

As etapas de operação do terceiro setor são as mesmas que as etapas de operação do segundo setor, pois a corrente nos dois setores tem o mesmo sentido, o que as diferencia é a razão cíclica dos interruptores. No segundo setor a razão cíclica do interruptor S_1 é maior que a razão cíclica do interruptor S_2 e no terceiro setor ocorre o contrário, a razão cíclica do interruptor S_2 é maior que a razão cíclica do S_1 e como a corrente tem o mesmo sentido nos dois setores os mesmos semicondutores irão conduzir, sendo assim, no segundo setor D_1 conduz durante mais tempo que S_2 e no terceiro setor S_2 conduz durante mais tempo que D_1 . A mesma análise pode ser feita para o primeiro e quarto setores.

Na Figura 5 são ilustradas a corrente e a tensão em cada semicondutor, a frequência de chaveamento na figura está muito reduzida em relação à frequência de chaveamento que será utilizada na implementação, para facilitar a visualização da análise feita sobre os setores de operação.

Figura 5 Esforços nos semicondutores



Fonte: Produção do autor

A razão cíclica dos interruptores será determinada por uma modulação PWM senoidal, onde uma onda sinusoidal de referência, com a frequência desejada para a tensão de saída, é comparada com uma onda triangular com a frequência de chaveamento desejada.

3 ANÁLISE QUANTITATIVA

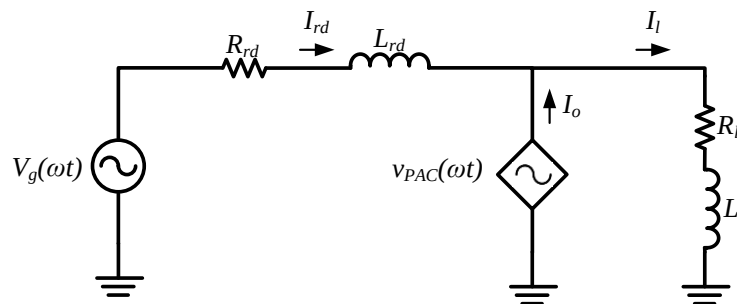
Neste capítulo serão apresentados os gráficos e as deduções das equações que definem o ângulo de defasagem da tensão do PAC e da potência reativa processada pelo inversor, em função das características da carga. Também serão apresentados gráficos e as deduções para a razão cíclica e para as equações que definem os esforços nos semicondutores. Estes dados são importantes para o dimensionamento do inversor e definir quais cargas, de acordo com o fator de potência e a potência aparente da própria carga, poderão ser conectadas ao mesmo. O dimensionamento da estrutura de potência já foi previamente calculado em [9]. Ao final do capítulo o projeto dos elementos passivos do conversor é realizado.

3.1 ÂNGULO DE DEFASAGEM E POTÊNCIA REATIVA PROCESSADA PELO INVERSOR

Seguindo a metodologia demonstrada em [10], a seguir será apresentada uma análise para o ângulo de defasagem θ da tensão do PAC e da potência reativa processada pelo inversor para diferentes condições de carga.

Fazendo um estudo do fluxo de potência, representado pela Figura 6 é possível obter as equações necessárias para realizar a análise citada acima. O inversor será substituído por uma fonte de tensão CA controlada para simplificar a análise.

Figura 6 Sistema analisado



Fonte: Produção do Autor

Pela Lei de Ohm tem-se que:

$$\overline{I_{rd}} = \frac{\overline{V_g} - \overline{V_{PAC}}}{\overline{Z_{rd}}} \quad (3)$$

Onde Z_{rd} é a impedância da rede, e a potência aparente fornecida pelo gerador pode ser escrita como:

$$\overline{S_g} = \overline{V_g} * \overline{I_{rd}}^* \quad (4)$$

Substituindo (3) em (4) e passando $\overline{V_{PAC}}$ para a forma retangular, a potência aparente resulta em:

$$S_g = \frac{V_g(V_g - V_{PAC}\cos\theta - V_{PAC}\sin\theta)(R_{rd} + jX_{rd})}{Z_{rd}^2} \quad (5)$$

Onde θ é o ângulo de defasagem entre a tensão no PAC e a tensão no gerador.

Separando as partes real e imaginária para evidenciar as potências ativa e reativa do gerador obtém-se:

$$P_g = \frac{V_g^2 R_{rd} - V_g V_{PAC} R_{rd} \cos\theta - V_g V_{PAC} X_{rd} \sin\theta}{Z_{rd}^2} \quad (6)$$

$$Q_g = \frac{V_g^2 X_{rd} - V_g V_{PAC} X_{rd} \cos\theta + V_{PAC} R_{rd} \sin\theta}{Z_{rd}^2} \quad (7)$$

A potência aparente na linha de transmissão é obtida por:

$$\overline{S_{rd}} = \overline{V_{rd}} * \overline{I_{rd}}^* \quad (8)$$

$$\overline{V_{rd}} = \overline{V_g} - \overline{V_{PAC}} \quad (9)$$

Substituindo (3) e (8) em (9) resulta em:

$$S_{rd} = \frac{(V_g^2 - 2V_g V_{PAC} \cos\theta + V_{PAC}^2)(R_{rd} + jX_{rd})}{Z_{rd}^2} \quad (10)$$

$$P_{rd} = \frac{R_{rd}(V_g^2 + V_{PAC}^2 - 2V_g V_{PAC} \cos\theta)}{Z_{rd}^2} \quad (11)$$

$$Q_{rd} = \frac{X_{rd}(V_g^2 + V_{PAC}^2 - 2V_g V_{PAC} \cos\theta)}{Z_{rd}^2} \quad (12)$$

E a potência aparente da carga é obtida por:

$$\overline{S_l} = \overline{V_{PAC}} * \overline{I_l}^* \quad (13)$$

$$\overline{I_l} = \frac{\overline{V_{PAC}}}{\overline{Z_l}} \quad (14)$$

Onde Z_l é a impedância da carga. Substituindo (14) em (13) obtém-se a potência aparente da carga.

$$S_l = \frac{V_{PAC}^2 (R_l + jX_l)}{Z_l^2} \quad (15)$$

$$P_l = \frac{V_{PAC}^2 R_l}{Z_l^2} \quad (16)$$

$$Q_l = \frac{V_{PAC}^2 X_l}{Z_l^2} \quad (17)$$

Com as potências da carga, do gerador e da linha de distribuição, a equação que determina o valor do ângulo de defasagem da tensão no PAC é obtido pela soma das potências do sistema:

$$P_g + P_{inv} = P_{rd} + P_l \quad (18)$$

Porém foi o inversor não deverá processar potência ativa, portanto P_{inv} é igual à zero. Reorganizando a equação (18)

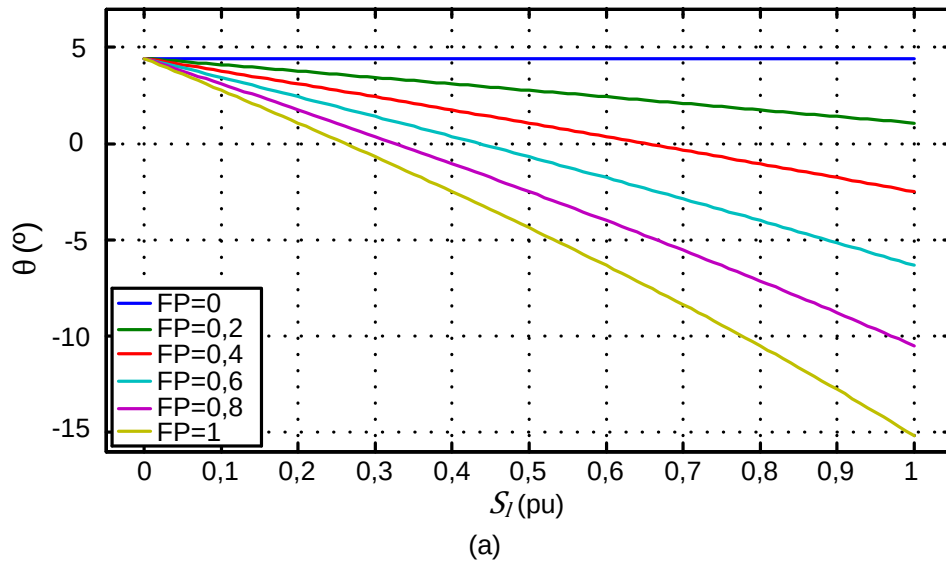
$$P_g - P_{rd} - P_l = 0 \quad (19)$$

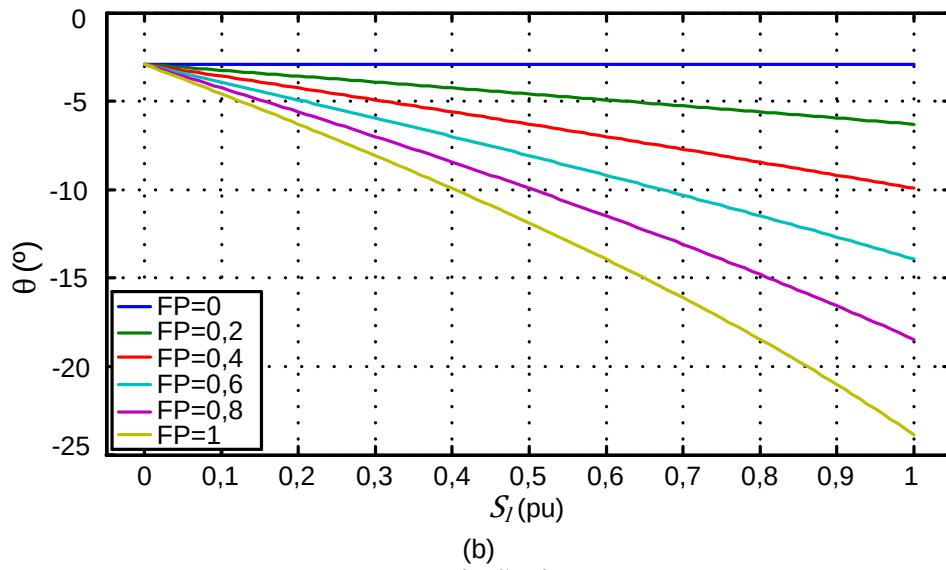
O que resulta em:

$$\frac{V_g R_{rd} \cos \theta - V_g X_{rd} \sin \theta - R_{rd} V_{PAC}}{Z_{rd}^2} - \frac{R_l V_{PAC}}{Z_l^2} = 0 \quad (20)$$

Com a equação (20) e a utilização de métodos numéricos foi possível encontrar os valores do ângulo de defasagem da tensão no PAC para diferentes fatores de potência da carga e para diferentes potências.

Figura 7 Variação do ângulo de defasagem com o fator de potência e a potência aparente: (a) $V_{pac}=0,92$ pu (b) $V_{pac}=1,05$ pu





A partir da Figura 7 é possível observar que com o aumento do fator de potência, ou seja, com o aumento da característica resistiva da carga, há o aumento do ângulo de defasagem θ , este já era um comportamento esperado visto que o inversor não deverá processar energia ativa e por isso haverá um aumento da defasagem, para que a rede possa fornecer energia ativa para a carga e não o inversor. O gráfico traçado na Figura 7 representa os valores de theta para valores de resistência e impedância de rede iguais a 0,14 p.u e para regular a tensão no PAC em 0,92 p.u na Figura 7(a) e em 1.05 p.u. na Figura 7(b), que são os limites inferior e superior, respectivamente, para que a tensão no PAC permaneça na região adequada .

Sabendo o ângulo de defasagem é possível determinar a potência reativa processada pelo inversor, e é possível encontra-la pela soma das potências reativas.

$$Q_g + Q_{inv} = Q_{rd} + Q_l \quad (21)$$

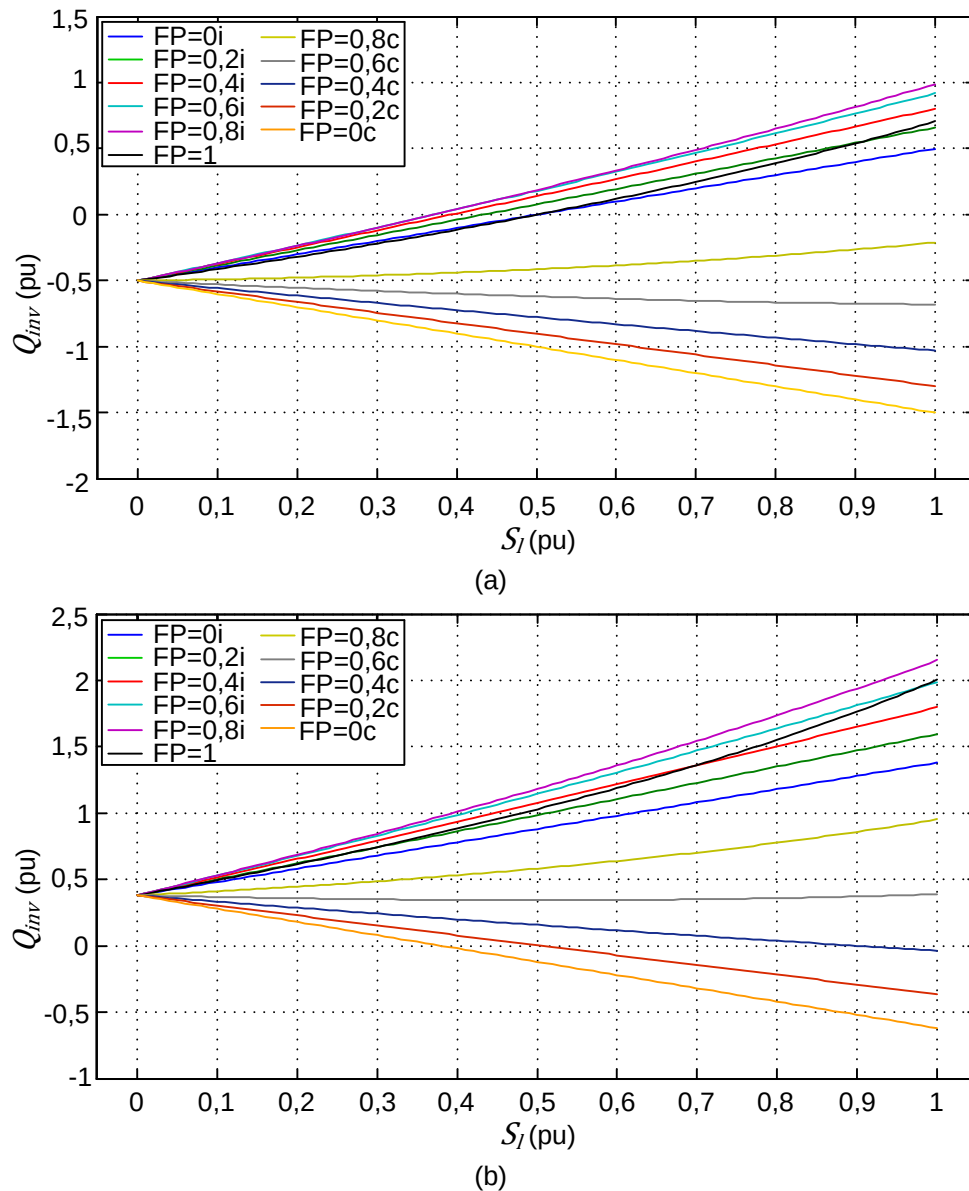
$$Q_{inv} = Q_{rd} + Q_l - Q_g \quad (22)$$

Resultando em:

$$Q_{inv} = \frac{V_{PAC}^2 (X_{rd} Z_l^2 + X_l Z_{rd}^2) - V_g V_{PAC} (X_{rd} \cos \theta + R_{rd} \sin \theta) Z_l^2}{Z_{rd}^2 Z_l^2} \quad (23)$$

A partir da equação (20) e da equação (23) é possível serem traçados os gráficos apresentados na Figura 8(a) e (b), que demonstram, em p.u., a energia reativa processada pelo inversor de acordo com o fator de potência da carga e com a potência aparente da carga.

Figura 8 Energia reativa processada pelo inversor em função o fator de potência e a potência aparente: (a) $V_{pac}=0,92$ pu (b) $V_{pac}=1,05$ pu



Fonte: Produção do autor

Conforme esperado, a Figura 8 mostra que com o acréscimo de carga há um aumento na energia reativa processada pelo inversor para compensar a tensão no PAC. Aqui novamente as Figura 8(a) e (b) foram traçadas para tensão no PAC em 0,92 p.u e 1,05p.u, respectivamente, e mostram que a energia processada pelo inversor pode ultrapassar 2 p.u. um dado importante para o dimensionamento do inversor.

3.2 ESFORÇOS NOS SEMICONDUTORES

Para calcular os esforços nos semicondutores, será considerado que a ondulação da corrente de saída do inversor é menor que 20% e calculado o valor médio e eficaz para um período de chaveamento, e este resultado será utilizado para calcular o valor médio e eficaz em um período da rede.

Da equação (1) e sabendo que:

$$I_{pk} = \frac{\sqrt{2}S_o}{v_{PAC}} \quad (24)$$

Utilizando o conceito de valor médio quase-instantâneo para calcular a corrente média nos interruptores, e sabendo que a corrente em um período de chaveamento é considerada constante:

$$\langle I_{Smed} \rangle = \frac{1}{T_s} \int_{t_0}^{t_0+d(\omega t)T_s} i_s dt = i_o(\omega t)d(\omega t) \quad (25)$$

Onde i_s é a corrente em um interruptor em um período de chaveamento.

Então, é possível calcular a corrente média nos interruptores em um período da rede, conforme mostrado por (26).

$$I_{Smed} = \frac{2}{2\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+\pi} i_o(\omega t)d(\omega t)d\omega t = \frac{S_o(\pi m_a \cos(\varphi) + 4)}{4\pi V_{pk}} \quad (26)$$

Normalizando a corrente média no interruptor, e variando o índice de modulação e o ângulo de defasagem entre corrente e tensão, é possível traçar um gráfico em três dimensões para verificar o comportamento da corrente.

O valor eficaz da corrente nos interruptores, para um período de chaveamento é dado por:

$$\langle I_{Sef} \rangle = 2 \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_{t_0}^{t_0+d(\omega t)T_s} i_s^2 dt} = i_o(\omega t)\sqrt{d(\omega t)} \quad (27)$$

E para um período da rede, o valor eficaz da corrente nos interruptores é:

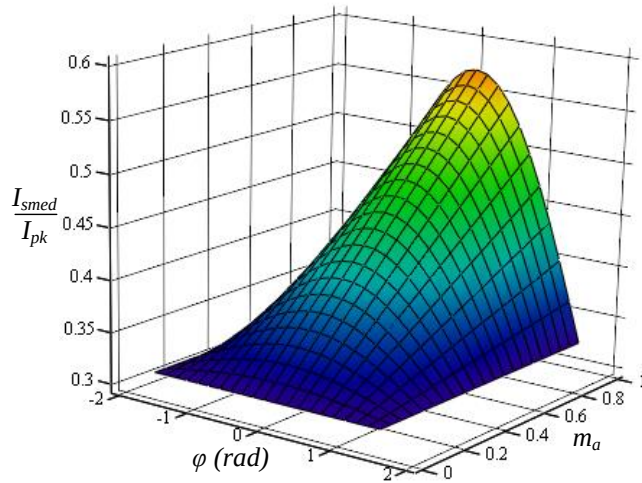
$$I_{sef} = 2 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+\pi} i_o(\omega t)^2 d(\omega t)d\omega t} = \frac{S_o}{6V_{pk}} \sqrt{\frac{(18\pi + 48m_a \cos(\varphi))}{\pi}} \quad (28)$$

Assim como para a corrente média foi traçado um gráfico, a partir da equação (28) é possível traçar um gráfico semelhante para a corrente eficaz.

Como pode ser verificado na Figura 9 e na Figura 10 os interruptores irão conduzir maior corrente de acordo com o aumento do índice de modulação e com a aproximação do ângulo de defasagem a zero.

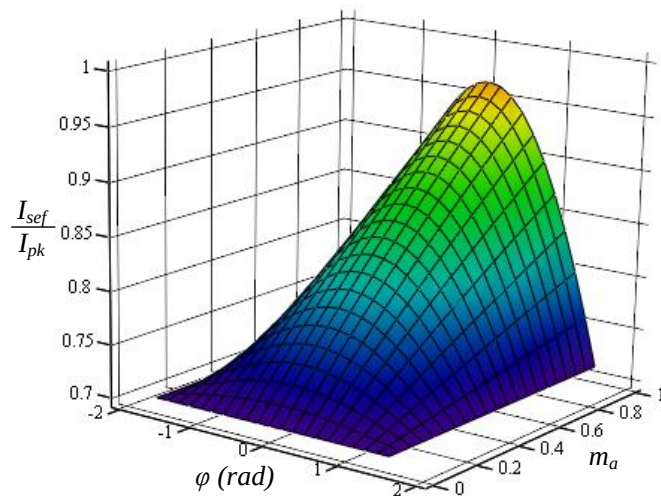
Os esforços de corrente nos diodos são calculados da mesma maneira que nos interruptores, porém os diodos conduzem no período complementar aos interruptores, mas a corrente conduzida por eles também é considerada contínua e será chamada de i_d , por isso a corrente média nos diodos para um período de chaveamento é obtida pela equação (29).

Figura 9 Corrente média normalizada nos interruptores



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 10 Corrente eficaz normalizada nos interruptores



Fonte: Produção do autor

$$\langle I_{dmed} \rangle = \frac{1}{T_s} \int_{d(\omega t)T_s}^{T_s} i_d dt = i_o(\omega t)(1 - d(\omega t)) \quad (29)$$

Para um período da rede:

$$I_{dmed} = \frac{2}{2\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+\pi} i_o(\omega t)(1 - d(\omega t))d\omega t = \frac{S_o(4 - \pi m_a \cos(\varphi))}{4\pi V_{pk}} \quad (30)$$

Da mesma forma, o valor eficaz da corrente nos diodos será calculado como segue.

$$\langle I_{def} \rangle = 2 \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_{d(\omega t)T_s}^{T_s} i_d^2 dt} = i_o(\omega t) \sqrt{1 - d(\omega t)} \quad (31)$$

Para um período da rede, o valor eficaz da corrente nos diodos é:

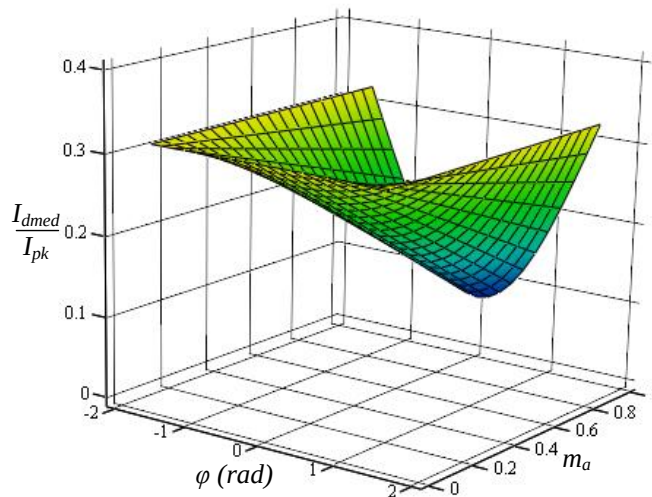
$$I_{def} = 2 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+\pi} i_o(\omega t)^2 (1 - d(\omega t))d\omega t} = \frac{S_o}{6V_{pk}} \sqrt{\frac{(18\pi - 48m_a \cos(\varphi))}{\pi}} \quad (32)$$

Por fim é traçado o gráfico para a corrente eficaz nos diodos. Na Figura 11 e na Figura 12 é possível observar que os diodos irão conduzir a maior parcela da corrente quando a defasagem se aproxima de $\pm 90^\circ$, que é quando o inversor processa apenas energia reativa.

Os esforços de tensão nos semicondutores deste conversor são os mesmos para o inversor monofásico em meia-ponte apresentados em [11] e pela equação (33).

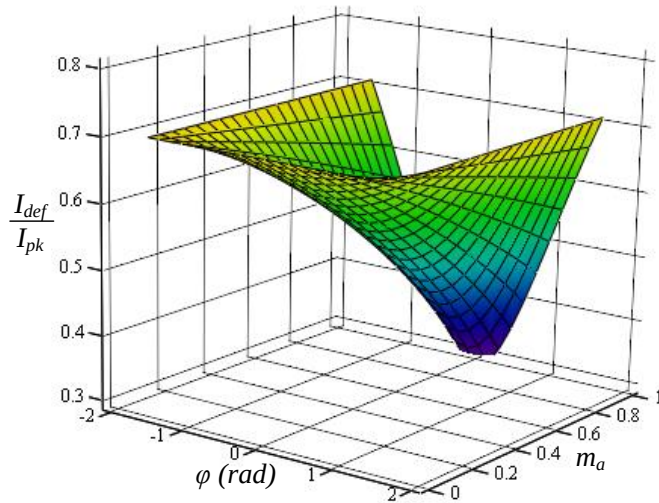
$$V_{S1} = V_{S2} = V_{d1} = V_{d2} = V_B \quad (33)$$

Figura 11 Corrente média nos diodos



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 12 Corrente eficaz nos diodos

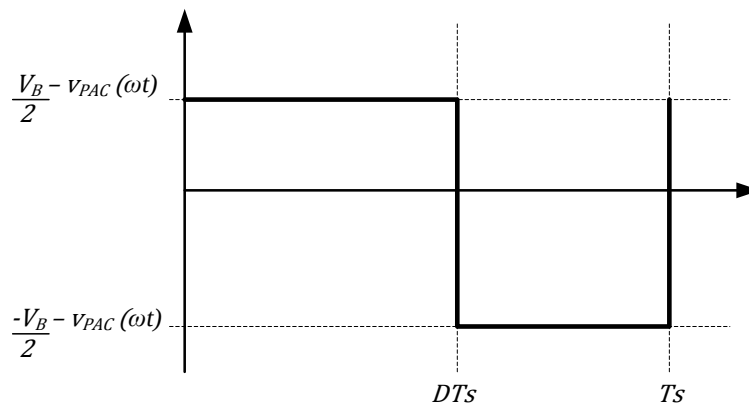


Fonte: Produção do autor

3.3 DEFINIÇÃO DA RAZÃO CÍCLICA

A razão cíclica do conversor pode ser obtida pela análise da tensão no indutor, mostrada na Figura 13. A tensão média em regime permanente no indutor para um período de chaveamento deve ser igual a zero e é determinada pela equação (34).

Figura 13 Tensão no indutor



Fonte: Produção do autor

$$v_{Lmed}(\omega t) = \frac{1}{T_s} \left[\int_0^{T_s d(\omega t)} \left(\frac{V_B}{2} - v_{PAC}(\omega t) \right) dt + \int_{T_s d(\omega t)}^{T_s} \left(\frac{-V_B}{2} - v_{PAC}(\omega t) \right) dt \right] = 0 \quad (34)$$

Onde $d(\omega t)$ é a razão cíclica do interruptor S_1 , considerando que a frequência de chaveamento é muito maior que a frequência da rede, e assim, $v_{PAC}(\omega t)$ é considerada constante e V_B é a tensão total do barramento CC. Resolvendo a equação (33) tem-se:

$$v_{Lmed}(\omega t) = \frac{V_B}{2} \cdot (2d(\omega t) - 1) - v_{PAC}(t) = 0 \quad (35)$$

E então a razão cíclica pode ser escrita como:

$$d(\omega t) = \frac{v_{PAC}(\omega t)}{V_B} + \frac{1}{2} = 0 \quad (36)$$

Definindo a razão de modulação de amplitude como segue:

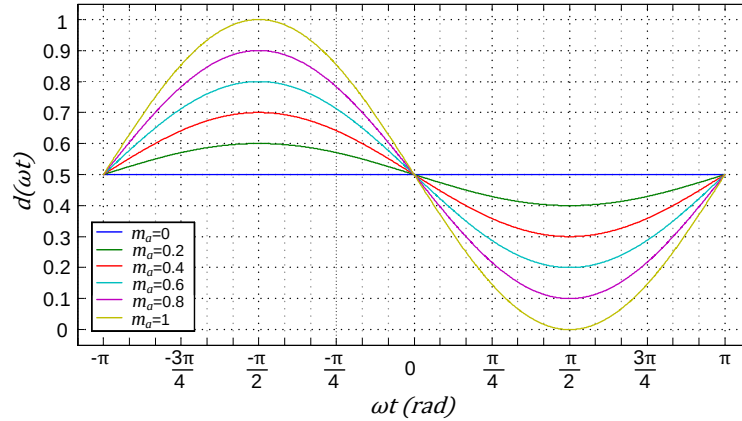
$$m_a = \frac{V_{pk}}{\frac{V_B}{2}} \quad (37)$$

Substituindo as equações (2) e (37) na equação (36), obtém-se:

$$d(\omega t) = \frac{m_a}{2} \sin(\omega t) + \frac{1}{2} \quad (38)$$

A Figura 14 mostra a variação da razão cíclica conforme o índice de modulação e de ωt .

Figura 14 Variação da razão cíclica em função de ωt e da razão de modulação



Fonte: Produção do autor

3.4 CÁLCULO DA INDUTÂNCIA MÍNIMA DE FILTRAGEM

A seguir é demonstrado como é calculada a indutância mínima de filtragem a partir da ondulação de corrente no indutor. A equação que representa a tensão no indutor é expressa como segue:

$$V_L = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \quad (39)$$

As figuras 3 e 4 ilustram a operação do inversor em dois setores e cada um destes setores possuindo duas etapas de operação, sabendo que no primeiro setor a tensão no PAC é positiva, a primeira etapa deste setor será considerada para realizar a análise que segue.

Sabe-se também que:

$$V_L = \frac{V_B}{2} - v_{PAC}(\omega t) \quad (40)$$

$$\Delta t = d(\omega t)T_s \quad (41)$$

Substituindo (41) em (40), e então (40) em (39) obtém-se:

$$\frac{V_B}{2} - v_{PAC}(\omega t) = L \frac{\Delta i_L}{d(\omega t)T_s} \quad (42)$$

$$L = \left(\frac{V_B}{2} - v_{PAC}(\omega t) \right) \frac{d(\omega t)T_s}{\Delta i_L} \quad (43)$$

Substituindo (2) e (38) em (43), e reorganizando-a chega-se em:

$$L = \frac{T_s}{\Delta i_L} \left(\frac{V_B}{4} - \frac{V_{pk}m_a}{2} \text{sen}^2(\omega t) \right) \quad (44)$$

A partir da equação (44) é possível notar que a indutância será máxima quando ωt for igual à zero ou π radianos, então, a indutância mínima necessária para o conversor será:

$$L \geq \frac{T_s}{\Delta i_L} \frac{V_B}{4} \quad (45)$$

3.5 CÁLCULO DA CAPACITÂNCIA MÍNIMA DE BARRAMENTO

O cálculo da capacitância do barramento foi baseado em [5], e pode ser encontrada a partir da ondulação de tensão no barramento. Para isso é possível calcular a corrente que passa pelo capacitor, e utilizar a equação que relaciona a tensão e a corrente em um capacitor apresentada na equação (46)

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt + V_c(0) \quad (46)$$

A corrente que passa pelo capacitor quando um dos interruptores está conduzindo é a corrente da saída $i_o(\omega t)$. Como a frequência da ondulação da tensão no barramento é da ordem da frequência da rede será utilizado o conceito de

valores médios quase instantâneos para encontrar a equação da corrente no barramento.

A corrente média no capacitor para um período de chaveamento é dada por:

$$\langle i_{c_{b1}}(t) \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{d(\omega t)T_s} -i_o(\omega t) dt \quad (47)$$

Resultando em:

$$\langle i_{c_{b1}}(t) \rangle = -\frac{I_{pk}}{2} \text{sen}(\omega t - \varphi) - \frac{I_{pk}}{4} m_a \cos(\varphi) + \frac{I_{pk}}{4} m_a \cos(\omega t - \varphi) \quad (48)$$

Agora, substituindo a equação (48) na equação (46)

$$v_{c_{b1}}(t) = \frac{1}{C_{b1}} \int_0^t \left(-\frac{I_{pk}}{2} \text{sen}(\omega t - \varphi) - \frac{I_{pk}}{4} m_a \cos(\varphi) + \frac{I_{pk}}{4} m_a \cos(\omega t - \varphi) \right) d\omega t + V_{c_{b1}}(0) \quad (49)$$

Resolvendo a integral, obtém-se a tensão no capacitor C_{b1} :

$$v_{c_{b1}}(t) = \frac{I_{pk}}{2C_{b1}} \left[\frac{\cos(\omega t - \varphi)}{\omega} - \frac{\cos(\varphi)}{\omega} - \frac{m_a t \cos(\varphi)}{2} + \frac{m_a \text{sen}(2\omega t - \varphi)}{4\omega} + \frac{m_a \text{sen}(\varphi)}{4\omega} \right] + V_{c_{b1}}(0) \quad (50)$$

Considerando que o inversor irá processar apenas potência reativa é possível reescrever a equação (50) da seguinte maneira:

$$v_{c_{b1}}(t) = \frac{I_{pk}}{2C_{b1}} \left[\pm \frac{\text{sen}(\omega t)}{\omega} \mp \frac{m_a \cos(2\omega t)}{4\omega} \pm \frac{m_a}{4\omega} \right] + V_{c_{b1}}(0) \quad (51)$$

Da mesma forma é calculada a tensão no capacitor C_{b2} , porém para o período complementar ao período que está circulando corrente em C_{b1} , sendo a tensão em C_{b2} dada por:

$$v_{c_{b2}}(t) = \frac{I_{pk}}{2C_{b1}} \left[\mp \frac{\text{sen}(\omega t)}{\omega} \mp \frac{m_a \cos(2\omega t)}{4\omega} \pm \frac{m_a}{4\omega} \right] + V_{c_{b2}}(0) \quad (52)$$

Para calcular a tensão total e diferencial do barramento será considerado que:

$$\begin{cases} C_b = C_{b1} = C_{b2} \\ V_b(0) = V_{c_{b1}}(0) = V_{c_{b2}}(0) \end{cases} \quad (53)$$

A tensão diferencial do barramento é dada pela subtração da tensão em cada capacitor

$$v_{b_d}(t) = v_{c_{b1}}(t) - v_{c_{b2}}(t) \quad (54)$$

Resultando em:

$$v_{b_d}(t) = \mp \frac{I_{pk}}{C_b} \frac{\text{sen}(\omega t)}{\omega} \quad (55)$$

A tensão total do barramento é dada pela soma da tensão em cada capacitor

$$v_{b_t}(t) = v_{c_{b1}}(t) + v_{c_{b2}}(t) \quad (56)$$

Resultando em:

$$v_{bt}(t) = \frac{I_{pk}}{C_b} \left[\mp \frac{m_a \cos(2\omega t)}{4\omega} \pm \frac{m_a}{4\omega} \right] + 2V_b(0) \quad (57)$$

A ondulação de tensão é calculada pela máxima variação da tensão no barramento e é dada por:

$$\Delta V_b = \frac{I_{pk} m_a}{C_b 4\omega} \quad (58)$$

Substituindo a razão de modulação pela equação (37) tem-se que:

$$\Delta V_b = \frac{I_{oef} \sqrt{2}}{C_b} \frac{V_{rd,ef} \sqrt{2}}{4\omega \frac{V_B}{2}} \quad (59)$$

Portanto a equação que relaciona a capacitância mínima de barramento com a ondulação da tensão no barramento:

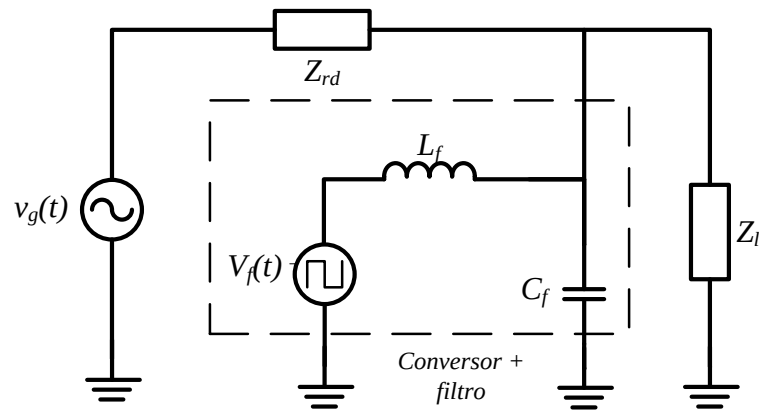
$$C_{b_{min}} > \frac{S_o}{\Delta V_b \omega V_b} \quad (60)$$

3.6 CÁLCULO DO FILTRO DE ALTA FREQUÊNCIA

O preço a ser pago pelas vantagens oferecidas pelo uso de conversores de potência é a emissão de harmônicos de corrente provenientes da comutação dos interruptores. Para atenuar estes harmônicos é necessária a utilização de filtros de saída [12]. Esses filtros são projetados para que seja criado um caminho de baixa impedância para as correntes de harmônicas mais elevadas.

Neste projeto será utilizado o filtro LC passa baixa para filtrar as harmônicas de corrente, porém devido às características do inversor, a impedância da rede não poderá ser desconsiderada, resultando em um filtro LCL na saída do conversor. A estrutura do conversor com o filtro no sistema é apresentada em destaque na Figura 15.

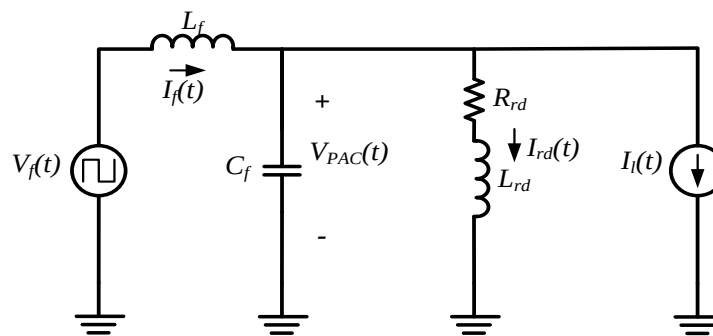
Figura 15 Arranjo do filtro de alta frequência



Fonte: Produção do autor

Para projetar o filtro do inversor, será considerado que a carga é uma fonte de corrente e será analisado o circuito apresentado na Figura 16

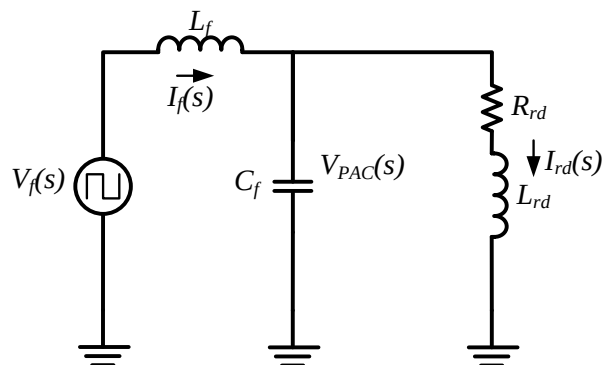
Figura 16 Circuito analisado para projetar o filtro de alta frequência do inversor



Fonte: Produção do autor

Fazendo a análise por superposição a fonte de tensão torna-se um curto circuito e a fonte de corrente torna-se um circuito aberto, resultando na Figura 17.

Figura 17 Circuito considerado para o projeto do filtro de saída



Fonte: Produção do autor

A função de transferência do circuito apresentado acima é:

$$\frac{I_{rd}(s)}{V_f(s)} = \frac{1}{L_{rd}L_fC_f} \left(\frac{1}{s^3 + s^2 \frac{R_{rd}}{L_{rd}} + s \left(\frac{L_{rd} + L_f}{L_{rd}L_fC_f} \right) + \frac{R_{rd}}{L_{rd}L_fC_f}} \right) \quad (61)$$

A frequência de ressonância de um filtro LCL é dada por

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_f + L_{rd}}{L_{rd}L_fC_f}} \quad (62)$$

A frequência de ressonância do filtro deve estar numa faixa entre dez vezes a frequência da rede e metade da frequência de chaveamento [13], porém frequência de ressonância será escolhida como sendo um quarto da frequência de cruzamento por zero, e esta frequência de cruzamento, por sua vez, foi escolhida como sendo de um quinto da frequência de chaveamento, então partir da escolha da frequência de ressonância e do cálculo da indutância do filtro pela equação (45), é possível escolher o valor da capacitância do filtro pela equação (63)

$$C_f = \frac{L_f + L_{rd}}{L_{rd}L_f(f_{res}2\pi)^2} \quad (63)$$

A Tabela 3 demonstra os parâmetros do inversor e em seguida o cálculo dos componentes do filtro de alta frequência e da capacitância de barramento.

Tabela 3 Parâmetros do inversor

Potência de saída	$S_o = 1.500 \text{ VA}$
Tensão do barramento CC	$V_B = 600 \text{ V}$
Tensão eficaz da rede	$V_{rd_ef} = 127 \text{ V}$
Ondulação máxima de corrente do indutor do filtro	$\Delta i_L = 20\%$
Ondulação máxima da tensão do barramento	$\Delta V_b = 3\%$
Frequência de comutação	$f_s = 50 \text{ kHz}$
Frequência de ressonância do filtro	$f_{ress} = 2,5 \text{ kHz}$
Frequência da rede	$f_{rd} = 60 \text{ HZ}$
Indutância da rede	$L_{rd} = 3,99 \text{ mH (0,14pu)}$
Resistência da rede	$R_{rd} = 1,51 \text{ } \Omega \text{ (0,14pu)}$

Fonte: Produção do autor

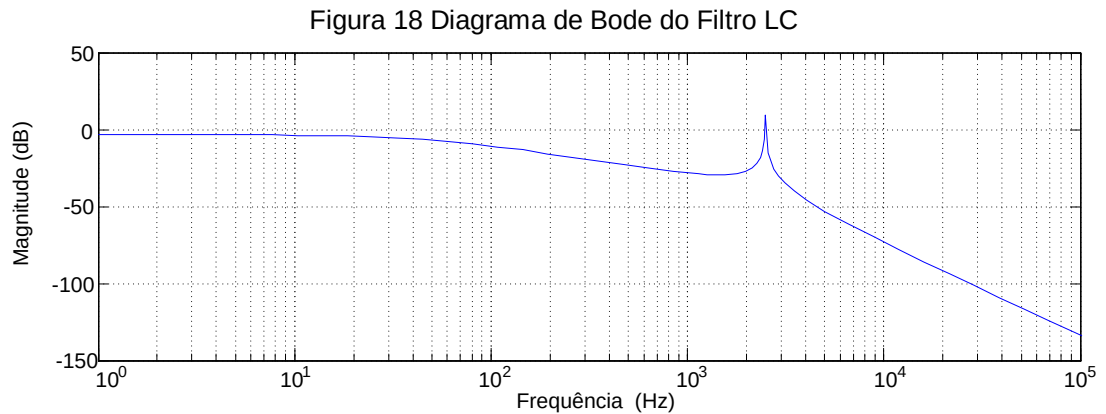
Substituindo os valores nas equações (45), (60) e (63) tem-se que:

$$L_{min} = 898,02 \mu H \quad (64)$$

$$C_{bmin} = 368,41 \mu F \quad (65)$$

$$C_f = 5,43 \mu F \quad (66)$$

O diagrama de bode do filtro é apresentado a seguir



Fonte: Produção do autor

A partir da Figura 18 é possível observar que frequências maiores que a frequência de ressonância são atenuadas a uma taxa de -60dB por década, apresentando boa atenuação das harmônicas da ordem da frequência de chaveamento do inversor.

3.7 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo destinou-se a apresentar os cálculos para o projeto do inversor que será utilizado para regular a tensão no PAC. Os cálculos para obter os capacitores do barramento e os elementos do filtro LC foram apresentados, bem como os cálculos dos esforços nos semicondutores.

Também foi demonstrada variação do ângulo e a potência reativa a ser processada pelo inversor para manter a tensão do PAC dentro dos limites do PRODIST. Os gráficos gerados por estas análises trazem informações importantes para o dimensionamento do inversor e para conhecer os limites de trabalho do mesmo.

4 MODELAGEM E CONTROLE

Neste capítulo será abordada, de forma geral, a operação do conversor, discutindo como ocorrerá a regulação da tensão do PAC, e com base nisso serão detalhadas quais serão as malhas de controle e o funcionamento das mesmas. Em seguida as plantas presentes no sistema de controle do conversor serão modeladas, sendo que apenas a planta de controle da tensão diferencial do barramento CC será validada numericamente porque as outras plantas presentes no sistema já foram validadas em [10] e por fim será realizado o projeto dos controladores.

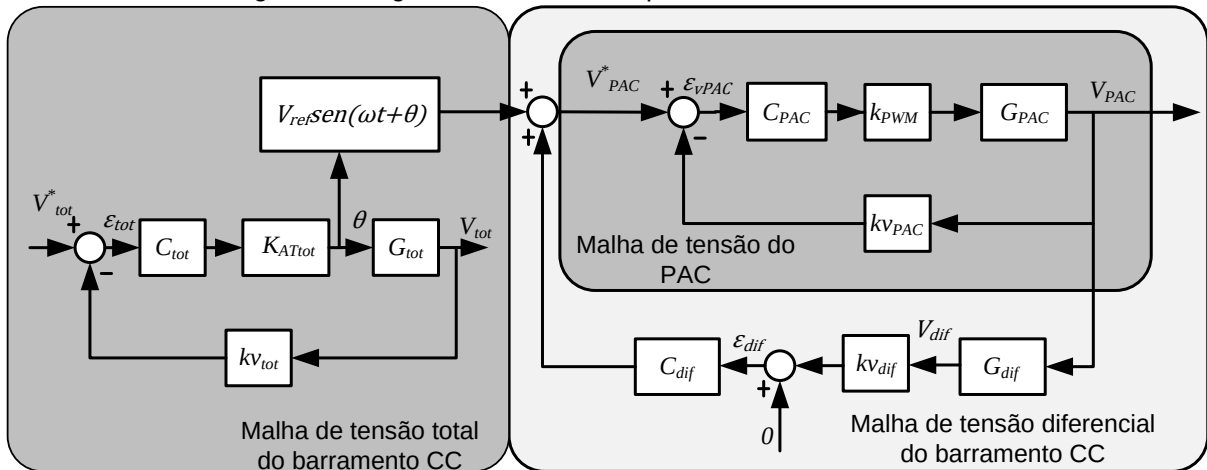
O objetivo do conversor é manter a tensão do PAC dentro dos limites estipulados pelo PRODIST e apresentados na tabela 1. A proposta para haver a regulação é que o conversor processe energia reativa, fornecendo-a ou absorvendo-a. Além disso, o conversor será modelado de maneira que não processe energia ativa, sendo a energia ativa processada referente às perdas.

Pela análise de fluxo de potência, a energia ativa tem ligação com o ângulo de abertura entre duas barras. Como o conversor é projetado para não processar energia ativa, quando a tensão do PAC sai da região adequada, o barramento começa a descarregar ou carregar, o que significa que energia ativa está sendo processada pelo conversor, logo, para que isso não ocorra o conversor irá defasar a tensão do PAC, não processando mais energia ativa e regulando a tensão no PAC.

A estrutura de potência do inversor meia ponte possui um barramento com ponto médio, permitindo desequilíbrio das tensões no PAC e das correntes do conversor além de permitir circulação de corrente contínua [5]. Esta corrente contínua pode carregar os capacitores que compõem o barramento de forma diferente, ficando o capacitor de uma metade do barramento com mais tensão que ou outro capacitor da outra metade do barramento podendo causar danos aos capacitores devido à sobretensão. Por este motivo faz-se necessário o controle da tensão diferencial do barramento que permitira a circulação de corrente contínua no inversor através da inserção de um nível médio na referência de tensão do PAC e permitindo o equilíbrio entre as tensões dos capacitores do barramento CC.

A Figura 19 apresenta o diagrama de blocos completo do sistema de controle que será composto por três malhas, a malha de tensão do PAC, a malha de tensão total do barramento e a malha de tensão diferencial do barramento CC.

Figura 19 Diagrama de blocos completo do sistema de controle.



Fonte: Produção do autor.

A malha de tensão do PAC será a malha mais rápida do sistema e será responsável pela regulação da tensão no PAC.

A malha de tensão diferencial do barramento é a malha mais lenta do sistema, sendo responsável por garantir que não haja desbalanço entre as tensões dos capacitores do barramento. Esta malha garante este equilíbrio através da adição de um nível CC na referência da tensão do PAC, fazendo com que as tensões nos capacitores se equilibrem.

A malha de tensão total do barramento será mais rápida que a malha da tensão diferencial e mais lenta que a malha de tensão no PAC. Esta malha monitora a tensão no barramento e é responsável pela defasagem da tensão no PAC.

4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

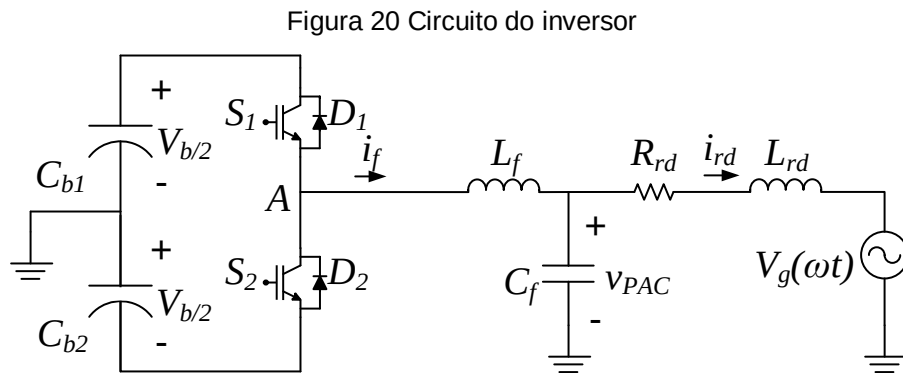
A modelagem matemática trata da obtenção da representação matemática das plantas a serem controladas, afim de que seus comportamentos dinâmicos sejam conhecidos possibilitando o projeto dos controladores.

Neste tópico são apresentados os modelos das plantas CA, de tensão total do barramento e de tensão diferencial do barramento. Os modelos CA e de tensão total podem ser encontrados em [10], sendo assim será validado numericamente o modelo da planta de tensão diferencial do barramento.

4.1.1 Modelo da planta de tensão CA

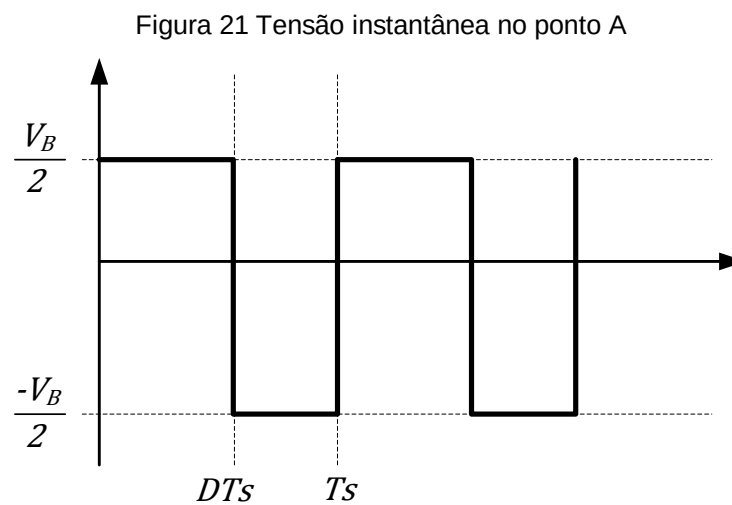
O modelo da tensão CA descreve a dinâmica da tensão no PAC para uma variação da razão cíclica do conversor.

A estrutura de potência é um inversor meia- ponte monofásico e é demonstrado na Figura 20.



Fonte: Produção do autor.

Para que a estrutura de potência seja simplificada é necessário saber que a comutação dos interruptores gera um nível de tensão no ponto A, e este ponto pode ser descrito como uma fonte de tensão com valor igual ao valor médio da tensão no ponto em um período de comutação. A Figura 21 representa a tensão no ponto A.



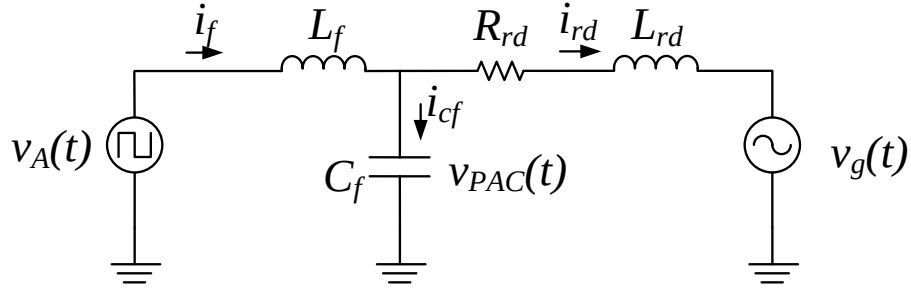
Fonte: Produção do autor

Da Figura 21 tem-se que $V_A(t)$ é:

$$V_A(t) = V_B \left(d(t) - \frac{1}{2} \right) \quad (67)$$

Assim pode-se simplificar a estrutura de potência da seguinte maneira:

Figura 22 Circuito simplificado



Fonte: Produção do autor

Da Figura 22 tem-se que:

$$i_{rd}(t) = i_{cf}(t) + i_f(t) \quad (68)$$

$$v_{PAC}(t) = L_{rd} \frac{di_{rd}(t)}{dt} + R_{rd} i_{rd}(t) + V_g \quad (69)$$

Sabendo que:

$$i_{rd}(t) = \frac{1}{L_f} \int_0^{T_s} \left\{ V_B \left[d(t) - \frac{1}{2} \right] - v_{PAC}(t) \right\} dt \quad (70)$$

Substituindo a equação 70 na equação 69, em seguida derivando os dois lados da igualdade e separando os termos de $v_{PAC}(t)$ e $d(t)$ resulta em:

$$\begin{aligned} k3 \frac{d^3 v_{PAC}(t)}{dt^3} + k2 \frac{d^2 v_{PAC}(t)}{dt^2} + k1 \frac{dv_{PAC}(t)}{dt} + R_{rd} v_{PAC}(t) = \\ = L_{rd} V_B \frac{dd(t)}{dt} + R_{rd} V_B d(t) + L_f \frac{dv_g(t)}{dt} - \frac{R_{rd} V_B}{2} \end{aligned} \quad (71)$$

Onde:

$$k3 = L_f L_{rd} C_f \quad (72)$$

$$k2 = L_f R_{rd} C_f \quad (73)$$

$$k1 = (L_f + L_{rd}) \quad (74)$$

Utilizando o conceito de valor médio quase-instantâneo, obtêm-se o seguinte modelo médio para descrever a dinâmica da tensão de saída do conversor:

$$\begin{aligned}
& k3 \frac{d^3 \langle v_{PAC}(t) \rangle}{dt^3} + k2 \frac{d^2 \langle v_{PAC}(t) \rangle}{dt^2} + k1 \frac{d \langle v_{PAC}(t) \rangle}{dt} + R_{rd} \langle v_{PAC}(t) \rangle = \\
& = L_{rd} V_B \frac{d \langle d(t) \rangle}{dt} + R_{rd} V_B \langle d(t) \rangle + L_f \frac{dv_g(t)}{dt} - \frac{R_{rd} V_B}{2}
\end{aligned} \tag{75}$$

Sabendo que a frequência de comutação é muito superior à frequência da rede, pode-se considerar que $v_g(t)$ é constante. Além disto, aplica-se uma perturbação na razão cíclica, resultando em uma perturbação na tensão do PAC e estas perturbações são representadas respectivamente por $\hat{d}(t)$ e $\hat{v}_{PAC}(t)$, assim, tem-se que:

$$\langle v_{PAC}(t) \rangle = V_{PAC} + \hat{v}_{PAC}(t) \tag{76}$$

$$\langle d(t) \rangle = D + \hat{d}(t) \tag{77}$$

$$\langle v_g(t) \rangle = V_g \tag{78}$$

Substituindo as equações 76, 77 e 78 em 75 tem-se:

$$\begin{aligned}
& k3 \frac{d^3 [V_{PAC} + \hat{v}_{PAC}(t)]}{dt^3} + k2 \frac{d^2 [V_{PAC} + \hat{v}_{PAC}(t)]}{dt^2} \\
& + k1 \frac{d [V_{PAC} + \hat{v}_{PAC}(t)]}{dt} + R_{rd} [V_{PAC} + \hat{v}_{PAC}(t)] = \\
& = L_{rd} V_B \frac{d [D + \hat{d}(t)]}{dt} + R_{rd} V_B [D + \hat{d}(t)] + L_f \frac{dV_g}{dt} - \frac{R_{rd} V_B}{2}
\end{aligned} \tag{79}$$

Na equação 79 os termos CC envolvem os valores quiescentes das variáveis, e estes termos dão origem ao ganho estático do inversor. Os termos CA dão origem ao modelo dinâmico do inversor, e para realizar a linearização do modelo, serão considerados apenas os termos de primeira ordem, resultando em:

$$\begin{aligned}
& k3 \frac{d^3 \hat{v}_{PAC}(t)}{dt^3} + k2 \frac{d^2 \hat{v}_{PAC}(t)}{dt^2} + k1 \frac{d \hat{v}_{PAC}(t)}{dt} + R_{rd} \hat{v}_{PAC}(t) = \\
& = L_{rd} V_B \frac{d \langle \hat{d}(t) \rangle}{dt} + R_{rd} V_B \hat{d}(t)
\end{aligned} \tag{80}$$

Aplicando a transformada de Laplace com condições iniciais nulas na equação 80 é possível obter a função de transferência que relaciona a tensão do PAC com a razão cíclica.

$$\frac{V_{PAC}(s)}{D(s)} = \frac{L_{rd} V_B s + R_{rd} V_B}{L_{rd} L_f C_f s^3 + R_{rd} L_f C_f s^2 + (L_{rd} + L_f) s + R_{rd}} \tag{83}$$

4.1.2 Modelo da planta de tensão total do barramento CC

O controle da tensão total do barramento CC se dará pela variação do ângulo da tensão no PAC, tornando-se necessário o conhecimento do modelo dinâmico que relaciona a tensão total do barramento CC com o ângulo da tensão no PAC. Para isso deve ser realizada uma análise do fluxo de potência, já apresentada no capítulo 3 e reapresentada a seguir.

$$p_g = \frac{v_g^2 R_{rd} - v_g v_{PAC} R_{rd} \cos\theta - v_g v_{PAC} X_{rd} \sin\theta}{Z_{rd}^2} \quad (82)$$

Da maneira como a equação acima é apresentada não é possível encontrar uma relação linear entre teta e a e a potência da rede (P_g), então a resistência da rede será desprezada com o intuito de simplificar a equação 82.

$$p_g = -\frac{v_g v_{PAC} \sin\theta}{X_{rd}} \quad (83)$$

Podendo ser reescrita explicitando a indutância da rede

$$p_g = -\frac{v_g v_{PAC} \sin\theta}{\omega_{rd} L_{rd}} \quad (84)$$

Sabe-se que para pequenas variações do ângulo pode-se afirmar que:

$$\sin\theta \cong \theta \quad (85)$$

Substituindo 85 em 84:

$$p_g = -\frac{v_g v_{PAC} \theta}{\omega_{rd} L_{rd}} \quad (86)$$

Aplicando uma perturbação em teta que causará uma perturbação na potência da rede, pode-se representar teta e a potência por:

$$\theta = \Theta + \hat{\theta}(s) \quad (87)$$

$$p_g = P_g + \hat{p}_g(s) \quad (88)$$

Substituindo 87 e 88 em 86:

$$P_g + \hat{p}_g(s) = -\frac{v_g v_{PAC} [\Theta + \hat{\theta}(s)]}{\omega_{rd} L_{rd}} \quad (89)$$

Novamente desprezando os termos CC e utilizando os termos de primeira ordem, tem-se:

$$\hat{p}_g(s) = -\frac{v_g v_{PAC} \hat{\theta}(s)}{\omega_{rd} L_{rd}} \quad (90)$$

Assim é possível encontrar a função de transferência que relaciona a potência da rede com o ângulo da tensão no PAC:

$$\frac{\hat{p}_g(s)}{\hat{\theta}(s)} = -\frac{v_g v_{PAC}}{\omega_{rd} L_{rd}} \quad (91)$$

Sabendo a relação da potência com o ângulo, é necessário descobrir qual é a relação da tensão nos capacitores do barramento CC com a potência processada pelo inversor.

Considerando que a energia em um capacitor é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} V_{cc}^2 C_b \quad (92)$$

Onde C_b é a capacitância equivalente do barramento total e V_{cc} é a tensão total do barramento.

A energia nos capacitores pode ser calculada por::

$$E_c = - \int p_{inv} dt \quad (93)$$

Substituindo 92 em 93:

$$\frac{1}{2} V_{cc}^2 C_b = - \int p_{inv} dt \quad (94)$$

Derivando os dois lados da igualdade tem-se que:

$$\frac{1}{2} \frac{dV_{cc}^2}{dt} C_b = -p_{inv} \quad (95)$$

Causando uma perturbação na tensão do barramento, que causará uma perturbação da potência do inversor (p_{inv}) e aplicando Laplace, pode-se escrever a tensão no barramento e a potência no inversor como:

$$V_{cc} = V_{cc} + \hat{v}_{cc}(s) \quad (96)$$

$$p_{inv} = P_{inv} + \hat{p}_{inv}(s) \quad (97)$$

Substituindo 96 e 97 em 95:

$$\frac{1}{2} s[V_{cc} + \hat{v}_{cc}(s)]^2 C_b = -[P_{inv} + \hat{p}_{inv}(s)] \quad (98)$$

$$\frac{1}{2} s[V_{cc}^2 + 2V_{cc}\hat{v}_{cc}(s) + \hat{v}_{cc}^2(s)] C_b = -[P_{inv} + \hat{p}_{inv}(s)] \quad (99)$$

Desconsiderando os termos CC e utilizando os termos de primeira ordem tem-se que:

$$\frac{1}{2} s 2V_{cc} \hat{v}_{cc}(s) C_b = -\hat{p}_{inv}(s) \quad (100)$$

A partir da equação 100 pode-se então encontrar a função de transferência que relaciona a potência processada pelo inversor com a tensão total do barramento CC:

$$\frac{\hat{v}_{cc}(s)}{\hat{p}_{inv}(s)} = -\frac{1}{sV_{cc}C_b} \quad (101)$$

Pela conservação de energia e considerando a carga uma perturbação ao sistema, sabe-se que:

$$\hat{p}_{inv} + \hat{p}_g = 0 \quad (102)$$

Substituindo as equações (100) e (101) na equação (102), e manipulando os dois lados da igualdade, é possível encontrar uma função de transferência que descreva o comportamento dinâmico da tensão total do barramento CC com o ângulo da tensão no PAC:

$$\frac{\hat{v}_{cc}(s)}{\hat{\theta}(s)} = -\frac{v_g v_{PAC}}{sV_{cc}C_b\omega_{rd}L_{rd}} \quad (103)$$

4.1.3 Modelo da planta de tensão diferencial do barramento CC

O modelo dinâmico da tensão diferencial do barramento CC deverá relacionar a diferença das tensões em cada capacitor do barramento com a tensão do PAC.

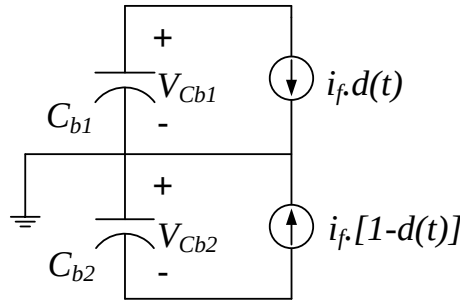
Como a tensão do PAC é controlada pela malha de tensão CA e a tensão total do barramento CC é controlada pelo ângulo de defasagem, implica que a corrente de saída do inversor será controlada em regime permanente, tornando possível a simplificação do circuito do conversor, apresentado na Figura 20, para a obtenção do modelo da planta diferencial do barramento CC. O circuito simplificado pode ser visto na Figura 23.

Da Figura 23 tem-se que:

$$V_{cb1}(t) = -\frac{1}{j\omega C_{b1}} i_f d(t) \quad (104)$$

$$V_{cb2}(t) = \frac{1}{j\omega C_{b2}} i_f [1 - d(t)] \quad (105)$$

Figura 23 Circuito simplificado



Fonte: Produção do autor.

Definindo a tensão diferencial como:

$$V_{dif}(t) = V_{Cb1}(t) - V_{Cb2}(t) \quad (106)$$

Sabendo que:

$$C_{b1} = C_{b2} = C_b \quad (107)$$

Substituindo a equação 106 nas equações 104 e 105 e em seguida substituindo estas na equação 107:

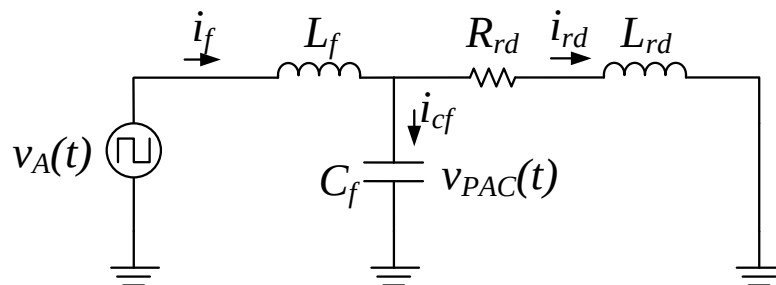
$$V_{dif}(t) = -\frac{1}{j\omega C_b} i_f(t) \quad (108)$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação 108:

$$V_{dif}(s) = -\frac{1}{sC_b} i_f(s) \quad (109)$$

Para encontrar uma relação entre a corrente no indutor do filtro (i_f) e a tensão do PAC será feita uma análise, do circuito completo, por superposição, além disto, é sabido que a tensão da rede é vista como uma perturbação para as malhas de controle, sendo assim o circuito analisado é apresentado na Figura 24.

Figura 24 Circuito para encontrar corrente no indutor do filtro



Fonte: Produção do autor.

Fazendo análise nodal, manipulando as equações e fazendo a transformada de Laplace, pode-se representar a corrente i_f por:

$$i_f(s) = V_{PAC}(s) \left(\frac{s^2 C_f L_{rd} + s C_f R_{rd} + 1}{s L_{rd} + R_{rd}} \right) \quad (110)$$

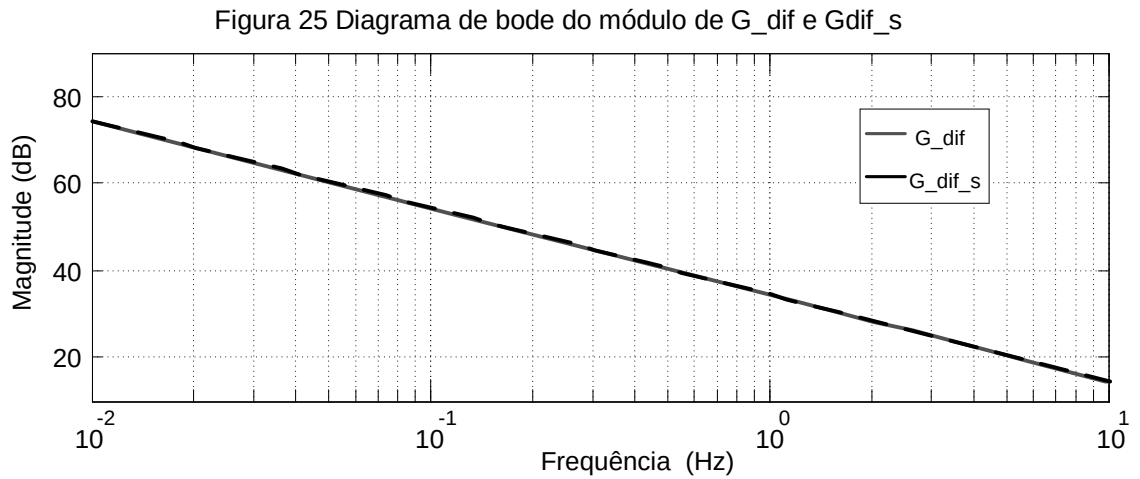
Substituindo a equação 110 na equação 109:

$$\frac{V_{dif}(s)}{V_{PAC}(s)} = -\frac{1}{s C_b} \left(\frac{s^2 C_f L_{rd} + s C_f R_{rd} + 1}{s L_{rd} + R_{rd}} \right) \quad (111)$$

O controle da tensão diferencial será projetado para que a função de transferência de malha aberta tenha uma frequência de cruzamento cerca de dez vezes menor que a frequência de cruzamento da função de transferência de malha aberta da malha de tensão total do barramento, que terá uma frequência de cruzamento cerca de uma década abaixo da frequência da rede. Estes detalhes serão mais discutidos no decorrer deste trabalho, mas já tendo este conhecimento é possível desprezar as dinâmicas mais rápidas do modelo, como mostrado na Figura 25, podendo ser simplificado por:

$$\frac{V_{dif}(s)}{V_{PAC}(s)} = -\frac{1}{s C_b R_{rd}} \quad (112)$$

Para diferenciar as equações (111) e (112), na Figura 25 elas serão chamadas de G_dif e G_dif_s respectivamente.



Fonte: Produção do autor.

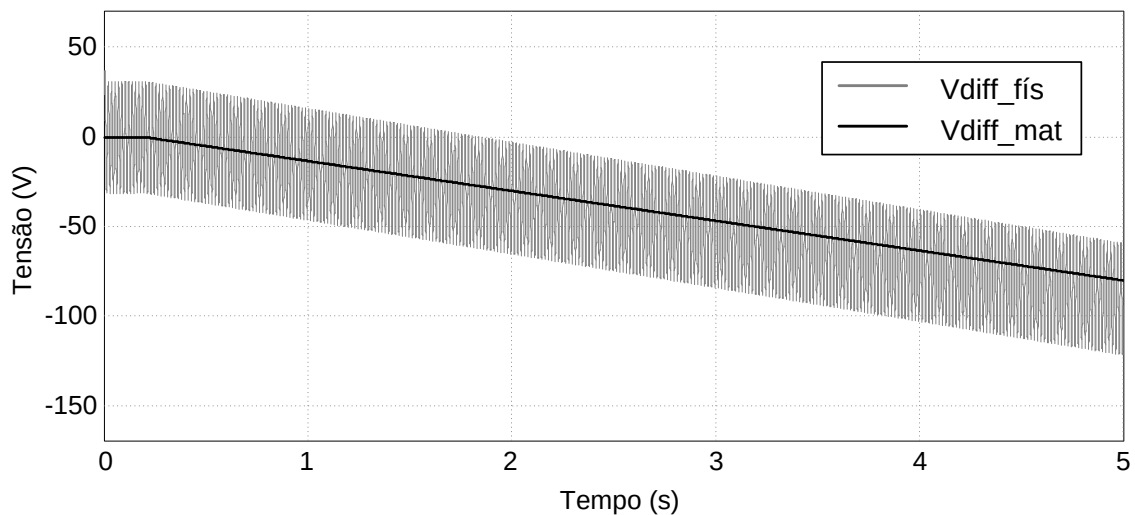
4.1.4 Validação do modelo da planta de tensão diferencial do barramento CC

Como apresentado anteriormente, não foi encontrado o modelo dinâmico da tensão diferencial do barramento CC em nenhum trabalho, tornado necessária a validação do modelo matemático apresentado na seção 1.1.3. Para isto foi utilizado

o software PSIM® para comparar o comportamento físico da tensão diferencial do barramento com o comportamento do modelo matemático. A entrada aplicada no modelo físico foi um offset na referência de tensão e foi medido o comportamento da tensão diferencial do barramento CC, uma entrada equivalente foi aplicada ao modelo matemático. Os resultados são apresentados na Figura 26 onde $V_{diff_fís}$ e V_{diff_mat} são os modelos físico e matemático respectivamente.

Analisando os resultados, é possível afirmar que o modelo encontrado para a tensão diferencial do barramento CC é aceitável, já que as curvas são muito semelhantes, tornando o modelo matemático válido.

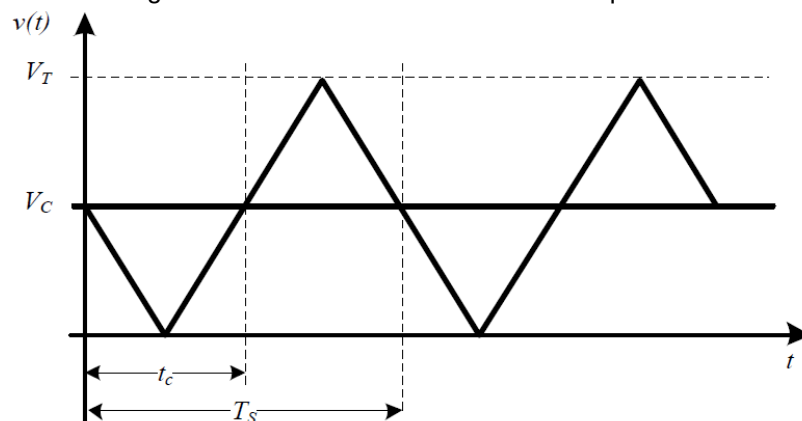
Figura 26 Tensão diferencial dos modelos físico e matemático



Fonte: Produção do autor.

4.1.5 Modelo do modulador PWM

Figura 27 Portadora e sinal de baixa frequência.



Fonte: [5].

O modelo matemático do modulador PWM deve apresentar o comportamento da razão cíclica d ao sinal de saída do controlador.

O modulador converterá um sinal contínuo em pulsos de comando para as chaves do inversor. O método utilizado para promover tal conversão foi a comparação de um sinal triangular de alta frequência (frequência de comutação) com um sinal de frequência muito inferior a frequência à onda triangular [11], como mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Considerando que V_T é a amplitude da triangular, V_c é o sinal da saída do controlador, t_c é o tempo em que o interruptor permanece fechado e T_s é um período de chaveamento, a razão cíclica D pode ser definida pela equação 113

$$D = \frac{t_c}{T_s} \quad (113)$$

Assumindo que a onda triangular é simétrica tem-se que:

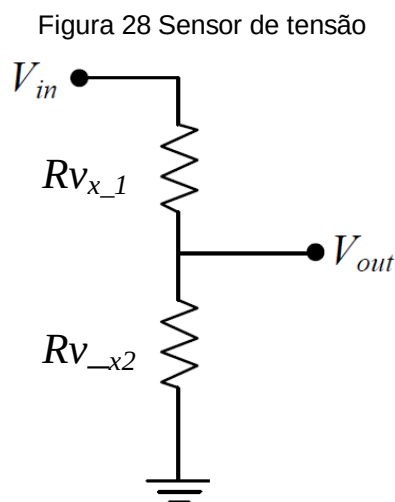
$$\frac{V_c}{V_T} = \frac{t_c}{T_s} \quad (114)$$

Substituindo a equação 113 na equação 114, e manipulando a equação resultante, é possível encontrar a função de transferência do modulador PWM.

$$PWM = \frac{D}{V_c} = \frac{1}{V_T} \quad (115)$$

4.1.6 Modelo do sensor de tensão

Os sensores de tensão utilizados no conversor serão divisores de tensão resistivos, como mostra a Figura 28.



Fonte: [5].

O modelo matemático do sensor de tensão associa uma tensão de saída V_{out} , com amplitude adequada para medição, com uma tensão de entrada V_{in} , abaixo as equações 116 e 117 representam o modelo matemático dos sensores da tensão do PAC e do barramento (total e diferencial).

$$K_{v_PAC} = \frac{R_{v_PAC2}}{R_{v_PAC1} + R_{v_PAC2}} \quad (116)$$

$$K_{v_B} = \frac{R_{v_B2}}{R_{v_B1} + R_{v_B2}} \quad (117)$$

4.2 PROJETO DOS CONTROLADORES

Tendo o conhecimento dos modelos matemáticos das plantas, é possível projetar os controladores das tensões do PAC, do barramento total e do barramento diferencial, que serão apresentados nesta seção.

O projeto dos controladores é baseado na metodologia da resposta em frequência, onde ganho e fase do sistema são analisados em função da frequência.

As malhas da tensão de barramento total e diferencial são muito mais lentas que a malha de tensão do PAC para evitar que haja interação entre as malhas.

De acordo com a metodologia de projeto de sistemas contínuos no plano "s" apresentada em [11] e [14], o projeto dos controladores deverá atender os seguintes requisitos:

- Margem de fase entre 30° e 90°;
- A inclinação da curva de módulo da função de transferência de laço aberto na passagem por 0dB deve ser de -20dB/década;
- Erro estático nulo;
- A frequência de cruzamento da curva de ganho para o sistema em laço aberto deve ser pelo menos quatro vezes menor que a frequência de comutação do modulador PWM;

A Tabela 4 apresenta os parâmetros necessários para realizar o projeto dos controladores

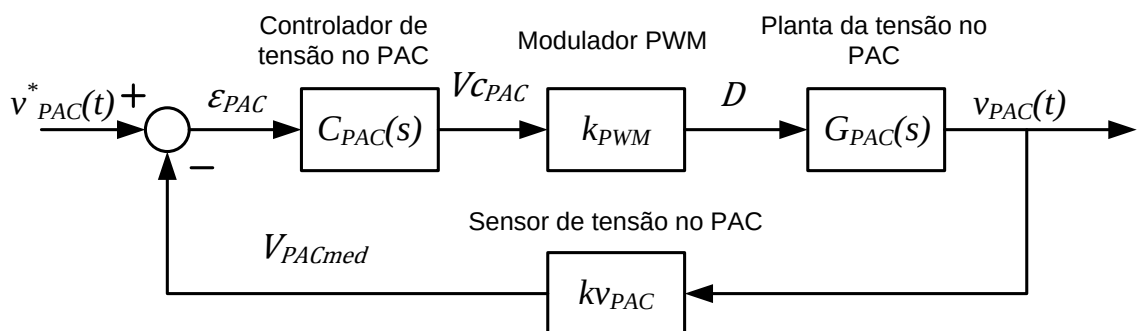
Tabela 4 Parâmetros do projeto dos controladores

Potência de saída	$S_o = 1.500 \text{ VA}$
Tensão do barramento CC	$V_B = 600 \text{ V}$
Capacitância do barramento CC	$C_b = 1 \text{ mF}$
Capacitância do filtro de saída	$C_f = 5,4 \text{ } \mu\text{F}$
Indutância do filtro de saída	$L_f = 0,9 \text{ mH}$
Frequência de comutação	$f_s = 50 \text{ kHz}$
Indutância da rede	$L_{rd} = 3,99 \text{ mH}$
Resistência da rede	$R_{rd} = 1,51 \text{ } \Omega$
Ganho do sensor de tensão do PAC	$K_{V_{PAC}} = 0,0625$
Ganho do sensor de tensão total	$K_{V_{tot}} = 0,0057$
Ganho do sensor de tensão diferencial	$K_{V_{dif}} = 0,0057$
Ganho na saída do controlador de tensão total	$K_{AT_{tot}} = 0,051$
Ganho do modulador PWM	$K_{PWM} = 1/22 \text{ V}^{-1}$

Fonte: Produção do autor.

4.2.1 Projeto do controlador da tensão no PAC

Figura 29 Malha de controle da tensão no PAC



Fonte: Produção do autor.

Para realizar o projeto do controlador da tensão no PAC, parte-se do diagrama de blocos da malha de controle da tensão no PAC, que é apresentado na Figura 29.

O projeto do controlador será realizado pela análise da função de transferência de laço aberto da malha de tensão no PAC que é apresentada na equação 118.

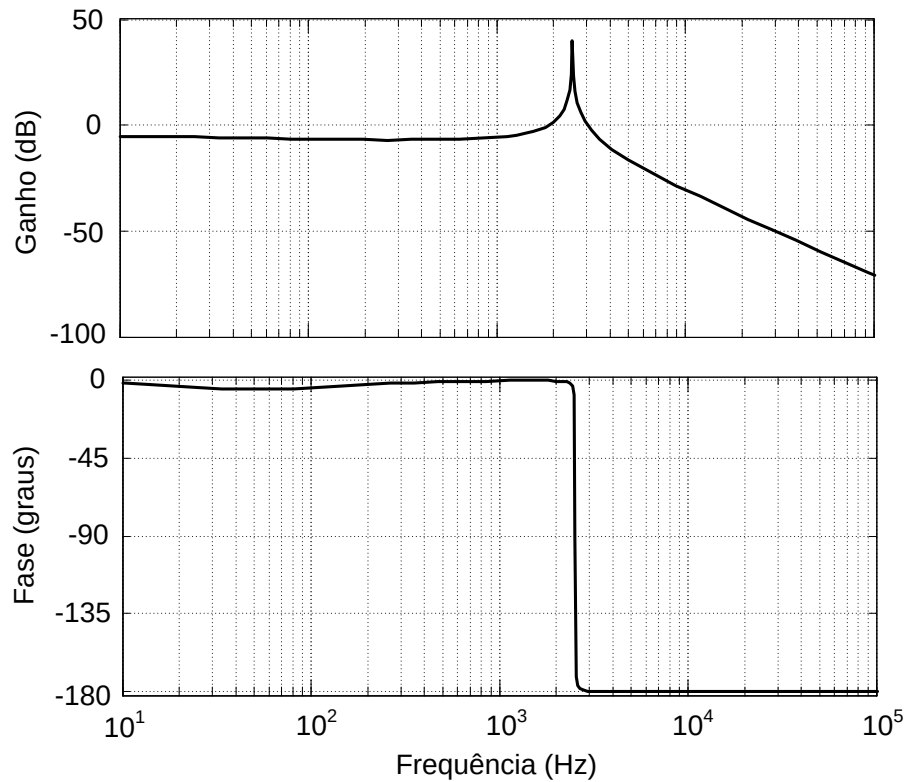
$$FTLA_{PAC}(s) = C_{PAC}(s) \cdot k_{PWM} \cdot kv_{PAC} \cdot G_{PAC}(s) \quad (118)$$

Onde:

$$G_{PAC}(s) = \frac{L_{rd}V_B s + R_{rd}V_B}{L_{rd}L_f C_f s^3 + R_{rd}L_f C_f s^2 + (L_{rd} + L_f)s + R_{rd}} \quad (119)$$

Para traçar a função de transferência de laço aberto, em um primeiro instante, foi considerado o compensador da tensão no PAC sendo unitário. A resposta em frequência da função de transferência de laço aberto é apresentada na Figura 30.

Figura 30 Função de transferência de laço aberto do PAC sem o compensador



Fonte: Produção do autor.

Observa-se que o sistema possui uma margem de fase ruim, próxima a $0,5^\circ$. A frequência de cruzamento está situada em 3 kHz, que não chega a ser um resultado ruim, porém não é a frequência desejada, e verifica-se ainda que a inclinação da curva de ganho na frequência de cruzamento é de -40dB/década, distante da inclinação desejada de -20dB/década.

A frequência de corte adotada será adotada como:

$$f_{c_{PAC}} = \frac{f_s}{8} = 6,25 \text{ kHz} \quad (120)$$

O controlador escolhido para a malha de tensão no PAC é do tipo proporcional integral derivativo, que apresenta a seguinte função de transferência:

$$C_{PID}(s) = k_{PID} \cdot \frac{(s + z_{PID1})(s + z_{PID2})}{s(s + p_{PID})} \quad (121)$$

Onde k_{PID} é o ganho do controlador PID, z_{PID1} , z_{PID2} e p_{PID} são os zeros e o polo do controlador PID, respectivamente, em rad/s.

O polo na origem fornece um ganho elevado para baixas frequências e garante o erro em regime permanente nulo. Os dois zeros serão alocados na frequência de ressonância da planta para atenuar os efeitos dos polos ou até mesmo anulá-los e o segundo polo foi situado em uma frequência de cinco vezes a frequência de cruzamento, para atenuar os distúrbios de mais alta frequência.

Comparando a equação 119 com a equação 61 é possível observar que seus denominadores são iguais, portanto a frequência de ressonância da planta de tensão no PAC é a mesma frequência de ressonância calculada na equação 62, portanto a frequência dos zeros do controlador será adotada conforme equação (122):

$$z_{PID1} = z_{PID2} = 2\pi \cdot 2,5 \text{ kHz} = 15,71k \text{ rad/s} \quad (122)$$

Com a frequência do polo já determinada em função da frequência de cruzamento, tem-se que:

$$p_{PID} = 2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot f_{c_{PAC}} = 2 \cdot \pi \cdot 31,25 \text{ kHz} = 196,35k \text{ rad/s} \quad (123)$$

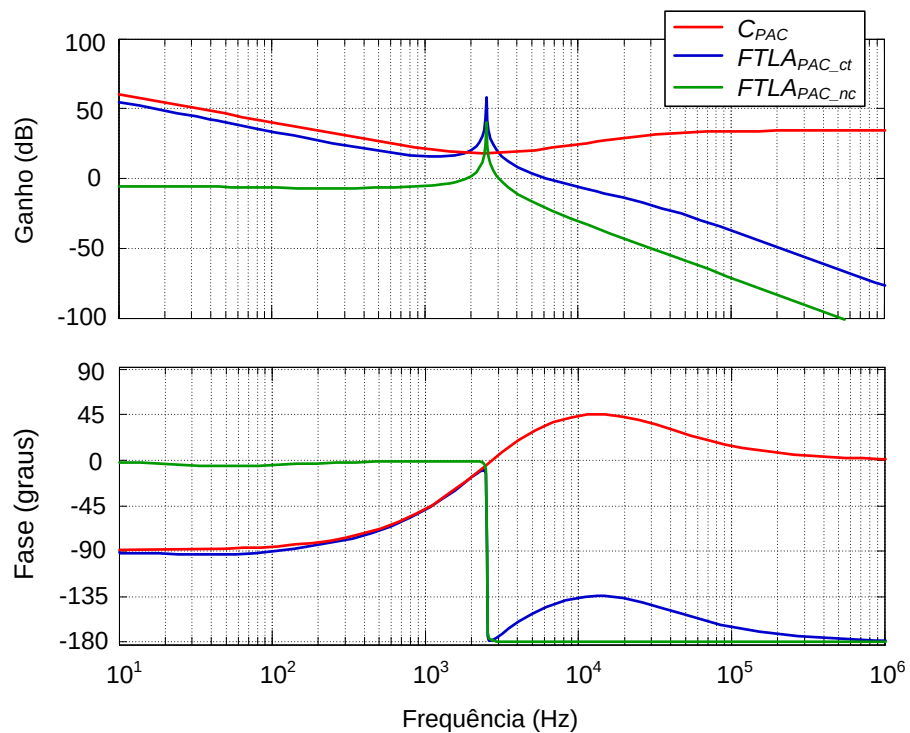
Para calcular o ganho do controlador, aplica-se o operador módulo na $FTLA_{PAC}$ na frequência de corte, na qual o valor do módulo nesta frequência deverá ser unitário. Porém, com a finalidade de simplificar o trabalho, foi utilizada a função *rltool* do software Matlab® na $FTLA_{PAC}$ considerando o controlador unitário, os polos e zeros do controlador foram alocados e o ganho foi encontrado para que a função

de transferência de laço aberto atendessem os requisitos do projeto. O ganho obtido foi:

$$k_{PID} = 15,2 \quad (124)$$

O diagrama de bode a seguir mostra a resposta em frequência do controlador (C_{PAC}), do sistema controlado ($FTLA_{PAC_ct}$) e não controlado ($FTLA_{PAC_nc}$).

Figura 31 Resposta em frequência do compensador e FTLA compensada e não compensada.

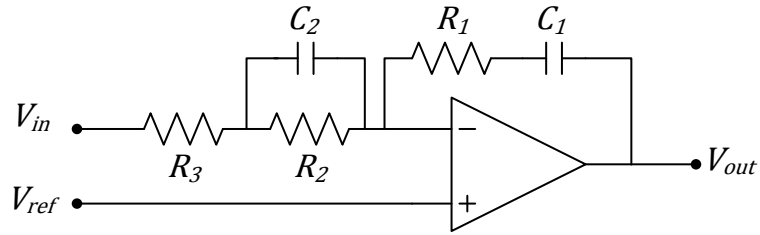


Fonte: Produção do autor.

Pela Figura 31 observa-se que o digrama de ganho e de fase da função de transferência de laço aberto da malha de tensão no PAC apresenta frequência de cruzamento de 6,25 kHz e margem de fase de 35,1 graus, obedecendo aos requisitos de projeto. Observa-se também um ganho elevado para frequências abaixo da frequência de cruzamento, permitindo maior robustez ao controle frente a distúrbios nestas frequências.

O controlador analógico utilizado para o controle da tensão do PAC é apresentado na Figura 32.

Figura 32 Controlador analógico da tensão no PAC



Fonte: Adaptado de [15].

A função de transferência do controlador analógico PID é dada pela equação 125

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{R_1}{R_3} \cdot \frac{\left(s + \frac{1}{R_1 C_1}\right) \left(s + \frac{1}{R_2 C_2}\right)}{s \left[s + \frac{1}{R_2 C_2} \cdot \left(\frac{R_2}{R_3} + 1\right)\right]} \quad (125)$$

Comparando a equação 125 com a equação 121, é possível encontrar as capacitâncias e resistências que serão utilizadas para implementar o controlador analógico:

$$C_1 = 18nF \quad (126)$$

$$R_1 = \frac{1}{C_1 z_{PID1}} = 3,3 \text{ k}\Omega \quad (127)$$

$$R_3 = \frac{R_1}{k_{PID}} = 220 \text{ }\Omega \quad (128)$$

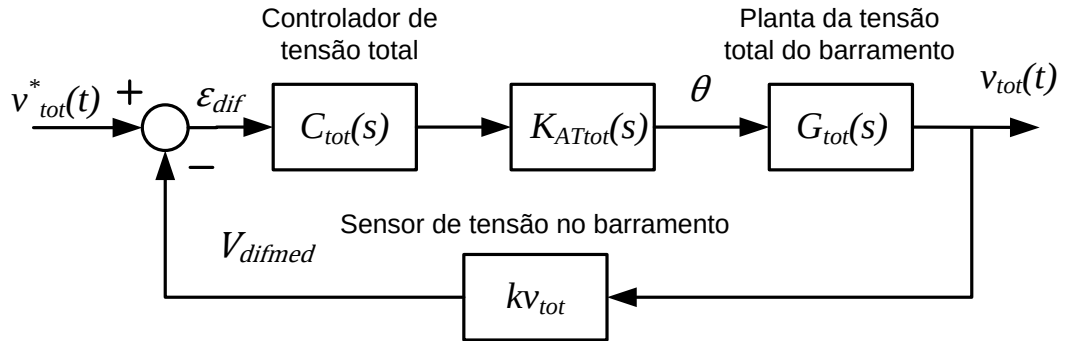
$$R_2 = R_3 (R_2 C_2 p_{PID} + 1) = R_3 \left(\frac{p_{PID}}{z_{PID2}} + 1\right) = 2,7 \text{ k}\Omega \quad (129)$$

$$C_2 = \frac{1}{R_2 z_{PID2}} = 22nF \quad (130)$$

4.2.2 Projeto do controlador da tensão total do barramento CC

Para realizar o projeto do controlador da tensão total no barramento CC, parte-se do diagrama de blocos apresentado na Figura 33.

Figura 33 Malha de controle da tensão total do barramento CC



Fonte: Produção do autor.

A malha de tensão total do barramento deverá ser mais lenta que a malha de controle do PAC, evitando que a malha de tensão total interfira na malha de tensão do PAC.

Comumente a frequência de cruzamento da malha de tensão total é sintonizada no máximo a um décimo da frequência natural de oscilação da topologia, porém devido às simplificações realizadas na modelagem da planta de controle total do barramento, a frequência de cruzamento será reduzida.

O projeto do controlador será realizado pela análise da função de transferência de laço aberto da malha de tensão total do barramento CC, que é apresentada na equação 131.

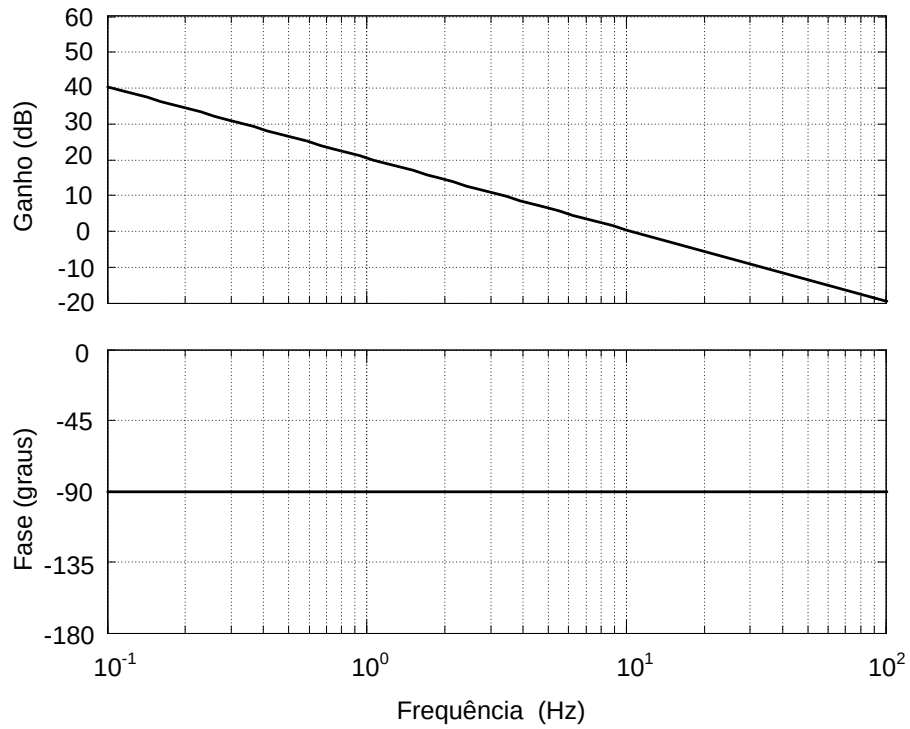
$$FTLA_{tot}(s) = C_{tot}(s) \cdot K_{ATtot} \cdot kv_{tot} \cdot G_{tot}(s) \quad (131)$$

Onde:

$$G_{tot}(s) = -\frac{v_g v_{PAC}}{s V_{CC} C_b \omega_{rd} L_{rd}} \quad (132)$$

Para traçar a função de transferência de laço aberto, em um primeiro instante, foi considerado o compensador da tensão total do barramento sendo unitário. A resposta em frequência da função de transferência de laço aberto é mostrada na Figura 34.

Figura 34 Função de transferência de laço aberto da tensão total do barramento sem compensador



Fonte: Produção do autor.

Observa-se que o sistema possui uma margem de fase boa, mas a frequência de cruzamento está situada em 10 Hz, porém a frequência de corte da malha de tensão total do barramento foi escolhida como:

$$f_{c_{tot}} = \frac{2 \cdot f_{rd}}{20} = 6 \text{ Hz} \quad (133)$$

Pelo sistema possuir margem de fase adequada, um compensador do tipo proporcional seria suficiente para garantir os requisitos do projeto. No entanto um compensador do tipo PI seria mais adequado pois além de garantir erro nulo em regime permanente proporciona uma inclinação de -20dB/década, fazendo com que o ganho da função de transferência de laço aberto em baixas frequências se eleve, melhorando a rejeição de ruídos. Um polo adicional de alta frequência será utilizando com o objetivo de reduzir os ruídos de alta frequência. Sendo assim o compensador escolhido será do tipo PI com polo adicional e sua função de transferência é apresentada na equação 134.

$$C_{PI+P}(s) = k_{PI+P} \cdot \frac{s + z_{PI+P}}{s(s + p_{PI+P})} \quad (134)$$

O zero do compensador foi alocado em uma frequência abaixo da frequência de cruzamento para garantir que a curva de ganho da função de transferência de laço aberto apresente uma inclinação de -20dB/década em 0dB, obedecendo a seguinte equação:

$$z_{PI+P} = \frac{f_{c_{tot}}}{4} = 2\pi \cdot 1,5 \text{ Hz} = 9,42 \text{ rad/s} \quad (135)$$

O polo adicional foi inserido da maneira que segue:

$$p_{PI+P} = 40 \cdot z_{PI+P} = 2\pi \cdot 60 \text{ Hz} = 377 \text{ rad/s} \quad (136)$$

O ganho do compensador foi obtido da mesma maneira descrita na seção 1.2.1.

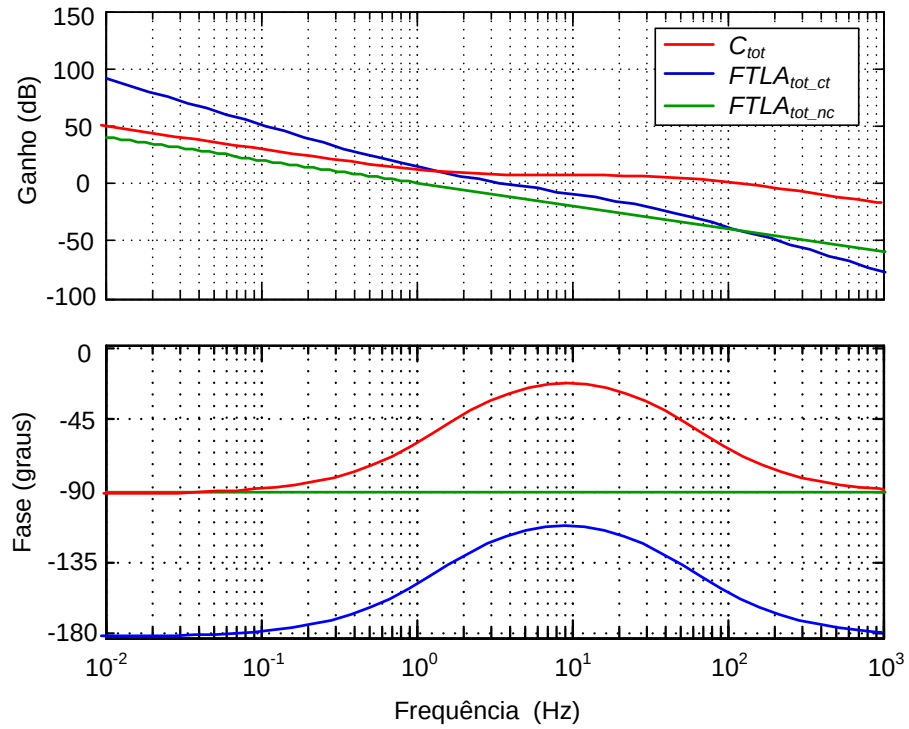
$$k_{PI+P} = 1315 \quad (137)$$

O diagrama de bode a seguir mostra a resposta em frequência do controlador (C_{tot}), do sistema controlado ($FTLA_{tot_ct}$) e não controlado ($FTLA_{tot_nc}$).

Pela Figura 35 observa-se que o digrama de ganho e de fase da função de transferência de laço aberto da malha da tensão total do barramento apresenta frequência de cruzamento de 6 Hz e margem de fase de 70,3 graus, obedecendo aos requisitos de projeto. Observa-se também um ganho elevado para frequências abaixo da frequência de cruzamento, permitindo maior robustez ao controle frente a distúrbios nestas frequências.

O controlador analógico utilizado para controlar a tensão total do barramento é apresentado na Figura 36.

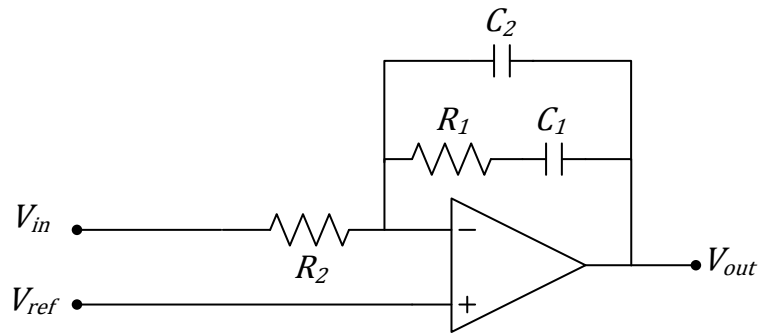
Figura 35 Resposta em frequência do compensador e FTLA compensada e não compensada.



Fonte: Produção do autor.

O controlador analógico utilizado para controlar a tensão total do barramento é apresentado na Figura 36.

Figura 36 Controlador analógico da tensão total do barramento



Fonte: Adaptado de [15].

A função de transferência do controlador analógico PI com um polo adicional é apresentada na equação 138.

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{\left(s + \frac{1}{R_1 C_1}\right)}{C_2 R_2 s \left(s + \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2 R_1}\right)} \quad (138)$$

Comparando as equações 138 e 134 temos que:

$$C_1 = 470nF \quad (139)$$

$$R_1 = \frac{1}{C_1 z_{PI+P}} = 220 k\Omega \quad (140)$$

$$C_2 = \frac{C_1}{C_1 R_1 p_{PI+P} - 1} = 12nF \quad (141)$$

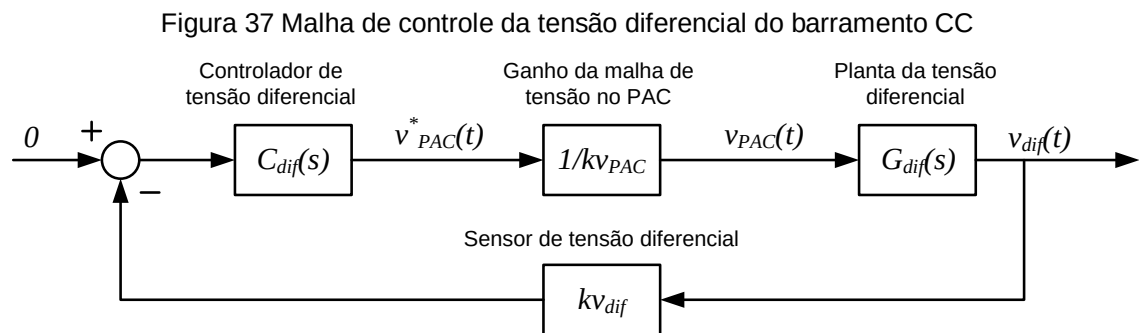
$$R_2 = \frac{1}{C_2 k_{PI+P}} = 68 k\Omega \quad (142)$$

4.2.3 Projeto do controlador da tensão diferencial do barramento CC

A malha de controle da tensão diferencial do barramento CC influenciará diretamente a malha de controle da tensão do PAC, incluindo um nível CC na referência de tensão.

O projeto da malha de controle da tensão diferencial será realizado de modo que a dinâmica da malha de controle diferencial seja mais lenta que a malha de tensão total, que por sua vez já é mais lenta que a malha de tensão do PAC evitando a interação entre as malhas, e possibilitando a substituição da malha de tensão do PAC por um ganho igual ao inversor do ganho do sensor de tensão do PAC.

O diagrama de blocos da malha de tensão diferencial é apresentado na Figura 37.



Fonte: Produção do autor.

O projeto do controlador será realizado pela análise da função de transferência de laço aberto da malha de tensão diferencial do barramento CC, que é apresentada na equação 143.

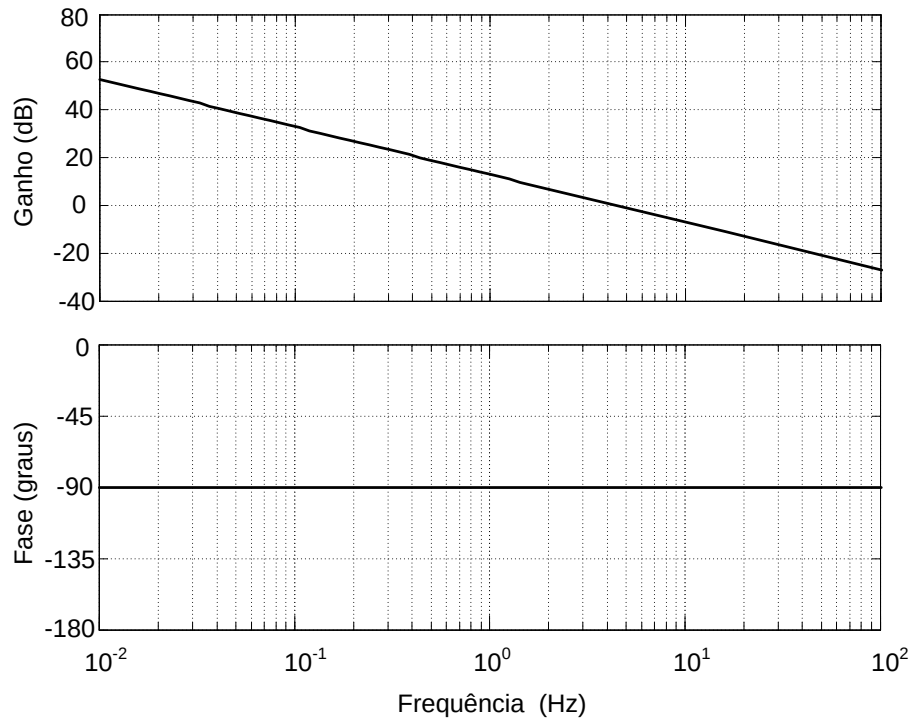
$$FTLA_{dif}(s) = C_{dif}(s) \cdot \frac{1}{kv_{PAC}} \cdot kv_{dif} \cdot G_{dif}(s) \quad (143)$$

Onde:

$$G_{dif}(s) = -\frac{1}{sC_bR_{rd}} \quad (144)$$

Para traçar a função de transferência de laço aberto (FTLA), em um primeiro instante, foi considerado o compensador da tensão diferencial do barramento sendo unitário. A resposta em FTLA é apresentada na Figura 38.

Figura 38 Função de transferência de laço aberto da tensão diferencial do barramento sem compensador



Fonte: Produção do autor.

Observa-se que o sistema possui uma margem de fase boa, mas a frequência de cruzamento está situada em aproximadamente 20 Hz, o que não é desejado. A frequência de corte será adotada como:

$$f_{c_{dif}} = \frac{f_{c_{tot}}}{2,5} = 2,4 \text{ Hz} \quad (145)$$

Nota-se que a frequência de corte escolhida não é a mesma frequência citada anteriormente, que seria uma década abaixo da frequência de corte da malha de tensão total do barramento CC. Isto se deveu ao fato de que os componentes

calculados, para a frequência da corte estipulada inicialmente, seriam de valores muito altos, tornando impraticável a implementação do controlador analógico.

O compensador escolhido para esta malha de controle será do tipo PI com um polo adicional de alta frequência, o mesmo compensador escolhido para a malha de controle da tensão total do barramento, pelos mesmos motivos já citados na seção 1.2.2. O zero do compensador será alocado em:

$$z_{PI+P_dif} = \frac{f_{c_{dif}}}{2} = 2\pi \cdot 1,2 \text{ Hz} = 7.54 \text{ rad/s} \quad (146)$$

O polo de alta frequência será alocado em:

$$p_{PI+P_dif} = 20 \cdot z_{PI+P_dif} = 2\pi \cdot 24 \text{ Hz} = 150,8 \text{ rad/s} \quad (147)$$

O ganho foi encontrado conforme descrito na seção 1.2.1.

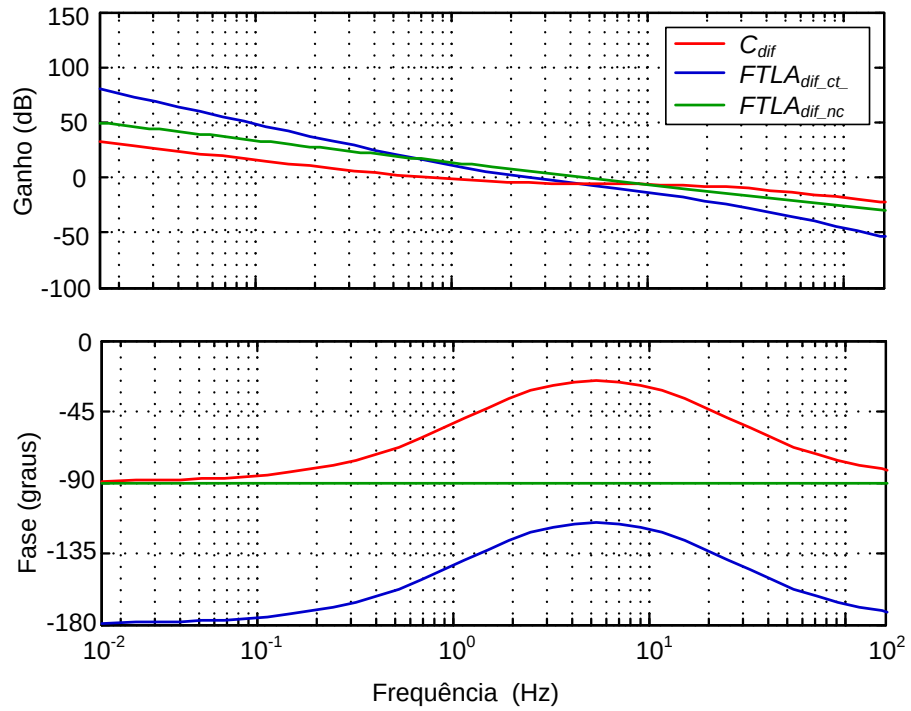
$$k_{PI+P_dif} = 67,7 \quad (148)$$

O diagrama de bode da Figura 39 mostra a resposta em frequência do controlador (C_{dif}), do sistema controlado ($FTLA_{dif_ct}$) e não controlado ($FTLA_{dif_nc}$).

Pode-se observar que o diagrama de ganho e de fase da função de transferência de laço aberto da malha da tensão total do barramento apresenta frequência de cruzamento de 2,4 Hz e margem de fase de 58,1 graus, obedecendo aos requisitos de projeto. Observa-se também um ganho elevado para frequências abaixo da frequência de cruzamento, permitindo maior robustez ao controle frente a distúrbios nestas frequências.

O controlador analógico utilizado para controlar a tensão total do barramento é o mesmo apresentado na Figura 36.

Figura 39 Resposta em frequência do compensador e FTLA compensada e não compensada.



Fonte: Produção do autor.

Comparando as equações 138 e 134 tem-se que:

$$C_1 = 2,47 \mu F \quad (149)$$

$$R_1 = \frac{1}{C_1 z_{PI+P}} = 56 \text{ k}\Omega \quad (150)$$

$$C_2 = \frac{C_1}{C_1 R_1 p_{PI+P} - 1} = 120 \text{ nF} \quad (151)$$

$$R_2 = \frac{1}{C_2 k_{PI+P}} = 120 \text{ k}\Omega \quad (152)$$

5 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Este capítulo visa avaliar o funcionamento do regulador de tensão através de simulações numéricas, sendo então possível validar a técnica de compensação proposta bem como os modelos matemáticos das plantas a serem controladas e os projetos dos controladores.

O regulador responsável por regular a tensão do PAC foi inserido em um sistema com cargas lineares conectadas a rede de alimentação, para que uma avaliação do desempenho do regulador pudesse ser feita com relação aos níveis de tensão críticos e/ou precários do PAC.

O programa utilizado para realizar a simulação foi o *PSim*. Os níveis de tensão foram comparados aos estabelecidos pelo PRODIST (Módulo 8) que foram apresentados na Tabela 1, sem o regulador estar conectado ao PAC e com o regulador conectado ao PAC.

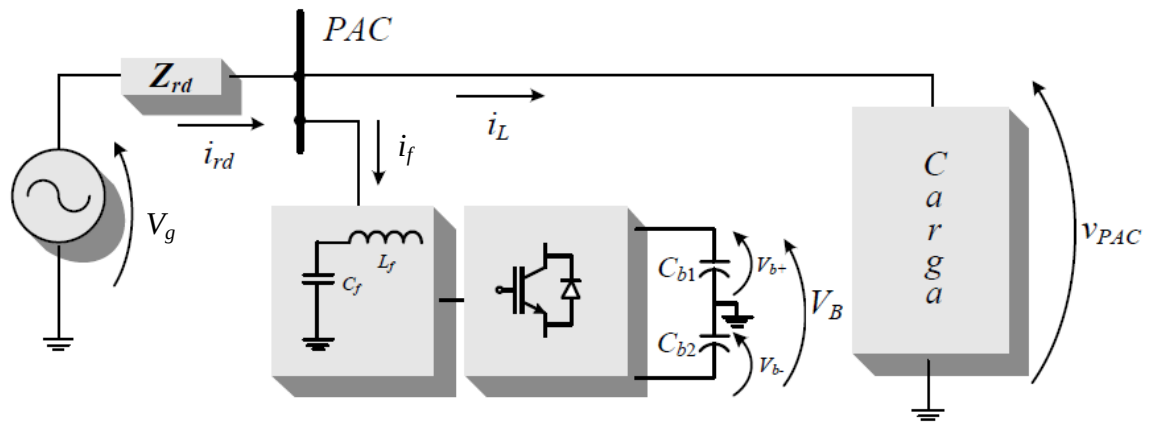
Primeiramente a estrutura simulada será apresentada, em seguida as especificações de carga e de tensão no PAC e por fim os resultados das simulações com as conclusões do capítulo.

5.1 ESTRUTURA SIMULADA

A estrutura simulada consiste de uma fonte de tensão com uma impedância série representando a linha de distribuição, a carga e o conversor, e estão conectados pelo PAC. A

Figura 40 apresenta o diagrama unifilar do sistema simulado.

Figura 40 Diagrama unifilar do sistema simulado



Fonte: Adaptado de [5].

Para realizar a simulação foram escolhidas duas cargas, uma com características indutivas e outra com características resistivas.

As cargas foram escolhidas para que suas potências não ultrapassassem a potência nominal do conversor, sendo a carga indutiva com fator de potência de 0,8.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados para realizar a simulação.

Tabela 5 Parâmetros da simulação

Tensão nominal da rede	$V_g = 127 \text{ V}$
Frequência da rede	$f_{rd} = 60 \text{ Hz}$
Indutância da rede	$L_{rd} = 3,99 \text{ mH}$
Resistência da rede	$R_{rd} = 1,51 \text{ } \Omega$
Tensão nominal do barramento	$V_b = 600 \text{ V}$
Capacitância do barramento CC	$C_b = 1 \text{ mF}$
Capacitância do filtro de saída	$C_f = 5,4 \text{ } \mu\text{F}$
Indutância do filtro de saída	$L_f = 0,9 \text{ mH}$
Frequência de comutação	$f_s = 50 \text{ kHz}$

Fonte: Produção do autor.

5.1.1 Especificação da queda de tensão

As cargas foram escolhidas com o objetivo de causar uma queda de tensão no PAC para que a tensão de atendimento permanecesse fora dos limites do PRODIST, tornando necessária a utilização do regulador de tensão para que a tensão do PAC passe a ser classificada como adequada.

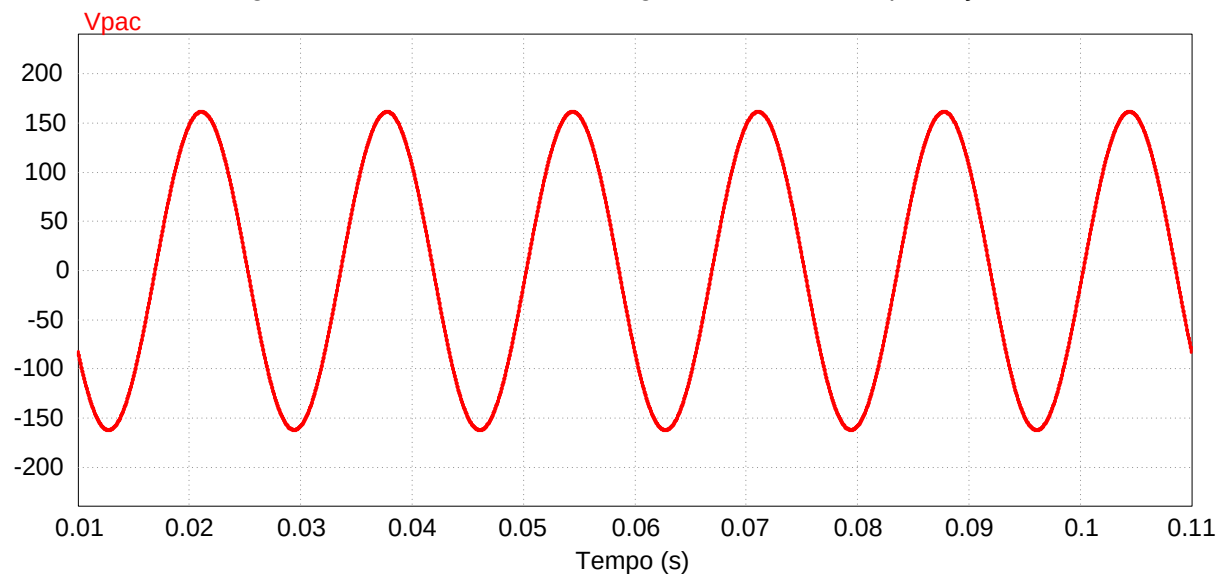
Tabela 6 Cargas simuladas

Potência da carga resistiva	$P_{lr} = 975,11 \text{ W}$
Potencia ativa da carga indutiva	$P_{li} = 960 \text{ W}$
Potência reativa da carga indutiva	$Q_{li} = 720 \text{ var}$
Fator de potência da carga indutiva	$FP_{li} = 0,8$

Fonte: Produção do autor.

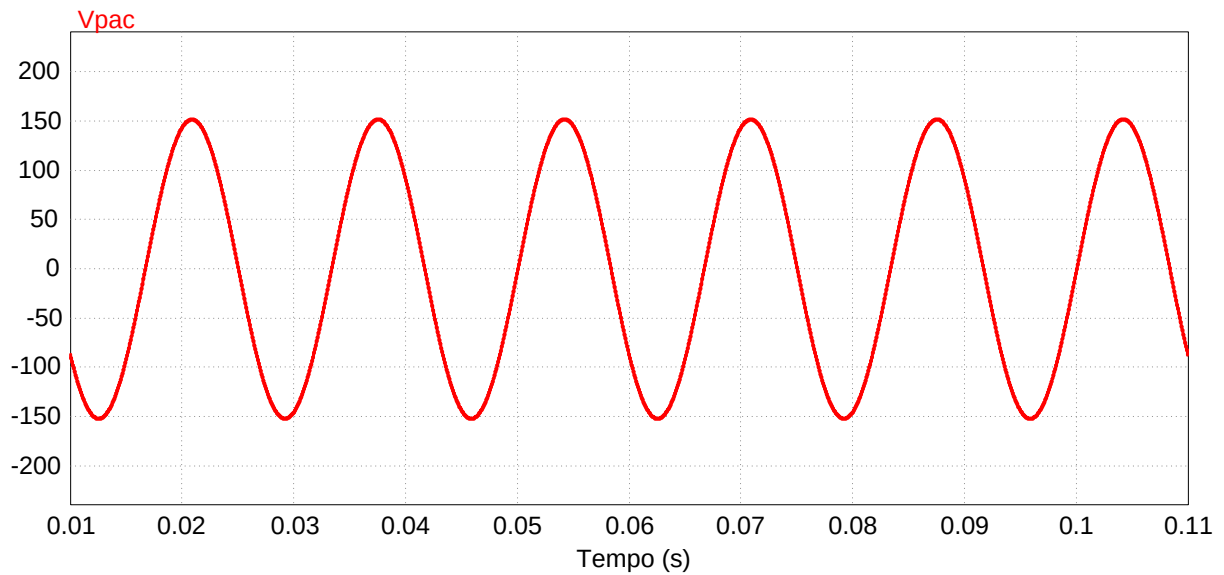
A Figura 41 ilustra a tensão no PAC para a carga resistiva sem compensação, assim com a Figura 42 ilustra a tensão no PAC para a carga indutiva.

Figura 41 Tensão no PAC com carga resistiva sem compensação



Fonte: Produção do autor

Figura 42 Tensão no PAC com carga indutiva sem compensação



Fonte: Produção do autor

A tabela apresenta os valores da tensão no PAC para o caso da carga resistiva e para o caso da carga indutiva associando-os com as classificações de tensão estabelecidas pela ANEEL

Tabela 7 Tensões no PAC sem compensação

TIPO DE CARGA	TENSÃO NO PAC (rms)	CLASSIFICAÇÃO
Resistiva	114 V	Precário
Indutiva	107 V	Crítico

Fonte: Produção do autor.

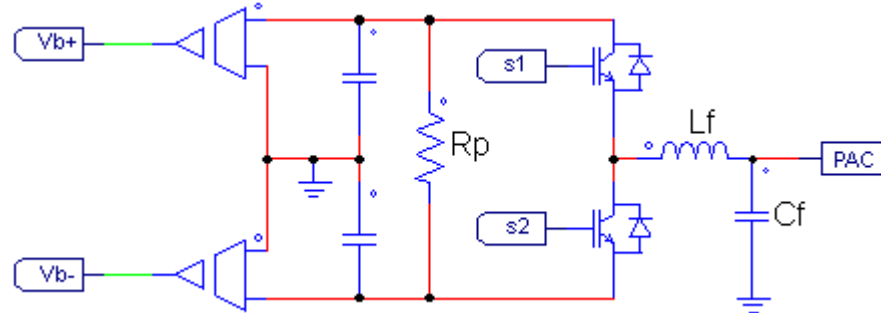
5.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO REGULADOR DE TENSÃO

Para comprovar o funcionamento do regulador de tensão, sua estrutura foi simulada sendo ela composta pelas cargas, pela rede e pelo conversor.

A simulação é composta por uma estrutura de potência, circuitos dos controladores da tensão no PAC e as tensões diferencial e total do barramento, geração de sincronismo e referências, sendo estas estruturas apresentadas nas páginas que seguem.

A Figura 43 apresenta a estrutura de potência. Na simulação desta estrutura foi inserida uma resistência, em paralelo com o barramento, equivalente a 10% da potência nominal do conversor para representar as perdas tornando os resultados da simulação mais próximos aos resultados esperados na implementação.

Figura 43 Estrutura de potência simulada

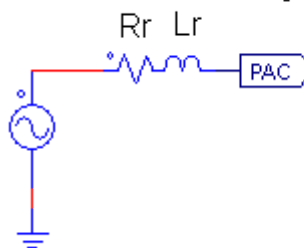


Fonte: Produção do autor.

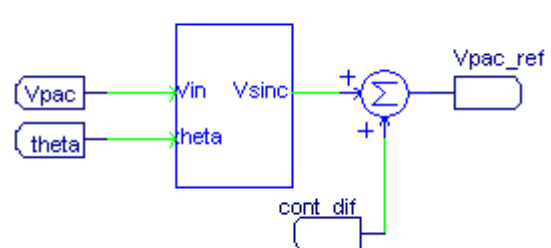
A rede de distribuição e a geração de referências simuladas são apresentadas na Figura 44. Para a geração de referências foi utilizado um bloco de transformada de Fourier disponível no *PSim*, permitindo a sincronização com a tensão do PAC. A tensão da rede foi mantida em 127 V e 60 Hz constantes.

Figura 44 Rede de distribuição e geração de referências simuladas

Rede de distribuição



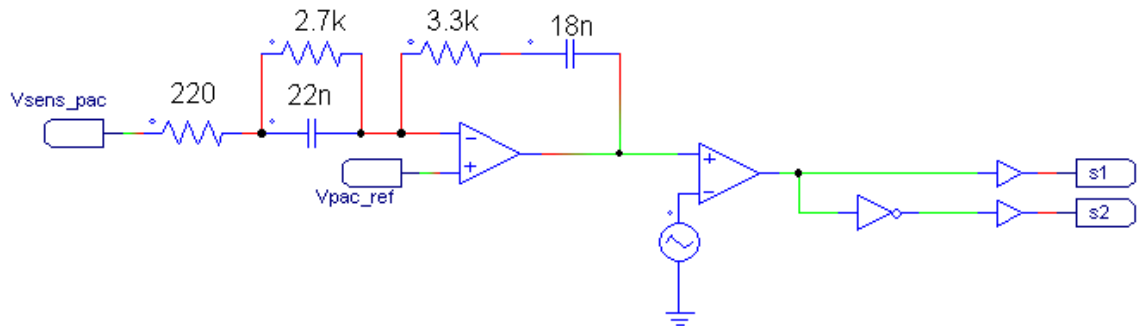
Referências



Fonte: Produção do autor

O controlador da tensão no PAC juntamente com o modulador PWM simulados, são apresentados na Figura 45. A tensão do PAC, após ser atenuada pelo sensor de tensão, sofre uma ação de controle que por sua vez entra no modulador PWM para gerar os pulsos de comando dos interruptores. A referência de tensão é o resultado das ações de controle do barramento total e diferencial, que irão defasar e/ou somar um nível CC, respectivamente, em uma senóide.

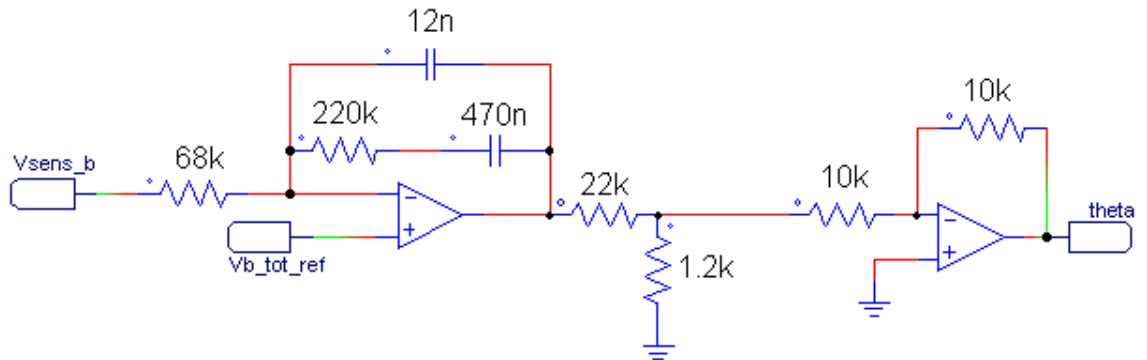
Figura 45 Controlador da tensão no PAC



Fonte: Produção do autor.

O controlador da tensão total do barramento é apresentado na Figura 46. Na saída do controlador do barramento foi incluído um atenuador para limitar o ângulo de abertura da tensão no PAC em aproximadamente 40° . O ganho unitário no último estágio do controlador é necessário para inverter o sinal da ação de controle.

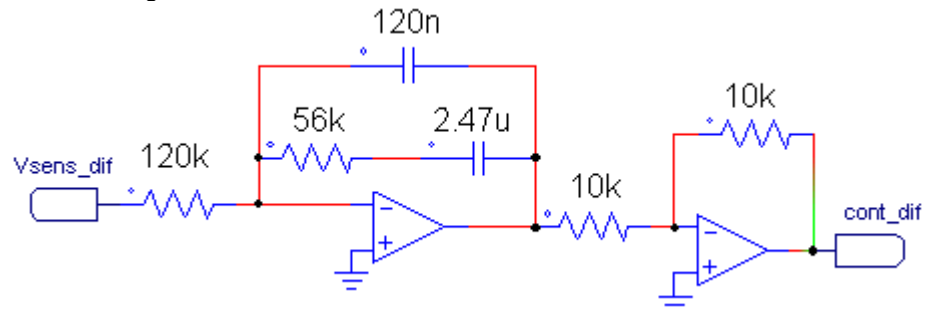
Figura 46 Controlador da tensão total do barramento



Fonte: Produção do autor.

A Figura 47 mostra o controlador da tensão diferencial do barramento.

Figura 47 Controlador da tensão diferencial do barramento

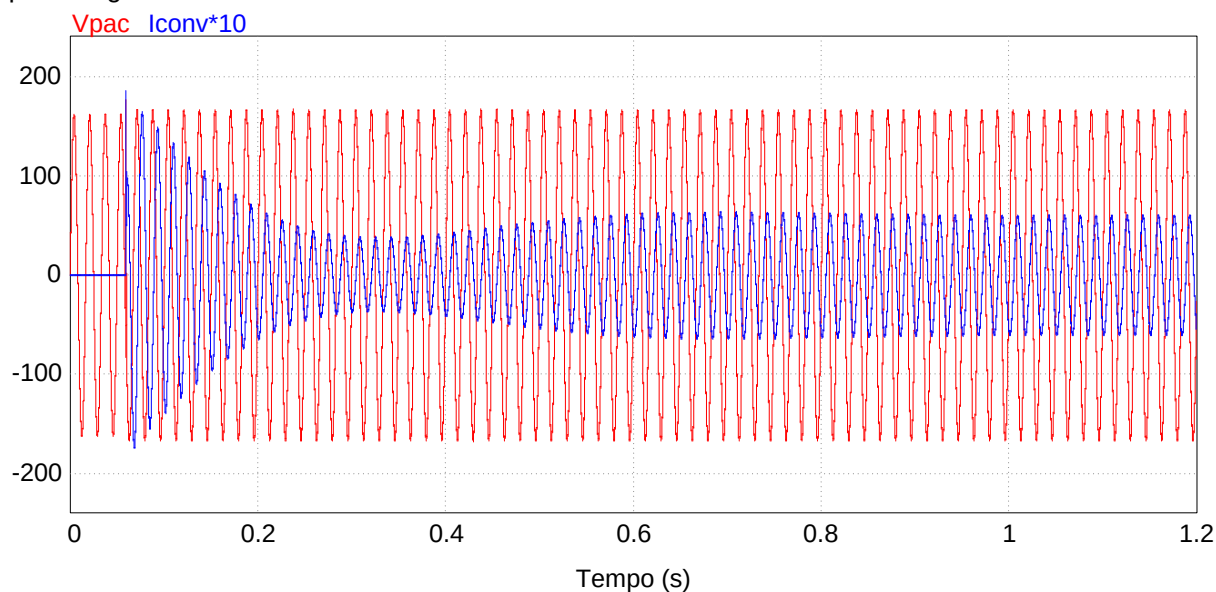


Fonte: Produção do autor.

A seguir serão apresentados os resultados das simulações realizadas.

Primeiramente serão apresentados os resultados das simulações para a carga resistiva. A Figura 48 mostra a tensão no PAC e a corrente na saída do regulador, nesta figura a corrente do regulador foi multiplicado por 10 para facilitar a visualização no gráfico.

Figura 48 Tensão no PAC e corrente na saída do conversor antes e depois da compensação para carga resistiva

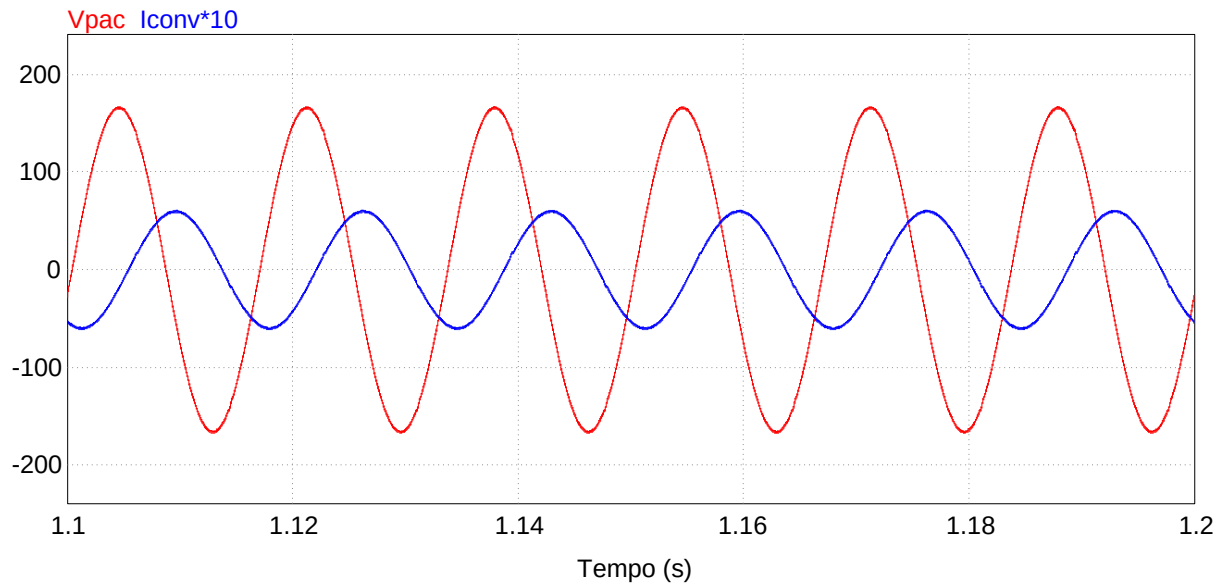


Fonte: Produção do autor

O regulador entra em operação em 0,06 segundos e até este momento a tensão no PAC é de aproximadamente 114 Vrms, após a conexão do regulador ao PAC a tensão do PAC passa a ser 117 Vrms, ficando dentro dos limites para classificação de tensão adequada.

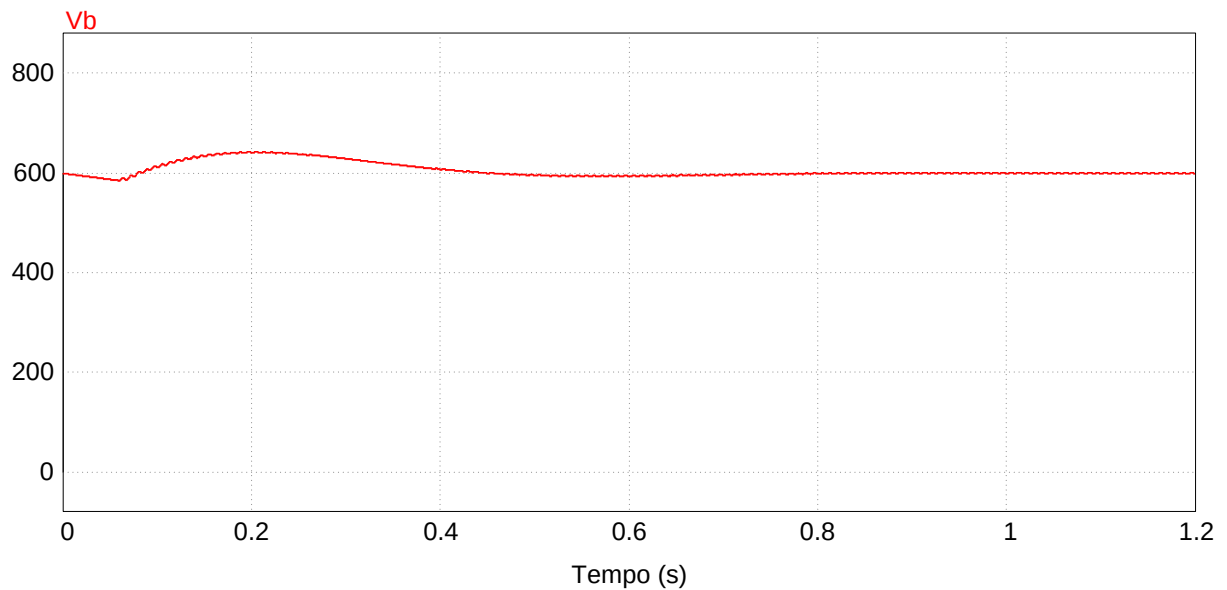
A corrente apresentada é a corrente após o filtro de alta frequência, quando o controle de tensão total do barramento entra em regime permanente a corrente na saída do regulador está defasada um pouco mais que 90° em relação à tensão, processando potência ativa, referente às perdas do conversor. A Figura 49 ilustra a tensão no PAC e a corrente em regime na saída do regulador, a corrente novamente foi multiplicada por 10 para facilitar a visualização.

Figura 49 Tensão no PAC e corrente na saída do regulador em regime



A Figura 50 apresenta a tensão total no barramento

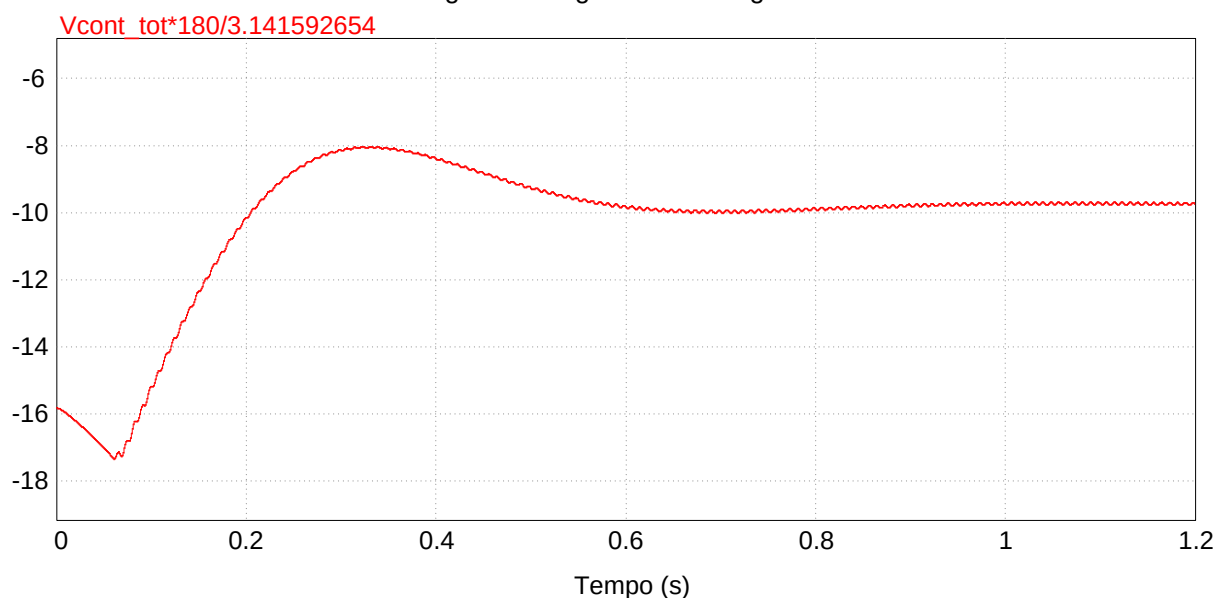
Figura 50 Tensão total do barramento



Pela inserção da carga resistiva para simular as perdas no conversor é possível observar que o barramento se descarrega até o instante que o regulador é conectado ao PAC, quando então o controle do barramento total começa a atuar defasando a tensão no PAC.

A ação de controle do barramento total é o ângulo que a tensão do PAC deverá defasar, o ângulo de defasagem do PAC é apresentado na Figura 51.

Figura 51 Ângulo de defasagem do PAC

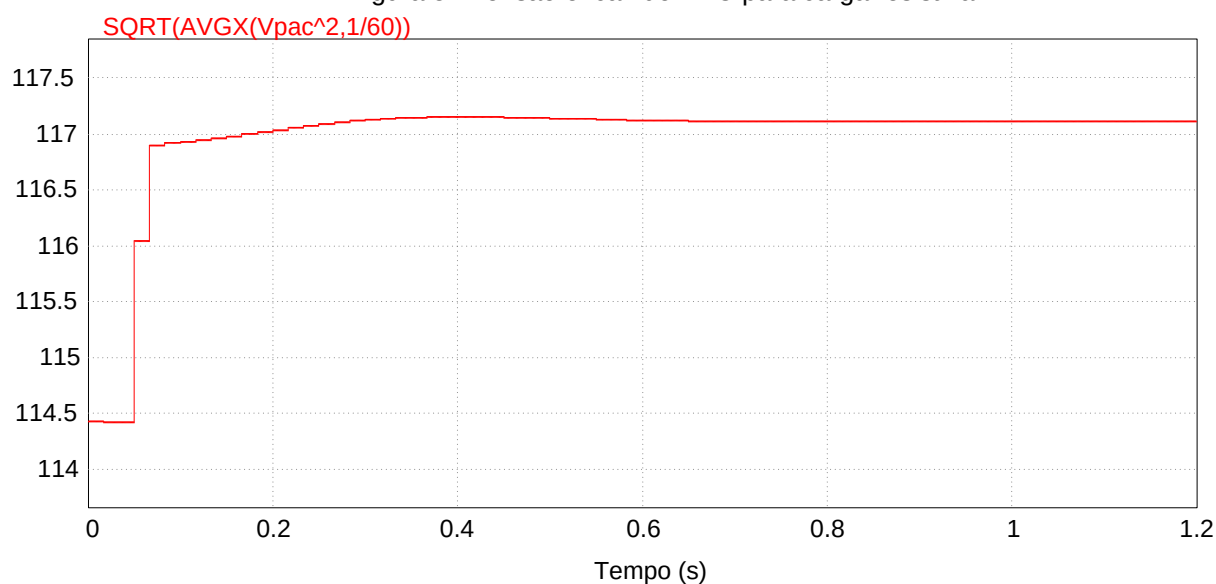


Fonte: Produção do autor

A ação de controle é o ângulo em radianos, mas para apresentar resultados mais fáceis de visualizar, na Figura 51 o ângulo é apresentado em graus. O ângulo necessário para compensar esta carga resistiva é de aproximadamente $-9,7^\circ$.

A Figura 52 mostra a tensão eficaz do PAC durante o tempo simulado. Observa-se que até o momento da conexão do regulador ao PAC a tensão era de aproximadamente 114,5 V, abaixo do limite inferior que classifica a tensão como adequada, de 116 V. Após a conexão do regulador a tensão do PAC sobe para aproximadamente 117 V em menos de 1 segundo.

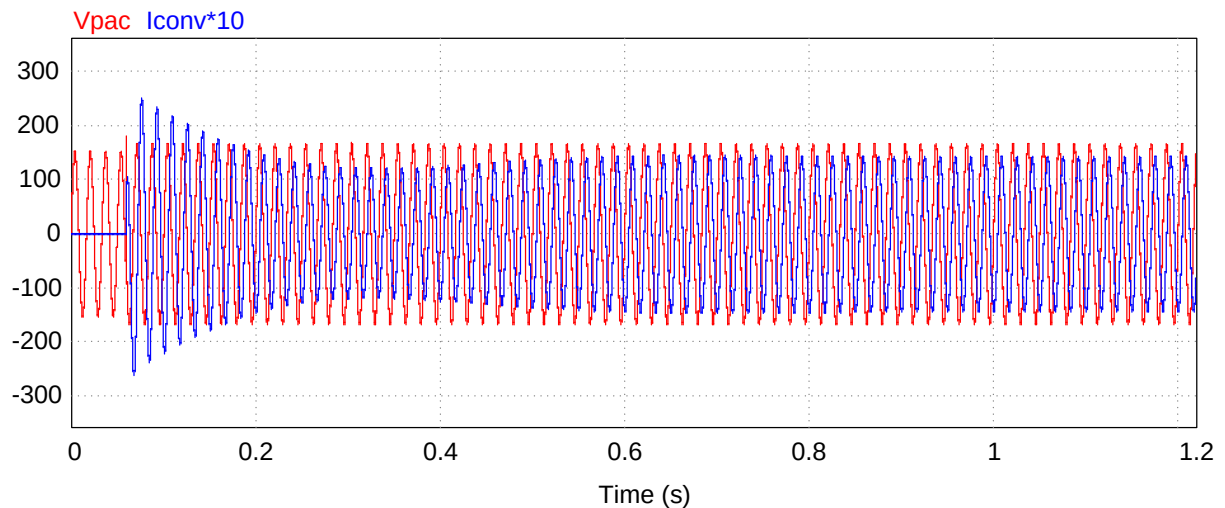
Figura 52 Tensão eficaz do PAC para carga resistiva



Fonte: Produção do autor

A Figura 53 apresenta a tensão no PAC e a corrente de saída do conversor, novamente a corrente foi multiplicada por 10 para facilitar a visualização.

Figura 53 Tensão no PAC e corrente na saída do conversor antes e depois da compensação para carga indutiva

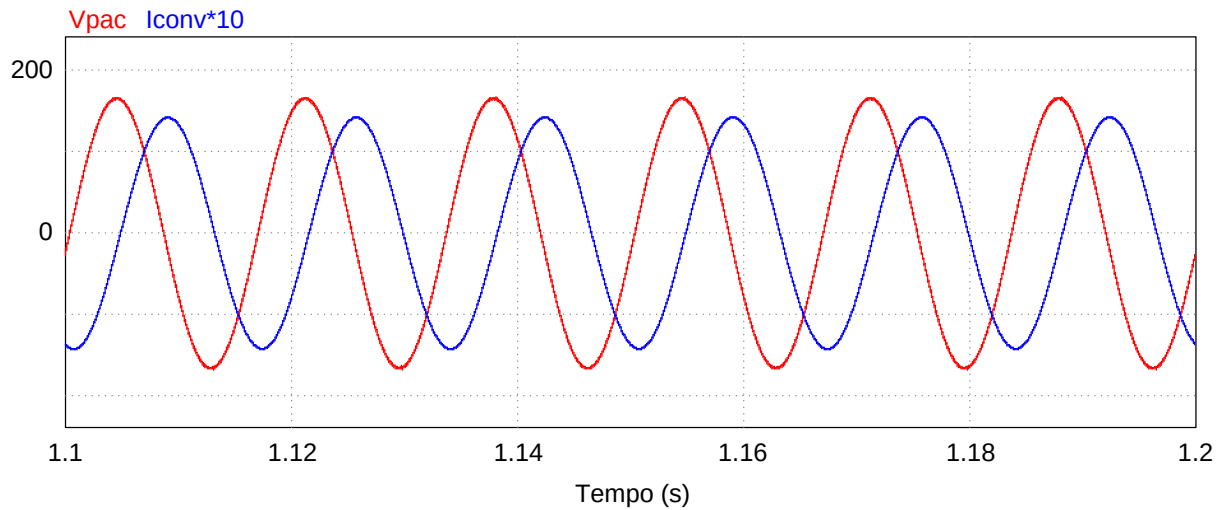


Fonte: Produção do autor

O regulador entra em operação em 0,06 segundos e até este momento a tensão no PAC é de aproximadamente 107 Vrms, após a conexão do regulador ao PAC a tensão do PAC passa a ser 117 Vrms, ficando dentro dos limites para classificação de tensão adequada.

Na também são apresentadas a tensão do PAC e a corrente após o filtro de alta frequência podendo ser observado que, em regime permanente, o ângulo de defasagem é de aproximadamente 90° para que a potência ativa processada pelo regulador seja referente às perdas.

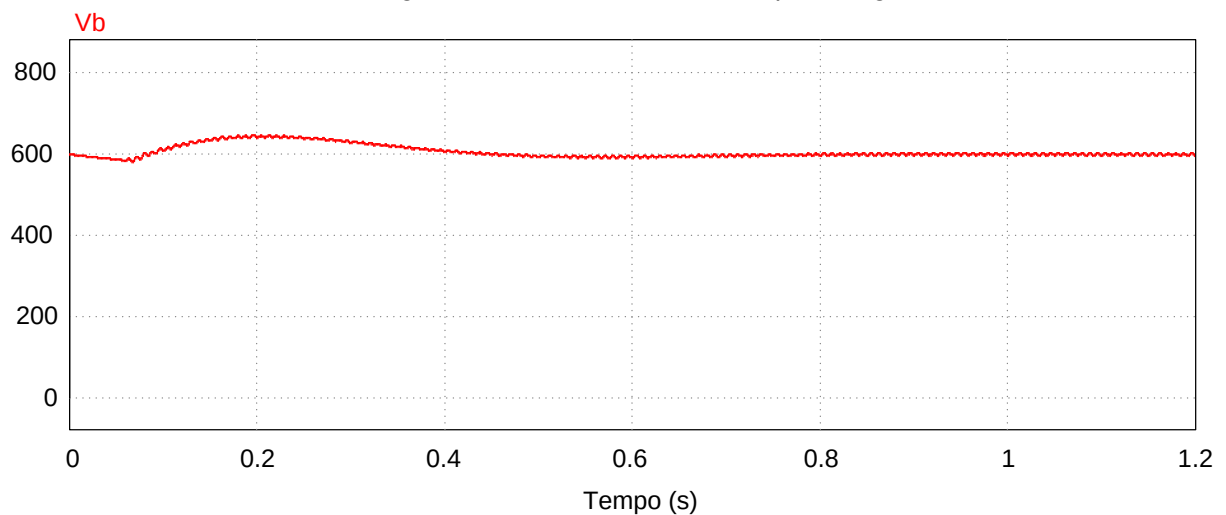
Figura 54 Tensão no PAC e corrente na saída do regulador em regime para carga RL



A Figura 55 apresenta a tensão no barramento quando uma carga indutiva está conecta ao PAC

A dinâmica da tensão do barramento com carga indutiva não apresentou grandes mudanças com relação à dinâmica da tensão do barramento com carga resistiva.

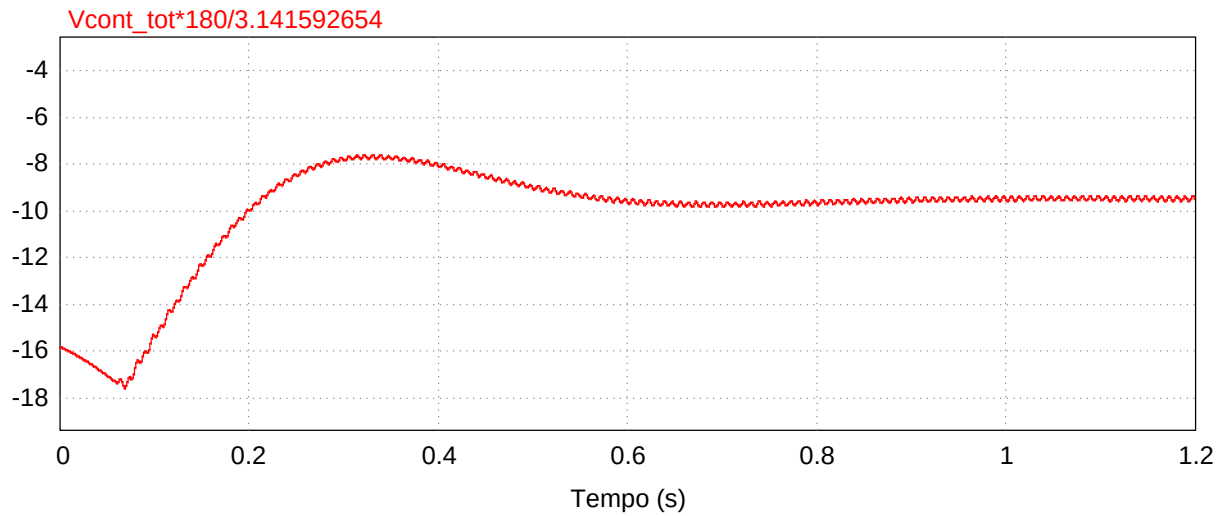
Figura 55 Tensão no barramento para carga RL



O ângulo de defasagem para regular a tensão no PAC com carga indutiva é apresentado na Figura 56.

O ângulo de defasagem necessário para regular a tensão no PAC quando há uma carga indutiva conectada ao mesmo é de aproximadamente $-9,4^\circ$.

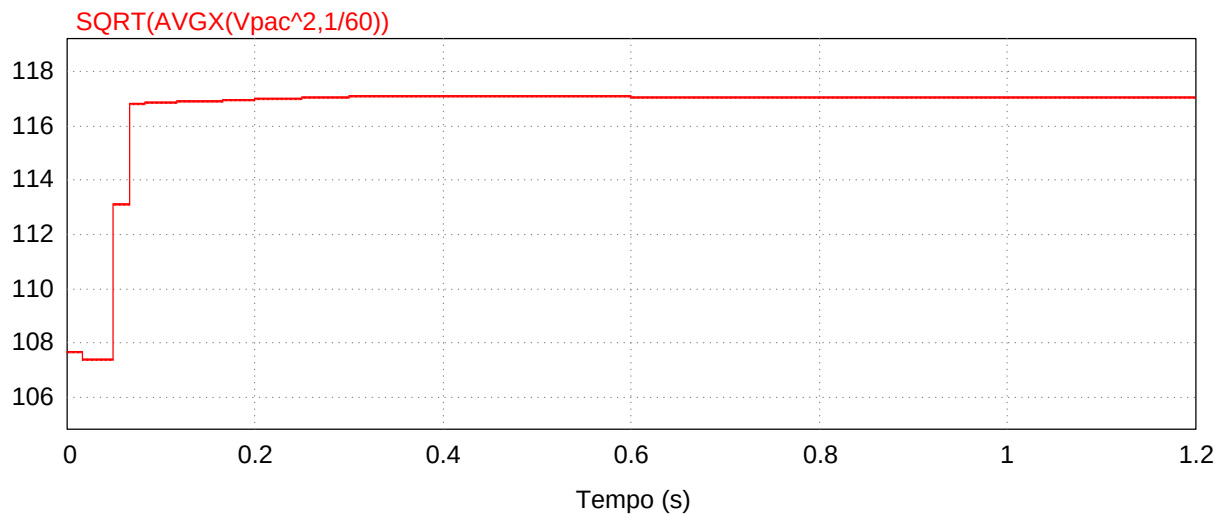
Figura 56 Ângulo de defasagem da tensão do PAC com carga RL



Fonte: Produção do autor

A Figura 57 mostra a tensão eficaz do PAC durante o tempo simulado. Observa-se que até o momento da conexão do regulador ao PAC a tensão era de aproximadamente 107 V, abaixo do limite inferior que classifica a tensão como adequada, de 116 V. Após a conexão do regulador a tensão do PAC sobe para aproximadamente 117 V em menos de 1 segundo.

Figura 57 tensão eficaz no PAC para carga indutiva



Fonte: Produção do autor

5.3 CONCLUSÕES GERAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi apresentada a estrutura simulada, se definiu as cargas simuladas, apresentou as tensões no PAC em regime permanente sem compensação para uma carga resistiva e uma carga indutiva com fator de potência 0,8.

Os resultados das simulações permitiram avaliar a capacidade do regulador de manter a amplitude da tensão do PAC dentro dos parâmetros definidos no PRODIST (Módulo 8). As perdas inseridas possibilitaram a avaliação do funcionamento do controlador de tensão do barramento.

O regulador foi capaz de manter a amplitude da tensão o PAC dentro dos limites da classificação adequada para uma carga R e uma RL validando os controladores propostos para a implementação.

6 IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo abordará os resultados experimentais do projeto, apresentando resultados obtidos com uma estrutura física composta por cargas, impedância da rede e por toda a estrutura do regulador de tensão. Os resultados apresentados não são os resultados finais deste trabalho de conclusão de curso, foram obtidos sem que a malha de tensão total do barramento fosse fechada, porém, serão mostrados nas páginas seguintes. Os resultados obtidos foram satisfatórios e considerados suficientes para que a banca examinadora avaliasse o presente trabalho. Vale ressaltar que os resultados experimentais com todas as malha fechadas serão apresentados no dia da defesa e inseridos na versão final do trabalho.

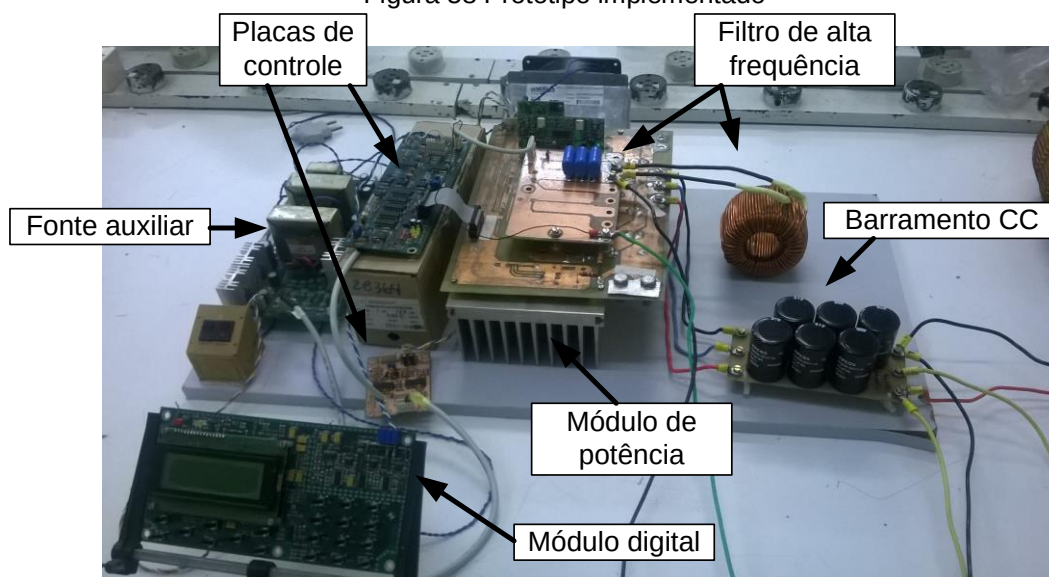
O regulador de tensão é composto por uma estrutura de um conversor trifásico bidirecional a quatro fios com ponto médio, porém como o trabalho proposto é monofásico foi utilizado apenas um braço do conversor, esta estrutura já havia sido utilizada em trabalhos anteriores [5],[9]e[12], e foi projetada para suportar uma potência de 4500 VA. Os controladores foram implementados de forma analógica e foi utilizado um módulo digital para geração as referências, sincronismo e defasagem da tensão do PAC.

Primeiramente são apresentados os circuitos eletrônicos implementados, seguidos dos resultados obtidos até o momento e comparados com os resultados de simulação.

6.1 CIRCUITOS ELETRÔNICOS IMPLEMENTADOS

O protótipo implementado é apresentado na Figura 58, o mesmo é composto por uma módulo de potência com filtro de alta frequência, duas placas de controle, uma fonte auxiliar chaveada, sensores de tensão montados no módulo de potência e um módulo digital para gerar as referências senoidais.

Figura 58 Protótipo implementado



Fonte: Produção do autor

6.1.1 Módulo de potência

O módulo de potência consiste em um inversor monofásico meia-ponte, com filtro de saída composto por indutor e capacitor previamente calculado.

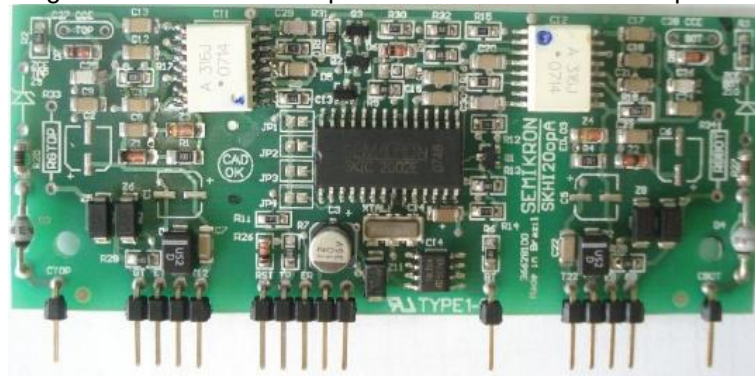
O módulo completo foi desenvolvido em [9], e é capaz de operar com até 4500 VA com tensões de 127 Vrms a 220 Vrms. Para construir o inversor foram utilizados dois interruptores do tipo IGBT, modelo IRG4F50WD do fabricante IR (*International Rectifier*) que operam com 50 kHz na frequência de chaveamento. Para realizar o acionamento dos interruptores foi utilizado o driver duplo SKHI20opA, que é um driver duplo isolado opticamente e é fabricado pela Semikron. O barramento CC é composto por quatro capacitores presentes na placa de potência e mais seis em uma placa adicional para obter a capacitância total de 1mF. Para dissipar as perdas de potência provenientes do chaveamento dos interruptores foi utilizado um dissipador de alumínio com ventilação forçada.

6.1.2 Driver

Como já mencionado anteriormente, o driver utilizado para o acionamento dos interruptores foi o SKHI20opA da Semikron, demonstrado na Figura 59. A função deste driver é garantir a comutação dos interruptores, garantir o tempo morto entre a entrada em condução e o bloqueio dos interruptores e possui proteção de subtensão

de alimentação, de sobrecorrente e de curto-circuito. É capaz de operar com tensões de até 1200V entre o coletor e o emissor e com frequências de até 100 kHz.

Figura 59 Driver utilizado para acionamento dos interruptores



Fonte: [5]

6.1.3 Comando do regulador

A placa de comando do regulador foi uma placa reutilizada disponível no laboratório, possui os controladores de tensão do PAC e do barramento total, moduladores PWM e o circuito de proteção de sobretensão do barramento. Além destes circuitos a placa possui circuitos de intertravamento que bloqueiam as chaves se algum erro é detectado pelo driver.

A placa de comando utilizada é apresentada na Figura 60.

Figura 60 Placa de comando

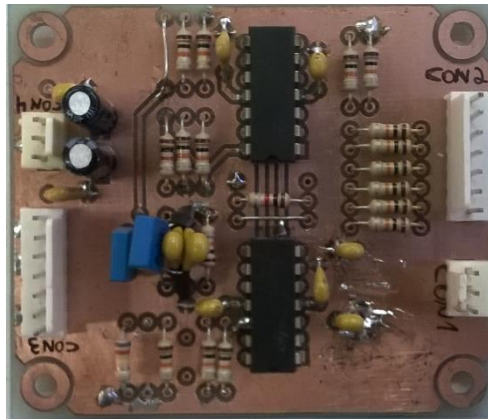


Fonte: Produção do autor

6.1.4 Controle da tensão diferencial do barramento CC

A placa de controle da tensão diferencial é uma placa separada a leitura da tensão do barramento é realizada na placa de comando do regulador e transmitida para a placa de controle da tensão diferencial do barramento. Ela tem a função de inserir um nível CC na referência senoidal de tensão para compensar desequilíbrio de tensão entre as duas metades do barramento.

Figura 61 Placa de controle da tensão total do barramento CC



Fonte: Produção do autor

6.1.5 Módulo digital

O módulo digital tem a função de gerar a referência senoidal para a tensão do PAC. Este módulo também será responsável pelo sincronismo das referências com a tensão no PAC antes da conexão do regulador além de processar a informação proveniente do controlador de tensão total do barramento para defasar a tensão do PAC. O módulo digital foi desenvolvido por [19] e apresentado na

Figura 62 Módulo digital utilizado



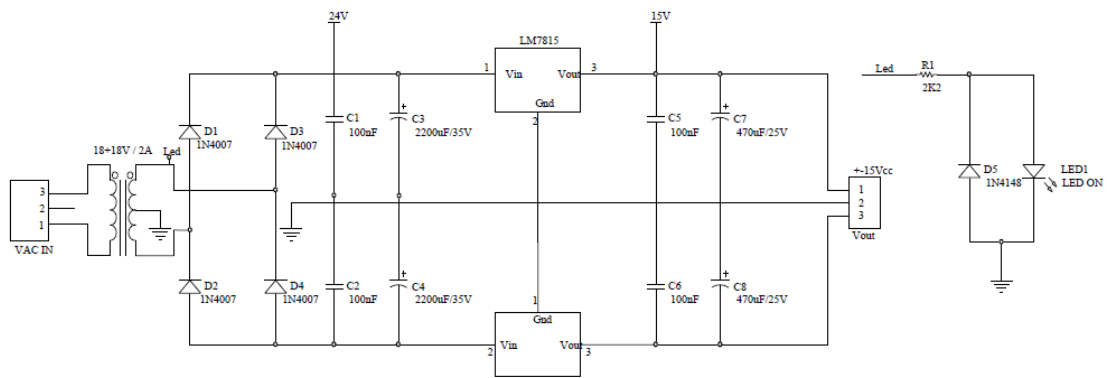
Fonte: [5]

6.1.6 Fonte auxiliar

A fonte auxiliar é utilizada para alimentar os circuitos de controle e comando, os drivers e o módulo digital. A fonte fornece tensão simétrica de 15 Vdc e 5 Vdc.

Um esquemático simplificado da fonte auxiliar é mostrado na Figura 63 e na Figura 64 é mostrada uma foto da fonte auxiliar utilizada.

Figura 63 Esquemático simplificado da fonte auxiliar



Fonte: [5]

Figura 64 Fonte auxiliar



Fonte: [5]

6.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos até o momento. Inicialmente a carga será apresentada, em seguida serão apresentados os resultados obtidos em regime permanente. Nenhuma dinâmica de controle será apresentada neste momento, pois a malha de tensão total do barramento não foi fechada.

Neste primeiro momento foram obtidos resultados apenas com carga resistiva pois não havia disponibilidade da utilização do banco de indutores para obter os resultados com carga indutivo.

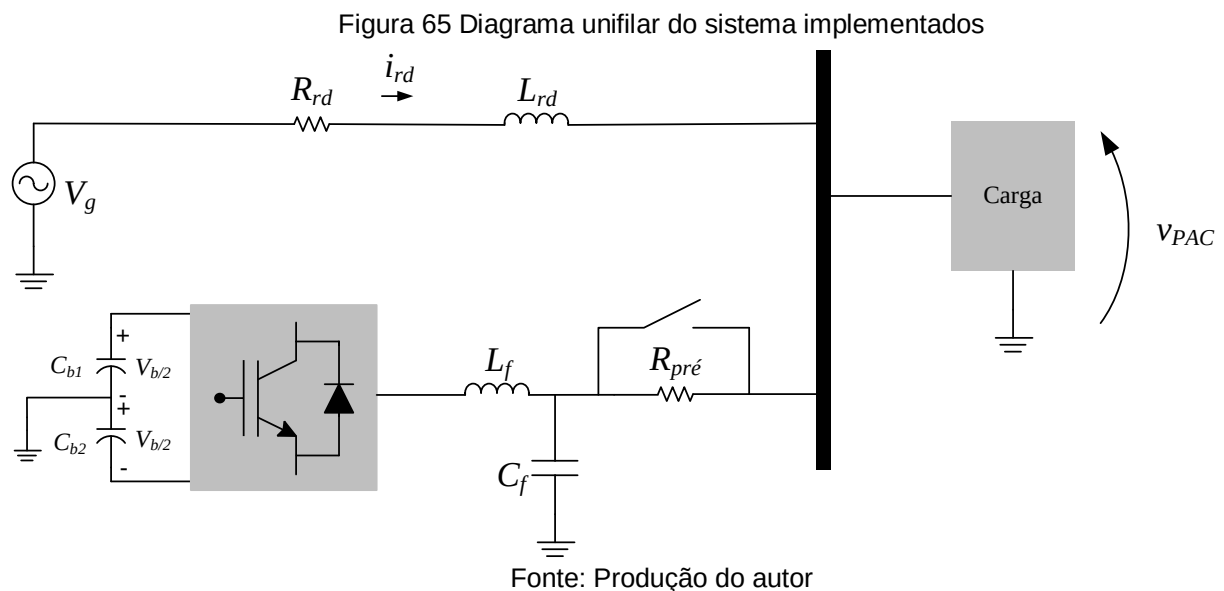
Buscou-se utilizar uma carga o mais próximo possível do valor simulado com potência de 1152 W (127 Vrms).

Como a malha de controle da tensão total do barramento não foi fechada utilizou-se um retificador para carregar o barramento e manter a tensão do mesmo controlada, foi colocado ainda um banco de resistores em paralelo com o barramento para consumir a potência ativa que seria processada pelo regulador de tensão em um caso de compensação de reativos.

O sistema foi alimentado com um variador de tensão e foi inserida uma impedância em série simulando a linha de transmissão escolhida.

Para realizar a conexão do regulador ao PAC foi colocado um resistor entre o filtro de alta frequência do regulador e o PAC com o intuito de ajustar a defasagem e as amplitudes, para então curtar a resistência presente entre o regulador e o PAC.

A Figura 65 apresenta o diagrama unifilar do sistema implementado.

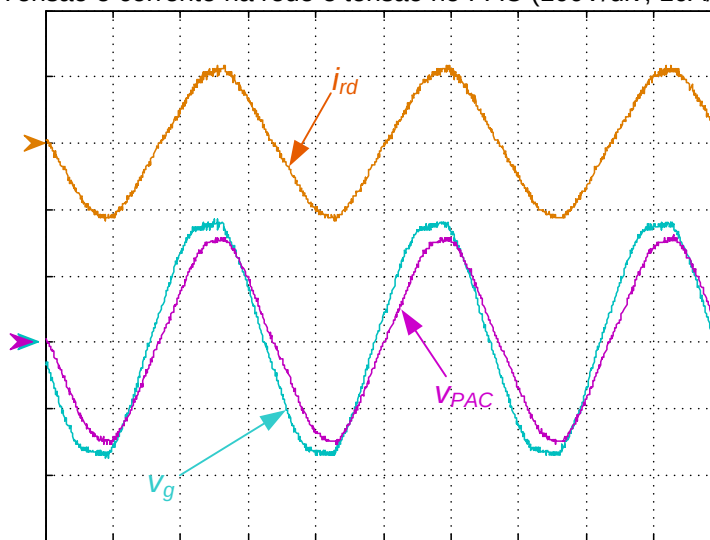


A resistência da rede utilizada neste teste foi de $1,5 \, \Omega$ e a indutância de 4m H. Neste primeiro momento não houve a preocupação com a indutância e a resistência da rede da UDESC nem do variador de tensão utilizado para emular a rede.

Para realizar o teste inicialmente o regulador não havia sido conectado ao PAC, para verificar a queda de tensão no PAC com a carga. Os resultados são

apresentados na Figura 66 onde a tensão da rede está com 127 Vrms, a corrente da rede com 7,57 Arms e a tensão do PAC com 105 Vrms, sendo classificada como crítica

Figura 66 Tensão e corrente na rede e tensão no PAC (100V/div, 10A/div 5ms/div)

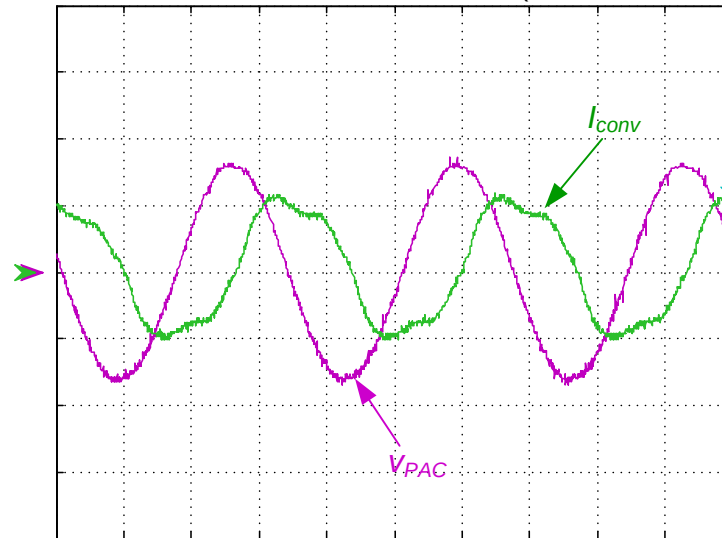


Fonte: Produção do autor

Verificado que haveria necessidade de compensação, o regulador foi conectado ao PAC conforme procedimento, de ajuste de fase e de amplitude, já descrito anteriormente, e então a tensão do PAC foi defasada até que a potência ativa do regulador fosse próxima de 0. Para verificar a potência ativa do conversor foi utilizado o *Application Key* do osciloscópio e feito uma análise de potência.

O ângulo que satisfaz a condição de potência ativa sendo zero ou próxima a isso foi de -12° e os resultados são apresentados na Figura 67, a tensão do PAC permaneceu em 116 Vrms e a corrente do conversor em 3,7 Arms. A diferença no ângulo necessário para compensar os reativos na prática para o ângulo necessário nas simulações se deve ao fato de que nas simulações não foram consideradas as impedâncias da rede e do variador de tensão. Essas considerações serão feitas para a versão final, e a impedância da rede emulada a ser inserida será mais adequada para ser mais próxima possível da impedância de rede escolhida no projeto.

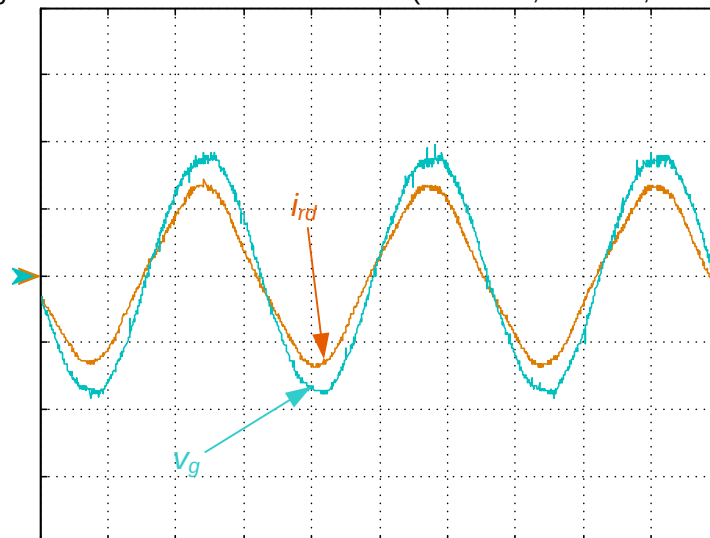
Figura 67 Tensão no PAC e corrente no conversor (100V/div, 5A/div, 5ms/div)



Fonte produção do autor

A tensão e a corrente na rede são apresentados na Figura 68. É possível verificar que há um aumento da corrente na rede, passando para 9 Arms, este aumento se deve a potência reativa drenada pelo regulador de tensão para manter a tensão do PAC adequada.

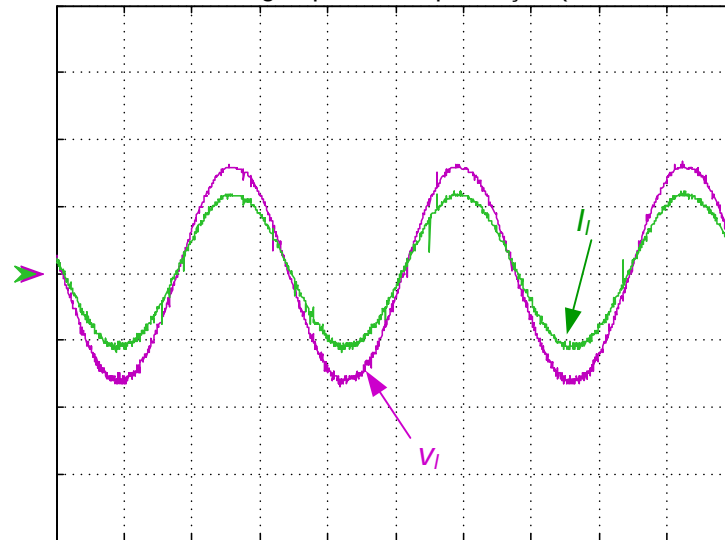
Figura 68 Tensão e corrente na rede (100 V/div, 10 A/div, 5 ms/div)



Fonte: Produção do autor

A corrente e a tensão na carga, após a compensação, são apresentados na Figura 69. A tensão foi regulada em 116 Vrms e a corrente em 8 Arms.

Figura 69 Tensão e corrente na carga após a compensação (100 V/div, 10 A/div, 5 ms/div)



Fonte: Produção do autor

Com estes resultados é possível observar que o regulador é capaz de manter a tensão no PAC regulada mesmo em malha aberta, e seus resultados experimentais se aproximam dos resultados simulados. O próximo passo para poder validar o regulador é realizar os testes com a malha de tensão total do barramento fechada e assim avaliar a dinâmica e o funcionamento do regulador.

7 CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho de conclusão de curso destinou-se a apresentar um regulador de tensão para linhas de distribuição, com uma alternativa para resolução rápida do problema de regulação de tensão que possa ocorrer nas redes de distribuição.

No capítulo 1 foi apresentado o problema de regulação de tensão, as exigências feitas às concessionárias de energia pela ANEEL, o módulo 8 do PRODIST foi estudado, definindo os limites de tensão de regulação que o sistema deve exigir. Também foi realizado um estudo dos dispositivos existentes para a regulação da tensão e então foi escolhido o conversor utilizado no trabalho.

No capítulo 2 foi realizada uma análise qualitativa do regulador apresentando as etapas de operação e algumas formas de onda de corrente e tensão que seriam aplicadas ao componentes do protótipo.

O capítulo 3 apresentou a análise quantitativa do regulador, explicitando a relação do ângulo de defasagem e da potência reativa processada pelo regulador com relação ao fator de potência e à potência da carga. Também gráficos foram traçados para o auxílio do cálculo dos esforços nos semicondutores, a capacitância mínima de barramento foi calculada bem como a indutância mínima de filtragem que auxiliou no cálculo do filtro de alta frequência ao final do capítulo.

O capítulo 4 destinou-se à modelagem matemática das plantas a serem controladas e dos demais dispositivos que compõem as malhas de controle. Ao fim do capítulo foi realizado o projeto dos controladores de tensão do PAC, de tensão total do barramento e de tensão diferencial do barramento.

No capítulo 5 foi realizada a simulação numérica da estrutura do regulador de tensão. Este capítulo foi fundamental para o entendimento do funcionamento do conversor como regulador de tensão.

No capítulo 6 são apresentados os circuitos eletrônicos que foram utilizados para realizar a implementação do conversor. Não foi possível, até o momento realizar os testes com todas as malhas de controle fechadas, mas com os resultados obtido foi possível constatar que o regulador proposto atende os requisitos do projeto, pois foi capaz de manter a tensão do PAC regulada e com as devidas considerações atingiu-se resultados próximos aos resultados simulados.

Apesar do regulador não estar funcionando com todas as malhas fechadas é possível identificar algumas melhorias para este projeto que não serão implementadas, são elas:

- Implementar um circuito de pré-carga para o carregamento do barramento e assim a conexão direta com a rede.

- Implementação de um algoritmo para encontrar um ponto de mínima potência do conversor para que o mesmo opere em um ponto onde será processada o mínimo de potência possível para realizar a regulação.

- Realizar estudo de compensação da tensão em cargas não lineares.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. 4. ed. [S.l.]: [s.n.], 2012.
- [2] IEEE Std. 519-1992. **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. 1992.
- [3] WATANABE, E. H. et al. **TECNOLOGIA FACTS - TUTORIAL**. SBA Controle e Automação, v. 9, Jan., Fev., March and April 1998.
- [4] MOORE, P; ASHMOLE, P.I. **FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEMS**. Power Engineering Journal, December 1995.
- [5] DA CUNHA, J.C. **Sistema Automático Para Regulação De Tensão Em Redes De Baixa Tensão**. Universidade do Estado de Santa Catarina. Trabalho de Conclusão de Curso. 2012.
- [6] RECH, C.; MONTAGNER, V.F.; SCHUNCH, L.; BELTRAME, R. C.; FISCHER, C.; DA SILVA, G. S.; ENDERLE, T. P. **Análise e Controle de um D-STATCOM para Redes de Distribuição Monofásicas**. CBA Congresso Brasileiro de Automática. Setembro 2012.
- [7] GOSH, A.; MISHRA, M. K.; JOSHI, A. **Operation of a DSTATCOM in Voltage Control Mode**. IEEE Transactions on Power Delivery. vol. 18, no. 1, pp. 258-264. January 2003.
- [8] GOSH, A.; LEDWICH, G. **A Flexible DSTATCOM Operating in Voltage or Current Control Mode**. IEE Proc-Gener. Transm. Distrib. vol. 149, no. 2, pp. 215-224. March 2002.
- [9] SPERB, J. D. **Projeto de um Inversor Trifásico com Snubber de Undeland Regenerativo e Controle Digital Implementado no DSP TMS320F2812**. Universidade do Estado de Santa Catarina Joinville. Dissertação de Mestrado. 2012.
- [10] ENDERLE, T. P. **Análise, projeto e Implementação de um D-STATCOM para Redes de Distribuição Monofásica**. Universidade Federal de Santa Maria. Dissertação de Mestrado. 2012.
- [11] BARBI, I. **Projeto de Fontes Chaveadas**. Florianópolis: Edição do Autor, 2007.
- [12] KLEIN, R. L. **Carga Eletrônica CA Programável com Regeneração de Energia**. Universidade do Estado de Santa Catarina Joinville. Dissertação de Mestrado. 2012

- [13] LISERRE, M.; BLAABJERG, F.; HANSEN, S. **Design and control of an LCL-filter based three-phase active rectifier**. IEEE Transactions on Industry Applications Conference. Vol. 41, no. 5, pp.1281-1291. September 2005.
- [14] OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**, 4a ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.
- [15] DOS SANTOS, R. J. M. **Condicionador Unificado de Qualidade de Energia Dual com Controle Simplificado**. Universidade do Estado de Santa Catarina Joinville. Dissertação de Mestrado. 2012.
- [16] HEERDT, J. A. et al. **Generic Generator of Three-Phase Periodic Signals for Application in AC Power Sources**. 9th Brazilian Power Electronics Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2007. p. 1060-1065.