

Phelipe Leal Serafim Rodrigues

Filtro Ativo de Potência Universal sem Transformadores de Isolação em Série

Campina Grande, Brasil

24 de março de 2014

Phelipe Leal Serafim Rodrigues

Filtro Ativo de Potência Universal sem Transformadores de Isolação em Série

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Orientador: Professor Cursino Brandão Jacobina, Dr. Ing.

Campina Grande, Brasil

24 de março de 2014

Phelipe Leal Serafim Rodrigues

Filtro Ativo de Potência Universal sem Transformadores de Isolação em Série/
Phelipe Leal Serafim Rodrigues. – Campina Grande, Brasil, 24 de março de 2014-
43 p. : il. ; 30 cm.

Orientador: Professor Cursino Brandão Jacobina, Dr. Ing.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Campina Grande –
UFCG
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica , 24 de março de 2014.

Phelipe Leal Serafim Rodrigues

Filtro Ativo de Potência Universal sem Transformadores de Isolação em Série

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Campina Grande, Brasil, 17 de março de 2014:

Professor Cursino Brandão Jacobina,
Dr. Ing.
Orientador

Professor
Convidado

Campina Grande, Brasil
24 de março de 2014

*Este trabalho é dedicado a Deus, aos meus pais, minha irmã,
minha namorada, orientador e aos meus amigos.*

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por todas as coisas boas que Ele tem me proporcionado, pela minha saúde e pelas oportunidades que me surgiram.

A meus pais Francisco de Assis e Lucy Mary, por serem os melhores pais que um filho pode ter. Proporcionaram-me tudo do melhor, educação, saúde, carinho, amor, acompanharam-me em minha trajetória de estudos e em todas as minhas conquistas, a cada minuto, com muita força, torcida e carinho. Se hoje estou me tornando um Engenheiro Eletricista, devo tudo a eles.

A minha irmã Larissa Leal, por sua amizade, companherismo e por saber que sempre posso contar com ela para tudo.

A teté (tia Zilda), que me acompanhou desde pequeno com muito carinho e amor, agradeço por ter participado de minha educação e por todas as palavras lindas e inspiradoras sobre Deus que me faziam ter força para continuar minha caminhada.

A minha namorada Carla, pela força que ela me deu desde o começo dessa batalha, acompanhando-me desde o começo do curso.

A todos os professores, coordenador e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG, em especial ao meu orientador Cursino, que me acompanha a quatro anos em minhas atividades acadêmicas e de pesquisa, estando presente em cada momento de minha caminhada, transmitindo conhecimento e me oferecendo oportunidades para me tornar um profissional competente.

Ao amigo Gregory, por toda a paciência e ajuda oferecida no decorrer deste trabalho.

A todos os meus amigos pelos momentos de descontração, mesmo nos momentos mais difíceis.

*"É possível encontrar a felicidade mesmo nas horas mais sombrias, se lembrar de
acender a luz."
(Alvo Dumbledore)*

Resumo

Este trabalho apresenta quatro topologias de filtro ativo de potência universal para compensação de potência reativa e harmônicos sem o transformador de isolação série, utilizando um (configuração 1 e 3) e dois (configuração 2 e 4) barramentos. Os sistemas propostos são uma combinação de filtros ativos série e paralelo. Eles são adequados para aplicações em que o tamanho é uma questão crítica, uma vez que o peso, tamanho e custo associado ao transformador são significativos. O sistema completo do controle, incluindo as estratégias PWM, serão desenvolvidas e uma comparação entre os filtros propostos será feita. A simulação e os resultados experimentais serão apresentados.

Key-words: Filtro Ativo de Potência, Filtro Ativo de Potência Universal, PWM, Controle.

Abstract

This paper presents four universal active power filter topologies for reactive power and harmonic compensation without series isolation transformer by using one (configuration 1 and 3) and two (configuration 2 and 4) dc-links. The proposed systems are a combination of a series and a shunt active filters. They are suitable for applications in which the size is a critical issue, since the weight, size and cost associated with the transformer is overcome. The complete control systems, including the PWM techniques, are developed and a comparison between the proposed filters is done. Simulation and experimental results are shown for validation purposes.

Key-words: Active Power Filter, Universal Active Power Filter, PWM, Control.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Filtro ativo universal trifásico convencional.	2
Figura 2 – Filtro ativo universal trifásico proposto - Configuração 1.	4
Figura 3 – Modelo do sistema - Configuração 1.	5
Figura 4 – Diagrama de controle do FAP universal - Configuração 1.	7
Figura 5 – Filtro ativo universal trifásico proposto - Configuração 2.	7
Figura 6 – Modelo do sistema - Configuração 2.	8
Figura 7 – Diagrama de controle do FAP universal - Configuração 2.	11
Figura 8 – Filtro ativo universal trifásico proposto - Configuração 3.	12
Figura 9 – Modelo do sistema - Configuração 3.	13
Figura 10 – Diagrama de controle do FAP universal - Configuração 3.	15
Figura 11 – Filtro ativo universal trifásico proposto - Configuração 4.	16
Figura 12 – Modelo do sistema - Configuração 4.	17
Figura 13 – Diagrama de controle do FAP universal - Configuração 4.	20
Figura 14 – Tensão (e_{g1}) e corrente (i_{g1}) na rede.	26
Figura 15 – Correntes do sistema (i_{g1} , i_{h1} e i_{l1}).	26
Figura 16 – Tensão na carga (v_{l1}).	27
Figura 17 – Tensão no capacitor e tensão de referência no barramento CC.	27
Figura 18 – Tensão (e_{g1}) e corrente (i_{g1}) na rede.	28
Figura 19 – Correntes do sistema (i_{g1} , i_{h1} e i_{l1}).	29
Figura 20 – Tensão na carga (v_{l1}).	29
Figura 21 – Tensão no barramento CC do conversor série e sua referência (v_{cg}^*).	30
Figura 22 – Tensão no barramento CC do conversor paralelo e sua referência (v_{ch}^*).	30
Figura 23 – Ângulo (δ_l^*) entre a tensão de referência (v_{g1}^*) e a tensão de referência da carga (v_{l1}^*).	31
Figura 24 – Tensão (e_{g1}) e corrente (i_{g1}) na rede.	32
Figura 25 – Correntes do sistema (i_{g1} , i_{h1} e i_{l1}).	32
Figura 26 – Tensão na carga (v_{l1}).	33
Figura 27 – Tensão no capacitor e tensão de referência no barramento CC.	33
Figura 28 – Tensão (e_{g1}) e corrente (i_{g1}) na rede.	34
Figura 29 – Correntes do sistema (i_{g1} , i_{h1} e i_{l1}).	35
Figura 30 – Tensão na carga (v_{l1}).	35
Figura 31 – Tensão no barramento CC do conversor série e sua referência (v_{cl}^*).	36
Figura 32 – Tensão no barramento CC do conversor paralelo e sua referência (v_{ch}^*).	36
Figura 33 – Ângulo (δ_l^*) entre a tensão de referência (v_{g1}^*) e a tensão de referência da carga (v_{l1}^*).	37
Figura 34 – Tensão na rede (e_{g1}) e correntes (i_{g1} e i_{g2}).	37

Figura 35 – Tensão no barramento CC (v_c).	38
Figura 36 – Variação do ângulo entre a tensão v_{gk} e a tensão da carga v_{lk}	43
Figura 37 – Variação do ângulo entre a tensão v_{gk} e a tensão da carga v_{lk}	43
Figura 38 – Variação do ângulo entre a tensão v_{gk} e a tensão da carga v_{lk}	43

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros de simulação em <i>p.u.</i>	25
Tabela 2 – Parâmetros de simulação em <i>p.u.</i>	28
Tabela 3 – Parâmetros de simulação em <i>p.u.</i>	28
Tabela 4 – Parâmetros de simulação em <i>p.u.</i>	31
Tabela 5 – Distorção harmônica total.	38

Lista de abreviaturas e siglas

FAP	Filtro Ativo de Potência.
UAF	Universal Active Filter.
PWM	Pulse Width Modulation.
DSP	Digital Signal Processor.
THD	Distorção Harmônica Total (<i>Total Harmonic Distortion</i>).
WTHD	Distorção Harmônica Total Ponderada (<i>Weighted Total Harmonic Distortion</i>).
CC	Corrente Contínua.

Lista de símbolos

*	no sistema de controle, trata-se de uma variável de referência.
g	subíndice indicativo de grandeza da rede.
l	subíndice indicativo de grandeza da carga.
p	derivada (d/dt).
H	conversor paralelo.
G	conversor série para as configurações 1 e 2.
L	conversor série para as configurações 3 e 4.
T	intervalo de chaveamento.
e_{gk}	tensão da fonte de alimentação trifásica para $k = 1, 2, 3$.
v_{gk}	tensão da rede de alimentação trifásica para $k = 1, 2, 3$.
v_{lk}	tensão da carga para $k = 1, 2, 3$.
v_g	tensão nominal da fonte.
v_l	tensão nominal da carga.
i_{gk}	corrente da rede para $k = 1, 2, 3$.
i_{lk}	corrente da carga para $k = 1, 2, 3$.
i_{hk}	corrente do conversor paralelo para $k = 1, 2, 3$.
i_{gk}^*	corrente de referência da rede para $k = 1, 2, 3$.
I_g^*	referência da amplitude da corrente na rede.
R_g	resistência interna da linha e/ou da fonte.
L_g	indutância interna da linha e/ou da fonte.
Z_l	impedância da carga.
R_l	resistência da carga.
L_l	indutância da carga.

v_c	tensão no barramento do FAP universal para as configurações 1 e 3.
v_{ch}	tensão no barramento do conversor paralelo para as configurações 2 e 4.
v_{cg}	tensão no barramento do conversor série para a configuração 2.
v_{cl}	tensão no barramento do conversor série para a configuração 4.
v_{hk0}	tensão de pólo do conversor paralelo das configurações 1 e 3 para $k = 1, 2, 3$.
v_{gk0}	tensão de pólo do conversor série da configuração 1 para $k = 1, 2, 3$
v_{lk0}	tensão de pólo do conversor série da configuração 3 para $k = 1, 2, 3$
v_{hk0h}	tensão de pólo do conversor paralelo das configurações 2 e 4 para $k = 1, 2, 3$
v_{gk0g}	tensão de pólo do conversor série da configuração 2 para $k = 1, 2, 3$
v_{lk0l}	tensão de pólo do conversor série da configuração 4 para $k = 1, 2, 3$
v_{l0}	tensão auxiliar da configuração 1.
v_{l0h}	tensão auxiliar da configuração 2.
v_{0h0g}	tensão auxiliar da configuração 2.
v_{g0}	tensão auxiliar da configuração 3.
v_{g0h}	tensão auxiliar da configuração 4.
v_{0h0l}	tensão auxiliar da configuração 4.
v_{gk}^*	tensão da rede de referência para $k = 1, 2, 3$.
v_{lk}^*	tensão da carga de referência para $k = 1, 2, 3$.
v_c^*	tensão de referência no barramento do FAP universal para as configurações 1 e 3.
v_{ch}^*	tensão de referência no barramento do conversor paralelo para as configurações 2 e 4.
v_{cg}^*	tensão de referência no barramento do conversor série para a configuração 2.
v_{cl}^*	tensão de referência no barramento do conversor série para a configuração 4.

v_{hk0}^*	tensão de pólo de referência do conversor paralelo da configuração 1 para $k = 1, 2, 3$.
v_{gk0}^*	tensão de pólo de referência do conversor série da configuração 1 para $k = 1, 2, 3$.
v_{lk0}^*	tensão de pólo de referência do conversor série da configuração 3 para $k = 1, 2, 3$.
v_{hk0h}^*	tensão de pólo de referência do conversor paralelo das configurações 2 e 4 para $k = 1, 2, 3$.
v_{gk0g}^*	tensão de pólo de referência do conversor série da configuração 2 para $k = 1, 2, 3$.
v_{lk0l}^*	tensão de pólo de referência do conversor série da configuração 4 para $k = 1, 2, 3$.
v_{l0}^*	tensão auxiliar de referência para a configuração 1.
v_{l0h}^*	tensão auxiliar de referência da configuração 2.
v_{0h0g}^*	tensão auxiliar de referência da configuração 2.
v_{g0}^*	tensão auxiliar de referência da configuração 3.
v_{g0h}^*	tensão auxiliar de referência da configuração 4.
v_{0h0l}^*	tensão auxiliar de referência da configuração 4.
V^*	vetor das tensões associadas a tensão auxiliar (v_{l0}^*).
V_h^*	vetor das tensões associadas a tensão auxiliar (v_{l0h}^*) para a configuração 2 e das tensões associadas a tensão (v_{g0h}^*) para a configuração 4.
V_g^*	vetor das tensões associadas a tensão auxiliar (v_{0h0g}^*).
V_l^*	vetor das tensões associadas a tensão auxiliar (v_{0h0l}^*).
v_{l0max}^*	limite superior da tensão auxiliar de referência (v_{l0}^*).
v_{l0min}^*	limite inferior da tensão auxiliar de referência (v_{l0}^*).
v_{g0max}^*	limite superior da tensão auxiliar de referência (v_{g0}^*).
v_{g0min}^*	limite inferior da tensão auxiliar de referência (v_{g0}^*).
v_{l0hmax}^*	limite superior da tensão auxiliar de referência (v_{l0h}^*).

$v_{l0_h}^*$	limite inferior da tensão auxiliar de referência ($v_{l0_h}^*$).
$v_{g0_h}^*$	limite superior da tensão auxiliar de referência ($v_{g0_h}^*$).
$v_{g0_h}^*$	limite inferior da tensão auxiliar de referência ($v_{g0_h}^*$).
$v_{0_h0_g}^*$	limite superior da tensão auxiliar de referência ($v_{0_h0_g}^*$).
$v_{0_h0_g}^*$	limite inferior da tensão auxiliar de referência ($v_{0_h0_g}^*$).
$v_{0_h0_l}^*$	limite superior da tensão auxiliar de referência ($v_{0_h0_l}^*$).
$v_{0_h0_l}^*$	limite inferior da tensão auxiliar de referência ($v_{0_h0_l}^*$).
q_{hk}	chaves de potência superiores do conversor paralelo para $k = 1, 2, 3$.
\bar{q}_{hk}	chaves de potência inferiores do conversor paralelo para $k = 1, 2, 3$.
q_{gk}	chaves de potência superiores do conversor série das configurações 1 e 2 para $k = 1, 2, 3$.
\bar{q}_{gk}	chaves de potência inferiores do conversor série das configurações 1 e 2 para $k = 1, 2, 3$.
q_{lk}	chaves de potência superiores do conversor série das configurações 3 e 4 para $k = 1, 2, 3$.
\bar{q}_{lk}	chaves de potência inferiores do conversor série das configurações 3 e 4 para $k = 1, 2, 3$.
μ	variável auxiliar para as configurações 1 e 2.
μ_h	variável auxiliar associado ao conversor paralelo para as configurações 2 e 4.
μ_g	variável auxiliar associado ao conversor série para a configuração 2.
μ_l	variável auxiliar associado ao conversor série para a configuração 4.
$trig$	sinal triangular.
$trig_h$	sinal triangular para o conversor paralelo das configurações 2 e 4.
$trig_g$	sinal triangular para o conversor série da configuração 2.
$trig_l$	sinal triangular para o conversor série da configuração 4.
δ_l^*	ângulo entre a tensão de referência (v_{gk}^*) e a tensão de referência da carga (v_{lk}^*)

R_C	bloco controlador da tensão no barramento.
R_k	bloco controlador responsável por definir a tensão de referência (v_{gk}^*).
R_s	bloco controlador responsável por definir o ângulo (δ_l^*).
S_{in}	bloco de sincronização entre a corrente e a tensão da rede.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA UNIVERSAL SEM TRANSFORMADORES DE ISOLAÇÃO EM SÉRIE	3
2.1	Configuração 1	3
2.1.1	Modelo do Sistema	3
2.1.2	Estratégia PWM	4
2.1.3	Estratégia de Controle	6
2.2	Configuração 2	6
2.2.1	Modelo do Sistema	6
2.2.2	Estratégia PWM	9
2.2.3	Estratégia de Controle	11
2.3	Configuração 3	12
2.3.1	Modelo do Sistema	12
2.3.2	Estratégia PWM	13
2.3.3	Estratégia de Controle	15
2.4	Configuração 4	15
2.4.1	Modelo do Sistema	15
2.4.2	Estratégia PWM	17
2.4.3	Estratégia de Controle	20
3	DIMENSIONAMENTO DO FAP UNIVERSAL	21
3.1	Configuração 1	21
3.1.1	Tensões	21
3.1.2	Especificação da tensão no barramento	21
3.2	Configuração 2	21
3.2.1	Tensões	21
3.2.2	Especificação das tensões nos barramentos	22
3.3	Configuração 3	23
3.3.1	Tensões	23
3.3.2	Especificação da tensão no barramento	23
3.4	Configuração 4	23
3.4.1	Tensões	23
3.4.2	Especificação das tensões nos barramentos	24
4	RESULTADOS DOS SISTEMAS	25

4.1	Introdução	25
4.2	Resultados da Simulação	25
4.2.1	Configuração 1	25
4.2.2	Configuração 2	25
4.2.3	Configuração 3	28
4.2.4	Configuração 4	31
4.3	Resultados Experimentais	34
4.3.1	Configuração 1	34
4.4	Distorção Harmônica Total	34
5	CONCLUSÕES	39
	Referências	40
	APÊNDICES	42
	APÊNDICE A – DETALHES DO ÂNGULO δ_l^*	43

1 Introdução

O aumento da poluição elétrica provoca perturbações nas formas de onda senoidais da tensão e da corrente em sistemas elétricos. Conseqüentemente, aumentam as perdas de potência e os equipamentos elétricos trabalham inadequadamente. Para se ter uma maior qualidade de potência em sistemas de elétricos de potência, é necessário filtrar as harmônicas e a potência reativa no sistema. Os chamados filtros passivos são comumente utilizados, eles são constituídos por indutores e capacitores, para realizar a filtragem. A utilização desses elementos, atuando como filtro, foi a primeira forma de compensação de harmônicos empregada na Engenharia Elétrica. Devido ao baixo custo e simplicidade de projeto, essa técnica continua sendo bastante utilizada nos dias de hoje (1) e (2), porém esta prática pode dar origem a uma ressonância entre os elementos passivos do filtro e as impedâncias de sistema (3).

Devido a exigência na qualidade da potência na carga (cargas sensíveis), a área filtros de potência é um campo de pesquisa muito importante na eletrônica de potência (4). Em 1971 foi introduzido o conceito de compensação ativa (5), que baseava-se na compensação dos harmônicos por meio da compensação do fluxo magnético no núcleo de um transformador. Em 1976 foram propostos vários sistemas de filtros ativos baseados no inversor fonte de corrente com modulação PWM (*Pulse Width Modulation*) e no inversor fonte de tensão também com modulação PWM (6). Com a publicação de Mohan (7), os princípios básicos dos filtros ativos foram firmemente estabelecidos.

A fim de proporcionar compensação da potência reativa e harmônicos com mais confiabilidade os filtros ativos de potência e filtros híbridos têm sido apresentados na literatura (4, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14). O filtro ativo em série (15) compensa tanto harmônicas de tensão, bem como as quedas de tensão no fornecimento de energia. O filtro ativo conectado em paralelo (16) compensa a parte reativa e os harmônicos da corrente devido às cargas não-lineares.

O filtro ativo universal (UAF) é um equipamento desenvolvido para suprir simultaneamente os harmônicos da corrente e compensar a potência reativa. Uma vez que são associadas as características dos filtros série e paralelo, o UAF é normalmente constituído por uma combinação de conversores série paralelo. O conversor série utiliza transformadores de isolamento. Peso, tamanho e os custos associados ao transformador torna indesejável tal solução, principalmente para ambientes de escritório e de casa. Fig. 1 ilustra um filtro universal trifásico convencional com a rede isolada para aplicações a três fios, utilizando o transformador trifásico série de costume.

O filtro ativo universal tem-se destacado cada vez mais e vários estudos vem sendo

propostos (17, 8, 18, 19). Este trabalho apresenta quatro topologias de filtros ativos universais (ver. Fig. 2, 5, 8 e 11) para os sistemas trifásicos a três fios. Para as duas primeiras configurações, a rede é considerada sendo isolada. Além disso, as configurações 1 e 3 utilizam um único barramento, enquanto as configurações 2 e 4 possuem dois barramentos. Os sistemas de controle, incluindo as estratégias de PWM, serão desenvolvidas. Alguns resultados preliminares de simulação e experimentais serão apresentados para validar as abordagens teóricas.

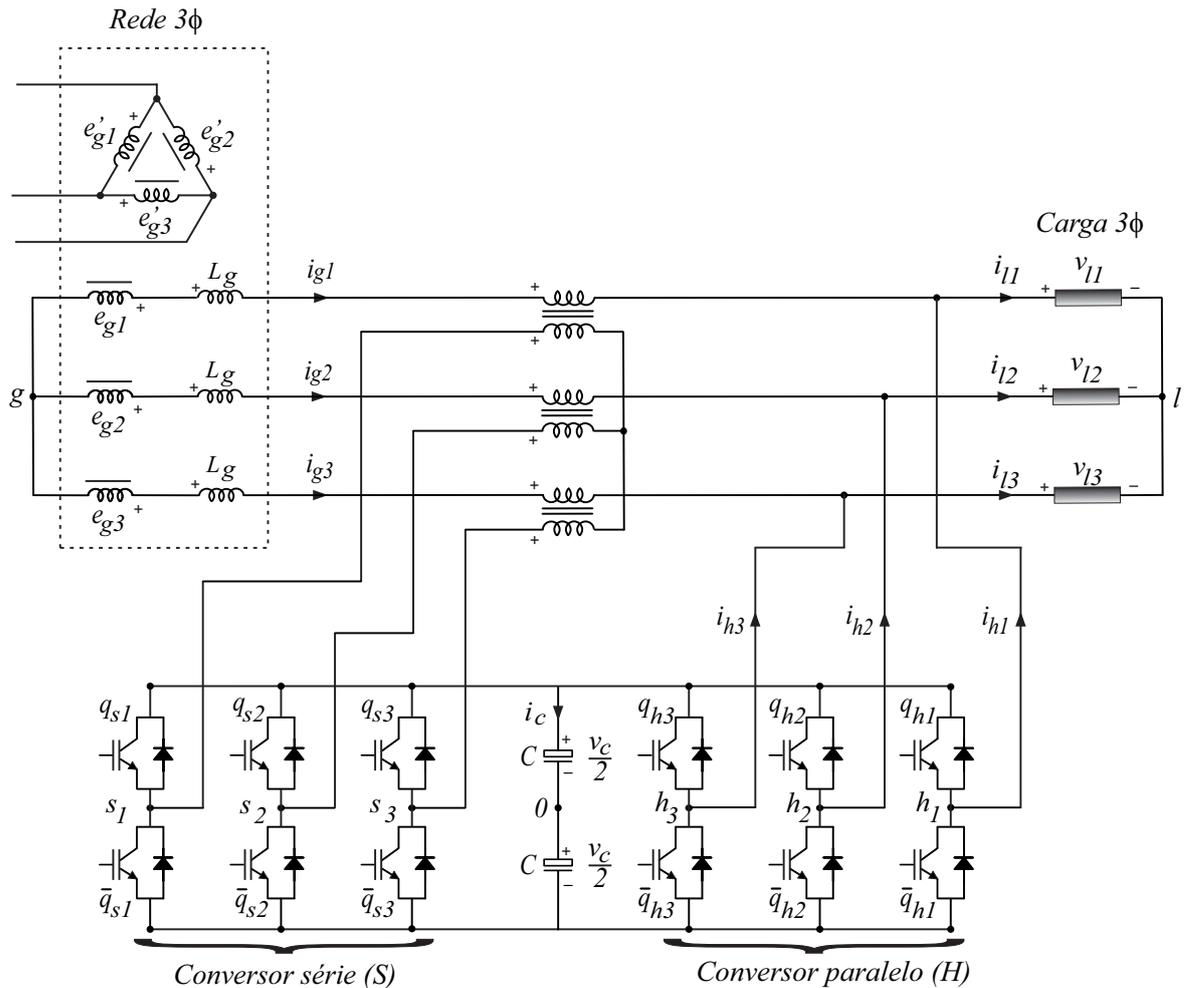


Figura 1 – Filtro ativo universal trifásico convencional.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: No Capítulo 2 serão apresentadas as configurações 1, 2, 3 e 4 propostas neste trabalho, com os modelos dos sistemas, as estratégias PWM e as estratégias de controle para todas as configurações. No Capítulo 3 será apresentado o dimensionamento dos FAP universais para todas as configurações. No Capítulo 4 serão apresentados os resultados das simulações e os resultados experimentais para todas as configurações. No Capítulo 5 será apresentada a conclusão, contendo um breve resumo do que foi desenvolvido e o que ainda precisa ser feito para concluir o projeto.

2 Filtro ativo de potência universal sem transformadores de isolação em série

2.1 Configuração 1

2.1.1 Modelo do Sistema

A configuração 1 pode ser vista na Fig. 2 e o modelo do sistema na Fig. 3. O sistema consiste de uma rede de energia que gera as tensões e_{g1} , e_{g2} e e_{g3} , uma carga Z_l e o filtro ativo universal (combinação de conversores série e paralelo). Neste caso, os conversores compartilham o mesmo barramento. Para esta configuração, o modelo é representado por 2.1, 2.2 e 2.3.

$$v_{gk} = v_{hk0} - v_{gk0} = e_{gk} - (R_g + L_g p) i_{gk} \quad (2.1)$$

$$v_{lk} = v_{hk0} - v_{l0} \quad (2.2)$$

$$i_{lk} = i_{gk} + i_{hk} \quad (2.3)$$

onde $p = d/dt$, $k = 1, 2, 3$, e v_{hk0} e v_{gk0} são as tensões de pólo dos conversores H e G e podem ser expressas por 2.4 e 2.5, respectivamente. Nas próximas relações, a variável k será igual a 1, 2 e 3.

$$v_{hk0} = (2q_{hk} - 1) \frac{v_c}{2} \quad (2.4)$$

$$v_{gk0} = (2q_{gk} - 1) \frac{v_c}{2} \quad (2.5)$$

onde q_{hk} e q_{gk} são os estados das chaves ($q_{hk} = q_{gk} = 1$ a chave está ligada e $q_{hk} = q_{gk} = 0$ a chave está desligada).

Com $e_{g1} + e_{g2} + e_{g3} = 0$, a tensão v_{l0} pode ser expressa como

$$v_{l0} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 v_{hk0} \quad (2.6)$$

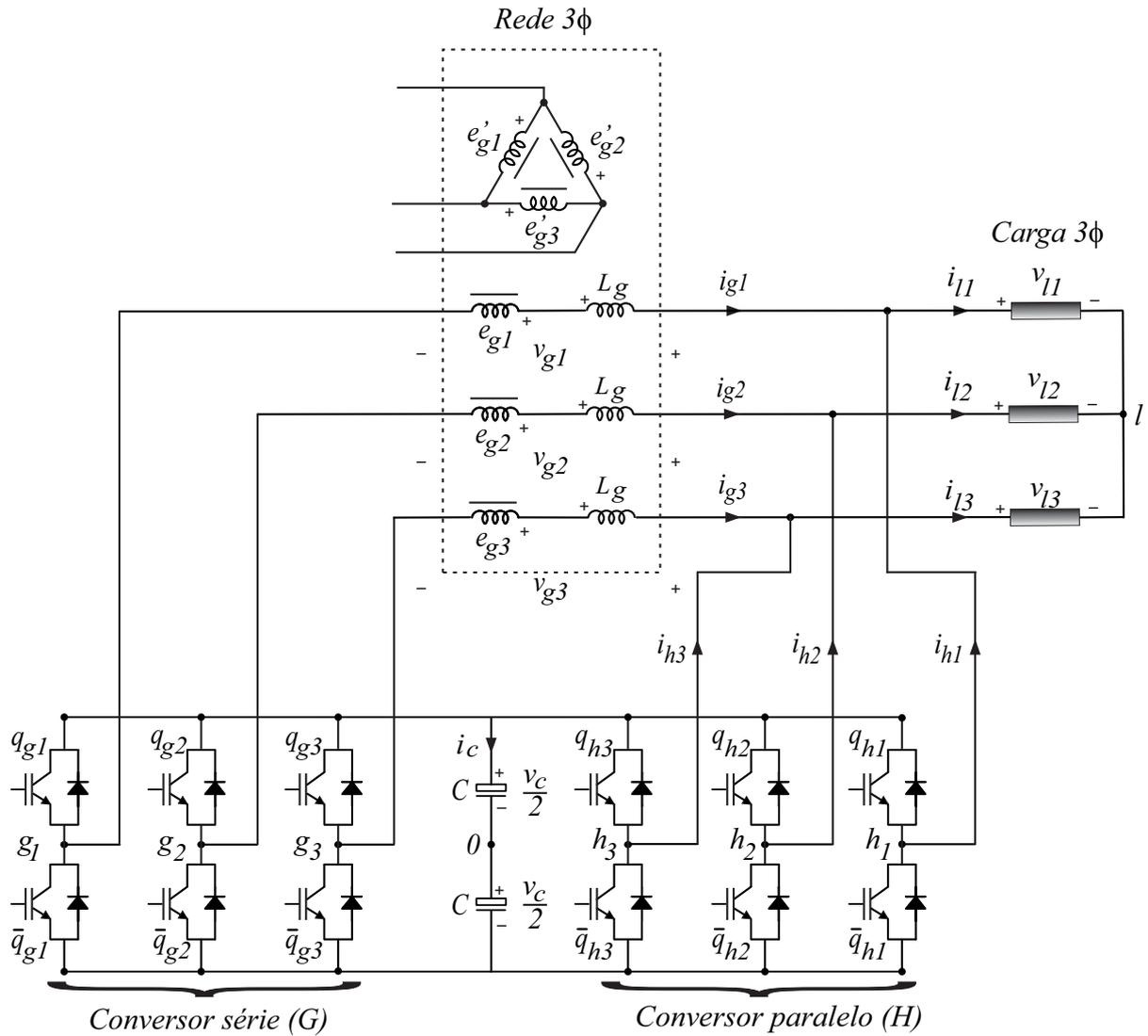


Figura 2 – Filtro ativo universal trifásico proposto - Configuração 1.

2.1.2 Estratégia PWM

O objetivo do comando PWM é impor tensões de referência com valor médio constante durante o intervalo de chaveamento T . Para a configuração 1, tem-se as tensões de pólo dadas por 2.7 a 2.12.

$$v_{h10}^* = v_{l1}^* + v_{l0}^* \quad (2.7)$$

$$v_{h20}^* = v_{l2}^* + v_{l0}^* \quad (2.8)$$

$$v_{h30}^* = v_{l3}^* + v_{l0}^* \quad (2.9)$$

$$v_{g10}^* = v_{l1}^* - v_{g1}^* + v_{l0}^* \quad (2.10)$$

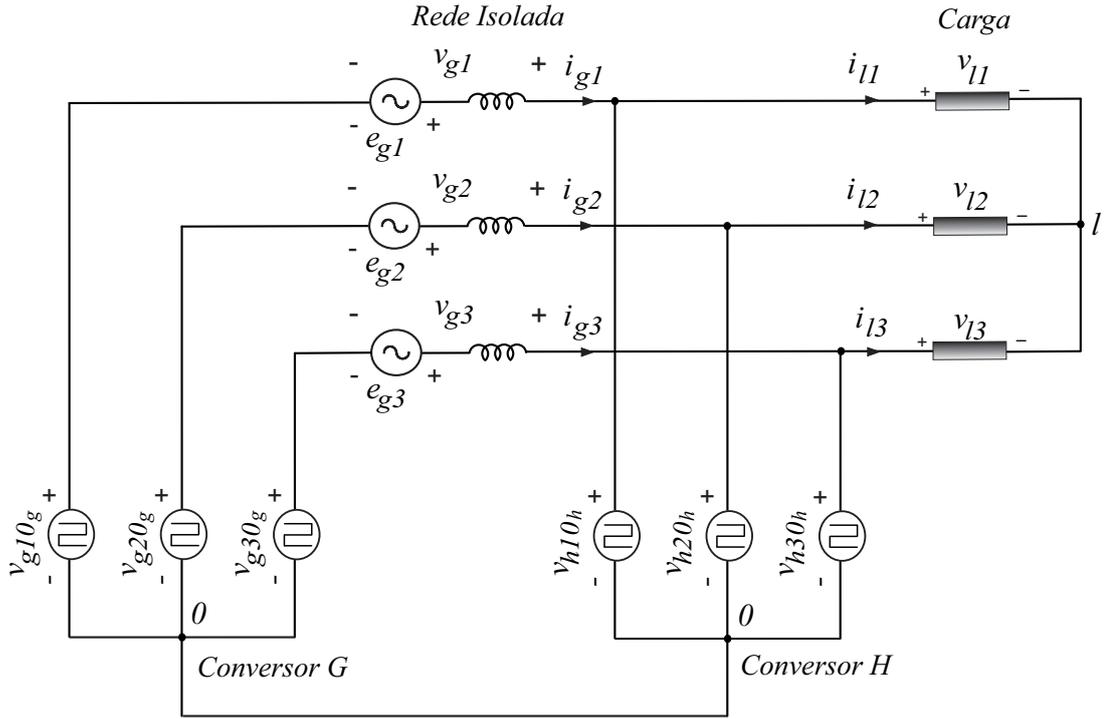


Figura 3 – Modelo do sistema - Configuração 1.

$$v_{g20}^* = v_{l2}^* - v_{g2}^* + v_{l0}^* \quad (2.11)$$

$$v_{g30}^* = v_{l3}^* - v_{g3}^* + v_{l0}^* \quad (2.12)$$

Portanto, para gerar uma tensão média igual a v_{lk}^* no intervalo T , deve-se escolher v_{l0}^* (um grau de liberdade). Seja v_c^* a tensão escolhida para o barramento do conversor, então v_{hk0} e v_{gk0} podem assumir dois valores representados por 2.13 e 2.14.

$$v_{hk0} = \pm \frac{v_c^*}{2} \quad (2.13)$$

$$v_{gk0} = \pm \frac{v_c^*}{2} \quad (2.14)$$

A tensão v_{l0}^* pode ser escolhida desde que satisfaça as relações 2.15, 2.16 e 2.17.

$$v_{l0max}^* = \frac{v_c^*}{2} - \max(V^*) \quad (2.15)$$

$$v_{l0min}^* = -\frac{v_c^*}{2} - \min(V^*) \quad (2.16)$$

$$v_{l0min}^* \leq v_{l0}^* \leq v_{l0max}^* \quad (2.17)$$

onde $V^* = \{v_{l1}^*, v_{l2}^*, v_{l3}^*, v_{l1}^* - v_{g1}^*, v_{l2}^* - v_{g2}^*, v_{l3}^* - v_{g3}^*\}$ e v_c^* é a tensão no barramento. A escolha das variáveis auxiliares satisfazendo os limites, anteriormente citados, pode ser fornecida através da introdução de um parâmetro μ ($0 \leq \mu \leq 1$) para a variável auxiliar, definido em (20) e (21) como

$$v_{l0}^* = \mu v_{l0max}^* + (1 - \mu)v_{l0min}^* \quad (2.18)$$

Existem três casos que merecem destaque:

$$v_{l0}^* = v_{l0max}^*, (\mu = 1) \quad (2.19)$$

$$v_{l0}^* = v_{l0min}^*, (\mu = 0) \quad (2.20)$$

o que reduz as perdas, já que um dos braços não chaveia, e

$$v_{l0}^* = \frac{v_{l0max}^* + v_{l0min}^*}{2}, (\mu = 0.5) \quad (2.21)$$

que reduz as distorções introduzidas pela alta frequência de chaveamento, devido aos pulsos de tensão gerados serem mais simétricos. Os estados das chaves q_{hk} e q_{gk} podem ser obtidos comparando-se com um sinal triangular dada por

$$trig = \pm \frac{v_c}{T} t \quad (2.22)$$

com as tensões de referência v_{hko}^* e v_{gko}^* .

2.1.3 Estratégia de Controle

Para a configuração 1 tem-se o diagrama de controle que pode ser visto na Fig. 4. A tensão no barramento é controlada através do controlador R_C , o qual a saída é a referência da amplitude da corrente na rede (I_g^*). O bloco S_{in} realiza a sincronização da rede entre a corrente de referência instantânea (i_{gk}^*) com a tensão (e_{gk}). Desta forma, a potência reativa e os harmônicos demandados pela carga são compensados. O controlador R_k é responsável por definir a tensão de referência (v_{gk}^*).

2.2 Configuração 2

2.2.1 Modelo do Sistema

A configuração 2 pode ser vista na Fig. 5 e o modelo do sistema na Fig. 6. Neste caso, o filtro possui dois barramentos, um para cada conversor. Para esta configuração o

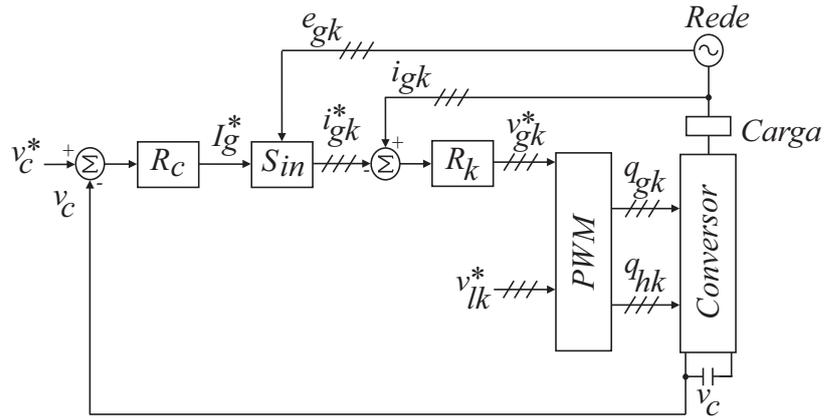


Figura 4 – Diagrama de controle do FAP universal - Configuração 1.

modelo é descrito por 2.23, 2.24 e 2.25.

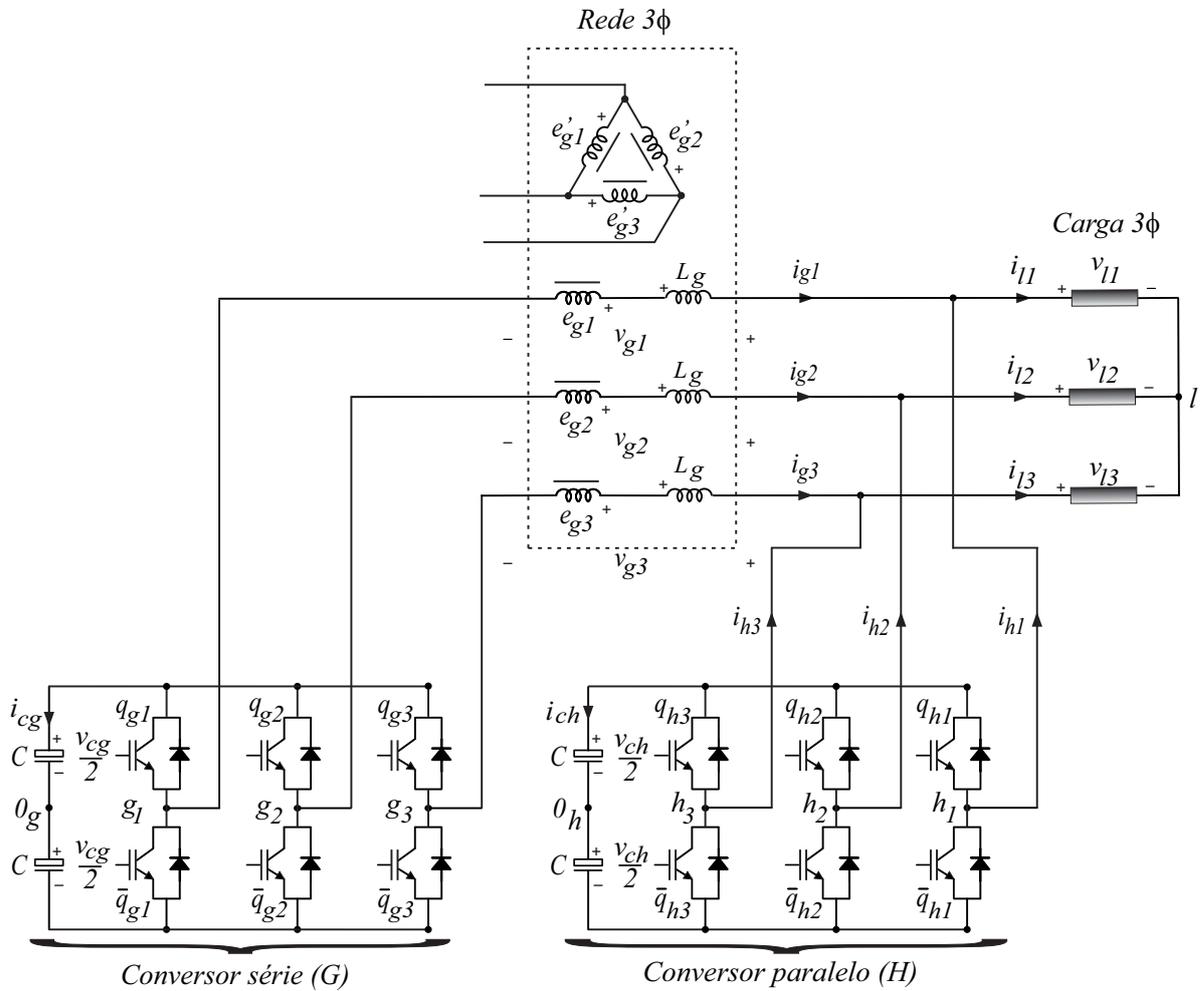


Figura 5 – Filtro ativo universal trifásico proposto - Configuração 2.

$$v_{gk} = v_{hk0_h} - v_{gk0_g} + v_{0_h0_g} = e_{gk} - (R_g + L_g p) i_{gk} \quad (2.23)$$

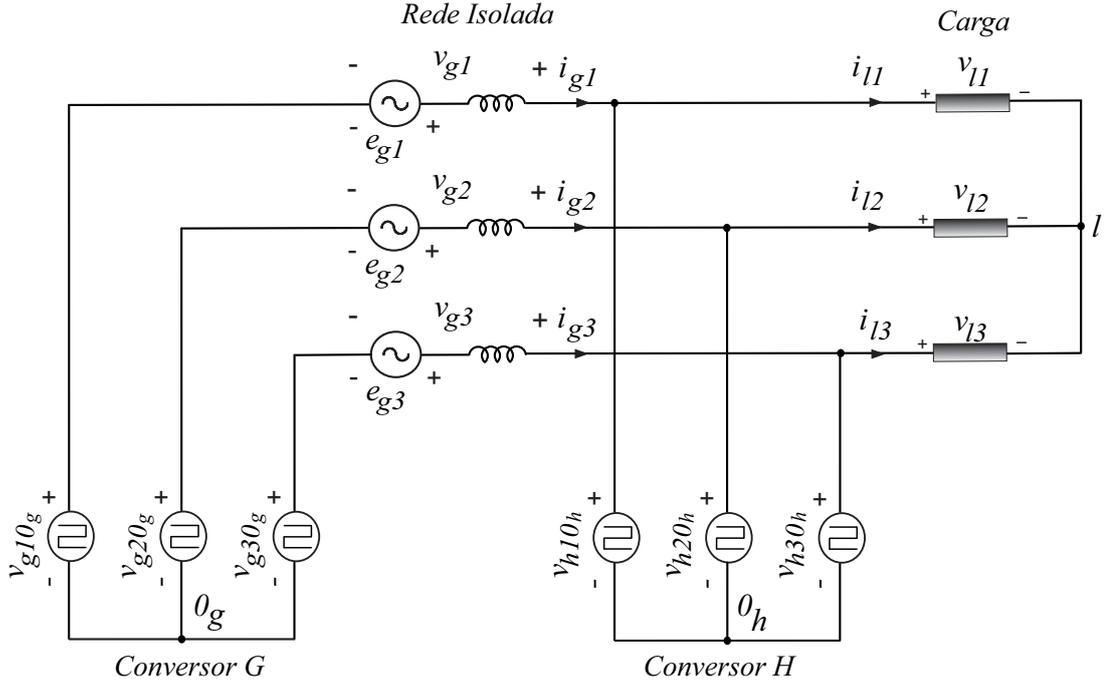


Figura 6 – Modelo do sistema - Configuração 2.

$$v_{lk} = v_{hk0_h} - v_{l0_h} \quad (2.24)$$

$$i_{lk} = i_{gk} + i_{hk} \quad (2.25)$$

onde v_{hk0_h} e v_{gk0_g} são as tensões de pólo dos conversores H e G e podem ser expressas pelas equações 2.26 e 2.27, respectivamente,

$$v_{hk0_h} = (2q_{hk} - 1) \frac{v_{ch}}{2} \quad (2.26)$$

$$v_{gk0_g} = (2q_{gk} - 1) \frac{v_{cg}}{2} \quad (2.27)$$

onde q_{hk} e q_{gk} são os estados das chaves ($q_{hk} = q_{gk} = 1$ chave ligada e $q_{hk} = q_{gk} = 0$ chave desligada).

Para um sistema balanceado, tem-se as equações 2.28 e 2.29.

$$\sum_{k=1}^3 v_{lk} = 0 \quad (2.28)$$

$$\sum_{k=1}^3 v_{gk} = 0 \quad (2.29)$$

Então adicionando as equações 2.28 e 2.29, as tensões v_{l0_h} e $v_{0_h0_g}$ são dadas por 2.30 e 2.31

$$v_{l0_h} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 v_{hk0_h} \quad (2.30)$$

$$v_{0_h0_g} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 (v_{gk0_g} - v_{hk0_h}) \quad (2.31)$$

2.2.2 Estratégia PWM

Para a configuração 2, tem-se as tensões de pólo

$$v_{h10_h}^* = v_{l1}^* + v_{l0_h}^* \quad (2.32)$$

$$v_{h20_h}^* = v_{l2}^* + v_{l0_h}^* \quad (2.33)$$

$$v_{h30_h}^* = v_{l3}^* + v_{l0_h}^* \quad (2.34)$$

$$v_{g10_g}^* = -v_{g1}^* + v_{h10_h}^* + v_{0_h0_g}^* \quad (2.35)$$

$$v_{g20_g}^* = -v_{g2}^* + v_{h20_h}^* + v_{0_h0_g}^* \quad (2.36)$$

$$v_{g30_g}^* = -v_{g3}^* + v_{h30_h}^* + v_{0_h0_g}^* \quad (2.37)$$

Portanto, para gerar uma tensão média igual a $v_{l_k}^*$ e $v_{g_k}^*$ no intervalo T , deve-se escolher $v_{l0_h}^*$ e $v_{0_h0_g}^*$ (dois graus de liberdade). Seja v_{ch} e v_{cg} as tensões escolhidas para o barramento do conversor paralelo e para o barramento do conversor série, respectivamente, então v_{hk0_h} e v_{gk0_g} podem ter dois valores representados nas equações 2.38 e 2.39.

$$v_{hk0_h} = \pm \frac{v_{ch}}{2} \quad (2.38)$$

$$v_{gk0_g} = \pm \frac{v_{cg}}{2} \quad (2.39)$$

A tensão $v_{l0_h}^*$ pode ser escolhida de tal modo que satisfaça:

$$v_{l0_h}^*{}_{max} = \frac{v_{ch}^*}{2} - \max(V_h^*) \quad (2.40)$$

$$v_{l0_h}^*{}_{min} = -\frac{v_{ch}^*}{2} - \min(V_h^*) \quad (2.41)$$

$$v_{l0_h}^*{}_{min} \leq v_{l0_h}^* \leq v_{l0_h}^*{}_{max} \quad (2.42)$$

onde $V_h^* = \{v_{l1}^*, v_{l2}^*, v_{l3}^*\}$ e v_{ch}^* é a tensão de referência no barramento do conversor paralelo.

A tensão $v_{0_h0_g}^*$ pode ser escolhida de tal modo que satisfaça:

$$v_{0_h0_g}^*{}_{max} = \frac{v_{cg}^*}{2} - \max(V_g^*) \quad (2.43)$$

$$v_{0_h0_g}^*{}_{min} = -\frac{v_{cg}^*}{2} - \min(V_g^*) \quad (2.44)$$

$$v_{0_h0_g}^*{}_{min} \leq v_{0_h0_g}^* \leq v_{0_h0_g}^*{}_{max} \quad (2.45)$$

onde $V_g^* = \{v_{h10_h}^* - v_{g1}^*, v_{h20_h}^* - v_{g2}^*, v_{h30_h}^* - v_{g3}^*\}$ e v_{cg}^* é a tensão de referência no barramento do conversor série.

A escolha das variáveis auxiliares que satisfaçam os seus limites pode ser fornecida introduzindo os parâmetros μ_h ($0 \leq \mu_h \leq 1$) e μ_g ($0 \leq \mu_g \leq 1$) para as variáveis auxiliares, definidas em (20) e (21) como

$$v_{l0_h}^* = \mu_h v_{l0_h}^*{}_{max} + (1 - \mu_h) v_{l0_h}^*{}_{min} \quad (2.46)$$

$$v_{0_h0_g}^* = \mu_g v_{0_h0_g}^*{}_{max} + (1 - \mu_g) v_{0_h0_g}^*{}_{min} \quad (2.47)$$

Existem três casos que merecem destaque:

$$v_{l0_h}^* = v_{l0_h}^*{}_{max}, (\mu_h = 1) \quad (2.48)$$

$$v_{l0_h}^* = v_{l0_h}^*{}_{min}, (\mu_h = 0) \quad (2.49)$$

o que reduz as perdas, já que um dos braços não chaveia, e

$$v_{l0_h}^* = \frac{v_{l0_h}^*{}_{max} + v_{l0_h}^*{}_{min}}{2}, (\mu_h = 0.5) \quad (2.50)$$

que reduz as distorções harmônicas introduzidas pela alta frequência de chaveamento devido aos pulsos de tensão serem mais simétricos.

O mesmo ocorre com o conversor série.

$$v_{0_h0_g}^* = v_{0_h0_gmax}^*, (\mu_g = 1) \quad (2.51)$$

$$v_{0_h0_g}^* = v_{0_h0_gmin}^*, (\mu_g = 0) \quad (2.52)$$

$$v_{0_h0_g}^* = \frac{v_{0_h0_gmax}^* + v_{0_h0_gmin}^*}{2}, (\mu_g = 0.5) \quad (2.53)$$

Os estados das chaves q_{hk} e q_{gk} podem ser obtidos comparando-se um sinal triangular dado por

$$trig_h = \pm \frac{v_{ch}}{T} t \quad (2.54)$$

$$trig_g = \pm \frac{v_{cg}}{T} t \quad (2.55)$$

com as tensões de referência $v_{hk0_h}^*$ e $v_{gk0_g}^*$.

2.2.3 Estratégia de Controle

O diagrama de controle para a configuração 2 pode ser visto na Fig. 7. Deve-se notar que, diferentemente da configuração 1, o controlador R_C considera a soma das tensões dos barramentos ($v_{cg}^* + v_{ch}^*$) para gerar a referência da amplitude da corrente da rede (I_g^*). O controlador R_k é responsável por regular a tensão de referência (v_{gk}^*). A tensão no barramento (v_{cg}) do conversor série é controlada por meio do controlador R_s , o qual a saída é o ângulo (δ_l^*) entre a tensão de referência (v_{gk}^*) e a tensão de referência da carga (v_{lk}^*). Detalhes sobre o ângulo (δ_l^*) pode ser visto no Apêndice A.

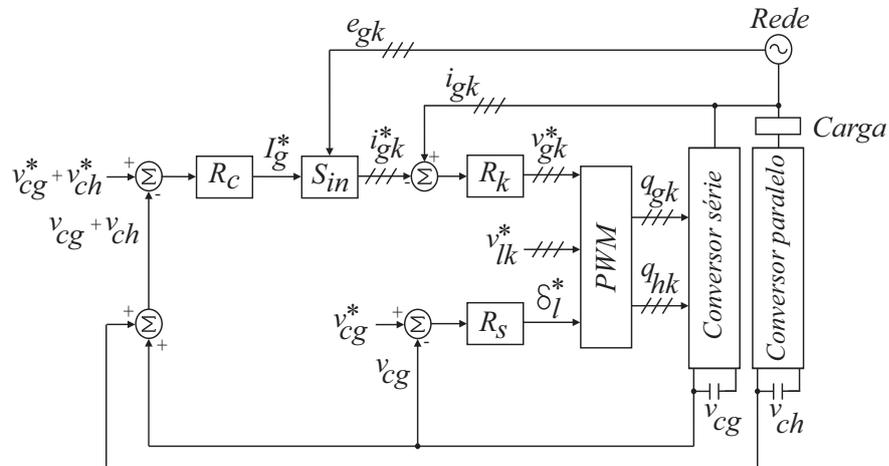


Figura 7 – Diagrama de controle do FAP universal - Configuração 2.

2.3 Configuração 3

2.3.1 Modelo do Sistema

A configuração 3 pode ser vista na Fig. 8 e o modelo do sistema na Fig. 9. Neste caso, o filtro nesse modelo é conectado a carga e possui um barramento. Para esta configuração o modelo é descrito por

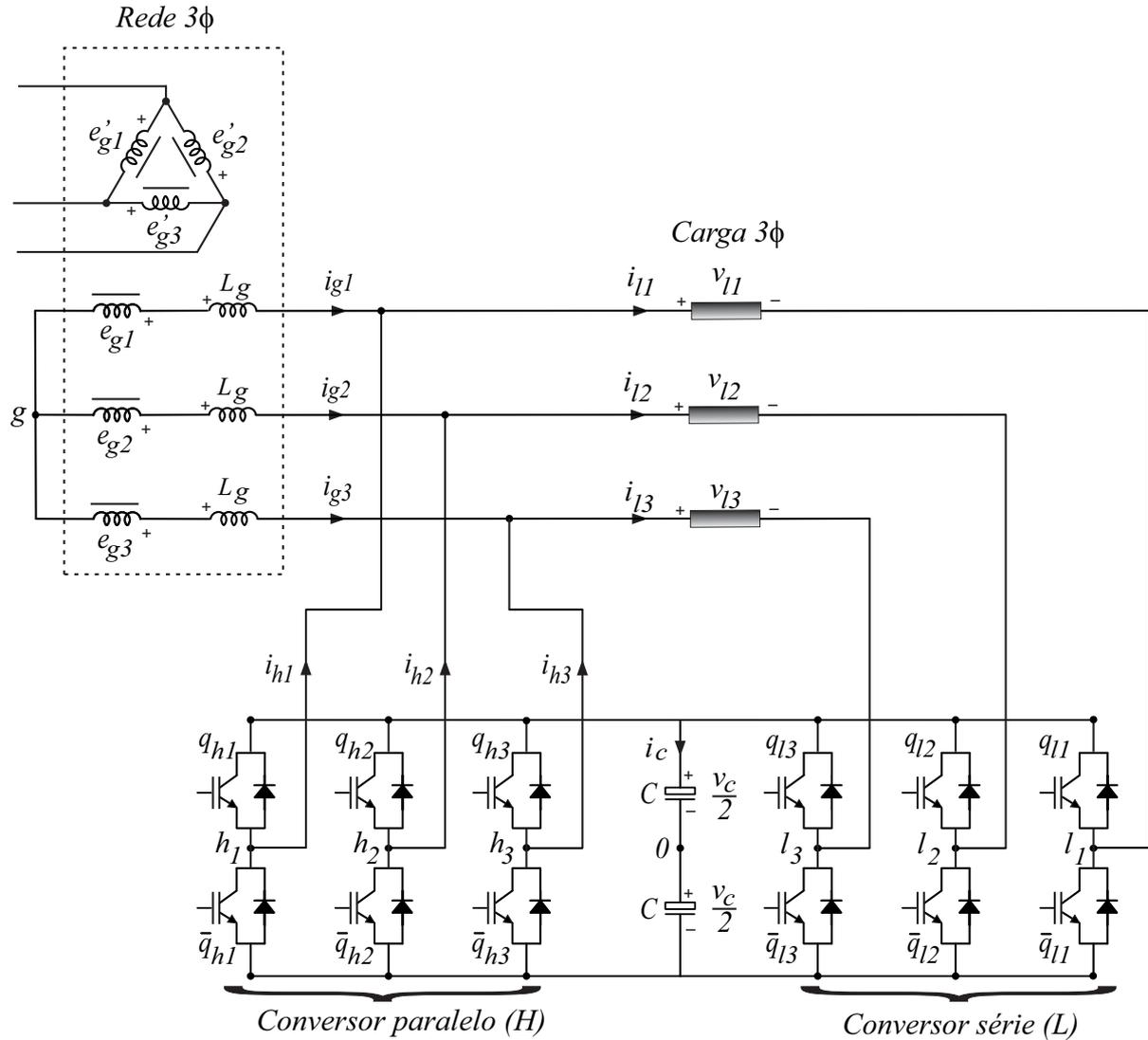


Figura 8 – Filtro ativo universal trifásico proposto - Configuração 3.

$$v_{gk} = v_{hk0} - v_{g0} = e_{gk} - (R_g + L_g p) i_{gk} \quad (2.56)$$

$$v_{lk} = v_{hk0} - v_{lk0} \quad (2.57)$$

$$\dot{i}_{lk} = \dot{i}_{gk} + \dot{i}_{hk} \quad (2.58)$$

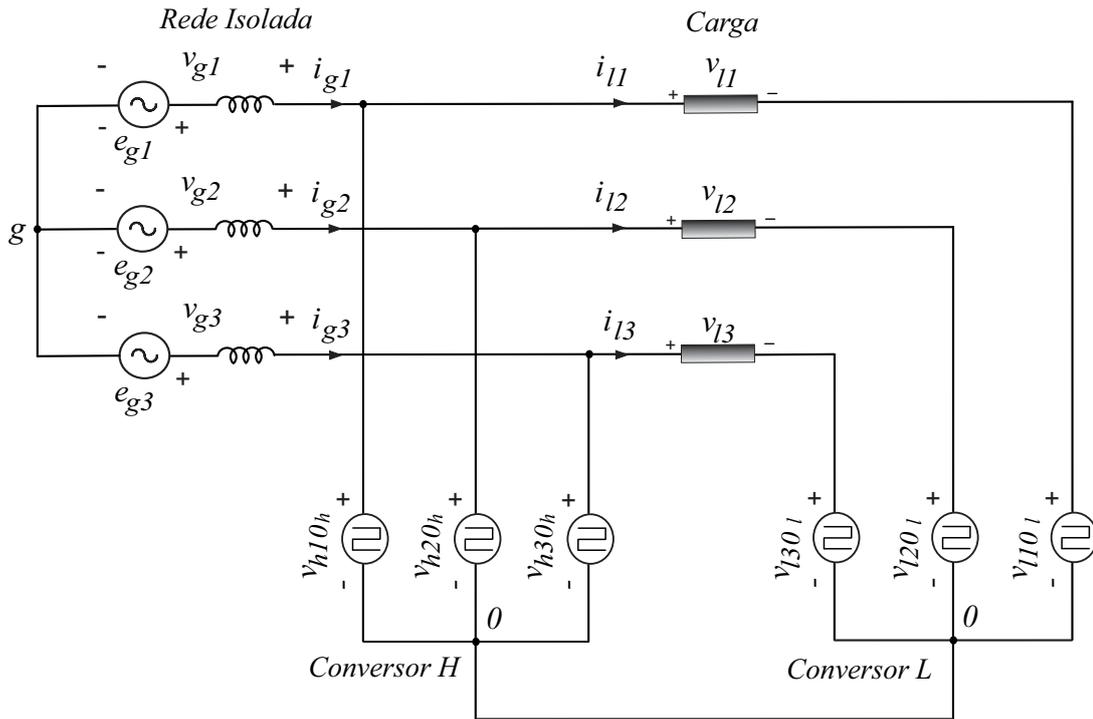


Figura 9 – Modelo do sistema - Configuração 3.

onde v_{hk0} e v_{lk0} são as tensões de pólo dos conversores H e L e podem ser expressas por 2.59 e 2.60, respectivamente.

$$v_{hk0} = (2q_{hk} - 1) \frac{v_c}{2} \quad (2.59)$$

$$v_{lk0} = (2q_{lk} - 1) \frac{v_c}{2} \quad (2.60)$$

onde q_{hk} e q_{lk} são os estados das chaves ($q_{hk} = q_{lk} = 1$ a chave está ligada e $q_{hk} = q_{lk} = 0$ a chave está desligada).

Com $e_{g1} + e_{g2} + e_{g3} = 0$, a tensão v_{g0} pode ser expressa como

$$v_{g0} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 v_{hk0} \quad (2.61)$$

2.3.2 Estratégia PWM

Para a configuração 3, tem-se as tensões de pólo dadas por 2.62 a 2.67.

$$v_{h10}^* = v_{g1}^* + v_{g0}^* \quad (2.62)$$

$$v_{h20}^* = v_{g2}^* + v_{g0}^* \quad (2.63)$$

$$v_{h30}^* = v_{g3}^* + v_{g0}^* \quad (2.64)$$

$$v_{l10}^* = v_{h10}^* - v_{l1}^* \quad (2.65)$$

$$v_{l20}^* = v_{h20}^* - v_{l2}^* \quad (2.66)$$

$$v_{l30}^* = v_{h30}^* - v_{l3}^* \quad (2.67)$$

Portanto, para gerar uma tensão média igual a v_{gk}^* no intervalo T , deve-se escolher v_{g0}^* (um grau de liberdade). Seja v_c^* a tensão escolhida para o barramento do conversor, então v_{hk0} e v_{lk0} podem assumir dois valores representados por 2.68 e 2.69.

$$v_{hk0} = \pm \frac{v_c^*}{2} \quad (2.68)$$

$$v_{lk0} = \pm \frac{v_c^*}{2} \quad (2.69)$$

A tensão v_{g0}^* pode ser escolhida desde que satisfaça as relações 2.70, 2.71 e 2.72.

$$v_{g0max}^* = \frac{v_c^*}{2} - \max(V^*) \quad (2.70)$$

$$v_{g0min}^* = -\frac{v_c^*}{2} - \min(V^*) \quad (2.71)$$

$$v_{g0min}^* \leq v_{g0}^* \leq v_{g0max}^* \quad (2.72)$$

onde $V^* = \{v_{g1}^*, v_{g2}^*, v_{g3}^*, v_{g1}^* - v_{l1}^*, v_{g2}^* - v_{l2}^*, v_{g3}^* - v_{l3}^*\}$ e v_c^* é a tensão no barramento. A escolha das variáveis auxiliares satisfazendo os limites, anteriormente citados, pode ser fornecida através da introdução de um parâmetro μ ($0 \leq \mu \leq 1$) para a variável auxiliar

$$v_{g0}^* = \mu v_{g0max}^* + (1 - \mu) v_{g0min}^* \quad (2.73)$$

Existem três casos que merecem destaque:

$$v_{g0}^* = v_{g0max}^*, (\mu = 1) \quad (2.74)$$

$$v_{g0}^* = v_{g0min}^*, (\mu = 0) \quad (2.75)$$

o que reduz as perdas, já que um dos braços não chaveia, e

$$v_{g0}^* = \frac{v_{g0max}^* + v_{g0min}^*}{2}, (\mu = 0.5) \quad (2.76)$$

o que reduz as distorções introduzidas pela alta frequência de chaveamento, devido aos pulsos de tensão gerados serem mais simétricos. Os estados das chaves q_{hk} e q_{lk} podem ser obtidos comparando-se com um sinal triangular dada por

$$trig = \pm \frac{v_c}{T} t \quad (2.77)$$

com as tensões de referência v_{hk0}^* e v_{lk0}^* .

2.3.3 Estratégia de Controle

Para a configuração 3 tem-se o diagrama de controle que pode ser visto na Fig. 10. A tensão no barramento é controlada através do controlador R_C , o qual a saída é a referência da amplitude da corrente na rede (I_g^*). O bloco S_{in} realiza a sincronização da rede entre a corrente de referência instantânea (i_{gk}^*) com a tensão (e_{gk}). O controlador R_k é responsável por definir a tensão de referência (v_{gk}^*).

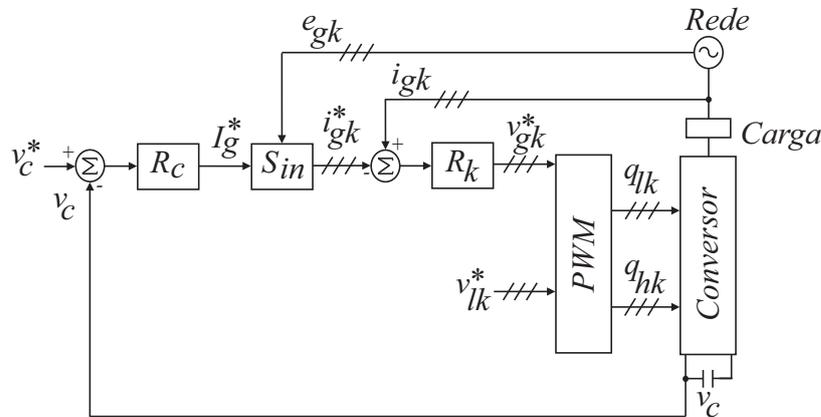


Figura 10 – Diagrama de controle do FAP universal - Configuração 3.

2.4 Configuração 4

2.4.1 Modelo do Sistema

A configuração 4 pode ser vista na Fig. 11 e o modelo do sistema na Fig. 12. Neste caso, o filtro conectado a carga possui dois barramentos, um para cada conversor. Para esta configuração o modelo é descrito por 2.78, 2.79 e 2.80.

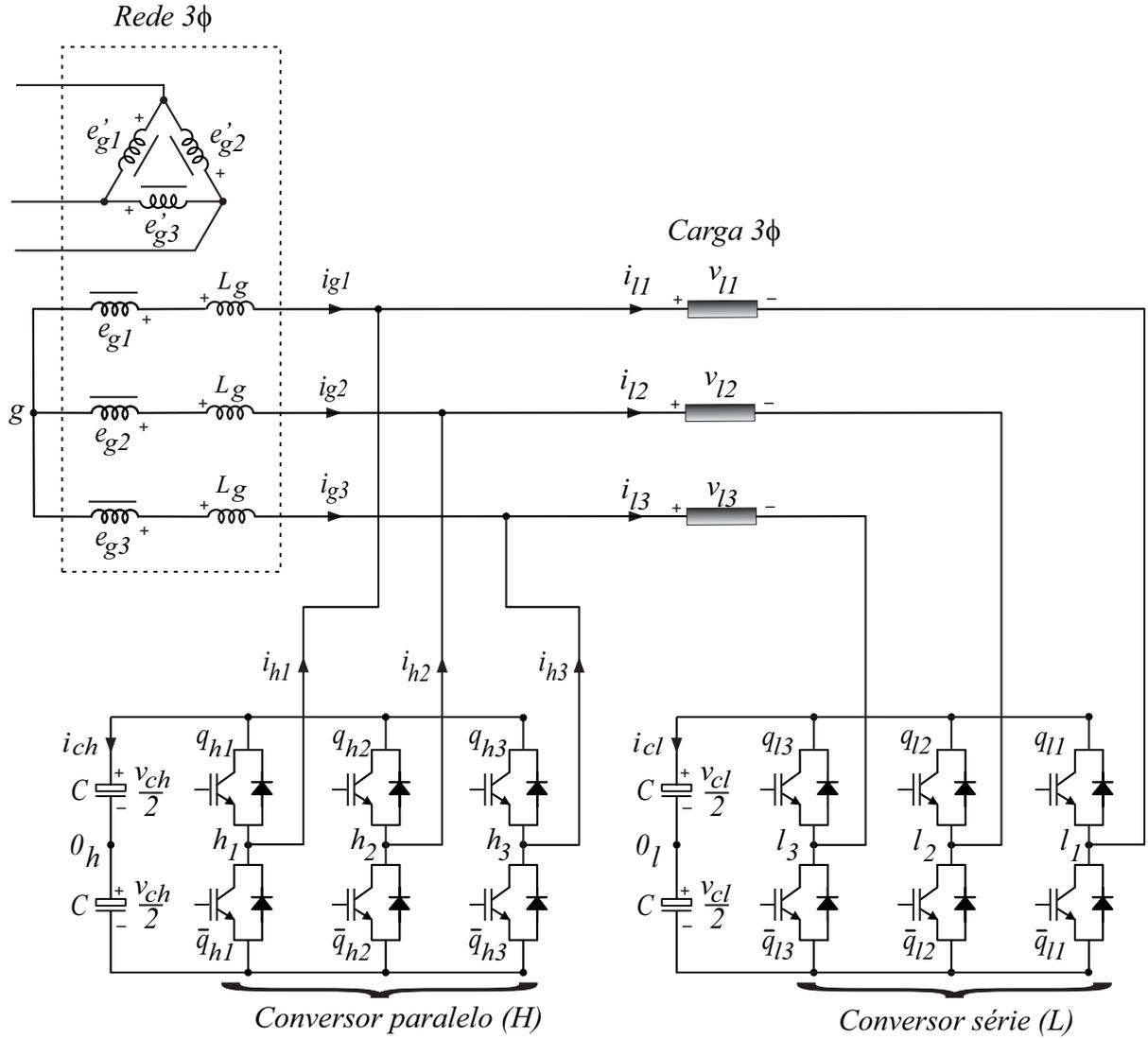


Figura 11 – Filtro ativo universal trifásico proposto - Configuração 4.

$$v_{gk} = v_{hk0_h} - v_{g0_h} = e_{gk} - (R_g + L_g p)i_{gk} \quad (2.78)$$

$$v_{lk} = v_{hk0_h} - v_{lk0_l} + v_{0_h0_l} \quad (2.79)$$

$$\dot{v}_{lk} = \dot{i}_{gk} + \dot{i}_{hk} \quad (2.80)$$

onde v_{hk0_h} e v_{lk0_l} são as tensões de pólo dos conversores H e L e podem ser expressas pelas equações 2.81 e 2.82, respectivamente.

$$v_{hk0_h} = (2q_{hk} - 1) \frac{v_{ch}}{2} \quad (2.81)$$

$$v_{lk0_l} = (2q_{lk} - 1) \frac{v_{cl}}{2} \quad (2.82)$$

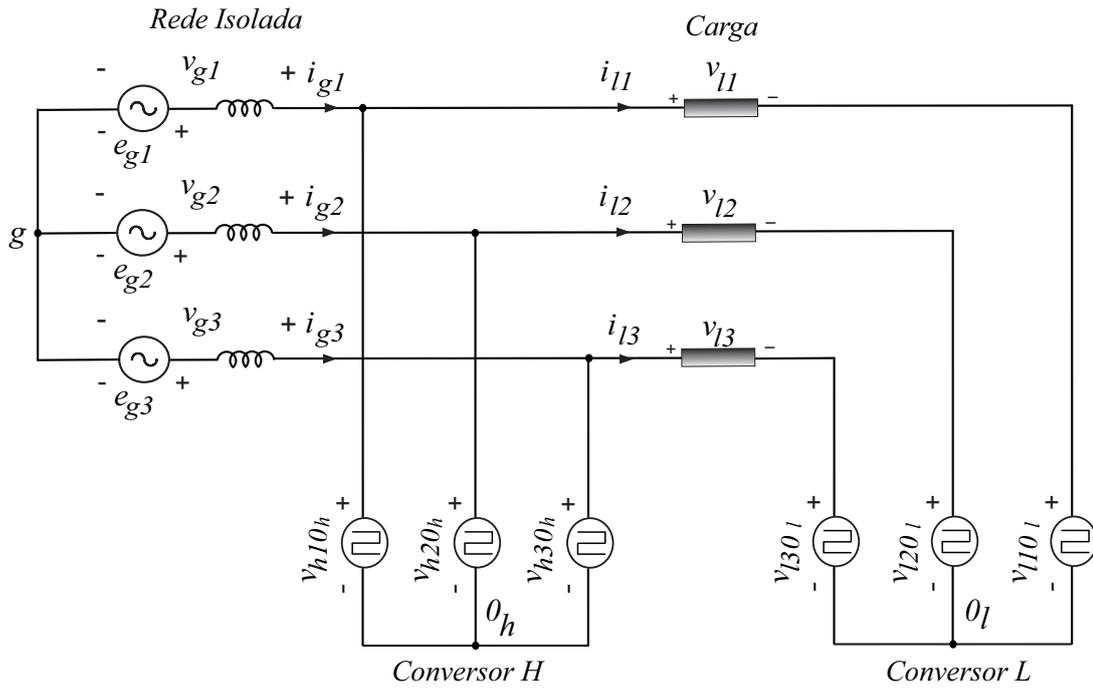


Figura 12 – Modelo do sistema - Configuração 4.

onde q_{hk} e q_{lk} são os estados das chaves ($q_{hk} = q_{lk} = 1$ chave ligada e $q_{hk} = q_{lk} = 0$ chave desligada).

Para um sistema balanceado, tem-se as equações 2.83 e 2.84.

$$\sum_{k=1}^3 v_{lk} = 0 \quad (2.83)$$

$$\sum_{k=1}^3 v_{gk} = 0 \quad (2.84)$$

Então adicionando as equações 2.83 e 2.84, as tensões v_{g0_h} e $v_{0_h0_l}$ são dadas por 2.85 e 2.86

$$v_{g0_h} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 v_{hk0_h} \quad (2.85)$$

$$v_{0_h0_l} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 (v_{lk0_l} - v_{hk0_h}) \quad (2.86)$$

2.4.2 Estratégia PWM

Para a configuração 2, tem-se as tensões de pólo

$$v_{h10_h}^* = v_{g1}^* + v_{g0_h}^* \quad (2.87)$$

$$v_{h20_h}^* = v_{g2}^* + v_{g0_h}^* \quad (2.88)$$

$$v_{h30_h}^* = v_{g3}^* + v_{g0_h}^* \quad (2.89)$$

$$v_{l10_l}^* = -v_{l1}^* + v_{h10_h}^* + v_{0_h0_l}^* \quad (2.90)$$

$$v_{l20_l}^* = -v_{l2}^* + v_{h20_h}^* + v_{0_h0_l}^* \quad (2.91)$$

$$v_{l30_l}^* = -v_{l3}^* + v_{h30_h}^* + v_{0_h0_l}^* \quad (2.92)$$

Portanto, para gerar uma tensão média igual a v_{gk}^* e v_{lk}^* no intervalo T , deve-se escolher $v_{g0_h}^*$ e $v_{0_h0_l}^*$ (dois graus de liberdade). Seja v_{ch} e v_{cl} as tensões escolhidas para o barramento do conversor paralelo e para o barramento do conversor série, respectivamente, então v_{hk0_h} e v_{lk0_l} podem ter dois valores representados nas equações 2.93 e 2.94.

$$v_{hk0_h} = \pm \frac{v_{ch}}{2} \quad (2.93)$$

$$v_{lk0_l} = \pm \frac{v_{cl}}{2} \quad (2.94)$$

A tensão $v_{g0_h}^*$ pode ser escolhida de tal modo que satisfaça:

$$v_{g0_hmax}^* = \frac{v_{ch}^*}{2} - \max(V_h^*) \quad (2.95)$$

$$v_{g0_hmin}^* = -\frac{v_{ch}^*}{2} - \min(V_h^*) \quad (2.96)$$

$$v_{g0_hmin}^* \leq v_{g0_h}^* \leq v_{g0_hmax}^* \quad (2.97)$$

onde $V_h^* = \{v_{g1}^*, v_{g2}^*, v_{g3}^*\}$ e v_{ch}^* é a tensão de referência no barramento do conversor paralelo.

A tensão $v_{0_h0_l}^*$ pode ser escolhida de tal modo que satisfaça:

$$v_{0_h0_lmax}^* = \frac{v_{cg}^*}{2} - \max(V_l^*) \quad (2.98)$$

$$v_{0_h0_lmin}^* = -\frac{v_{cg}^*}{2} - \min(V_l^*) \quad (2.99)$$

$$v_{0_h 0_l}^* \min \leq v_{0_h 0_l}^* \leq v_{0_h 0_l}^* \max \quad (2.100)$$

onde $V_l^* = \{v_{h10_h}^* - v_{l1}^*, v_{h20_h}^* - v_{l2}^*, v_{h30_h}^* - v_{l3}^*\}$ e v_{cl}^* é a tensão de referência no barramento do conversor série.

A escolha das variáveis auxiliares que satisfaçam os seus limites pode ser fornecida introduzindo os parâmetros μ_h ($0 \leq \mu_h \leq 1$) e μ_l ($0 \leq \mu_l \leq 1$) para as variáveis auxiliares

$$v_{g0_h}^* = \mu_h v_{g0_h}^* \max + (1 - \mu_h) v_{l0_h}^* \min \quad (2.101)$$

$$v_{0_h 0_l}^* = \mu_l v_{0_h 0_l}^* \max + (1 - \mu_l) v_{0_h 0_l}^* \min \quad (2.102)$$

Existem três casos que merecem destaque:

$$v_{g0_h}^* = v_{g0_h}^* \max, (\mu_h = 1) \quad (2.103)$$

$$v_{g0_h}^* = v_{g0_h}^* \min, (\mu_h = 0) \quad (2.104)$$

o que reduz as perdas, já que um dos braços não chaveia, e

$$v_{g0_h}^* = \frac{v_{g0_h}^* \max + v_{g0_h}^* \min}{2}, (\mu_h = 0.5) \quad (2.105)$$

que reduz as distorções harmônicas introduzidas pela alta frequência de chaveamento devido aos pulsos de tensão serem mais simétricos.

O mesmo ocorre com o conversor série.

$$v_{0_h 0_l}^* = v_{0_h 0_l}^* \max, (\mu_l = 1) \quad (2.106)$$

$$v_{0_h 0_l}^* = v_{0_h 0_l}^* \min, (\mu_l = 0) \quad (2.107)$$

$$v_{0_h 0_l}^* = \frac{v_{0_h 0_l}^* \max + v_{0_h 0_l}^* \min}{2}, (\mu_l = 0.5) \quad (2.108)$$

Os estados das chaves q_{hk} e q_{lk} podem ser obtidos comparando-se um sinal triangular dado por

$$trig_h = \pm \frac{v_{ch}}{T} t \quad (2.109)$$

$$\text{trig}_l = \pm \frac{v_{cl}}{T} t \quad (2.110)$$

com as tensões de referência v_{hk0h}^* e v_{lk0l}^* .

2.4.3 Estratégia de Controle

O diagrama de controle para a configuração 4 pode ser visto na Fig. 13. Deve-se notar que, diferentemente da configuração 3, o controlador R_C considera a soma das tensões dos barramentos ($v_{cl}^* + v_{ch}^*$) para gerar a referência da amplitude da corrente da rede (I_g^*). O controlador R_k é responsável por regular a tensão de referência (v_{gk}^*). A tensão no barramento (v_{cl}) do conversor série é controlada por meio do controlador R_s , o qual a saída é o ângulo (δ_l^*) entre a tensão de referência (v_{gk}^*) e a tensão de referência da carga (v_{lk}^*).

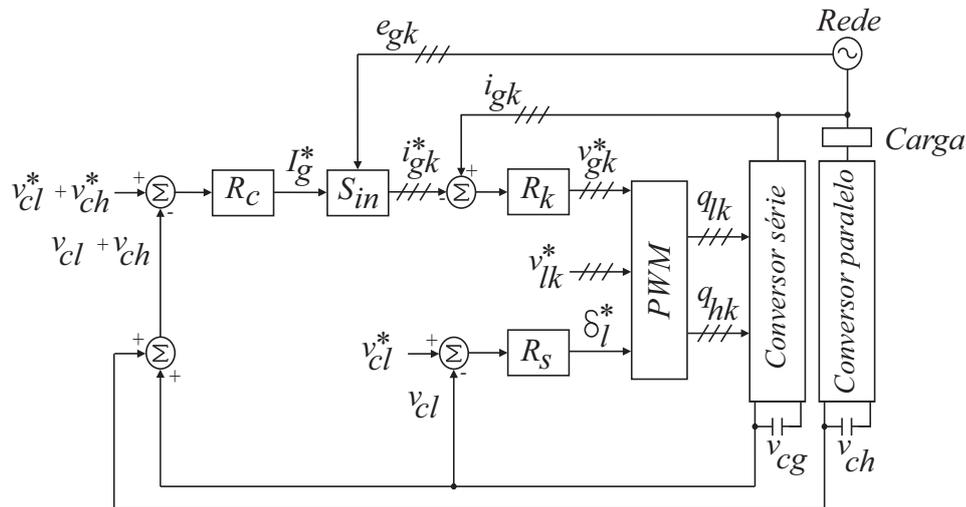


Figura 13 – Diagrama de controle do FAP universal - Configuração 4.

3 Dimensionamento do FAP universal

3.1 Configuração 1

3.1.1 Tensões

Para a configuração 1 a tensão da carga deve ser metade da tensão da rede, a fim de otimizar a tensão no barramento e implica em uma redução da corrente da rede.

$$v_l = \frac{v_g}{2} \quad (3.1)$$

$$v_c = v_l \quad (3.2)$$

A amplitude da corrente da rede é ajustada pelo controle da tensão no barramento. A tensão de pólo do conversor paralelo será ajustada diretamente pela tensão de referência da carga.

3.1.2 Especificação da tensão no barramento

A máxima tensão gerada pelo conversor pode ser calculada notando que

$$v_{lk} - v_{l\bar{k}} = v_{hk0} - v_{h\bar{k}0} \quad (3.3)$$

$$(v_{lk} - v_{gk}) - (v_{l\bar{k}} - v_{g\bar{k}}) = v_{gk0} - v_{g\bar{k}0} \quad (3.4)$$

com $\bar{k}! = k$.

Como v_{lk} e $v_{lk} - v_{gk}$ fazem parte do sistema trifásico, a amplitude de $v_{lk} - v_{l\bar{k}}$ e $(v_{lk} - v_{gk}) - (v_{l\bar{k}} - v_{g\bar{k}})$ é igual a $\sqrt{3}E$. Desde que $\max(v_{lk} - v_{l\bar{k}}) = \max((v_{lk} - v_{gk}) - (v_{l\bar{k}} - v_{g\bar{k}})) = v_c$ e $\min(v_{lk} - v_{l\bar{k}}) = \min((v_{lk} - v_{gk}) - (v_{l\bar{k}} - v_{g\bar{k}})) = -v_c$, para o conversor gerar uma tensão de amplitude E é necessária uma tensão no barramento v_c com um valor mínimo igual a $\sqrt{3}E$.

3.2 Configuração 2

3.2.1 Tensões

Para a configuração 2 a tensão na carga deve ser maior que a tensão da rede para o conversor G operar com zero de potência ativa. Considerando a carga com $v_l = 1.0pu$

para regular com $v_g = 0.8pu$ é necessário $v_{h0_h} = 1.0pu$ and $v_{g0_g} = 0.6pu$ defasado de 90° com relação a v_g . Portanto temos as equações 3.5, 3.6 e 3.7.

$$v_l = 1.25v_g \quad (3.5)$$

$$v_{cg} = 0.6v_l \quad (3.6)$$

$$v_{ch} = v_l \quad (3.7)$$

O controle da tensão total dos barramentos define a amplitude da corrente da rede I_g^* e o ângulo entre a tensão na rede e a tensão na carga é definido pelo controle da tensão no barramento do conversor série.

3.2.2 Especificação das tensões nos barramentos

A máxima tensão gerada pelo conversor série pode ser calculada observando que a equação 3.8.

$$(v_{hk0_h}^* - v_{gk}^*) - (v_{h\bar{k}0_h}^* - v_{g\bar{k}}^*) = v_{gk0_g} - v_{g\bar{k}0_g} \quad (3.8)$$

com $\bar{k}! = k$.

Como $(v_{hk0_h}^* - v_{gk}^*)$ é parte do sistema trifásico, a amplitude de $(v_{hk0_h}^* - v_{gk}^*) - (v_{h\bar{k}0_h}^* - v_{g\bar{k}}^*)$ é igual a $\sqrt{3}E_{cg}$. Since $max((v_{hk0_h}^* - v_{gk}^*) - (v_{h\bar{k}0_h}^* - v_{g\bar{k}}^*)) = v_{cg}$ e $min((v_{hk0_h}^* - v_{gk}^*) - (v_{h\bar{k}0_h}^* - v_{g\bar{k}}^*)) = -v_{cg}$, para o conversor gerar uma tensão de amplitude E_{cg} é necessária uma tensão no barramento v_{cg} como um valor mínimo de $\sqrt{3}E_{cg}$.

A tensão máxima gerada pelo conversor paralelo pode ser observada na equação 3.9.

$$v_{lk} - v_{l\bar{k}} = v_{hk0_h} - v_{h\bar{k}0_h} \quad (3.9)$$

com $\bar{k}! = k$.

Como v_{lk} é parte de um sistema trifásico, a amplitude de $v_{lk} - v_{l\bar{k}}$ será igual a $\sqrt{3}E_{ch}$. Desde que $max(v_{lk} - v_{l\bar{k}}) = v_{ch}$ e $min(v_{lk} - v_{l\bar{k}}) = -v_{ch}$, para o conversor gerar uma tensão de amplitude E_{ch} é necessário usar uma tensão de barramento v_{ch} com um valor mínimo de $\sqrt{3}E_{ch}$.

3.3 Configuração 3

3.3.1 Tensões

Para a configuração 3 a tensão da carga deve ser o dobro da tensão da rede, a fim de otimizar a tensão no barramento e implica em uma redução da corrente da rede.

$$v_l = 2v_g \quad (3.10)$$

$$v_c = v_l \quad (3.11)$$

A amplitude da corrente da rede é ajustada pelo controle da tensão no barramento. A tensão de pólo do conversor paralelo será ajustada diretamente pela tensão de referência da carga.

3.3.2 Especificação da tensão no barramento

A máxima tensão gerada pelo conversor pode ser calculada notando que

$$v_{gk} - v_{g\bar{k}} = v_{hk0} - v_{h\bar{k}0} \quad (3.12)$$

$$(v_{gk} - v_{lk}) - (v_{g\bar{k}} - v_{l\bar{k}}) = v_{lk0} - v_{l\bar{k}0} \quad (3.13)$$

com $\bar{k}! = k$.

Como v_{gk} e $v_{gk} - v_{lk}$ fazem parte do sistema trifásico, a amplitude de $v_{gk} - v_{g\bar{k}}$ e $(v_{gk} - v_{lk}) - (v_{g\bar{k}} - v_{l\bar{k}})$ é igual a $\sqrt{3}E$. Desde que $\max(v_{gk} - v_{g\bar{k}}) = \max((v_{gk} - v_{lk}) - (v_{g\bar{k}} - v_{l\bar{k}})) = v_c$ e $\min(v_{gk} - v_{g\bar{k}}) = \min((v_{gk} - v_{lk}) - (v_{g\bar{k}} - v_{l\bar{k}})) = -v_c$, para o conversor gerar uma tensão de amplitude E é necessária uma tensão no barramento v_c com um valor mínimo igual a $\sqrt{3}E$.

3.4 Configuração 4

3.4.1 Tensões

Para a configuração 4 a tensão na carga deve ser maior que a tensão da rede para o conversor L operar com zero de potência ativa. Considerando a carga com $v_l = 1.0pu$ para regular com $v_g = 0.8pu$ é necessário $v_{h0_h} = 1.0pu$ and $v_{l0_l} = 0.6pu$ defasado de 270° com relação a v_g . Portanto temos as equações 3.14, 3.15 e 3.16.

$$v_l = 1.25v_g \quad (3.14)$$

$$v_{cl} = 0.6v_l \quad (3.15)$$

$$v_{ch} = v_g \quad (3.16)$$

O controle da tensão total dos barramentos define a amplitude da corrente da rede I_g^* e o ângulo entre a tensão na rede e a tensão na carga é definido pelo controle da tensão no barramento do conversor série.

3.4.2 Especificação das tensões nos barramentos

A máxima tensão gerada pelo conversor série pode ser calculada observando que a equação 3.17.

$$(v_{hk0_h}^* - v_{lk}^*) - (v_{h\bar{k}0_h}^* - v_{l\bar{k}}^*) = v_{lk0_l} - v_{l\bar{k}0_l} \quad (3.17)$$

com $\bar{k}! = k$.

Como $(v_{hk0_h}^* - v_{lk}^*)$ é parte do sistema trifásico, a amplitude de $(v_{hk0_h}^* - v_{lk}^*) - (v_{h\bar{k}0_h}^* - v_{l\bar{k}}^*)$ é igual a $\sqrt{3}E_{cl}$. Since $\max((v_{hk0_h}^* - v_{lk}^*) - (v_{h\bar{k}0_h}^* - v_{l\bar{k}}^*)) = v_{cl}$ e $\min((v_{hk0_h}^* - v_{lk}^*) - (v_{h\bar{k}0_h}^* - v_{l\bar{k}}^*)) = -v_{cl}$, para o conversor gerar uma tensão de amplitude E_{cl} é necessária uma tensão no barramento v_{cl} como um valor mínimo de $\sqrt{3}E_{cl}$.

A tensão máxima gerada pelo conversor paralelo pode ser observada na equação 3.18.

$$v_{gk} - v_{g\bar{k}} = v_{hk0_h} - v_{h\bar{k}0_h} \quad (3.18)$$

com $\bar{k}! = k$.

Como v_{gk} é parte de um sistema trifásico, a amplitude de $v_{gk} - v_{g\bar{k}}$ será igual a $\sqrt{3}E_{ch}$. Desde que $\max(v_{gk} - v_{g\bar{k}}) = v_{ch}$ e $\min(v_{gk} - v_{g\bar{k}}) = -v_{ch}$, para o conversor gerar uma tensão de amplitude E_{ch} é necessário usar uma tensão de barramento v_{ch} com um valor mínimo de $\sqrt{3}E_{ch}$.

4 Resultados dos sistemas

4.1 Introdução

Os seguintes resultados foram obtidos através de resultados de simulação e experimentais. O comportamento das configurações 1, 2, 3 e 4 do filtro ativo de potência universal sem o isolamento do transformador para controlar a tensão da carga e a corrente da redeseção apresentados. Os resultados aqui foram obtidos através de simulação para todas as configurações e experimental para a configuração 1.

As simulações foram feitas com a utilização do *softwares* Matlab e DEV-Cpp e na realização da montagem um processador de sinal digital (DSP) foi utilizado.

4.2 Resultados da Simulação

4.2.1 Configuração 1

Na Tabela 1 encontram-se os parâmetros da simulação em *p.u.* para a configuração 1.

Tabela 1 – Parâmetros de simulação em *p.u.*.

e_g	v_l	r_g	x_g	f_{pl}	f_{PWM}	μ
1.0	0.5	0.01	0.1	0.8	10 (KHz)	0.5

Os resultados da simulação para a configuração 1 podem ser vistos nas Figs. 14, 15, 16 e 17 no Anexo ???. Na Fig. 14 pode-se notar que a tensão da rede primária está em fase com a corrente correspondente, ou seja, a rede primária está fornecendo energia com fator de potência unitário. A partir da Fig. 15 observam-se as correntes do sistema para a fase 1 (i_{g1} , i_{h1} e i_{l1}), nota-se que a corrente i_{l1} está atrasada em relação a corrente i_{g1} , em outras palavras, o filtro ativo universal adiantou a corrente original que antes era igual a i_{l1} , fornecendo a potência reativa necessária. Na Fig. 16 tem-se a tensão na carga (v_{l1}^*). Na Fig. 17 tem-se a tensão controlada do barramento e sua referência, analisando os gráficos, conclui-se que o controle foi realizado corretamente. Os resultados para as demais fases são semelhantes.

4.2.2 Configuração 2

Na Tabela 2 encontram-se os parâmetros da simulação em *p.u.* para a configuração 2.

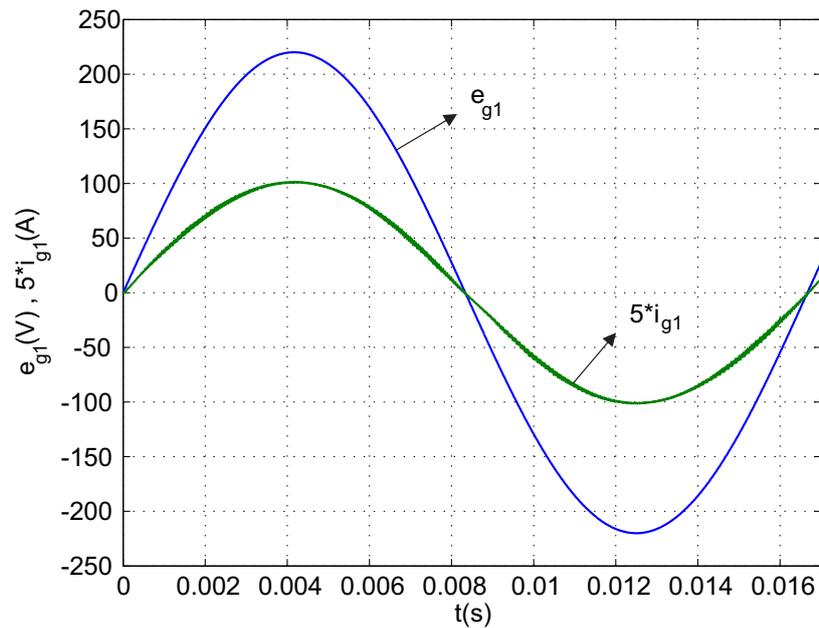


Figura 14 – Tensão (e_{g1}) e corrente (i_{g1}) na rede.

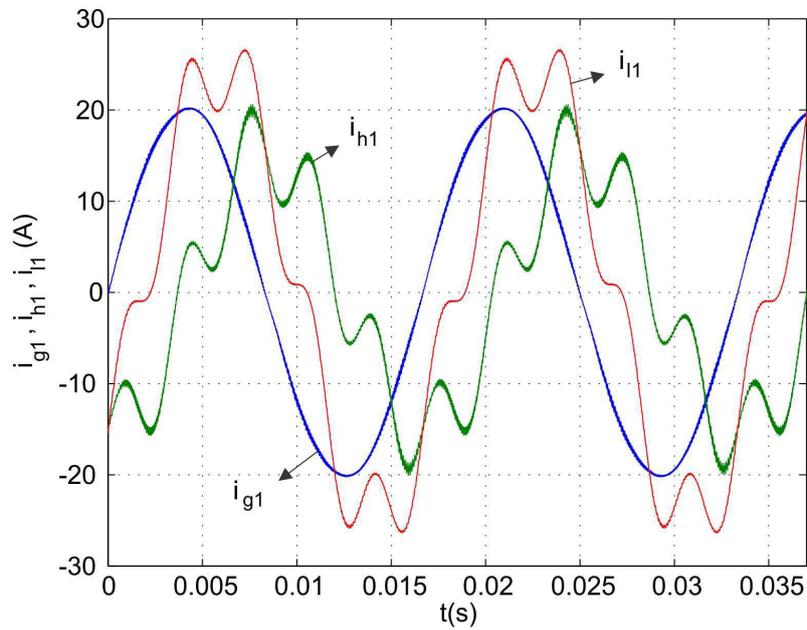


Figura 15 – Correntes do sistema (i_{g1} , i_{h1} e i_{l1}).

Os resultados da simulação para a configuração 2 podem ser vistos nas Figs. 18, 19, 20, 21, 22 e 23 no Anexo ???. Na Fig. 18 pode-se notar que a tensão da rede primária está em fase com a corrente correspondente, ou seja, a rede primária está fornecendo energia com fator de potência unitário. A partir da Fig. 19 observam-se as correntes do sistema para a fase 1 (i_{g1} , i_{h1} e i_{l1}), nota-se que a corrente i_{l1} está atrasada em relação a corrente i_{g1} , em outras palavras, o filtro ativo universal adiantou a corrente original que antes

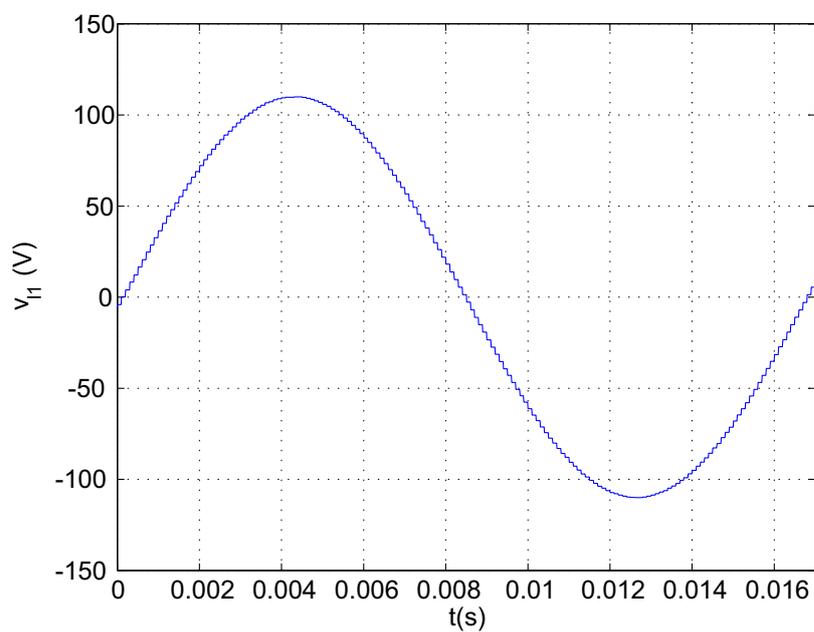


Figura 16 – Tensão na carga (v_{l1}).

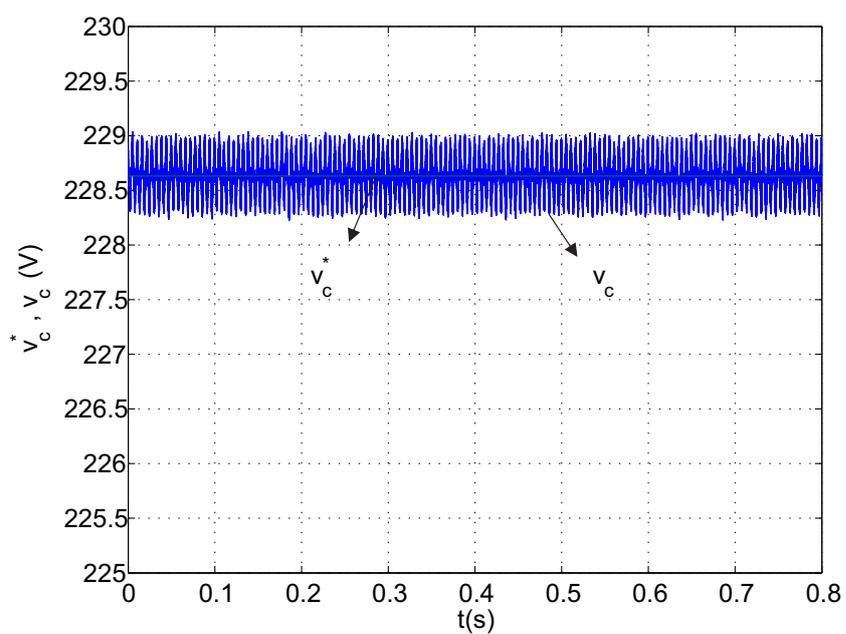
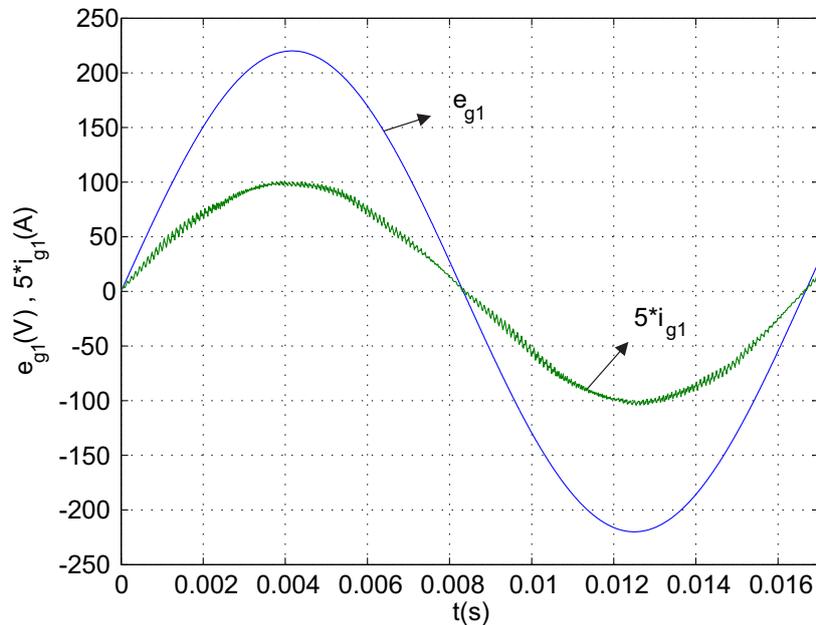


Figura 17 – Tensão no capacitor e tensão de referência no barramento CC.

Tabela 2 – Parâmetros de simulação em *p.u.*.

e_g	v_l	r_g	x_g	f_{pl}	f_{PWM}	μ_h	μ_g
1.0	1.25	0.01	0.1	0.8	10 (KHz)	0.5	0.5

era igual a i_{l1} , fornecendo a potência reativa necessária. Na Fig. 20 tem-se a tensão na carga (v_{l1}^*). Nas Figs. 21 e 22 obteve-se resultados semelhantes para a tensão do capacitor no barramento CC (para o conversor série) e a tensão do capacitor no barramento CC (para o conversor shunt), respectivamente, analisando os gráficos, vê-se que o controle foi realizado corretamente. Na Fig. 23 tem-se o ângulo (δ_l^*) entre a tensão da rede (v_{g1}^*) e a tensão da carga (v_{l1}^*). Os resultados para as demais fases são semelhantes.

Figura 18 – Tensão (e_{g1}) e corrente (i_{g1}) na rede.

4.2.3 Configuração 3

Na Tabela 3 encontram-se os parâmetros da simulação em *p.u.* para a configuração 3.

Tabela 3 – Parâmetros de simulação em *p.u.*.

e_g	v_l	r_g	x_g	f_{pl}	f_{PWM}	μ
1.0	2.0	0.01	0.1	0.8	10 (KHz)	0.5

Os resultados da simulação para a configuração 3 podem ser vistos nas Figs. 24, 25, 26 e 27 no Anexo ???. Na Fig. 24 pode-se notar que a tensão da rede primária está

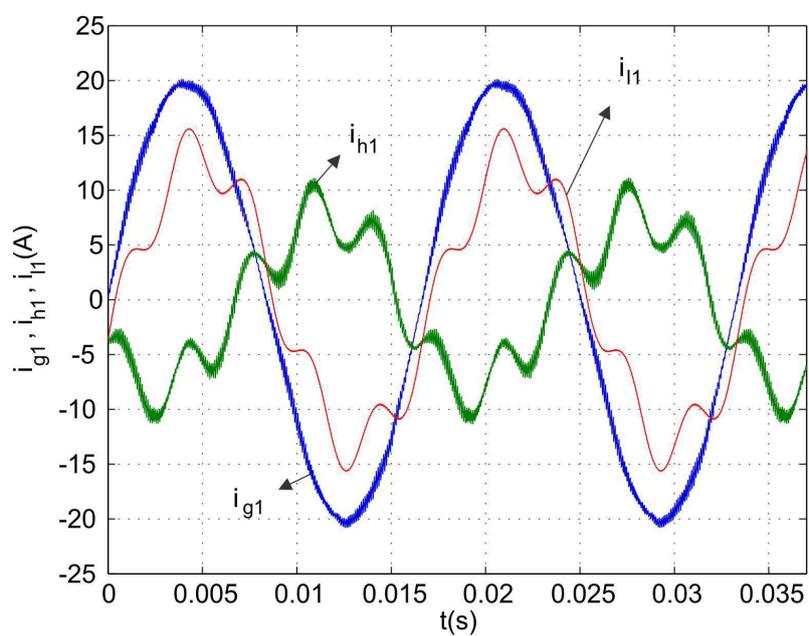


Figura 19 – Correntes do sistema (i_{g1} , i_{h1} e i_{l1}).

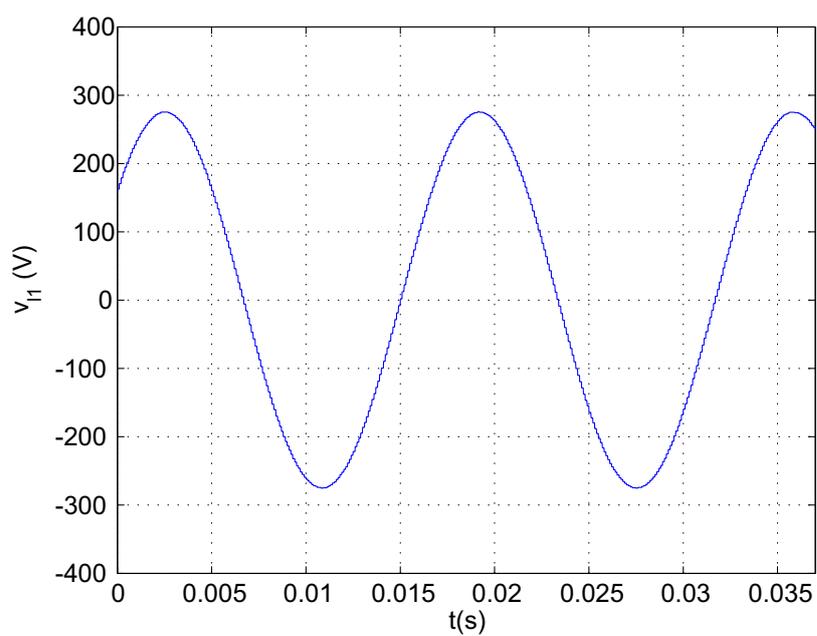
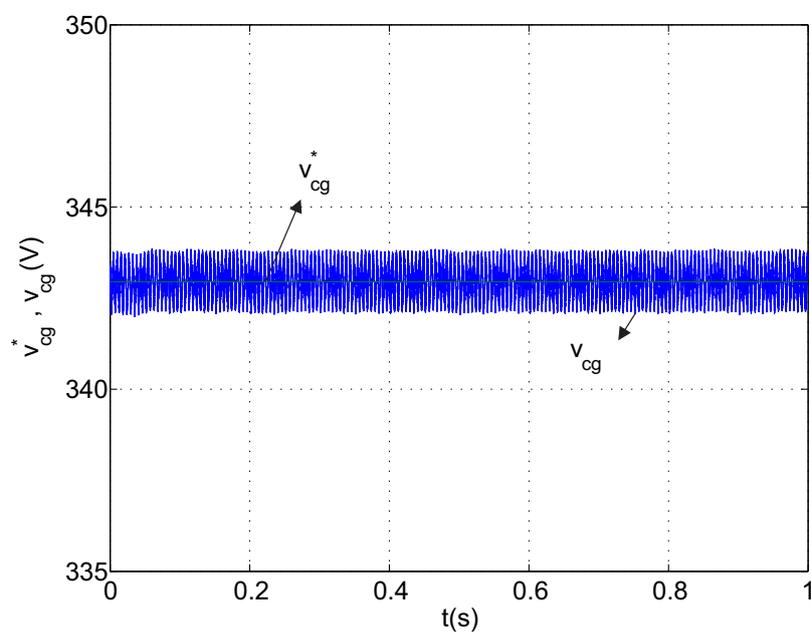
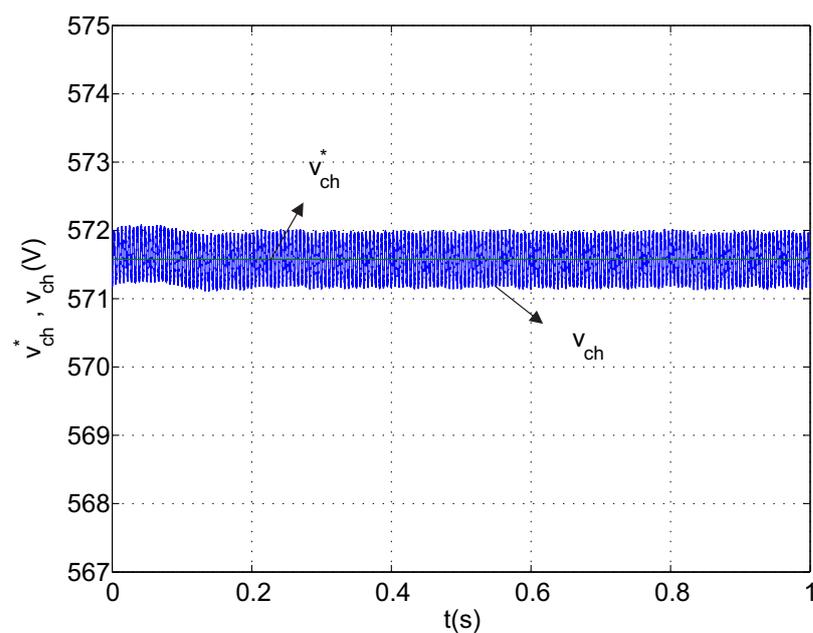


Figura 20 – Tensão na carga (v_{l1}).

Figura 21 – Tensão no barramento CC do conversor série e sua referência (v_{cg}^*).Figura 22 – Tensão no barramento CC do conversor paralelo e sua referência (v_{ch}^*).

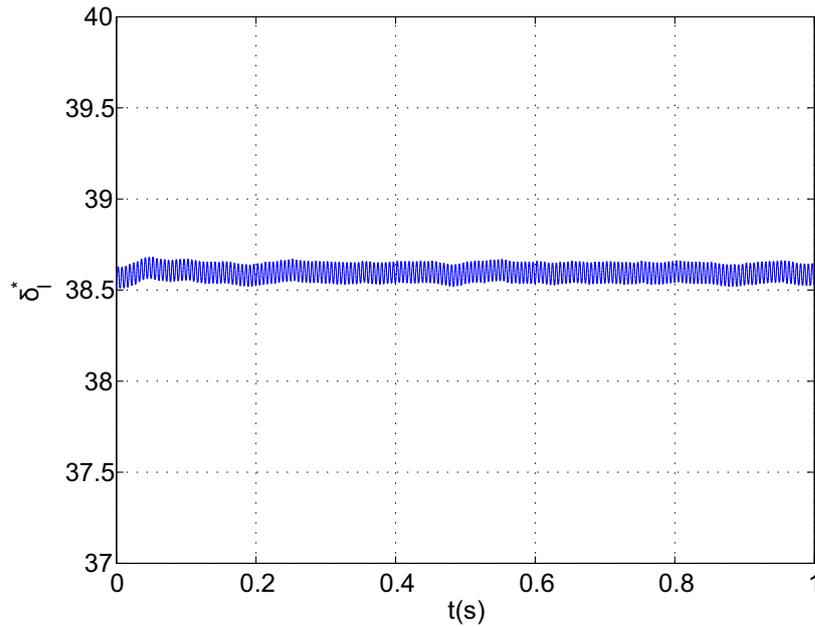


Figura 23 – Ângulo (δ_l^*) entre a tensão de referência (v_{g1}^*) e a tensão de referência da carga (v_{l1}^*).

em fase com a corrente correspondente, ou seja, a rede primária está fornecendo energia com fator de potência unitário. A partir da Fig. 25 observam-se as correntes do sistema para a fase 1 (i_{g1} , i_{h1} e i_{l1}), pode-se ver que a corrente i_{l1} está atrasada em relação a corrente i_{g1} , em outras palavras, o filtro ativo universal adiantou a corrente original que antes era igual a i_{l1} , fornecendo a potência reativa necessária. Na Fig. 26 tem-se a tensão na carga (v_{l1}^*). Na Fig. 27 pode-se ver a tensão controlada do barramento e sua referência, analisando os gráficos, vê-se que o controle foi realizado corretamente. Os resultados para as demais fases são semelhantes.

4.2.4 Configuração 4

Na Tabela 4 encontram-se os parâmetros da simulação em *p.u.* para a configuração 4.

Tabela 4 – Parâmetros de simulação em *p.u.*.

e_g	v_l	r_g	x_g	f_{pl}	f_{PWM}	μ_h	μ_l
1.0	1.25	0.01	0.1	0.8	10 (KHz)	0.5	0.5

Os resultados da simulação para a configuração 4 podem ser vistos nas Figs. 28, 29, 30, 31, 32 e 33 no Anexo ???. Na Fig. 28 pode-se notar que a tensão da rede primária está em fase com a corrente correspondente, ou seja, a rede primária está fornecendo energia com fator de potência unitário. A partir da Fig. 29 observam-se as correntes do sistema para a fase 1 (i_{g1} , i_{h1} e i_{l1}), pode-se ver que a corrente i_{l1} está atrasada em

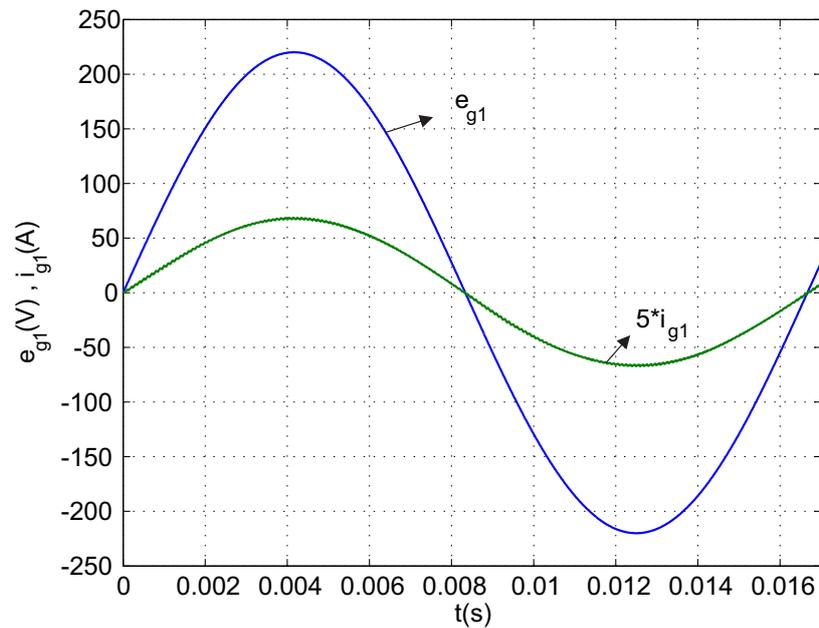


Figura 24 – Tensão (e_{g1}) e corrente (i_{g1}) na rede.

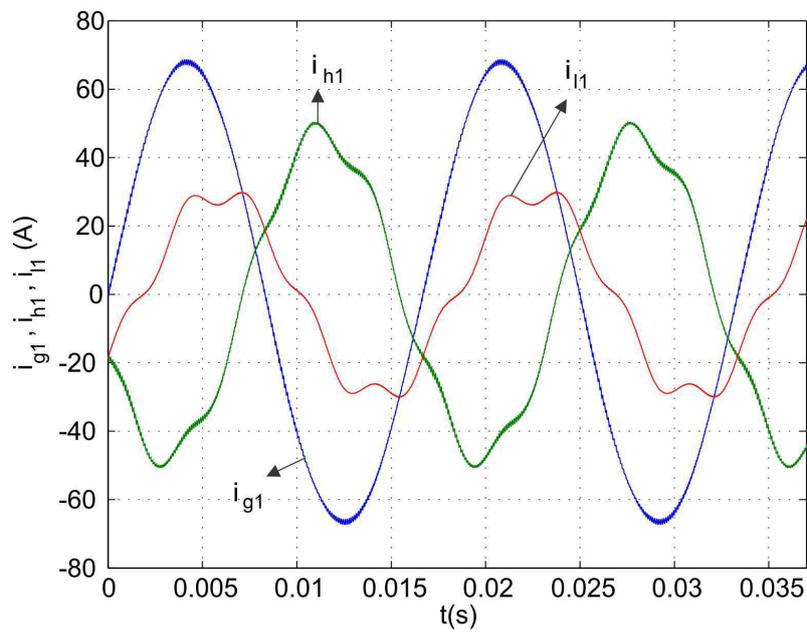


Figura 25 – Correntes do sistema (i_{g1} , i_{h1} e i_{l1}).

relação a corrente i_{g1} , em outras palavras, o filtro ativo universal adiantou a corrente original que antes era igual a i_{l1} , fornecendo a potência reativa necessária. Na Fig. 30 tem-se a tensão na carga (v_{l1}^*). Nas Figs. 31 e 32 obteve-se resultados semelhantes para a tensão do capacitor no barramento CC (para o conversor série) e a tensão do capacitor no barramento CC (para o conversor shunt), respectivamente, analisando os gráficos, vê-se que o controle foi realizado corretamente. Na Fig. 33 tem-se o ângulo (δ_l^*) entre a tensão

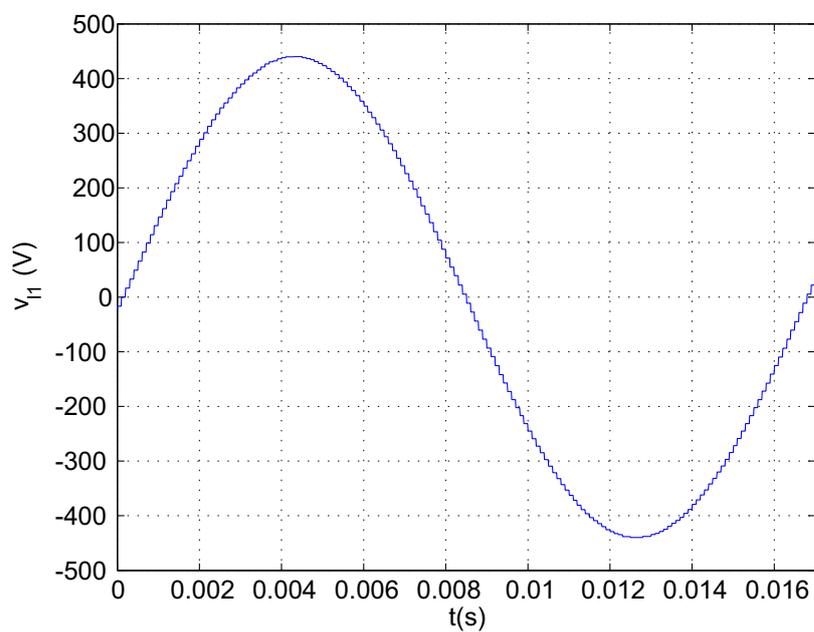


Figura 26 – Tensão na carga (v_{l1}).

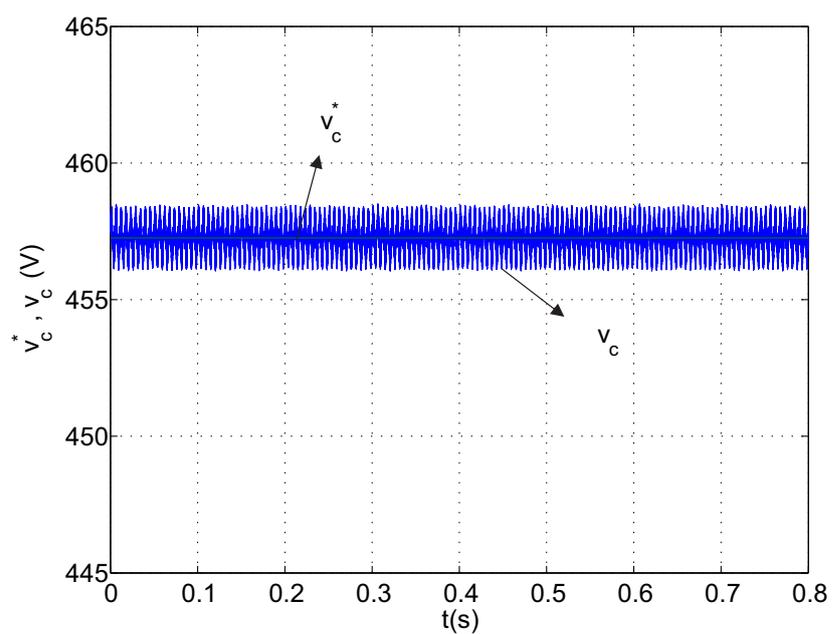


Figura 27 – Tensão no capacitor e tensão de referência no barramento CC.

da rede (v_{g1}^*) e a tensão da carga (v_{l1}^*). Os resultados para as demais fases são semelhantes.

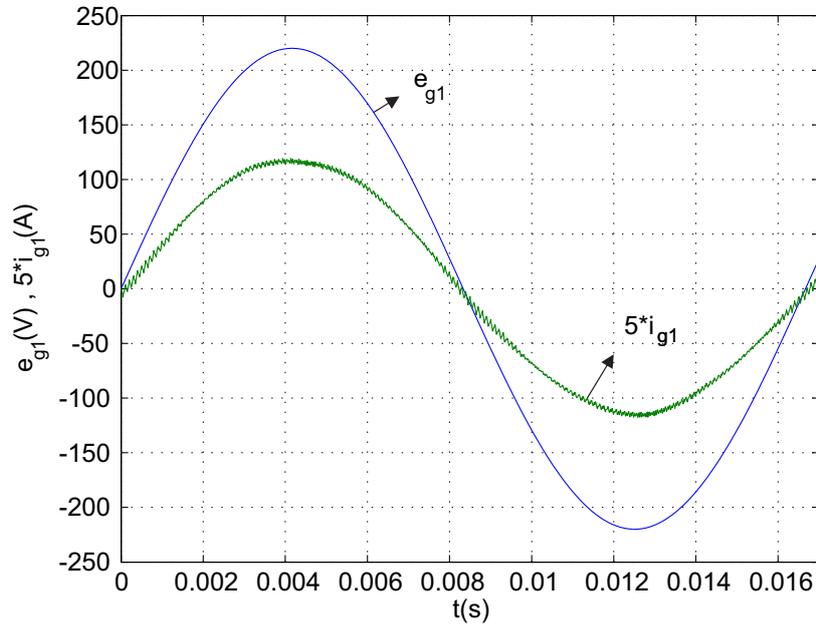


Figura 28 – Tensão (e_{g1}) e corrente (i_{g1}) na rede.

4.3 Resultados Experimentais

4.3.1 Configuração 1

Os resultados experimentais para a configuração 1 podem ser vistos nas Figs. 34 e 35 no Anexo ???. Na Fig. 34, pode-se ver que as tensões da rede primária estão em fase com as respectivas correntes, fazendo com o que o sistema opere com fator de potência perto de um, no lado da rede. Na Fig. 35 tem-se a tensão do capacitor no barramento CC (V_C) seguindo o seu valor de referência ($V_C^* = 100V$). Estes resultados mostram que o sistema funcionou de maneira satisfatória. Os resultados para as demais fases são semelhantes.

4.4 Distorção Harmônica Total

A taxa de distorção harmônica total (THD) é definida como sendo:

$$THD = \frac{1}{I_{rms1}} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{rms h}^2} \quad (4.1)$$

Este índice reflete o nível de componentes harmônicos com relação a componente fundamental. Para que haja um bom funcionamento do sistema elétrico é necessário que este índice tenha valores baixos.

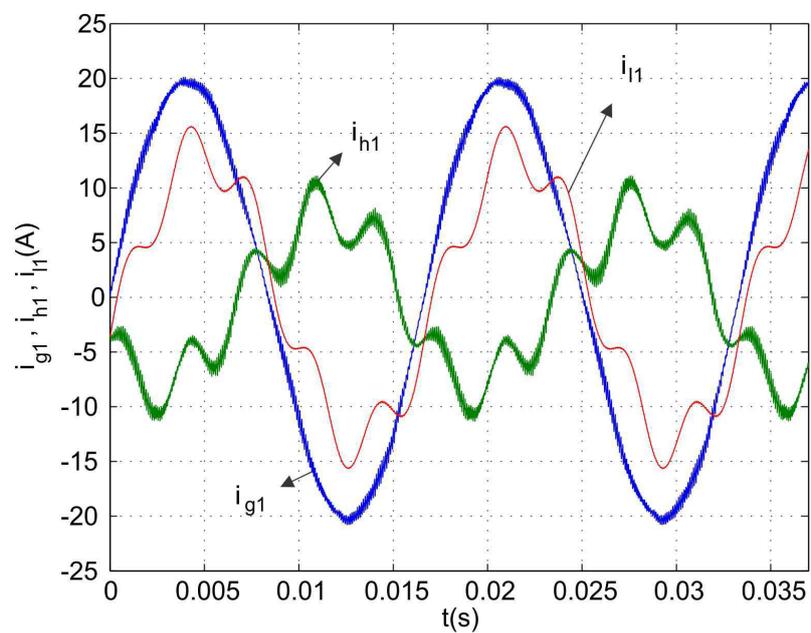


Figura 29 – Correntes do sistema (i_{g1} , i_{h1} e i_{l1}).

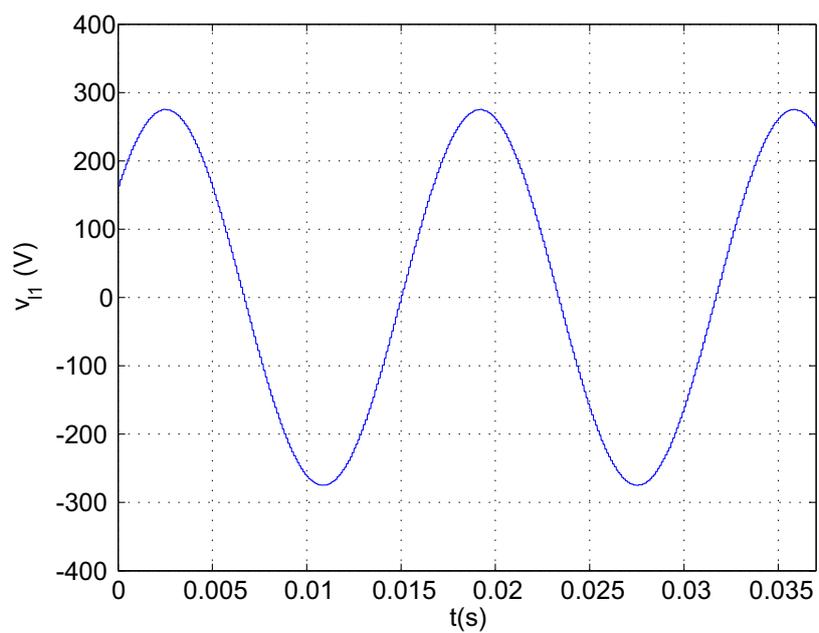
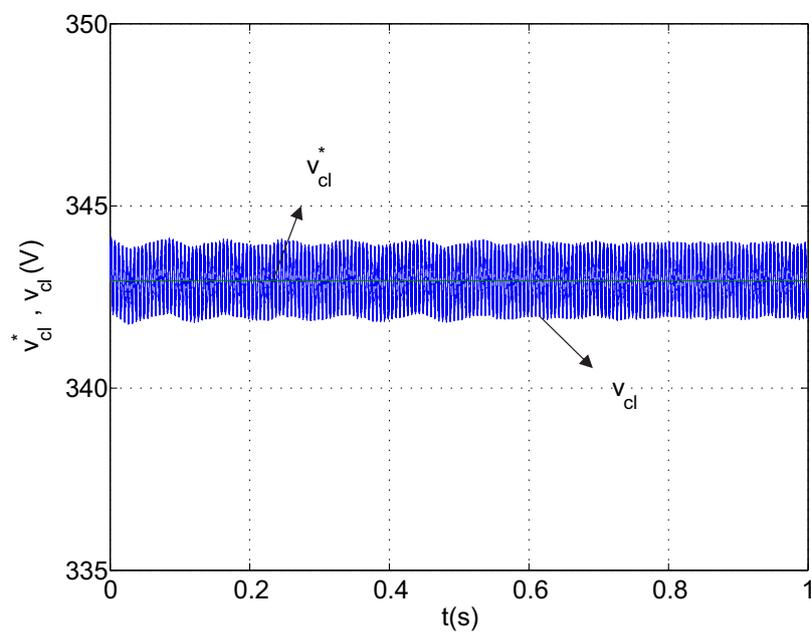
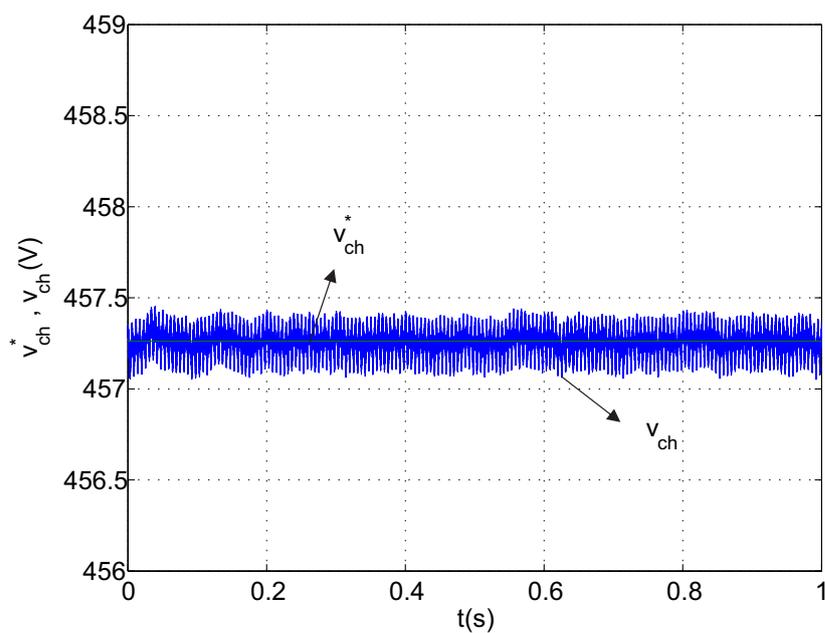


Figura 30 – Tensão na carga (v_{l1}).

Figura 31 – Tensão no barramento CC do conversor série e sua referência (v_{cl}^*).Figura 32 – Tensão no barramento CC do conversor paralelo e sua referência (v_{ch}^*).

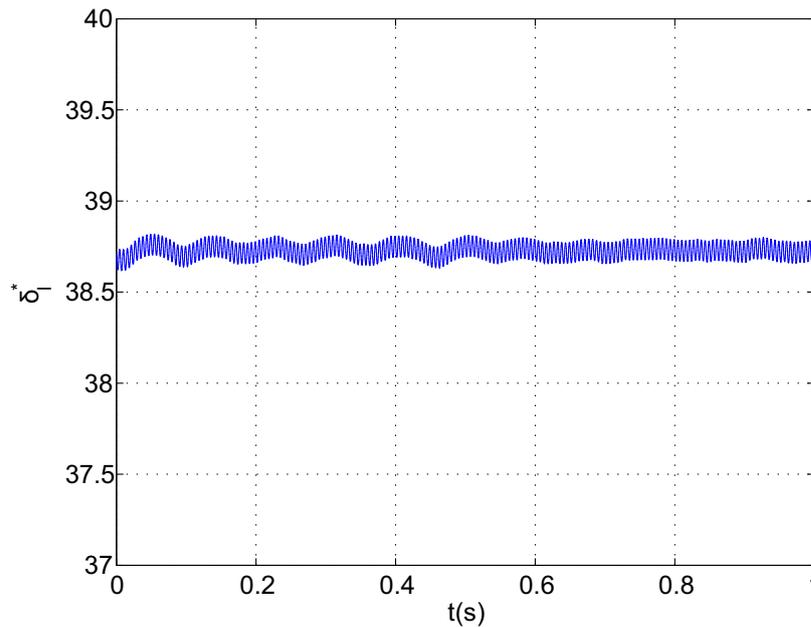


Figura 33 – Ângulo (δ_l^*) entre a tensão de referência (v_{g1}^*) e a tensão de referência da carga (v_{l1}^*).

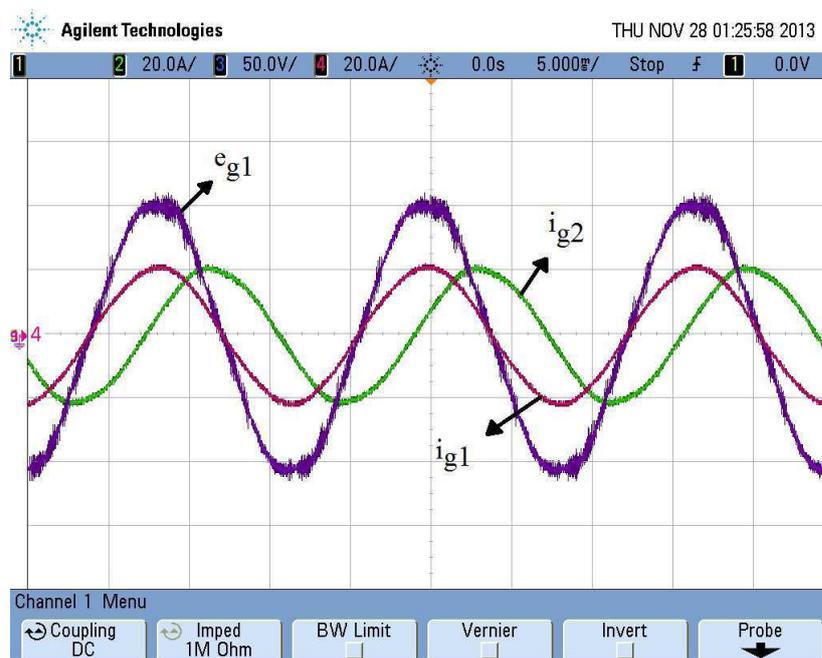


Figura 34 – Tensão na rede (e_{g1}) e correntes (i_{g1} e i_{g2}).

A Tabela 5 mostra os valores de THD das correntes i_{g1} , i_{g2} e i_{g3} para as configurações 1, 2, 3 e 4. Pode-se perceber que a distorção harmônica total para as configurações 2 e 4 apresentaram-se maiores que as configurações 1 e 3, isto devido ao fato de que o ângulo δ_l^* (proveniente do controle do conversor em série das configurações 2 e 4) sofre pequenas variações, interferindo assim na onda senoidal da tensão da carga (v_l^*).

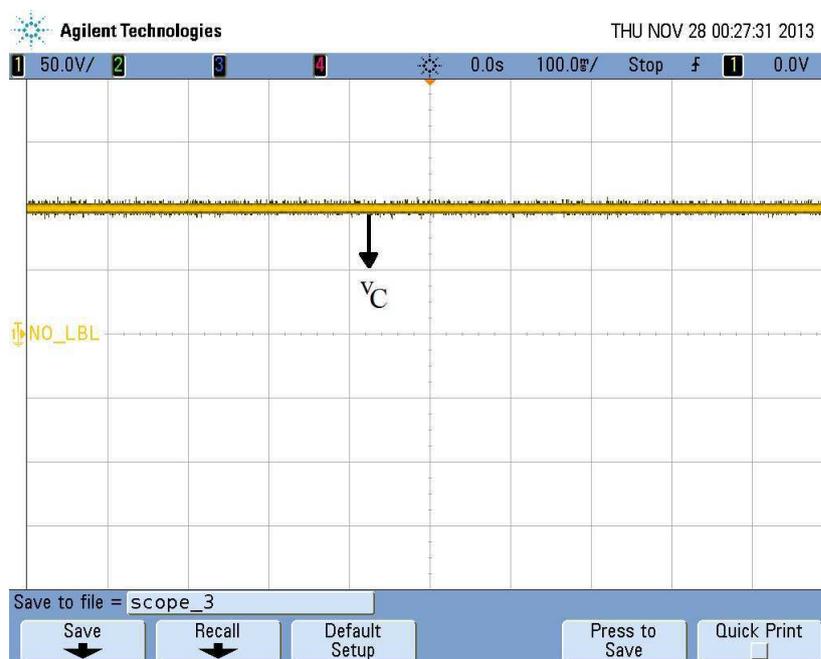


Figura 35 – Tensão no barramento CC (v_c).

Tabela 5 – Distorção harmônica total.

Correntes	THD - config. 1	THD - config. 2	THD - config. 3	THD - config. 4
i_{g1}	1.51%	4.59%	1.36%	3.39%
i_{g2}	1.49%	4.59%	1.36%	3.38%
i_{g3}	1.51%	4.61%	1.51%	3.38%

5 Conclusões

Neste trabalho foram desenvolvidas estruturas de compensação estática para sistemas trifásicos, devido à necessidade de corrigir problemas no sistema elétrico, causados pelo emprego de cargas não-lineares, chaveamentos, entre outros.

O filtro ativo universal é formado pela junção do filtro paralelo e pelo filtro série, atuando tanto na tensão quanto na corrente do sistema. Este trabalho abordou o estudo de quatro configurações de filtros ativos universais, estrutura importante na eletrônica de potência, para corrigir problemas de qualidade de energia.

As quatro estruturas desenvolvidas consistiam de um filtro ativo de potência universal sem a utilização dos transformadores de isolamento. A primeira das estruturas utiliza conversores série e paralelo compartilhando o mesmo barramento e sendo aplicado no caso em que a rede é considerada sendo isolada. A segunda estrutura, também para o caso em que a rede é considerada sendo isolada, o filtro possui dois barramentos, um para cada conversor. A terceira e quarta estruturas possui a mesma configuração que a primeira e a segunda estruturas, respectivamente, diferenciando no fato de que o filtro é aplicado diretamente a carga.

Para cada uma das estruturas estudadas, foram desenvolvidos os modelos do sistema, a estratégia de PWM, bem como o sistema de controle. As simulações foram realizadas com os *softwares* MatLab e DEV-Cpp e a montagem foi realizada utilizando DSP.

As configurações 1 e 3 mostram-se mais eficientes no que diz respeito à distorção harmônica das correntes. Por outro lado, usando a configuração 2 e 4 pode-se operar com uma tensão mais elevada na carga.

Como continuidade no estudo, serão realizadas as montagens experimentais para as configurações 2, 3 e 4 além de realizar uma análise de WTHD e de perdas nos conversores de todas as configurações.

Referências

- 1 PENG, F. Z.; SU, G. J.; FARQUHARSON, G. A. A series lc filter for harmonic compensation of ac drives. *Proc. of the IEEE Power Electr. Specia. Conf. - PESC'99*, IEEE, 1999. Citado na página 1.
- 2 POMILIO, J. A.; DECKMANN, S. M. *Caracterização e compensação de harmônicos e reativos de cargas não-lineares residenciais e comerciais*. v. 11, n1, p. 9-16. [S.l.: s.n.], março 2006. Citado na página 1.
- 3 DAS, J. Passive filters-potentialities and limitations. In: IEEE. *Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2003. Conference Record of the 2003 Annual*. [S.l.], 2003. p. 187–197. Citado na página 1.
- 4 SINGH, B.; AL-HADDAD, K.; CHANDRA, A. A review of active filters for power quality improvement. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 46, n. 5, p. 960–971, 1999. Citado na página 1.
- 5 SASAKI, H.; MACHIDA, T. A new method to eliminate ac harmonic currents by magnetic flux compensation - considerations on basic design. *IEEE transactions Power app. Syst.* Citado na página 1.
- 6 GYUGYI, L.; STRYCUDA, E. C. Active ac power filters. *IEEE Industrial applications Society Annual Meeting.*, IEEE, 1976. Citado na página 1.
- 7 MOHAN, N. et al. Active filters for ac harmonic suppression. *IEEE/PES Winter Meeting, A77026-8.*, IEEE, 1977. Citado na página 1.
- 8 SANTOS, E. Cipriano dos et al. Single-phase to three-phase universal active power filter. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 26, n. 3, p. 1361–1371, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- 9 FUKUDA, S.; YODA, T. A novel current-tracking method for active filters based on a sinusoidal internal model. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 37, n. 3, p. 888–895, 2001. Citado na página 1.
- 10 TIAN, J.; CHEN, Q.; XIE, B. Series hybrid active power filter based on controllable harmonic impedance. *Power Electronics, IET*, IET, v. 5, n. 1, p. 142–148, 2012. Citado na página 1.
- 11 KOMURCUGIL, H.; KUKRER, O. A new control strategy for single-phase shunt active power filters using a lyapunov function. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 53, n. 1, p. 305–312, 2006. Citado na página 1.
- 12 RIBEIRO, R. L. de A.; AZEVEDO, C. C. de; SOUSA, R. M. de. A robust adaptive control strategy of active power filters for power-factor correction, harmonic compensation, and balancing of nonlinear loads. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 27, n. 2, p. 718–730, 2012. Citado na página 1.

- 13 JAIN, S.; AGARWAL, V. A single-stage grid connected inverter topology for solar PV systems with maximum power point tracking. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 22, n. 5, p. 1928–1940, 2007. Citado na página 1.
- 14 BORISOV, K.; GINN, H. L.; TRZYNADLOWSKI, A. M. Attenuation of electromagnetic interference in a shunt active power filter. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 22, n. 5, p. 1912–1918, 2007. Citado na página 1.
- 15 JACOBINA, C. et al. Three-phase series active power filter without dc voltage source. In: IEEE. *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE*. [S.l.], 2008. p. 880–884. Citado na página 1.
- 16 LAMICH, M. et al. Control of a three phase four wires shunt hybrid filter. In: IEEE. *Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on*. [S.l.], 2008. p. 2247–2252. Citado na página 1.
- 17 BENTO, A. A.; SILVA, E. R. da; PRAGA, P. Integrated one-cycle control for three-leg universal active power filter. In: IEEE. *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE*. [S.l.], 2008. p. 3974–3980. Citado na página 2.
- 18 SANTOS, W. et al. New configurations of single-phase universal active power filters with reduced number of electric power switches. In: IEEE. *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE*. [S.l.], 2012. p. 1032–1039. Citado na página 2.
- 19 BHATTACHARYA, S.; TESHNIZI, H. M.; PARKHIDEH, B. An universal active power filter controller system. In: IEEE. *Industry Applications Society Annual Meeting, 2009. IAS 2009. IEEE*. [S.l.], 2009. p. 1–8. Citado na página 2.
- 20 JACOBINA, C. B. et al. Digital scalar pulse-width modulation: a simple approach to introduce nonsinusoidal modulating waveforms. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 16, n. 3, p. 351–359, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 10.
- 21 BLASKO, V. Analysis of a hybrid pwm based on modified space-vector and triangle-comparison methods. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 33, n. 3, p. 756–764, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 10.

Apêndices

APÊNDICE A – Detalhes do ângulo δ_l^*

De acordo com a Fig. 36, fazendo uma análise mais detalhada com relação ao ângulo (δ_l^*) entre a tensão de referência (v_{gk}) e a tensão de referência da carga (v_{lk}), percebe-se que quando este ângulo tem uma variação para mais, a tensão de pólo (v_{gk0g}) cresce, necessitando de uma maior tensão no barramento do conversor série (Fig. 37). Quando este ângulo tem uma variação para menos, a tensão de pólo (v_{gk0g}) diminui, necessitando de uma menor tensão no barramento do conversor série (Fig. 38). Com isso, a tensão no barramento do conversor série pode ser controlada por meio de um controlador, o qual a saída seja o ângulo (δ_l^*).

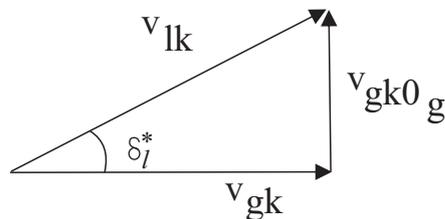


Figura 36 – Variação do ângulo entre a tensão v_{gk} e a tensão da carga v_{lk} .

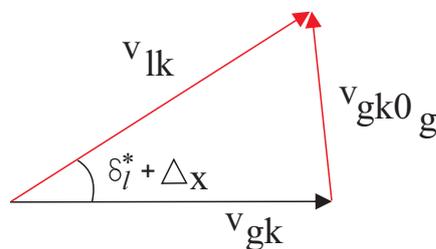


Figura 37 – Variação do ângulo entre a tensão v_{gk} e a tensão da carga v_{lk} .

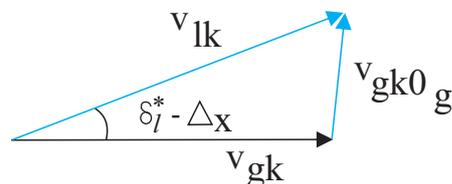


Figura 38 – Variação do ângulo entre a tensão v_{gk} e a tensão da carga v_{lk} .