

Marcelo Hahn Durgante

**Controle de Corrente em Conversores  
Conectados à Rede Elétrica Utilizando  
Controladores Multimalha**

**Alegrete, RS**

**20 de Abril de 2014**



Marcelo Hahn Durgante

**Controle de Corrente em Conversores  
Conectados à Rede Elétrica Utilizando Controladores  
Multimalha**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Controle de Sistemas, da Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Universidade Federal do Pampa – Unipampa

Curso de Engenharia Elétrica

Programa de Pós-Graduação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Stefanello

Alegrete, RS

20 de Abril de 2014

---

D959c      Durgante, Marcelo Hahn  
                Controle de Corrente em Conversores Conectados à Rede Elétrica  
                Utilizando Controladores Multimalha / Marcelo Hahn Durgante.  
                42 p.

                Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pampa,  
                MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 2014.

                “Orientação: Prof. Dr. Márcio Stefanello”.

                1. Controle Adaptativo. 2. Controle Multimalha. 3. Rejeição de  
                Distúrbio. 4. Incerteza Paramétrica. I. Título

---

Marcelo Hahn Durgante

## **Controle de Corrente em Conversores Conectados à Rede Elétrica Utilizando Controladores Multimalha**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Controle de Sistemas, da Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Trabalho aprovado. Alegrete, RS, 30 de agosto de 2013:

---

**Prof. Dr. Márcio Stefanello**  
Orientador

---

**Dr. Humberto Pinheiro**  
UFSM

---

**Dr. Rodrigo Padilha Viana**  
Unipampa

Alegrete, RS  
20 de Abril de 2014



# Agradecimentos





# Resumo

O controle de conversores tem sido muito explorado devido às inúmeras aplicações que possui, dentre as quais está a geração de correntes que serão injetadas na rede. A conexão de conversores na rede elétrica, no entanto, apresenta diversos desafios, como a existência de incerteza paramétrica na planta, e distúrbios advindos da rede. Além disso, inerentemente ao seu funcionamento, inversores de tensão geram harmônicas de comutação que precisam ser compensadas. A tendência atual das estratégias de controle é o relaxamento da exigência clássica de conhecimento completo da planta a ser controlada, buscando robustez com relação às incertezas paramétricas. Este trabalho apresenta uma estratégia de controle capaz de rejeitar distúrbios e apresentar bom desempenho frente a incertezas, utilizando técnicas de Controle Multi-Malhas e Controle Adaptativo. São apresentados resultados de simulação, e resultados experimentais que demonstram o funcionamento do sistema.

**Palavras-chave:** controle multi-malha. controle adaptativo. conexão de conversores na rede. rejeição de distúrbios. incerteza paramétrica.



# Abstract

Converter control is being very exploited due to the numerous applications it has, among which is the generation of currents for grid injection. The connection of converters to the grid, however, presents several challenges such as parametric uncertainty associated to the plant and disturbances coming from the grid. Furthermore, inverters generate switching harmonics that need to be compensated. The tendency in control strategies is the relaxation of the classical requirement of complete knowledge of the plant, seeking robustness with respect to parametric uncertainties. This work presents a control strategy capable of disturbance rejection and good performance in relation to uncertainties, using Multi-Loop and Adaptive control techniques. Simulation results are presented, and experimental results demonstrate system operation.

**Key-words:** multiloop control. adaptive control. converter grid connection. disturbance rejection. parametric uncertainty.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Topologia do filtro LCL. . . . .	25
Figura 2 – Comparação entre filtro L e filtro LCL. . . . .	26
Figura 3 – Diferença entre filtros LCL e LCL com amortecimento passivo. . . . .	27
Figura 4 – Estrutura geral de Controle Multimalha. . . . .	28
Figura 5 – Lugar das raízes para a tensão do capacitor. . . . .	29
Figura 6 – Lugar das raízes para a corrente do capacitor. . . . .	29



## Lista de tabelas





# Lista de abreviaturas e siglas

THD	Distorção Harmônica Total (do inglês <i>Total Harmonic Distortion</i> )
FAP	Filtro Ativo de Potência
DSP	Processador Digital de Sinal (do inglês <i>Digital Signal Processor</i> )
LCL	Filtro composto por dois indutores e um capacitor
PI	Proporcional-Integral
PLL	Malha de Captura de Fase



# Lista de símbolos

$\Gamma$	Letra grega Gama
$\Lambda$	Lambda
$\zeta$	Letra grega minúscula zeta
$\in$	Pertence



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>21</b>
1.1	Considerações sobre <i>LCL</i>	24
1.1.1	Corrente e Tensão do Capacitor	27
1.2	Objetivos e Contribuições da Dissertação	29
1.3	Organização do Documento	30
<b>2</b>	<b>IMC</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>Resultados</b>	<b>33</b>
	<b>Conclusão</b>	<b>35</b>
	<b>Referências</b>	<b>37</b>
	<b>Anexos</b>	<b>41</b>



# 1 Introdução

A tensão fornecida pelo sistema elétrico de potência é idealmente senoidal e balanceada, com correntes de linha senoidais, amplitude e frequência fixas e fator de potência unitário. Durante a operação real do sistema, no entanto, é difícil manter as condições ideais. As divergências do padrão são classificadas como problemas de qualidade de energia e, por se tratarem de problemas, devem ser corrigidas.

Problemas de qualidade de energia ocorrem com mais frequência e intensidade em ambientes industriais, devido ao tipo de carga instalada. Transformadores, fornos a arco, conversores tiristorizados e cargas semelhantes drenam correntes harmônicas e causam variações bruscas de energia reativa. É crescente a utilização de dispositivos eletrônicos de potência em equipamentos eletroeletrônicos, atualmente tão comuns em residências. Tais dispositivos possuem, em geral, um estágio de entrada sem correção do fator de potência, fazendo com que drenem correntes distorcidas da rede elétrica (MANSOOR et al., 1995). Estes fatores em conjunto agravam o problema de qualidade de energia, devido às suas consequências negativas, como o aquecimento de condutores e transformadores devido à circulação de correntes reativas e o mau funcionamento de equipamentos sensíveis conectados ao sistema. Tais consequências levaram à criação de normas internacionais que regulamentam limites para a distorção harmônica total, ou THD (do inglês *Total Harmonic Distortion*). Como exemplos de normas pode-se citar a IEC 1000-3-2 e a IEEE 519-1992.

É possível mitigar estes problemas através da conexão de filtros de potência com a carga. Estes filtros podem ser ativos ou passivos, e a conexão pode ser em série, em paralelo, ou em série-paralelo. O filtro pode ser implementado com elementos passivos (resistores, indutores e capacitores) ou elementos ativos (chaves semicondutoras de potência), sendo os filtros ativos conhecidos como FAP's (Filtros Ativos de Potência). Embora filtros passivos sejam mais simples de projetar e mais baratos de construir do que filtros ativos, têm como desvantagem a possibilidade de oscilar com a impedância da linha e uma capacidade de compensação limitada, visto que para cada componente harmônica um reator deve ser projetado. Por isso, a partir da década de 70, com o desenvolvimento da tecnologia de dispositivos semicondutores de potência, microprocessadores e processadores digitais de sinal, ou DSP's (do inglês *Digital Signal Processor*) foi possível desenvolver algoritmos mais complexos de modulação, geração de referências e programas supervisórios, o que tornou a utilização de FAP's ainda mais popular (SASAKI; MACHIDA, 1971).

Além disso, diversos fatores têm levado à intensificação no uso de conversores eletrônicos de potência nos últimos anos. As inúmeras aplicações que precisam de uma

forma de conexão com a rede elétrica fazem uso de conversores de potência. Novas tecnologias, a crise energética e o aumento do efeito estufa são alguns dos motivos para o aumento desta demanda. Aplicações de geração distribuída, como células de energia, painéis fotovoltaicos, turbinas eólicas e microturbinas são usadas não só para aumentar a energia disponível no sistema, mas também para melhorar sua confiabilidade, fornecendo energia aos consumidores mesmo durante uma falta na rede (KARSHENAS; SAGHAFI, 2006). Na maioria destes geradores, a eletricidade está disponível em um estágio contínuo, ou é produzida em baixa frequência e, portanto, é convertida para um nível contínuo. Inversores de tensão são predominantemente utilizados para transferir energia de uma fonte contínua para a rede elétrica.

Apesar de vastamente utilizados, os inversores de tensão demandam cuidado em sua utilização. Isso deve-se ao fato de o inversor de tensão trabalhar com uma frequência de comutação da ordem de kHz para manter as perdas de comutação em níveis aceitáveis. Para manter as correntes harmônicas oriundas do inversor em níveis aceitáveis, de forma a respeitar os códigos de rede, existem diversas topologias de filtro que podem ser utilizadas (RIBEIRO, 2003). A mais comum é a aplicação de um filtro L como interface entre a rede e o inversor. Mais recentemente, filtros LCL começaram a ser utilizados para esta função (LINDGREN; SVENSSON, 1998)(TEODORESCU et al., 2004) (SHEN et al., 2008), pois apresentam maior atenuação das frequências harmônicas sem aumentar significativamente o consumo de potência reativa na frequência fundamental da rede quando comparados a filtros L (DANNEHL; FUCHS; HANSEN, 2007). Além disso, as dimensões do filtro LCL são significativamente menores que a de um filtro L, reduzindo o custo do filtro e as perdas de operação.

A indutância da rede pode ser considerada como parte do filtro LCL. No entanto, a incerteza quanto ao seu valor real altera a frequência de ressonância do filtro e pode levar a instabilidade. Por este motivo, a incerteza quanto ao valor da indutância da rede precisa ser incluída no projeto do controlador (LISERRE; BLAABJERG; HANSEN, 2005). Outro ponto importante é que o controlador precisa rejeitar distorções de corrente de baixa ordem resultantes da distorção de tensão no ponto de conexão do conversor. Isto, aliado ao fato de que o controlador é implementado em um microcontrolador ou um DSP, torna o projeto bastante complexo.

Por ser de terceira ordem, o filtro LCL apresenta um pico de amplitude em sua frequência de ressonância, o que faz com que a estabilidade geral do sistema seja reduzida dependendo principalmente de sua frequência de ressonância. Dessa forma, é necessário realizar o amortecimento desta ressonância. É possível realizar este amortecimento de forma passiva através da inserção de um resistor em série ou em paralelo com o capacitor do filtro (AHMED; FINNEY; WILLIAMS, 2007). Embora este amortecimento reduza consideravelmente o pico de amplitude na frequência de ressonância, ele resulta em dissi-



pação de energia pelo filtro e degrada o desempenho de atenuação nas altas frequências. Não é, portanto, uma solução aceitável para aplicações que necessitam do máximo de desempenho (SHEN et al., 2010). Outra forma de realizar este amortecimento é via amortecimento ativo (GERVASIO et al., 2013). Isto é alcançado utilizando uma dentre várias estratégias de controle possíveis, tais como estruturas de controle específicas (WU; LEHN, 2006), estimação de impedância da rede (LISERRE; BLAABJERG; TEODORESCU, 2007), retroação de estados (GABE et al., 2007), estratégias utilizando múltiplos laços de realimentação (LOH; HOLMES, 2005), dentre outras (DANNEHL; WESSELS; FUCHS, 2009) (MORENO et al., 2009) (YANG et al., 2011).

Em geral, essas estratégias de controle podem ser implementadas analogicamente ou digitalmente. Os métodos de controle digital oferecem diversas vantagens sobre as técnicas analógicas, como reprogramabilidade, tolerância à variações nos componentes, suporte a múltiplos modos de operação, melhor eficiência e, em geral, melhor desempenho. O controle analógico se limita a estruturas particulares, enquanto o controle digital depende apenas dos limites da taxa de amostragem, resolução e capacidade computacional (KIMBALL, 2008).

Assim sendo, o enfoque recai sobre as técnicas de controle digital. Existem muitas técnicas diferentes para o controle de conversores. O controle proporcional-integral, comumente chamado de PI, utiliza compensadores de erro do tipo proporcional-integral para produzir os sinais de comando de cada fase. A parte integral do controlador minimiza o erro em baixas frequências, enquanto a parte proporcional e a posição do zero influenciam na ondulação do sinal. O desafio desta técnica é realizar o rastreamento das referências de corrente. Isto é resolvido, em geral, utilizando circuitos do tipo malha de captura de fase, ou PLL (do inglês *Phase Locked Loop*) para gerar as referências de corrente. O controlador PI geralmente é implementado em eixos síncronos dq, de modo que as referências senoidais são transformadas em sinais constantes. Alternativamente, podem ser utilizados PI em eixos estacionários  $\alpha\beta$  (KAZMIERKOWSKI; MALESANI, 1998). Em ambos os casos, o objetivo é o rastreamento de referências senoidais e a rejeição de distúrbios de mesma natureza (SANTIPRAPAN; AREERAK; AREERAK, 2011).

Uma outra abordagem é o controle de corrente usando um controlador do tipo *Dead-Beat*. Essa é a mais rápida estratégia de controle linear que pode ser adotada. Teoricamente, o laço de corrente replica exatamente a corrente de referência com dois ciclos de atraso. O controle é baseado no modelo interno do sistema, usado para prever o comportamento dinâmico do sistema. O controlador, assim sendo, é inerentemente sensível às incertezas do modelo (MALESANI; MATTAVELLI; BUSO, 1999).

Existe ainda o controlador por Histerese. Devido à sua inerente não-linearidade, este controlador é capaz de proporcionar uma resposta dinâmica rápida. Utilizando esta técnica, é possível atingir o máximo aproveitamento do conversor de potência (YAO; HOLMES,

1993). O limite para a regulação de corrente, na verdade, é dado pelo projeto do conversor. O controle de corrente por histerese é estável e robusto com relação às variações na carga ou qualquer outro tipo de distúrbios dinâmicos (MALESANI et al., 1991).

O controle de realimentação é a estratégia de controle mais simples que existe para compensar perturbações de um processo. Embora a grande maioria das estratégias de controle utilizadas na prática industrial seja controle de realimentação simples, essa estratégia apresenta uma desvantagem bastante significativa: é preciso que um distúrbio se propague pelo processo, fazendo a variável controlada desviar do ponto de operação, para que a realimentação adote uma ação corretiva (SMITH; CORRIPIO, 2008).

Existem aplicações, no entanto, que demandam desempenho superior, devido à alguma necessidade específica, dinâmica lenta ou perturbações frequentes. Quando o distúrbio é associado à variável controlada ou quando o elemento de controle final apresenta comportamento não-linear, o Controle Multimalha melhora significativamente o desempenho em relação ao controle com realimentação simples (KRISHNASWAMY et al., 1990).

Este tipo de controle pressupõe um conjunto de malhas em cascata, onde as mais externas geram as referências para as malhas mais internas. Dessa forma, variáveis intermediárias são usadas para reduzir o efeito de algumas dinâmicas no processo. Não é mais necessário esperar o distúrbio propagar-se pelo sistema e modificar a variável controlada. Uma vez que uma mudança seja detectada em uma variável intermediária, a ação corretiva começa imediatamente a ser aplicada na variável manipulada, reduzindo a magnitude do impacto do distúrbio e conseqüentemente melhorando o desempenho. O único requisito para que isto aconteça é que a malha interna seja mais rápida que a malha externa. Quanto mais rápida, melhor, pois a velocidade da malha interna implica na velocidade com que mudanças na variável intermediária serão detectadas, o que afeta diretamente a redução do impacto do distúrbio na variável controlada.

As técnicas de controle clássicas pressupõem o uso de um modelo interno do sistema que deve ser precisamente conhecido. Nas duas últimas décadas, este requisito vem sendo relaxado, e o desafio é desenvolver estratégias de controle robustas à incerteza paramétrica (GEROMEL, 1999).

## 1.1 Considerações sobre LCL

A principal vantagem do filtro LCL sobre o filtro L é conseguir uma melhor atenuação das componentes harmônicas de corrente oriundas do processo de comutação do conversor utilizando componentes indutivos de menor volume. Isto é obtido pela inserção de um capacitor, resultando num filtro do tipo  $T$  (SHEN et al., 2010). Para análise, considere a estrutura da Fig. 1. Os indutores  $L_1$  e  $L_2$  e o capacitor  $C$  formam o filtro LCL, com suas

resistências associadas  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_d$  respectivamente. A indutância  $L_g$  e sua resistência associada  $R_g$  correspondem à indutância da rede,  $V_i$  é a tensão de saída do inversor e  $V_g$  é a tensão da rede:

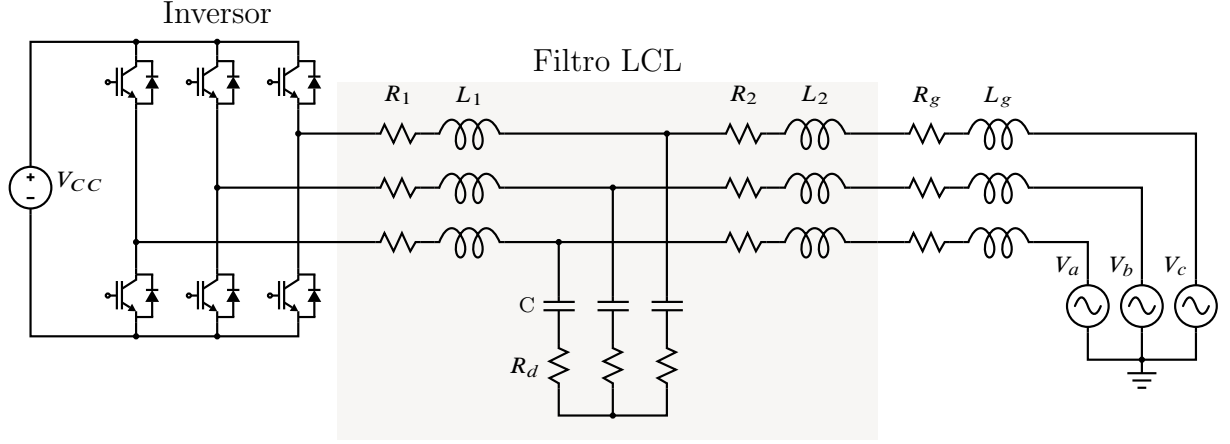


Fig. 1 – Topologia do filtro LCL.

Dessa forma, tem-se:

$$Z_i = L_1 s + R_1$$

$$Z_g = (L_2 + L_g)s + R_2 + R_g$$

$$Z_0 = \frac{1}{Cs} + R_d$$

Pode-se definir então, as seguintes funções de transferência:

$$G_{V_i-I_1}(s) = \frac{I_1(s)}{V_i(s)} = \frac{Z_g + Z_0}{Z_i Z_g + Z_i Z_0 + Z_g Z_0} \quad (1.1)$$

$$G_{V_i-I_2}(s) = \frac{I_2(s)}{V_i(s)} = \frac{Z_0}{Z_i Z_g + Z_i Z_0 + Z_g Z_0} \quad (1.2)$$

$$G_{I_1-I_2}(s) = \frac{I_2(s)}{I_1(s)} = \frac{Z_0}{Z_g + Z_0} \quad (1.3)$$

Para efeito de comparação, pode-se reescrever a (1.1) e (1.2) de forma a considerar apenas um indutor  $L = L_1 + L_2 + L_g$ . Negligenciando a resistência série do indutor, e considerando  $\alpha = \frac{L_1}{L}$ , têm-se:

$$G_{V_i-I_1}(s) = \frac{I_1(s)}{V_i(s)} = \frac{(1 - \alpha)LCs^2 + R_d Cs + 1}{\alpha(1 - \alpha)L^2Cs^3 + R_d LCs^2 + Ls} \quad (1.4)$$

$$G_{V_i-I_2}(s) = \frac{I_2(s)}{V_i(s)} = \frac{R_d C s + 1}{\alpha(1-\alpha)L^2 C s^3 + R_d L C s^2 + L s} \quad (1.5)$$

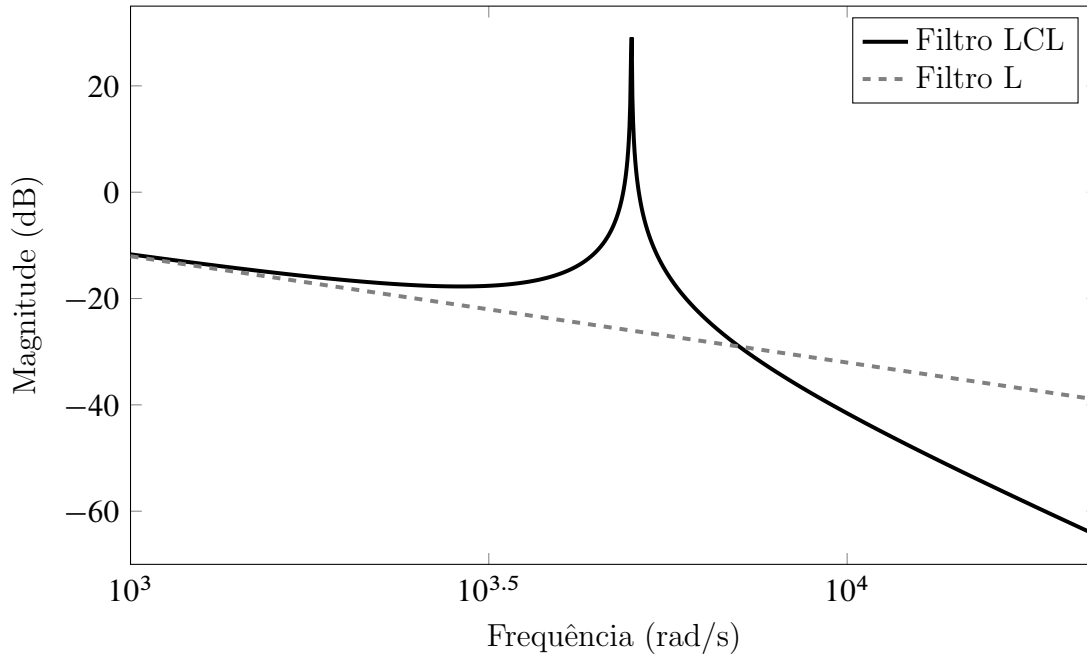


Figura 2 – Comparação entre filtro L e filtro LCL.

A Fig. 2 mostra o diagrama de Bode de (1.5) com  $R_d = 0$  para dois casos: com e sem capacitância  $C$ . No caso de  $C = 0$ , tem-se o filtro L. No caso de  $C \neq 0$ , tem-se o filtro LCL.

Embora nos dois casos a indutância total tenha sido mantida a mesma, observa-se que o filtro LCL apresenta uma maior atenuação das harmônicas de comutação de alta frequência se comparado ao filtro L. Em contrapartida, o filtro LCL possui um pico de amplitude na frequência de ressonância. Por isso, é preciso mais cuidado no projeto para manter a estabilidade do sistema.

O recurso mais comumente utilizado para tal é a adição de um resistor de amortecimento  $R_d$ . O amortecimento passivo, no entanto, prejudica a atenuação das harmônicas de alta frequência. A Fig. 3 mostra o diagrama de Bode de (1.3) para  $R_d = 0$ ,  $R_d = 2\Omega$  e  $R_d = 10\Omega$ .

A redução no amortecimento de harmônicas de alta frequência faz com que filtros LCL com amortecimento passivo sejam maiores que filtros LCL sem amortecimento passivo, para que atinjam o mesmo desempenho. Esse aumento de tamanho implica em aumento de custo e redução da banda passante do filtro. As considerações aqui feitas demonstram o porquê da escolha do filtro LCL sem amortecimento passivo. Embora seja mais trabalhoso e delicado projetá-lo, o desempenho é sensivelmente melhor.

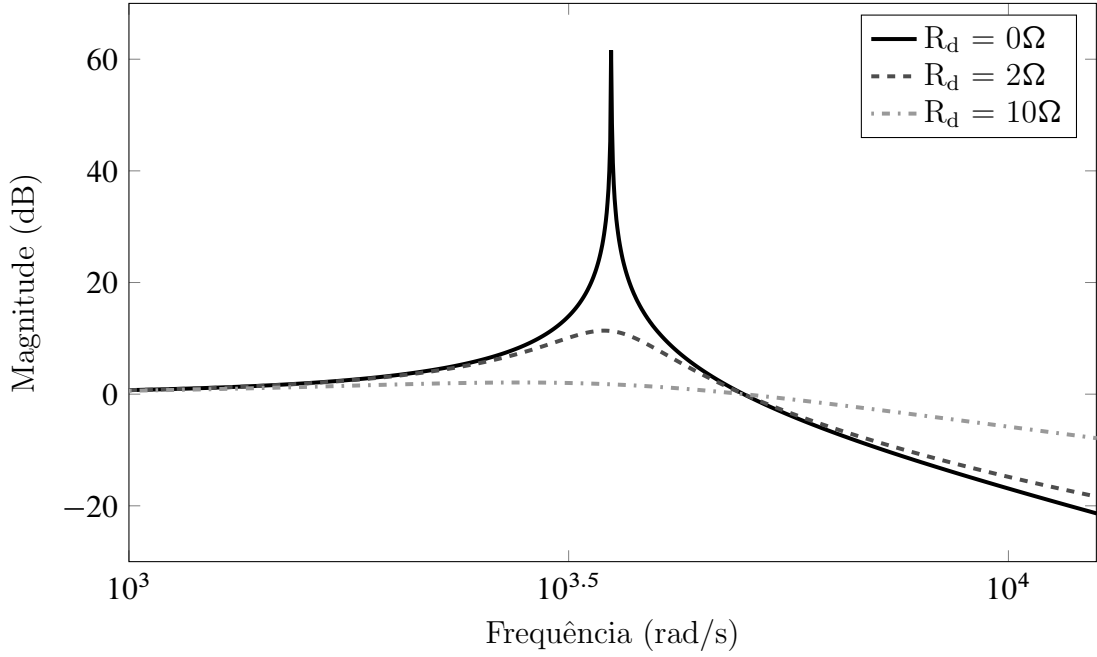


Figura 3 – Diferença entre filtros LCL e LCL com amortecimento passivo.

### 1.1.1 Corrente e Tensão do Capacitor

O sistema formado pelo conversor alimentado por tensão conectado à rede através de um filtro *LCL* é um sistema composto por estados que podem ser utilizados em uma estrutura multimalha, onde a malha interna pode ser projetada para controlar a tensão ou a corrente do capacitor. Independentemente de qual variável é escolhida, o conhecimento da indutância  $L_1$  e da capacitância  $C$  do filtro facilitam o projeto da malha interna. Deve haver, no entanto, capacidade de rejeição de distúrbios.

O Controle Multimalha é adequado para melhorar o desempenho de sistemas de controle com apenas uma malha em que o distúrbio esteja relacionado com a variável manipulada ou quando o elemento de controle final exibe um comportamento não-linear (LEE; OH, 2002).

A Fig. 4 mostra a estrutura geral do Controle Multimalha, onde  $I_2^*$  é a referência para a malha externa,  $U$  é a referência para a malha interna,  $C_o$  é a função de transferência do controlador primário,  $C_i$  é a função de transferência do controlador secundário,  $G_{id}$  e  $G_{od}$  são a planta,  $G_{di}$  e  $G_{do}$  são os distúrbios.

A decisão sobre qual variável deve ser controlada em cada uma das malhas é complexa, e uma análise mais profunda deve ser feita para verificar qual a melhor opção para cada malha. Essa análise é feita em (ABDEL-RAHIM; QUAICOE, 1994), utilizando o método do lugar das raízes e a técnica do espaço de estados médio. Esta é uma técnica essencial para a análise de circuitos chaveados, pois permite que as técnicas de análise de circuitos tradicionais sejam aplicadas a eles.

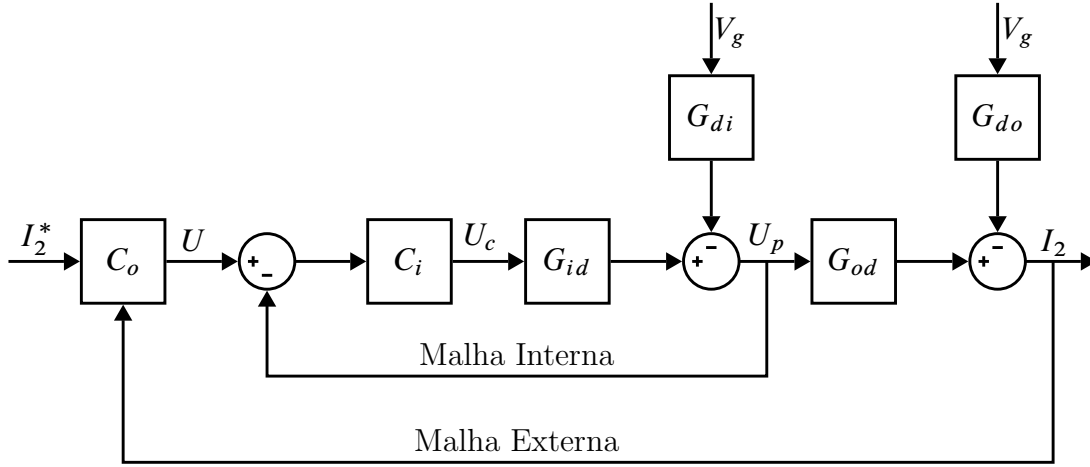


Fig. 4 – Estrutura geral de Controle Multimalha.

O princípio de funcionamento é que a comutação ciclo a ciclo é ignorada em favor das características médias do circuito nas frequências abaixo da frequência de Nyquist. Perde-se então a capacidade de ver a forma de onda da comutação, mas pode-se determinar rapidamente uma série de fatores do circuito, como estabilidade, margem de ganho e de fase, o lugar das raízes e a resposta transiente média. Os passos para usar esta técnica são os seguintes:

1. Desenhar o circuito em cada estado;
2. Escrever a equação de nó, malha ou elemento para cada estado;
3. Determinar qual parcela do período o sistema permanece em cada estado;
4. Multiplicar cada equação de estado por sua parcela de tempo e somá-las para obter uma média ponderada das equações de estado.

As funções de transferência da tensão  $v_c$  e da corrente  $i_c$  do capacitor em relação à razão cíclica  $d$  são dadas por:

$$\frac{v_c}{d} = \frac{\frac{2V_{DC}}{L_1} \frac{1}{C} \left( s + \frac{R_2}{L_2} \right)}{s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (1.6)$$

$$\frac{i_c}{d} = \frac{\frac{2V_{DC}}{L_1} s \left( s + \frac{R_2}{L_2} \right)}{s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (1.7)$$

Com

$$a_2 = \frac{R_1}{L_1} + \frac{R_2}{L_2}$$

$$a_1 = \frac{1}{L_1 L_2} \left( R_1 R_2 + \frac{L_1 + L_2}{C} \right)$$

$$a_0 = \frac{R_1 + R_2}{C L_1 L_2}$$

A Fig. 5 mostra o lugar das raízes para a função de transferência (1.6).

Fig. 5 – Lugar das raízes para a tensão do capacitor.

Percebe-se que os polos da função de transferência da tensão do capacitor apresentam um comportamento oscilatório ao longo do eixo imaginário. Devido ao projeto do filtro *LCL*, a oscilação não ocorre em uma frequência muito alta, o que simplifica o controle desta variável. Além disso, na prática haverá sempre parte real nas resistências, o que fará com que os polos desloquem-se um pouco para o semiplano esquerdo, saindo do limiar de estabilidade.

Supondo que o controlador da malha interna tenha um elevado desempenho no rastreamento de referências e na rejeição de distúrbios, o controle da tensão do capacitor é vantajoso. O capacitor pode ser visto como uma fonte de tensão, e toda a dinâmica do inversor e do indutor do lado do conversor podem ser ignorados, simplificando o controle da corrente da rede.

A Fig. 6 mostra o lugar das raízes para a função de transferência (1.7).

Fig. 6 – Lugar das raízes para a corrente do capacitor.

Percebe-se que os polos da função de transferência da corrente do capacitor deslocam-se para o semiplano esquerdo, indicando que o sistema tende à estabilidade. Essa é a grande vantagem de utilizar a corrente do capacitor como variável de controle da malha interna.

A corrente do capacitor mostra-se como uma ótima escolha. No entanto, a tensão do capacitor pode ser selecionada como uma variável intermediária a ser controlada, sintetizando-se assim uma fonte de tensão controlada por tensão, no caso, o conversor. Deste modo, tem-se um circuito do tipo *RL* que aproxima o comportamento no ponto de conexão.

## 1.2 Objetivos e Contribuições da Dissertação

O objetivo desse trabalho é propor uma estratégia de controle para um conversor conectado à rede elétrica através de um filtro LCL. A estratégia proposta deve ser robusta

com relação às incertezas e distúrbios da rede elétrica, e resultar numa dinâmica de malha fechada rápida o suficiente para permitir a rejeição de distúrbios e o rastreamento de possíveis referências complexas, incluindo harmônicas.

Mais especificamente, esta Dissertação visa:

- Propor um controlador adaptativo para controlar a corrente de conversores conectados à rede elétrica com um filtro LCL que ajuste automaticamente os ganhos e que garanta estabilidade para uma ampla faixa de valores de impedância da rede;
- Propor um controlador que garanta desempenho e estabilidade frente a distúrbios de tensão e incerteza na impedância da rede elétrica;
- Realizar a prova de estabilidade do controlador proposto.

### 1.3 Organização do Documento

O Capítulo 1 apresenta a motivação para este trabalho. É apresentada uma breve revisão bibliográfica, de modo a situar o trabalho desenvolvido no contexto atual de utilização de conversores conectados à rede elétrica.

O Capítulo 2 apresenta a modelagem matemática do sistema. O filtro LCL é modelado tanto em tempo contínuo quanto em tempo discreto, considerando como variável intermediária tanto a corrente como a tensão do capacitor.

O Capítulo 3 apresenta a proposta de controlador adaptativo utilizando uma estrutura multimalha, novamente para ambos os casos de escolha de variável intermediária.

O Capítulo 4 apresenta a proposta de controlador adaptativo através de modelo interno.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com os controladores propostos, tanto em simulação quanto em experimentos de bancada.

O Capítulo 6 traz as conclusões do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.



## 2 IMC



## 3 Resultados



## Conclusão



# Referências

- ABDEL-RAHIM, N.; QUAICOE, J. E. A Single-Phase Voltage-Source Utility Interface System for Weak AC Network Applications. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, v. 1, p. 93–99, February 1994. Citado na página 27.
- AHMED, K. H.; FINNEY, S. J.; WILLIAMS, B. W. Passive Filter Design for Three-Phase Inverter Interfacing in Distributed Generation. *Compatibility in Power Electronics*, p. 1–9, June 2007. Citado na página 22.
- DANNEHL, J.; FUCHS, F. W.; HANSEN, S. PWM Rectifier with LCL-Filter using different Current Control Structures. *European Conference on Power Electronics and Applications*, p. 1–10, September 2007. Citado na página 22.
- DANNEHL, J.; WESSELS, C.; FUCHS, F. W. Limitations of Voltage-Oriented PI Current Control of Grid-Connected PWM Rectifiers With *LCL* Filters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 56, n. 2, p. 380–388, February 2009. Citado na página 23.
- GABE, I. J. et al. Stability Analysis of Grid-Connected Voltage Source Inverters with *LCL*-Filters using Partial State Feedback. *European Conference on Power Electronics and Applications*, p. 1–10, September 2007. Citado na página 23.
- GEROMEL, J. C. Optimal Linear Filtering Under Parameter Uncertainty. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 47, n. 1, p. 168–175, January 1999. Citado na página 24.
- GERVASIO, F. et al. Dynamic analysis of active damping methods for lcl-filter-based grid converters. In: *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 671–676. ISSN 1553-572X. Citado na página 23.
- KARSHENAS, H. R.; SAGHAFI, H. Performance Investigation of LCL Filters in Grid Connected Converters. *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America*, p. 1–6, March 2006. Citado na página 22.
- KAZMIERKOWSKI, M. P.; MALESANI, L. Current Control Techniques for Three-Phase Voltage-Source PWM Converters: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 45, n. 5, p. 691–703, October 1998. Citado na página 23.
- KIMBALL, J. W. *Digital Control Techniques for Switching Power Converters*. Tese (Doutorado) — University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008. Citado na página 23.
- KRISHNASWAMY, P. R. et al. When To Use Cascade Control. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 29, n. 10, p. 2163–2166, October 1990. Citado na página 24.
- LEE, Y.; OH, S. Enhanced Control with a General Cascade Control Structure. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 41, n. 11, p. 2679–2688, May 2002. Citado na página 27.
- LINDGREN, M.; SVENSSON, J. Control of a Voltage-source Converter Connected to the Grid through an LCL-filter - Application to Active Filtering. *Power Electronics Specialists Conference*, v. 1, p. 229–235, May 1998. Citado na página 22.

- LISERRE, M.; BLAABJERG, F.; HANSEN, S. Design and Control of an *LCL*-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 41, n. 5, p. 1281–1291, September 2005. Citado na página 22.
- LISERRE, M.; BLAABJERG, F.; TEODORESCU, R. Grid Impedance Estimation via Excitation of *LCL*-Filter Resonance. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 43, n. 5, p. 1401–1407, September/October 2007. Citado na página 23.
- LOH, P. C.; HOLMES, D. G. Analysis of multiloop control strategies for LC/CL/*LCL*-filtered voltage-source and current-source inverters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 41, n. 2, p. 644–654, March/April 2005. Citado na página 23.
- MALESANI, L.; MATTAVELLI, P.; BUSO, S. Robust Dead-Beat Current Control for PWM Rectifiers and Active Filters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 35, n. 3, p. 613–620, May/June 1999. Citado na página 23.
- MALESANI, L. et al. Improved Current Control Technique of VSI PWM Inverters with Constant Modulation Frequency and Extended Voltage Range. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 27, n. 2, p. 365–369, March/April 1991. Citado na página 24.
- MANSOOR, A. et al. Predicting the Net Harmonic Currents Produced by Large Number of Distributed Single-Phase Computer Loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 4, p. 2001–2006, October 1995. Citado na página 21.
- MORENO, J. C. et al. A Robust Predictive Current Control for Three-Phase Grid-Connected Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 56, n. 6, p. 1993–2004, June 2009. Citado na página 23.
- RIBEIRO, E. R. *Filtros Ativos Série Para a Compensação de Harmônicas de Tensão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. Citado na página 22.
- SANTIPRAPAN, P.; AREERAK, K.-L.; AREERAK, K.-N. Mathematical Model and Control Strategy on DQ Frame for Shunt Active Power Filters. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, p. 353–361, 2011. Citado na página 23.
- SASAKI, H.; MACHIDA, T. A New Method to Eliminate AC Harmonic Currents by Magnetic Flux Compensation - Considerations on Basic Design. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-90, n. 5, p. 2009–2019, September 1971. Citado na página 21.
- SHEN, G. et al. An Improved Control Strategy for Grid-Connected Voltage Source Inverters With an *LCL* Filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 23, n. 4, p. 1899–1906, July 2008. Citado na página 22.
- SHEN, G. et al. A New Feedback Method for PR Current Control of *LCL*-Filter-Based Grid-Connected Inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 57, n. 6, p. 2033–2041, June 2010. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. *Princípios e Prática do Controle Automático de Processo*. third. Rio de Janeiro: LTC, 2008. Citado na página 24.



TEODORESCU, R. et al. A New Control Structure for Grid-Connected LCL PV Inverters with Zero Steady-State Error and Selective Harmonic Compensation. *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, v. 1, p. 580–586, 2004. Citado na página 22.

WU, E.; LEHN, P. W. Digital Current Control of a Voltage Source Converter With Active Damping of LCL Resonance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 21, n. 5, p. 1364–1373, September 2006. Citado na página 23.

YANG, S. et al. A Robust Control Scheme for Grid-Connected Voltage-Source Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, n. 1, p. 202–212, January 2011. Citado na página 23.

YAO, Q.; HOLMES, D. G. A Simple, Novel Method for Variable-Hysteresis-Band Current Control of a Three Phase Inverter with Constant Switching Frequency. *Industry Applications Society Annual Meeting*, p. 1122–1129, October 1993. Citado na página 24.



# Anexos

