

Estudo Sobre Controladores de Corrente Implementados Digitalmente

Luiz Rafael Salama Andrade

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing
(Orientador)

Prof. Maurício Aredes, Dr.-Ing

Prof. Felipe José da Costa Padilha, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
JANEIRO DE 2009

Agradecimentos

Aos meus pais, por sempre incentivarem e apoiarem meus estudos.

Ao prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, pelo apoio na realização deste trabalho.

Aos professores do departamento, por elevarem o curso de Engenharia Elétrica ao nível que hoje está.

Aos meus amigos e familiares, por sempre me apoiarem e também pela compreensão nos diversos momentos que não pude estar com eles.

Aos meus colegas de faculdade, que me ajudaram em diversas disciplinas e compartilharam sua amizade ao longo destes cinco anos de curso.

À minha gerente e companheiros de trabalho do CENPES, pelo incentivo aos meus estudos e pela compreensão em relação à carga horária no meu ano final de faculdade. Ao meu coordenador, Filipe, pelo esclarecimento em alguns tópicos deste trabalho.

Resumo

Este trabalho consiste em um estudo comparativo entre dois métodos de controladores de corrente: um com comparadores de dois níveis trabalhando no eixo abc , “bang-bang”, e outro com utilização de tabela de chaveamento, comparadores de três níveis e mudança de referencial. O objetivo deste trabalho é apresentar a teoria e os cálculos realizados para projetar cada um destes controladores e apresentar os resultados de desempenho de cada um na simulação e no controle experimental.

A execução do controlador de corrente será realizada através de um computador, no ambiente “*Real-Time Workshop*” do *Matlab/Simulink*. Como exemplificação de implementação destes métodos, também será apresentado o acionamento de um motor de indução utilizando os dois métodos estudados.

Sumário

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 - Objetivo	4
Capítulo 2 - Controladores de Corrente	6
2.1 - Aspectos Gerais	6
2.2 - Controladores Lineares	9
2.2.1 Controlador PI Estacionário e Síncrono	10
2.2.2 Controladores com Realimentação de Estados	11
2.2.3 Controladores Preditivos e “ <i>DeadBeat</i> ”	12
2.3 - Controladores Não-Lineares	13
2.3.1 Controladores com Comparadores de Histerese	14
2.3.2 Controladores com Comparadores de Banda	15
2.3.3 Controladores com Otimização	16
2.3.4 Controladores com Redes Neurais e Lógica “ <i>Fuzzy</i> ”	18
2.4 - Proposta do Projeto	19
Capítulo 3 - Teoria	21
3.1 - Inversor	21
3.2 - Controlador de Corrente “Bang-Bang”	23
3.3 - Controlador de Corrente para Inversores de Potência Trifásicos	25
3.3.1 Mudança de coordenadas para o referencial $\alpha\beta$	27
3.3.2 Análise pelos Vetores de Chaveamento	28
3.3.3 Análise do Método de Controle	31
Capítulo 4 - Simulação e Métodos de Análise dos Resultados	36
4.1 – Métodos para Análise dos Resultados	36
4.1.1 Análise de Distorção Harmônica	37
4.1.2 Quantidade de Chaveamentos	39
4.2 - Simulação	40
4.2.1 Implementação da tabela de chaveamento no formato <i>S-Function</i>	41
4.2.2 Resultados das Simulações	41
Capítulo 5 - Resultados Experimentais	45
5.1 - Medidores de Corrente	46
5.2 - Resultados Experimentais	47
5.3 - Aplicação Prática	51
Capítulo 6 - Conclusão	55
Referências	58

Apêndices	59
Apêndice 1 - Código para cálculo de THD e contagem de número de chaveamentos.	59
Apêndice 2 - Código para geração de S-Function.	61
Apêndice 3 - Controlador “bang-bang” implementado no Simulink.	64
Apêndice 4 - Controlador com tabela de chaveamento implementado no Simulink	65
Apêndice 5 - Controlador “bang-bang” implementado no Simulink para controle em tempo real.	66
Apêndice 6 - Controlador com tabela de chaveamento implementado no Simulink para controle em tempo real.	67

Lista de Figuras

<i>Figura 2.1 - Modelo de controlador para carga trifásica a três fios.</i>	8
<i>Figura 2.2 - Controlador estacionário PI.</i>	10
<i>Figura 2.3 - Controlador PI síncrono.</i>	11
<i>Figura 2.4 - Controlador com realimentação de estados.</i>	12
<i>Figura 2.5 - Controlador de corrente preditivo.</i>	13
<i>Figura 2.6 - Controlador com comparadores de histerese.</i>	14
<i>Figura 2.7 - Hexágono de trajetória da corrente.</i>	17
<i>Figura 2.8 - Controlador preditivo com mínima frequência de chaveamento.</i>	17
<i>Figura 2.9 - Superfície de controle do controlador PI e controlador baseado em lógica "fuzzy"[1].</i>	19
<i>Figura 3.1 - Diagrama conceitual do inversor alimentando o motor de indução</i>	22
<i>Figura 3.2 - Possíveis combinações dos estados das chaves do inversor.</i>	23
<i>Figura 3.3 - Controlador com comparadores de três níveis com implementação de tabela de chaveamento.</i>	25
<i>Figura 3.4 - Controlador com tabela de chaveamento e realimentação dos sinais de erro.</i>	26
<i>Figura 3.5 - Diagrama vetorial de tensão no eixo de referência $\alpha\beta$</i>	31
<i>Figura 3.6 - Comparador de três níveis.</i>	31
<i>Figura 4.1 - Método de Hanning aplicado a um vetor de pontos.</i>	39
<i>Figura 4.2 - Modelo do inversor utilizado na simulação.</i>	42
<i>Figura 4.3 - Espectro harmônico da simulação do controlador "bang-bang". Corrente 3A e banda de tolerância 0,2A</i>	44
<i>Figura 4.4 - Espectro harmônico da simulação do controlador com tabela de chaveamento. Corrente 3A e banda de tolerância 0,2A</i>	44
<i>Figura 5.1 - Diagrama esquemático computador e sistema analógico.</i>	45
<i>Figura 5.2 - Circuito equivalente de um motor de indução.</i>	47
<i>Figura 5.3 - Espectro harmônico da experiência prática do controlador "bang-bang". Corrente 3A e banda de tolerância 0,2A</i>	50
<i>Figura 5.4 - Espectro harmônico da experiência prática do controlador "bang-bang". Corrente 3A e banda de tolerância 0,2A</i>	50
<i>Figura 5.5 - Velocidade do motor de indução com a implementação dos dois controladores.</i>	53
<i>Figura 5.6 - Ampliação de um trecho da resposta dinâmica do motor.</i>	53
<i>Figura 6.1 - Comparativo entre número de chaveamentos.</i>	55

Lista de Tabelas

<i>Tabela 3.1 - Tensão de linha do inversor para os oito vetores de chaveamento.</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 3.2 - Valores de tensão no eixo de referência $\alpha\beta$ dos oitos vetores.</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 3.3 - Análise dos erros nos eixos $\alpha\beta$.</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 3.4 - Tabela de chaveamento do controlador.</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 4.1 - Resultados das simulações.</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 5.1 - Resultados experimentais.</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 5.2 - Resultados do acionamento do motor de indução.</i>	<i>52</i>

Capítulo 1 - Introdução

O alto desempenho no acionamento de máquinas elétricas depende largamente da tecnologia de controle implementada, sendo empregadas técnicas de controle com realimentação de corrente em todas aplicações onde são exigidos uma resposta rápida, alta precisão e um alto nível de desempenho. Um controle rápido e eficiente é realizado através de diversos métodos de chaveamento, transferindo energia de forma controlada de uma fonte de alimentação para a carga, através do comando de chaves semicondutoras de potência que comutam entre os estados ligado e desligado. Alguns destes métodos serão analisados neste projeto.

O dispositivo constituído por este conjunto de chaves de potência que transforma uma entrada, fonte de alimentação em corrente contínua, em corrente alternada de forma controlada, é chamado de inversor. Os sinais de comando das chaves de potência do inversor são na forma de modulação por largura de pulso, mais conhecido na literatura como sinal PWM (*"Pulse Width Modulation"*). Estes sinais são formados por trens de pulsos que podem assumir dois valores, um ou zero, representando os dois estados que as chaves podem assumir (condução e bloqueio). A largura de cada pulso carrega a informação necessária para o comando do respectivo dispositivo de potência. De acordo com o estado do sinal PWM, zero ou um, irá definir qual dos dois terminais da fonte de alimentação do inversor será conectado à carga, controlando o fluxo de potência da fonte de alimentação à carga.

Atualmente, há uma preferência pela utilização de conversores de tensão ao invés de conversores de corrente na conversão de corrente contínua em alternada, e vice-versa. Isto pode ser justificado pela introdução de dispositivos de potência com alta capacidade de interrupção e também com uma melhor adaptação deste método às cargas com características indutivas, como ocorre normalmente em corrente alternada, eliminando a necessidade de utilização de filtros capacitivos no lado de corrente alternada.

Por outro lado, motores e algumas cargas em corrente alternada alimentados por conversores apresentam melhor desempenho quando controlados por corrente ao invés de tensão. Isto

ocorre pois desta forma se elimina a dependência dos parâmetros do estator, tornando mais direta a ação do controlador, no fluxo e torque desenvolvido pela máquina.

O objetivo dos controladores de corrente é forçar que o sinal de corrente na carga siga a referência especificada. Isto se consegue através da variação da taxa de chaveamento das chaves semicondutoras, empregando as técnicas de modulação de pulso. A ação do inversor é baseada na comparação entre o sinal medido na carga e o de referência. Um controle com rápida resposta e baixos níveis de harmônicos resulta em um acionamento com altas velocidades e baixos torques pulsantes. Portanto, os algoritmos de controle que geram estes sinais PWM são diretamente relacionados ao bom desempenho do inversor, conseqüentemente, também são responsáveis pelo desempenho no acionamento da máquina.

Por isto, o controle de corrente em conversores *PWM* é atualmente um assunto tão importante da eletrônica de potência. Estas técnicas de controle podem variar desde a utilização de simples controladores a métodos com otimização em tempo real.

A maioria das aplicações trifásicas de inversores comandados por sinais PWM utiliza um controle em malha fechada, com realimentação de corrente, como por exemplo no acionamento de motores, filtros ativos, conversores *AC/DC*, dentre outros. As principais vantagens da utilização do controle em malha fechada são as seguintes

- Controle instantâneo do sinal de corrente no circuito;
- Limitação de picos de corrente;
- Compensação de variação da carga.

Atualmente, a pesquisa de novos métodos para o controle de corrente tem se deslocado para o desenvolvimento de técnicas que possam ser totalmente implementadas digitalmente, mesmo que isto provoque uma pequena perda de precisão e desempenho dinâmico [1]. Por isto, dentre os diversos métodos de controle de corrente disponíveis na literatura, alguns métodos que sejam possíveis de serem totalmente implementados digitalmente serão selecionados como base de estudo deste projeto. Nestes métodos selecionados serão realizadas análises mais aprofundadas e também serão comparados seus desempenhos através de simulações e experimentos práticos.

Em Outubro de 1998 a *Industrial Electronics Society* do IEEE lançou uma edição especial sobre controladores de corrente com utilização de conversores PWM. Nesta edição havia diversos artigos tratando sobre variados métodos de controle de corrente. Desta edição foram selecionados alguns artigos [1]-[3] como principais fontes de informação para o estudo deste projeto. Dentre os artigos desta seção, o primeiro [1] apresenta uma pesquisa sobre as diversas técnicas de controle de corrente, com um resumo dos diversos métodos disponíveis na literatura, além da explicação dos principais conceitos utilizados, vantagens, métodos de análise de desempenho, dentre outros. Além disto, um dos métodos de controle de corrente analisados neste projeto será baseado em um outro artigo desta mesma edição [2].

Em outro artigo [4], também do IEEE, são apresentadas as principais teorias e definições utilizadas em controladores de corrente, como espaço vetorial, vetores de chaveamento e critérios de desempenho, além de também apresentar um resumo de diversas técnicas de controle de corrente.

Apesar destes artigos apresentarem as teorias de diversos métodos de controle de corrente e também resultados práticos da implementação destes métodos em simulações e aplicações práticas, as vantagens de cada um são explicadas individualmente, sem a comparação dos métodos entre si, pelo menos não através de simulações ou experimentos práticos. Como o objetivo destes artigos não era realizar uma comparação dos métodos entre si, mas sim apresentar um resumo destes, cada método foi tratado individualmente, realizando ensaios em cargas diferentes, logo, os resultados obtidos não podem ser correlacionados.

Neste trabalho deseja-se também apresentar um resumo da teoria sobre os diversos métodos de controle de corrente disponíveis na literatura, porém, selecionar alguns métodos para serem estudados de forma mais aprofundada, explicar seus cálculos e implementá-los em simulações e em experimentos, de forma a obter dados numéricos que tornem possível a realização de uma comparação dos métodos entre si. Destes resultados será possível realizar uma análise das vantagens e desvantagens de cada método, e principalmente, quando se deve utilizar cada um.

Como critério de seleção dos métodos a serem estudados, o principal requisito é que os métodos selecionados possam ser totalmente implementados digitalmente, pois se deseja utilizar um computador do tipo PC para exercer a função de controlador do circuito acionado. Além disto, se deseja que estes controladores funcionem independentemente da obtenção ou variação dos parâmetros da carga.

1.1 - Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é elaborar uma plataforma de estudo abordando alguns dos diversos métodos de controle de corrente disponíveis na literatura. Estes métodos selecionados deverão se adequar ao perfil de estudo deste trabalho, ou seja, serem possíveis de ser implementados com a bancada disponível no laboratório, descrita mais adiante. Serão apresentados os cálculos, a teoria e suas implementações em simulações e no acionamento do motor elétrico instalado na bancada. Com os resultados obtidos, será possível apresentar uma análise e comparação destes métodos entre si.

A bancada disponível no laboratório é constituída por um motor de indução trifásico, três medidores de corrente por “*Efeito Hall*”, um inversor de ponte completa, uma placa de envio e aquisição de dados conectada a um computador. No computador será utilizado o ambiente “*Real-Time Workshop*” do *Matlab/Simulink*, trabalhando em tempo real com o circuito da bancada. A placa de comunicação de dados é utilizada para enviar os seis sinais digitais de comando do inversor e também o recebimento dos três sinais de corrente da carga, estabelecendo a comunicação entre computador-circuito.

Com base nas referências descritas, no Capítulo 2 deste projeto serão apresentadas diversas técnicas de controle de corrente disponíveis. Para cada uma delas será descrito um breve resumo sobre seu funcionamento, vantagens e desvantagens. Porém, na conclusão deste capítulo serão selecionados como tema deste trabalho apenas alguns dos métodos que se adequem à bancada utilizada.

No Capítulo 3 serão apresentadas novamente explicações sobre as duas técnicas selecionadas, porém, com um aprofundamento maior nas suas teorias e cálculos necessários para o projeto de seus controladores. Além disto, será explicado o funcionamento do inversor

trifásico utilizado neste projeto para o acionamento da carga, além do conceito de espaço vetorial, apresentando suas vantagens e os cálculos necessários para realizar a mudança de coordenadas.

No Capítulo 4 estes controladores serão simulados em um aplicativo do *Matlab*, o *Simulink*. Com a conclusão das simulações, será verificado se os algoritmos de controle estão funcionando corretamente e também será estimado como o sistema irá se comportar com a implementação destes controladores. Como os testes foram realizados totalmente no computador, os ajustes dos controladores foram feitos nesta etapa sem o perigo de danificar qualquer dispositivo. Neste capítulo também serão apresentados os critérios de desempenho utilizados neste projeto para análise e comparação dos métodos. Através desta análise, será brevemente discutida a vantagem de cada método e o desempenho de cada um, de acordo com a variação dos parâmetros dos controladores.

No Capítulo 5 os controladores serão implementados no laboratório para o controle de uma carga trifásica. Os resultados obtidos serão novamente analisados através dos métodos descritos no Capítulo 4 e comparados aos resultados obtidos da simulação. Como apresentação de uma aplicação prática destes controladores, eles serão implementados no acionamento de um motor de indução trifásico. Novamente os resultados com a implementação destes métodos serão analisados e então apresentadas as vantagens e desvantagens da utilização de cada um neste acionamento.

No Capítulo 6 será feita a conclusão de todo projeto, apresentando uma análise dos resultados obtidos na simulação, na implementação em bancada e no acionamento do motor. Além disto, serão discutidas as vantagens da utilização de cada método, levando em consideração os critérios de desempenho dinâmico e os métodos de análise apresentados no Capítulo 3.

Capítulo 2 - Controladores de Corrente

Neste capítulo serão apresentados breves resumos sobre alguns dos diversos métodos de controle de corrente disponíveis na literatura. Porém, tendo em vista os objetivos deste trabalho, apresentados na seção 1.1, será dada maior ênfase aos métodos que se adequem à bancada utilizada. A apresentação dos diversos métodos foi inserida neste trabalho apenas para situar o leitor, permitindo contextualizar os métodos selecionados dentro do universo das diversas técnicas que existem descritas na literatura.

2.1 - Aspectos Gerais

Nas indústrias é comum a utilização de inversores de fonte de tensão por modulação de largura de pulso PWM (“*Pulse Width Modulation*”) para o acionamento de motores de indução trifásicos. Esta estratégia permite obter na carga um sinal de corrente praticamente senoidal, em uma frequência desejada. Um sinal PWM senoidal é obtido pela comparação, em tempo real, de uma referência senoidal da frequência desejada na carga, com um sinal (portadora) de onda triangular com uma frequência f_t , sendo esta a mesma frequência de chaveamento desejada dos semicondutores de potência. O resultado desta comparação é a geração dos sinais de comando das chaves dos inversores, controlando o liga/desliga destas chaves. Desta forma, será possível controlar o valor da tensão média na carga e também sua frequência. A implementação mais comum deste método de modulação é analógica, porém, há diversos algoritmos simples e eficientes que propõem sua implementação digitalmente [5].

Outros métodos, principalmente utilizados nos acionamentos de alto desempenho de motores de indução, são os baseados no método de controle vetorial. Estes métodos utilizam cálculos para realizar mudanças de coordenadas para um novo sistema de eixos, transformando os sinais de corrente do estator de um referencial trifásico para um novo par de eixos em quadratura. O controle das componentes de cada um destes eixos resulta em um controle direto do fluxo e torque do motor. Desta forma, torna-se muito mais eficiente o controle do acionamento do motor. Como estes tipos de controladores utilizam a corrente para controlar o

sistema, é necessária a implementação de uma malha de realimentação para o controle de corrente.

Tanto estes métodos, com transformação de coordenadas, quanto outros métodos que utilizam diretamente os sinais coletados do circuito, geram como saída do próprio controlador os sinais de comando das chaves semicondutoras do inversor, dispensando a necessidade de moduladores PWM. Estes sinais de comando são gerados através da comparação entre a referência e os sinais da carga, com a utilização de algoritmos de controle que podem variar desde o resultado de uma simples comparação, até a otimização do controlador.

Inicialmente, os controladores de corrente com comparadores por histerese tiveram uma maior utilização no acionamento de máquinas, uma vez que os controladores baseados na modulação PWM eram de alta complexidade de implementação. Desta forma, as técnicas baseadas em modulação PWM não tiveram pesquisa suficiente, e por consequência, não alcançaram grande desenvolvimento [5].

Com a evolução da tecnologia dos semicondutores de potência, os diversos métodos que anteriormente eram de difícil implementação se tornaram mais viáveis. Ocorreram diversas mudanças nas pesquisas para acionamentos de máquinas elétricas. Com esta evolução, a complexidade do acionamento de máquinas não estava mais na implementação, mas sim no desenvolvimento de inovadoras técnicas de controle baseadas em programação em tempo real.

Os reguladores por modulação PWM também foram incentivados com o desenvolvimento da tecnologia de processadores digitais, que então conseguiam trabalhar com altas frequências de operação. Com isto, foi possível substituir os reguladores com comparadores por banda pela modulação vetorial *PWM* nos controladores de corrente, sendo teoricamente possível utilizar infinitos vetores de tensão aplicados à carga, ao invés dos oito vetores fundamentais do controlador com comparadores.

O modelo básico de um controlador de corrente para uma carga trifásica a três fios está representado na Figura 2.1. Neste tipo de controlador há basicamente os seguintes componentes:

- **Inversor:** utilizado para acionamento do circuito. A combinação de suas chaves irá determinar o vetor de tensão que será aplicado à carga.
- **Fonte de corrente contínua V_{DC} :** nos inversores de ponte completa, conforme Figura 4.2, o sinal de entrada é em corrente contínua, geralmente proveniente da retificação da rede elétrica. A variação dos estados das chaves do inversor é que irá determinar o vetor de tensão que será aplicado à carga
- **Controlador:** realiza os cálculos da malha de controle do sistema, gerando em sua saída os sinais de comando do inversor. Na saída do controlador podem ser fornecidos três sinais de controle das chaves do inversor (S_A, S_B, S_C) ou um sinal de entrada para um modulador *PWM*.
- **Corrente na carga:** por meio de medidores de corrente, por *Efeito Hall* por exemplo, são coletados os sinais de corrente na carga e enviados ao controlador para serem comparados ao sinal de referência.
- **Sinal de referência:** Sinal que se deseja na carga. O controlador irá determinar o vetor de tensão que deve ser aplicado na sua saída de forma a tentar reduzir a zero o erro de corrente entre a referência e o sinal medido.

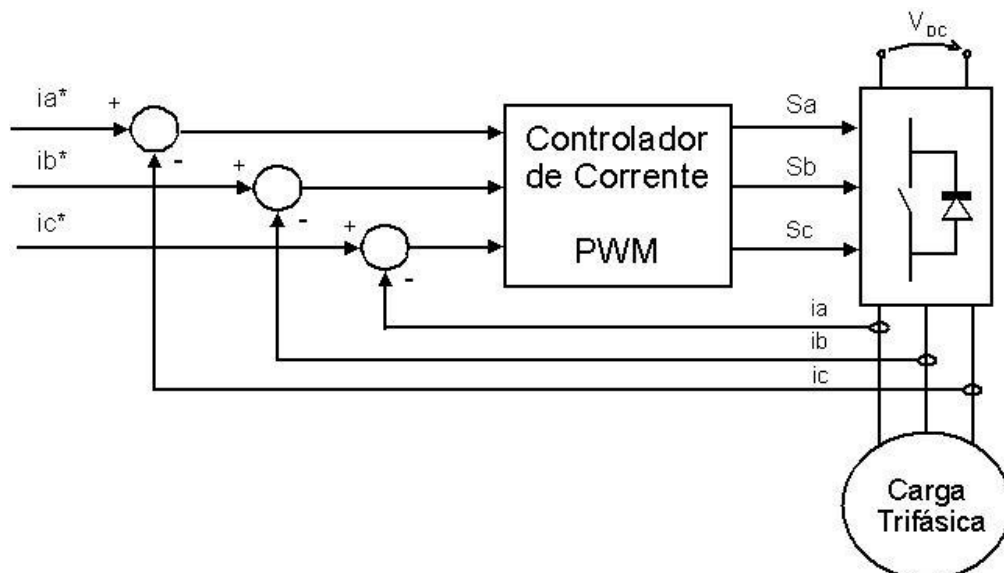


Figura 2.1 - Modelo de controlador para carga trifásica a três fios.

Os métodos de controle de corrente podem ser divididos de diversas formas. Neste trabalho eles serão divididos em dois grupos: controles lineares e não-lineares. O primeiro inclui o método proporcional integral (PI) estacionário e síncrono, controladores com realimentação de estados, preditivo e “*deadbeat*”. O segundo é formado pelos controladores com comparadores por banda, com otimização e os baseados em rede neural e lógica “*Fuzzy*”.

Nos próximos itens serão apresentados breves resumos sobre alguns destes métodos, com a explicação sobre o funcionamento de seus algoritmos de controle, principais vantagens e desvantagens. Na conclusão deste capítulo será apresentada a proposta deste projeto, selecionando alguns destes métodos como base de estudo deste projeto. Nos capítulos seguintes estes métodos serão analisados de forma mais aprofundada e implementados tanto em simulação, quanto experimentalmente no laboratório.

2.2 - Controladores Lineares

Os controladores lineares operam com moduladores de tensão convencionais do tipo *PWM*. Ao contrário dos controladores não-lineares, os lineares separam claramente a compensação do erro de corrente e a modulação de tensão [1]. Desta forma, é possível explorar as principais vantagens dos moduladores em malha aberta como: frequência constante de chaveamento, espectro de harmônicos bem definido e a possibilidade de otimizar o padrão de chaveamento e a utilização do *link* em corrente contínua. Nestes tipos de controladores, há a vantagem de poderem ser realizados independentemente o projeto da malha de controle e os testes em malha aberta do inversor e da carga.

Em geral, devido à utilização de moduladores do tipo *PWM*, os controladores lineares possuem um espectro de harmônicos bem definidos, porém, suas propriedades dinâmicas são inferiores aos controladores baseados em comparadores de dois níveis [5].

2.2.1 Controlador PI Estacionário e Síncrono

O controlador estacionário, também chamado de controlador de corrente por comparação em rampa (*“the ramp comparison current controller”*) [1], utiliza três compensadores de erro do tipo *PI* para produzir os sinais de comando das três fases, separadamente.

A comparação entre os três sinais de saída dos controladores *PI* com o da portadora triangular, gera os sinais de comando das três chaves S_A , S_B e S_C . A parte integral do compensador minimiza o erro em baixas frequências, enquanto o ganho proporcional e o posicionamento do zero influenciam na ondulação (*“ripple”*) do sinal.

A principal dificuldade deste método é conseguir o correto rastreamento entre os sinais das correntes de referência e os das correntes reais. Para solucionar este problema é comum a implementação de circuitos *PLL* (*“Phase Locked Loop”*), muito utilizados para o sincronismo de sinais.

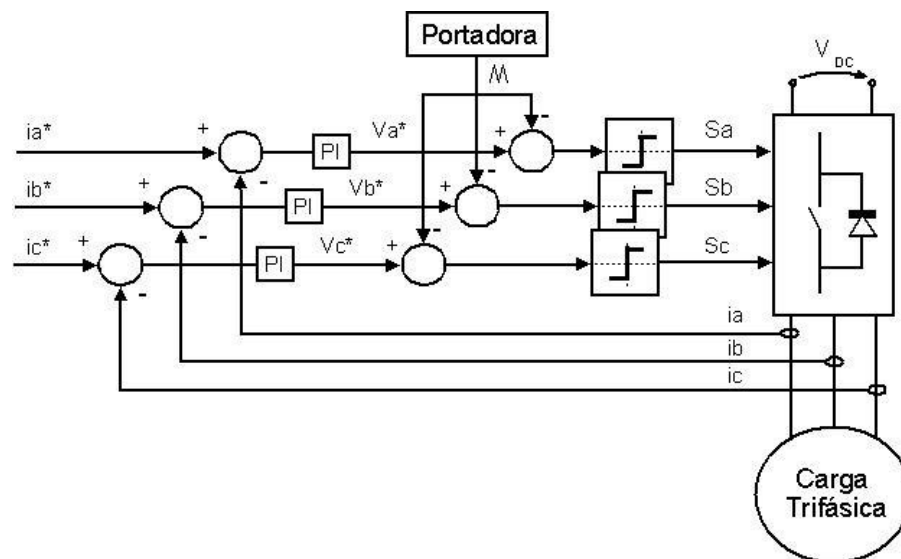


Figura 2.2 - Controlador estacionário PI.

Há outro tipo de controlador *PI*, o síncrono, que utiliza dois compensadores *PI*, ao invés de três como no estacionário, com componentes vetoriais definidas no sistema de referência rotatório,

girando na velocidade síncrona (eixos d - q). Devido à transformação de coordenadas, os compensadores PI irão atuar reduzindo o erro da componente fundamental a zero.

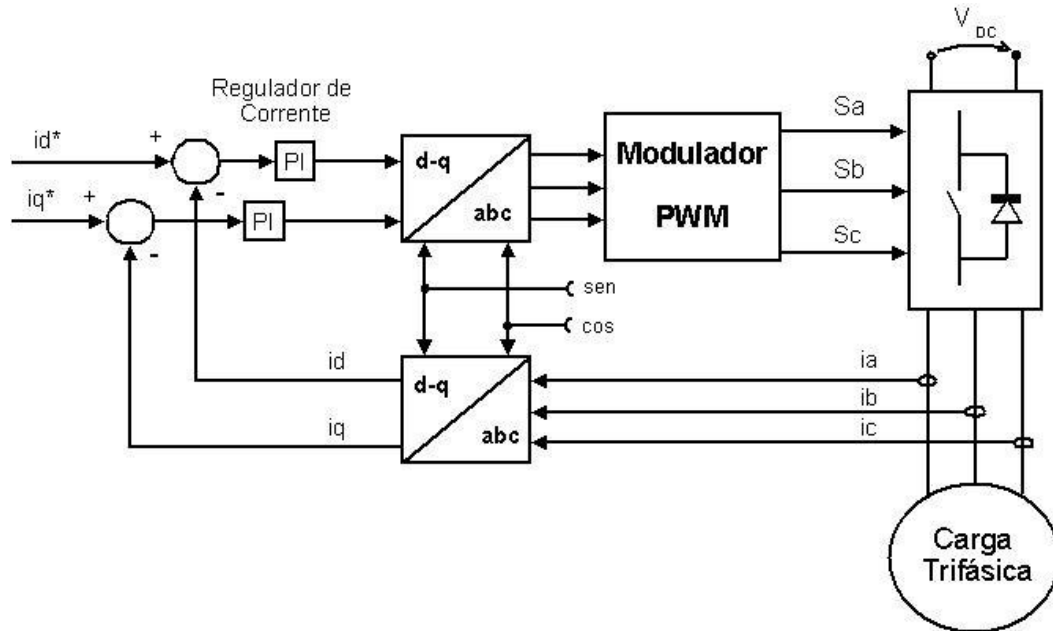


Figura 2.3 - Controlador PI síncrono.

2.2.2 Controladores com Realimentação de Estados

Neste tipo de controle os reguladores convencionais PI podem ser substituídos pelo controlador de realimentação de estados trabalhando em coordenadas estacionária ($\alpha\beta$) ou síncrona (d - q).

O controlador da Figura 2.4 trabalha com o eixo de coordenadas d - q e é desenvolvido com base na teoria de realimentação de estados multi-variável. Uma matriz de ganho $\underline{K} = \begin{bmatrix} \underline{K}_1 & \underline{K}_2 \end{bmatrix}$ é projetada pelo método de alocação de pólos de forma a garantir o sobrepasso especificado em projeto.

Com a variação da parte integral \underline{K}_2 pode-se reduzir a zero o erro do sistema em regime permanente, porém, provoca um grande aumento do erro durante o transitório. Para reduzir este erro são adicionados ganhos \underline{K}_f para o sinal de referência e \underline{K}_d para a perturbação.

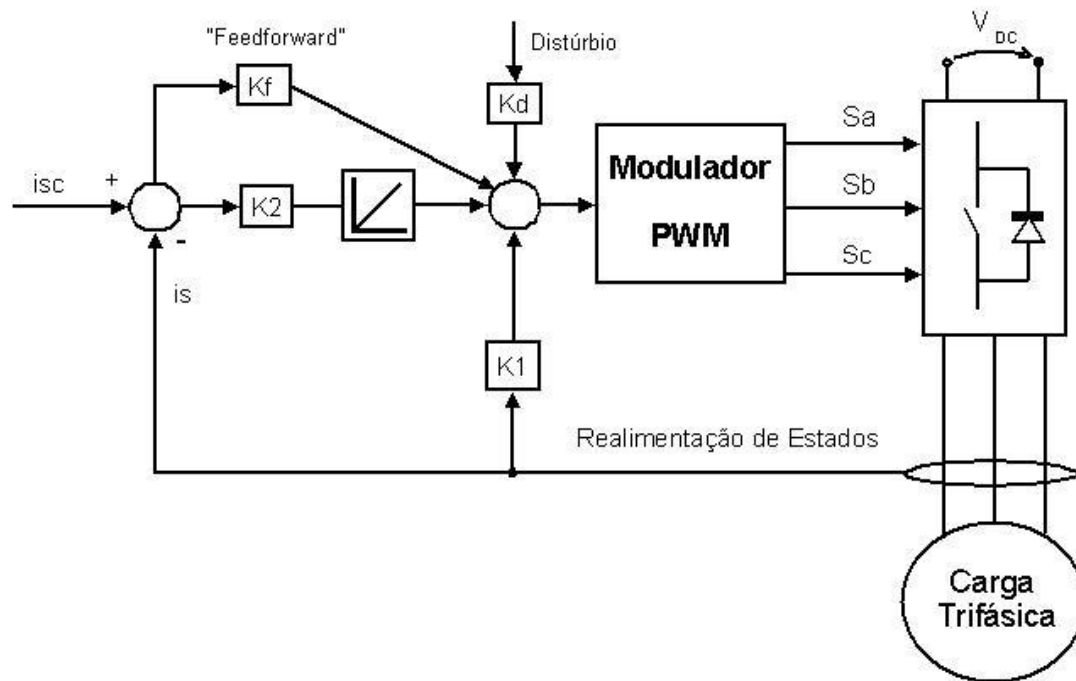


Figura 2.4 - Controlador com realimentação de estados.

A resposta deste tipo de controlador é superior aos controladores PI convencionais, uma vez que o algoritmo de controle garante dinamicamente a correta compensação da força eletromotriz [1].

2.2.3 Controladores Preditivos e “DeadBeat”

Esta classe de controladores preditivos estima no início de cada período de amostragem o erro de corrente que ocorreria neste intervalo, baseado no modelo da carga controlada e do erro atual. O controlador irá analisar estas informações e determinar um vetor de tensão, gerado pelo modulador PWM, de forma a minimizar o erro da corrente neste intervalo.

Ou seja, o controlador preditivo (Figura 2.5) calcula o vetor de comando de tensão u_{SC} a cada período de amostragem de forma a tentar manter o sinal de corrente na carga igual ao de referência \hat{i} . O vetor de tensão calculado, u_{SC} , é então implementado no modulador PWM, podendo este ser baseado em espaço vetorial ou senoidal.

Uma desvantagem deste tipo de controlador é que ele não garante proteção de sobrecorrente na carga, uma vez que a frequência de chaveamento é constante, porém, a ondulação (*ripple*) de corrente na carga é variável.

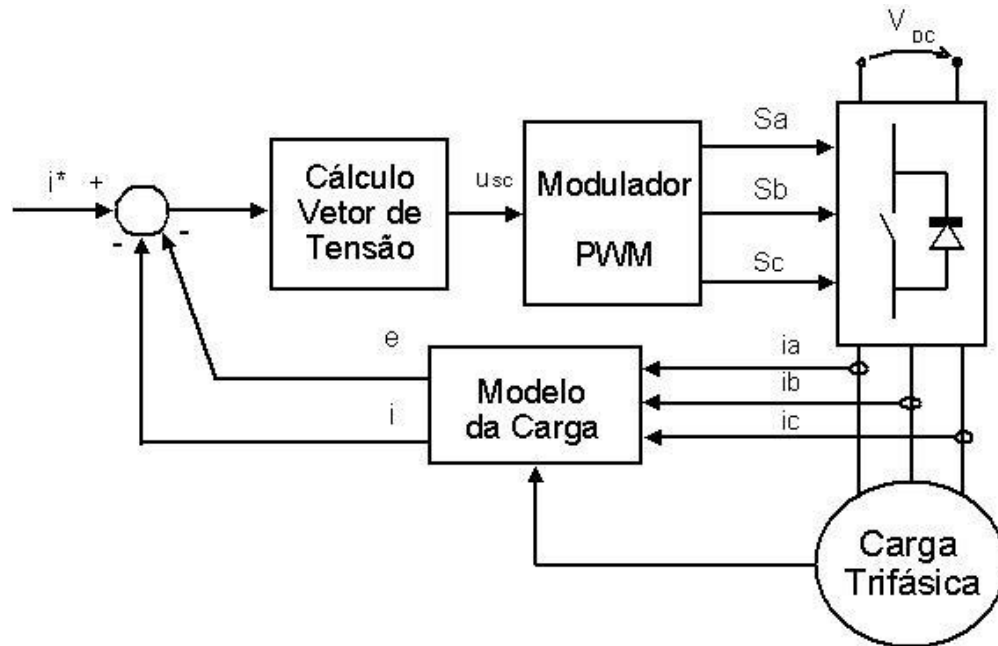


Figura 2.5 - Controlador de corrente preditivo.

Os controladores do tipo “*deadbeat*” são parecidos com os do tipo preditivo, porém, a escolha do vetor de tensão u_{sc} é determinada de forma a eliminar o erro de corrente no fim do período de amostragem. Para a correta implementação deste método são necessárias algumas informações adicionais, de acordo com o tipo de carga a ser controlada, como por exemplo no caso de acionamento de motores de indução: fluxo e velocidade. A determinação destes parâmetros requer a implementação de observadores de estados.

2.3- Controladores Não-Lineares

A maioria dos controladores não-lineares, ao contrário dos lineares, não possui um espectro harmônico bem definido, chaveando de acordo com o erro de corrente na carga. Esta é a principal desvantagem destes tipos de controladores, podendo variar a frequência de chaveamento desde valores baixos até o limite do inversor, dependendo da dinâmica da carga.

Apesar disto, estes tipos de controladores são bastante utilizados devido ao seu ótimo desempenho dinâmico e proteção contra picos de corrente.

Dentre os controladores não-lineares, os que serão mais enfatizados neste trabalho são os baseados em comparadores de dois e três níveis. Estes controladores são robustos, de fácil implementação, independentes da carga e têm ótimos resultados dinâmicos, especialmente no controle de motores de indução. Também serão apresentados métodos baseados em rede neural, lógica “fuzzy” e com otimização.

2.3.1 Controladores com Comparadores de Histerese

As principais vantagens dos controladores de corrente utilizando comparadores de histerese são a simplicidade de implementação, robustez, independência da variação dos parâmetros da carga e ótimo desempenho dinâmico, limitado apenas pela frequência de chaveamento e a constante de tempo da carga.

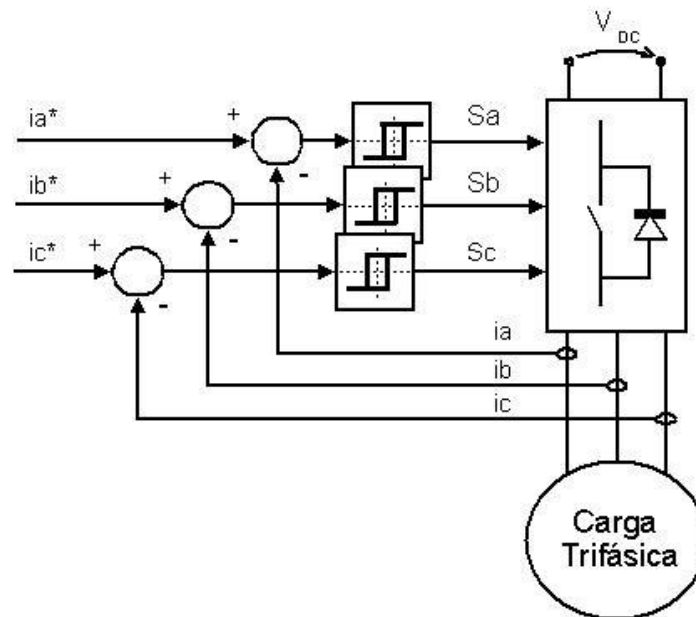


Figura 2.6 - Controlador com comparadores de histerese.

Seu algoritmo de controle é formado por três controladores independentes, onde cada um deles é responsável pelo comando de uma perna do inversor. A realimentação da malha de controle é

através dos sinais de corrente de corrente na carga. Estes sinais coletados são comparados aos de referência. Os sinais de chaveamento S_A, S_B, S_C são gerados diretamente da saída do comparador, variando seu estados quando o sinal de erro da corrente exceder o valor de banda designada para o comparador.

Apesar das diversas vantagens deste método, uma das principais desvantagens é que a frequência de chaveamento depende dos parâmetros da carga e varia de acordo com a tensão da fonte. Além disto, este método não emprega nenhuma estratégia de chaveamento do vetor de tensão zero¹, logo, é esperado que nos sistemas comandados por estes controladores ocorra uma quantidade maior de chaveamentos por unidade de tempo.

Como explicado anteriormente, estes tipos de controladores apresentam uma ótima resposta dinâmica, porém, devido à variação da frequência de chaveamento os seus resultados não têm um espectro harmônico bem definido. Há algumas propostas para eliminar este problema através da variação da banda de tolerância dos comparadores, durante a execução do controle, de acordo com a tensão na carga de forma a tentar manter a frequência de chaveamento constante. Contudo, a principal característica dos controladores por histerese, que é a simplicidade de implementação, é perdida neste tipo de controlador com frequência de chaveamento constante, uma vez que sua implementação é muito mais complexa do que a de frequência variável. A utilização destes controladores é recomendada apenas para aplicações de alta velocidade e alto desempenho.

2.3.2 Controladores com Comparadores de Banda

Estes tipos de controladores têm praticamente a mesma malha de controle dos controladores com utilização de comparadores de histerese. A única diferença é o funcionamento de seus comparadores, onde os que atuam por banda apresentam em sua saída o resultado da comparação direta entre o sinal realimentado e o de referência, enquanto os de histerese dependem do sentido de variação do erro, precisando ultrapassar valores distintos conforme o erro esteja crescendo ou decrescendo, para que a saída de seu comparador mude de estado.

¹ Adiante será apresentado o modelo vetorial, que descreve a operação de um inversor. Nesse modelo, as possíveis combinações de estados das chaves (condução e bloqueio) são associadas a vetores de tensão, entre os quais o referido vetor zero, que corresponde à tensão nula nos terminais da carga.

O método mais simples que se encaixa neste tipo de controladores é o controlador do tipo “bang-bang”, onde sua malha de controle é constituída por três controladores independentes, analisando em cada um deles o sinal de corrente em cada fase. A saída de cada comparador pode assumir dois valores, de acordo com o erro entre o sinal de referência e o sinal de corrente na carga, onde a saída de seus comparadores irá comandar as chaves correspondentes à fase analisada. Na implementação digital destes controladores são utilizados tempos de amostragem constantes, porém, suas principais desvantagens são as mesma dos que utilizam comparadores por histerese, frequência de chaveamento variável e a falta de implementação de técnicas para redução do número de chaveamentos.

É desejável no acionamento de motores e no controle de corrente de cargas elétricas que o erro instantâneo seja reduzido a zero. Porém, nos controladores de corrente com comparadores de histerese e também com os de banda, este erro da corrente costuma atingir altos valores devido à interação do sistema com os três controladores independentes. Como o sistema a ser estudado neste projeto é a três fios, a variação do estado do comparador em uma fase influencia o sinal nas outras duas fases, gerando um desbalanço do sistema.

Esta interação entre as três fases poderia ser compensada caso o erro das correntes fosse analisado como um só, em um espaço vetorial. Além disto, se ao invés de utilizar comparadores de dois níveis fossem utilizados comparadores de três níveis, com uma tabela de chaveamento, seria possível reduzir consideravelmente o chaveamento do inversor. Esta redução é possível devido à escolha do vetor de tensão zero no inversor. Com base nesta implementação em espaço vetorial, foram desenvolvidas diversas teorias para projeto de controladores.

2.3.3 Controladores com Otimização

Estes tipos de controladores realizam em tempo real diversos algoritmos para otimização de seus parâmetros, necessitando da realização de complexos cálculos durante sua execução, que normalmente só podem ser implementados com microprocessadores de elevado desempenho [1].

Um dos tipos de controladores com otimização é o de mínima frequência de chaveamento, cujo algoritmo é baseado em espaço vetorial com a utilização de comparadores por banda. No caso de três controladores independentes, trabalhando com bandas de tolerância iguais ($\pm h$) para as três fases, é formado um hexágono (Figura 2.7) simétrico no eixo de coordenadas $\alpha\beta$ ao redor do seu centro, o vetor de corrente de referência. Quando o vetor de corrente na carga atinge um dos extremos deste hexágono, há sete trajetórias possíveis que o algoritmo pode prever, seis ativas e uma do vetor de tensão zero. O algoritmo irá analisar as informações e selecionar como saída do inversor o vetor de tensão de forma a minimizar a frequência média de chaveamento.

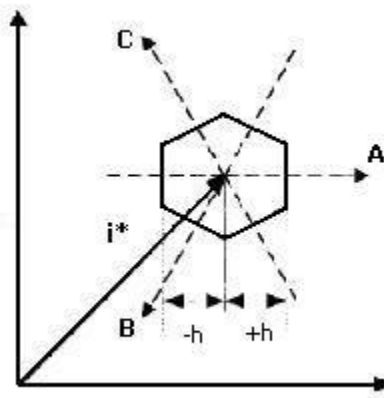


Figura 2.7 - Hexágono de trajetória da corrente.

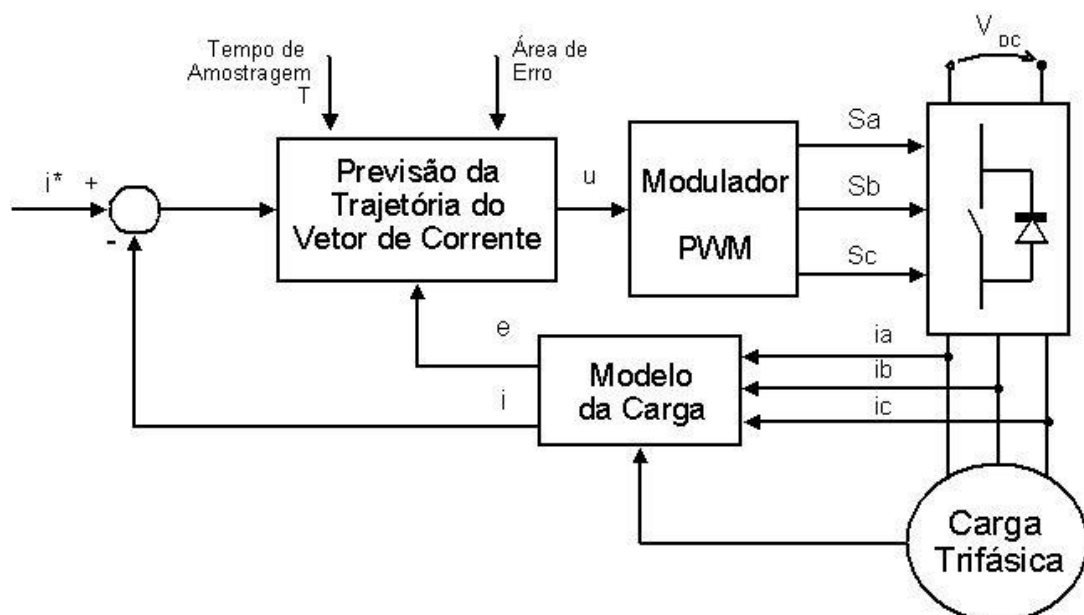


Figura 2.8 - Controlador preditivo com mínima frequência de chaveamento.

O controlador de corrente preditivo de mínima frequência trabalha com frequência variável, cujo algoritmo calcula o próximo vetor de tensão de forma a manter o máximo de tempo possível o erro dentro da área de erro definida. Por esta característica este controlador é considerado também um método otimizado.

2.3.4 Controladores com Redes Neurais e Lógica “Fuzzy”

Recentemente, novas tecnologias baseadas nos métodos de redes neurais e lógica “fuzzy” têm sido implementadas em controladores de corrente utilizando modulação PWM. As principais vantagens da rede neural são o processamento paralelo, habilidade de aprendizagem, robustez e generalização. Eles podem ser satisfatoriamente utilizados em controladores de corrente, podendo substituir os diversos tipos de controladores, tanto lineares como os não-lineares.

Um exemplo de utilização de um controlador baseado neste método é apresentado em [1]. Este controlador é projetado para ter o mesmo funcionamento que um com otimização *on-line*. Após o treinamento da rede neural, utilizando algoritmos próprios, este controlador pode substituir o de otimização. Desta forma, não há mais necessidade da realização dos complexos cálculos *on-line* do controlador otimizado.

Em aplicações básicas, os reguladores baseados em lógica “fuzzy” são utilizados como substitutos aos controladores com compensadores do tipo *PI*. Quando se utiliza lógica “fuzzy” em controladores de corrente, o erro de rastreamento e os picos de corrente do controlador PWM podem ser consideravelmente reduzidos, uma vez que os ganhos do controlador podem ser ajustados segundo uma superfície arbitrária, de forma a ter uma sensibilidade adequada para cada ponto de operação da carga. Porém, o ajuste da superfície de controle não é trivial. Na Figura 2.9 é apresentado um exemplo de comparação da superfície de controle do controlador *PI* e o baseado em lógica “fuzzy”.

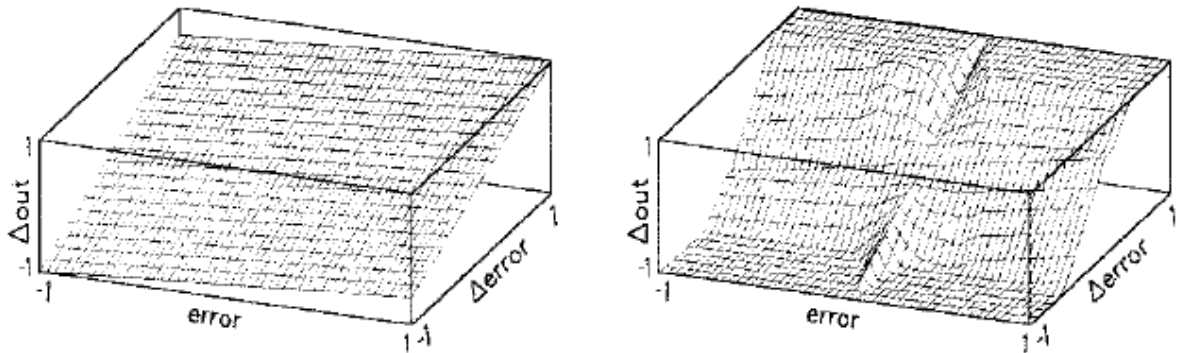


Figura 2.9 - Superfície de controle do controlador PI e controlador baseado em lógica "fuzzy"[1].

2.4 - Proposta do Projeto

Os objetivos principais deste trabalho são a análise, estudo e implementação de métodos de controle de corrente que possam servir a finalidades práticas específicas deste projeto, que são:

- a realização do controle de corrente de forma digital direta, utilizando um computador PC, sem utilizar um modulador PWM;
- que a técnica de controle implementada funcione no acionamento de uma carga trifásica indutiva, independente da identificação e variação dos parâmetros da carga.

Os controladores assim desenvolvidos serão assim empregados como ferramenta didática, em disciplinas de Engenharia Elétrica da UFRJ, bem como em atividades de pesquisa, utilizando um ambiente de controle em tempo real (*Real-Time Windows Target*) do *Matlab/Simulink*.

Dentre os diversos métodos apresentados neste capítulo, serão selecionados apenas alguns como fonte de estudo para este projeto. Os métodos selecionados devem atender às premissas apresentadas no parágrafo anterior. Os resultados obtidos destes métodos serão comparados entre si através de simulações e implementações.

Uma análise mais aprofundada dos métodos selecionados será feita no próximo capítulo. Também serão realizadas simulações, com auxílio do aplicativo *Simulink*, contido no programa *MatLab*. A implementação será realizada no laboratório, controlando a corrente em um circuito

trifásico e executando o controle em tempo real através do computador, com auxílio do programa *Simulink* e de placas de aquisição e envio de dados. Como exemplificação de uma aplicação prática para estes controladores, os métodos selecionados também serão implementados no controle de uma máquina de indução trifásica.

Como os controladores lineares utilizam moduladores *PWM*, estes métodos foram descartados do estudo, uma vez que se deseja utilizar o ambiente *PC/Simulink* para controlar diretamente o conversor, e não é possível realizar modulação PWM em tempo real neste ambiente.

Dentre os controladores não-lineares, os controladores de frequência constante com utilização de comparadores de histerese, assim como os baseados em rede neural e lógica “fuzzy”, também foram descartados do estudo, uma vez que sua implementação digital é muito complexa e só é recomendada para acionamento de alto desempenho, não se encaixando no objetivo de estudo deste trabalho. Os controladores com otimização, assim como no caso dos lineares, precisam de informações dos parâmetros da carga para funcionar corretamente, não atendendo novamente aos objetivos deste trabalho.

Logo, os métodos de controle de corrente a serem estudados serão os não-lineares, com a utilização de comparadores de dois níveis, “bang-bang”, e os controladores baseados no espaço vetorial com comparadores de três níveis e implementação de tabela de chaveamento. Estes métodos, especialmente o “bang-bang”, possuem uma implementação simplificada, comparada aos métodos com otimização, por exemplo, e além disto apresentam ótimos resultados dinâmicos e funcionam independentemente da variação da carga, contanto que o sistema suporte às variações instantâneas de corrente (di/dt) demandadas pela carga. No próximo capítulo as teorias destes métodos selecionados serão analisadas de forma mais aprofundada.

Capítulo 3 - Teoria

No capítulo anterior foram apresentados resumos das principais técnicas de controle de corrente para cargas trifásicas. Dentre estas, foram selecionados os controladores baseados em comparadores de banda como tema de estudo deste projeto.

O objetivo deste capítulo é apresentar os princípios de funcionamento dos controladores de corrente selecionados como tema de estudo deste projeto, explicando as lógicas de controle utilizadas e os fundamentos necessários para o entendimento delas. Na seção 3.1 será apresentada uma breve explicação sobre o inversor utilizado e também sobre os oito vetores de chaveamento, sendo seu entendimento essencial para a compreensão das teorias apresentadas ao longo do trabalho. Nos itens 3.3 e 3.2 serão explicados novamente os métodos de controle selecionados, apresentando de forma mais aprofundada a teoria necessária para o entendimento destes métodos e os cálculos realizados para o projeto dos controladores.

3.1 - Inversor

Técnicas de chaveamento são largamente utilizadas em inversores de potência para o controle de corrente de sistemas trifásicos. Cada chave de um inversor pode assumir apenas dois estados, condução e bloqueio, de modo que sinais binários (digitais) podem ser usados para realizar o comando das chaves do inversor. Por extensão, os estados de chaveamento do inversor, como um todo, também podem ser descritos por combinações de valores binários.

A Figura 3.1 mostra o diagrama esquemático do inversor utilizado na bancada, onde V_{an}, V_{bn}, V_{cn} representam as tensões fornecidas nos terminais do motor, ligado em Y a três fios. A alimentação em corrente contínua do inversor (barramento CC) é apresentada como V_{dc} , porém, para simplificar a análise, a tensão de alimentação é considerada dividida ao meio e o ponto central é considerado como referência, de forma a obter $V_{dc}/2$ nos terminais negativo e positivo do inversor. As letras A,B,C indicam as três fases do motor e serão denominados de S_A, S_B, S_C os estados das chaves nos respectivos ramos do inversor. As chaves tripolares

mostradas nesta figura funcionam na forma contínua, podendo estar em dois estados, sendo tipicamente implementadas na prática por um par de dispositivos semicondutores de potência, conectados em meia-ponte, operando alternadamente e de forma mutuamente exclusiva entre os modos de condução e bloqueio, sob comando de sinais digitais.

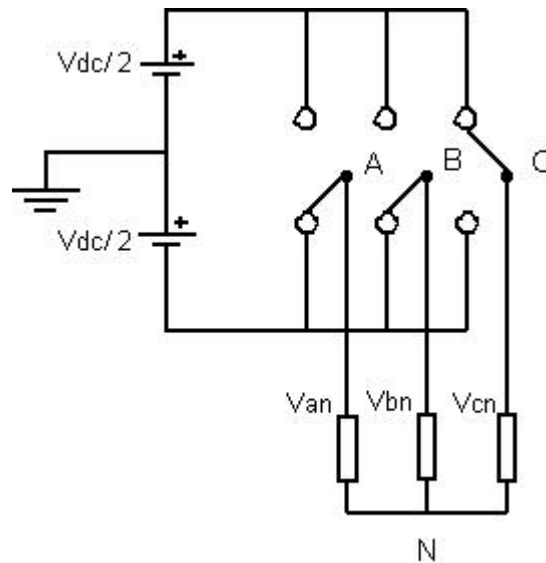


Figura 3.1 - Diagrama conceitual do inversor alimentando o motor de indução

Como pode ser visto na Figura 3.1, as chaves das três fases podem estar em dois estados distintos independentemente, comutando na saída um sinal de tensão positivo ou negativo com relação ao ponto médio do barramento CC. Como explicado anteriormente, os sinais de comando do inversor são representados digitalmente, na forma de trens de pulsos que podem assumir apenas os valores um e zero. A amplitude de cada pulso e o intervalo de tempo que ele permanece neste estado, determinam qual estado a chave deve assumir e por quanto tempo ela deve permanecer neste estado.

Como referência neste trabalho, será determinado que a chave está fornecendo um sinal positivo de tensão nos seus terminais de saída quando seu estado é igual a 1, e quando está com estado igual a zero, está fornecendo um sinal negativo. Desta forma, é possível obter oito possíveis combinações de chaveamento. Estas combinações estão apresentadas na Figura 3.2 como os oito vetores de estado $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7, V_8$.

Por exemplo, o estado de chaveamento $V_4(1,0,0)$ implica que o inversor está fornecendo uma tensão positiva no seu terminal A e um sinal negativo nos terminais B e C,

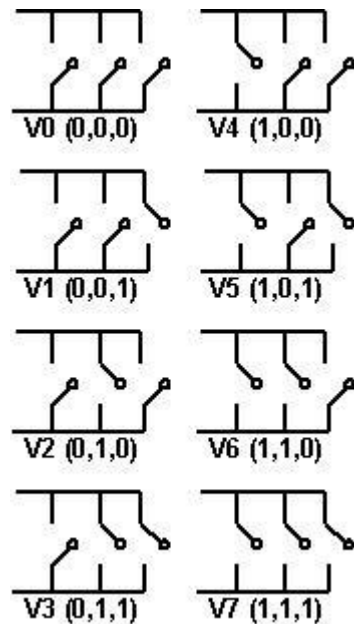


Figura 3.2 - Possíveis combinações dos estados das chaves do inversor.

3.2 - Controlador de Corrente “Bang-Bang”

O método de controle do tipo “bang-bang” é um dos métodos com implementação mais simplificada. O diagrama esquemático de seu controle está apresentado na Figura 2.6. Ele se encaixa no grupo dos controladores não-lineares, sendo constituído por três controladores independentes, um para cada fase, que comparam os sinais de corrente na carga aos sinais de referência. O resultado desta comparação produz os sinais *PWM* S_A, S_B, S_C de comando das chaves do inversor, de forma a forçar que a corrente na carga siga o sinal de referência.

Apesar de ser um método simples de se implementar, ele é capaz de produzir boa resposta dinâmica. Esta vantagem ocorre principalmente devido à evolução dos dispositivos de potência que conseguem comutar cada vez mais em maiores frequências. Além disto, como já foi explicado anteriormente, este método funciona independente da identificação e variações dos parâmetro da carga. Todas estas vantagens tornam atrativa a implementação do controlador “bang-bang” em acionamentos que não exijam alto desempenho.

Seu algoritmo de controle é constituído por três comparadores independentes de dois níveis, um por fase. A lógica de controle consiste basicamente na comparação entre os sinais de corrente de referência, especificados no controlador, com os medidos do circuito controlado. Caso o sinal de saída deste comparador seja positivo, será comutada a chave do inversor responsável por esta fase para fornecer tensão positiva na carga, de forma a reduzir o erro de corrente. Caso seja negativo, a chave é comutada para fornecer tensão negativa.

Como a comutação das chaves do inversor depende do erro de corrente em cada intervalo de amostragem, caso a carga tenha uma constante de tempo pequena e/ou a tensão em corrente alternada do circuito controlado seja alta, haverá altos níveis de comutação neste acionamento em intervalos de tempo aleatórios. Esta é a principal desvantagem destes controladores, não possuírem um espectro harmônico bem definido devido ao fato de não terem uma frequência chaveamento constante.

Além disto, este controlador funciona como três sistemas de controle independentes, analisando a corrente em cada fase separadamente. Este desacoplamento na análise dos sinais da corrente gera um maior desbalanço no circuito, uma vez que apesar da correção do erro da corrente no circuito ser pela aplicação da tensão, o sistema é conectado a três fios e o controlador analisa independentemente o erro da corrente em cada fase, ou seja, ao reduzir o erro de corrente em uma fase, irá provocar o aumento em outra. Como apresentado na seção 3.3, uma solução para compensar este desbalanço é a utilização de um outro eixo de referência para analisar o erro das correntes, eixos $d-q$ ou $\alpha\beta$ por exemplo.

Existem diversos métodos para se reduzir o número de chaveamentos causados por este controlador, tentando analisar os três sinais de corrente em um mesmo sistema de eixos [2]-[4], como apresentados no Capítulo 2. Apesar destas desvantagens do método “*bang-bang*”, com a evolução dos dispositivos de potência os resultados deste controlador são excelentes, com boa resposta dinâmica, não podendo ser desconsiderado na análise e comparação de diferentes métodos de controle de corrente.

3.3 - Controlador de Corrente para Inversores de Potência Trifásicos

Em [2], é proposto um método para síntese de um controlador com realimentação de corrente de fácil implementação e com rápida resposta dinâmica, para trabalhar com inversores trifásicos comandados por sinais por largura de pulso. Neste controlador, a análise dos sinais das correntes é realizada em eixos de referência ortogonais, com a utilização de comparadores de três níveis e uma tabela de chaveamento. O funcionamento do controlador consiste basicamente na análise dos sinais de erro das correntes, selecionando na tabela de chaveamento o vetor de tensão que deve ser aplicado na saída do inversor de forma a minimizar o erro do sinal da corrente na carga. Além disto, este controlador também tem a vantagem de reduzir o número de chaveamentos, como apresentado na seção 2.3.1, devido à seleção do vetor de tensão zero.

Este método utiliza uma estratégia inovadora e simples para selecionar o vetor de tensão a ser aplicado na carga, trabalhando no sistema de referência $\alpha\beta$ e utilizando todos os oito possíveis vetores de tensão apresentados.

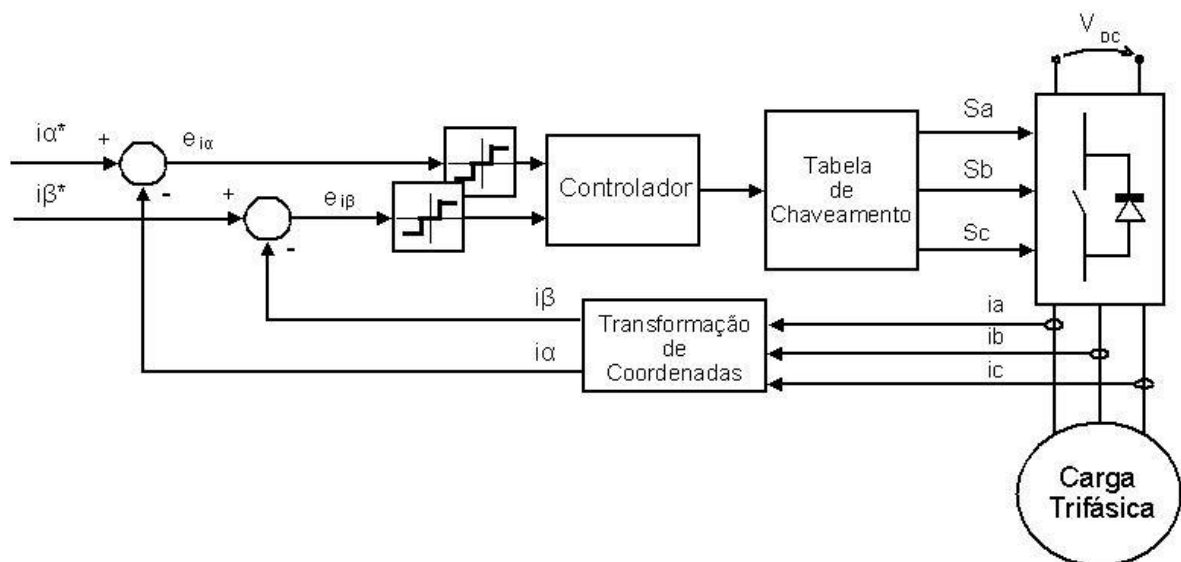


Figura 3.3 - Controlador com comparadores de três níveis com implementação de tabela de chaveamento.

Na Figura 3.3 é apresentado um modelo esquemático deste controlador. São especificados os sinais de corrente de referência (i_{α}^* , i_{β}^*) e também são coletados em tempo real, por sensores de corrente, os sinais de corrente na carga, sendo depois transformados para os eixos $\alpha\beta$ (i_{α} ,

i_β). São utilizados dois comparadores de três níveis, um para cada eixo de referência, que analisam os sinais de erro da corrente, e_{i_α} e e_{i_β} , e geram em sua saída um sinal de três estados que realimenta a malha do controlador.

$$e_{i_\alpha} = i_\alpha^* - i_\alpha \quad e_{i_\beta} = i_\beta^* - i_\beta$$

Equação 3.1 - Erros de corrente no sistema de referência $\alpha\beta$.

Quando o erro em um dos eixos for acima da banda positiva, o controlador deverá selecionar um vetor de chaveamento que forneça um sinal de tensão positivo neste eixo, de forma a tentar reduzir a zero este erro. Ação similar e inversa ocorre para o caso do erro ser abaixo da banda negativa. Quando o erro estiver entre as duas bandas, a princípio o sinal de tensão aplicado ao eixo analisado não faz diferença. Na seção 3.3.3 será apresentada uma vantagem deste controlador onde, mesmo nestes casos onde o erro do sinal da corrente é pequeno, o controlador utiliza este sinal para selecionar um vetor de tensão que não aumente o erro. Por isto, uma realimentação com os sinais de erro da corrente dos dois eixos foi implementada neste trabalho no modelo do controlador. O diagrama de blocos deste controlador está representado na com a utilização desta realimentação dos sinais do erro das correntes.

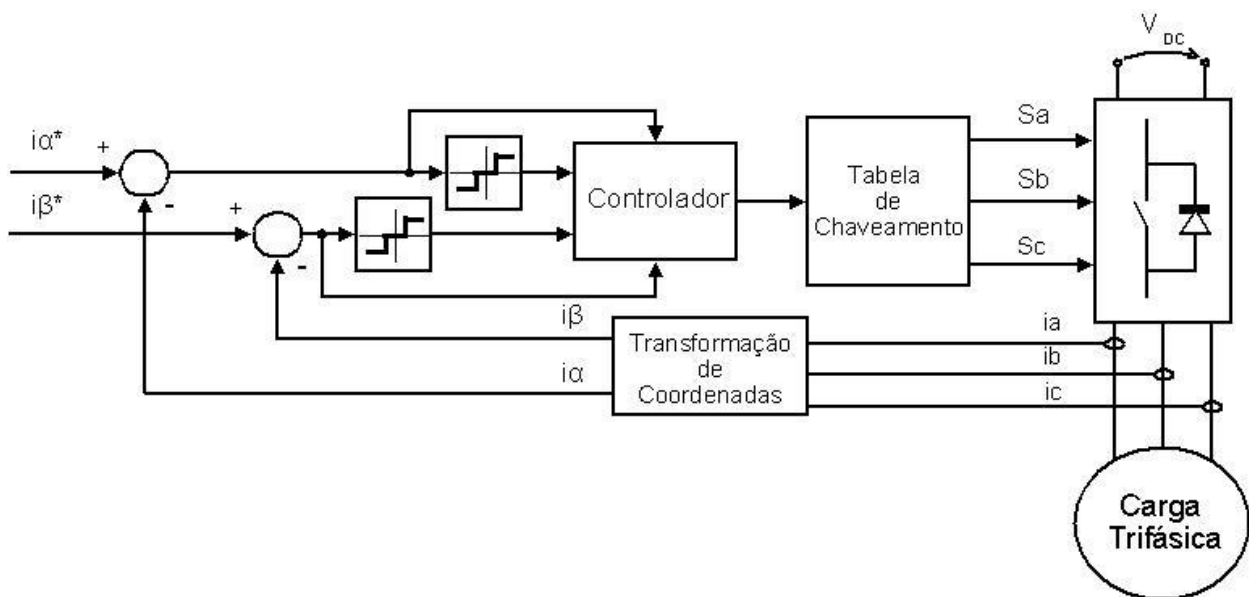


Figura 3.4 - Controlador com tabela de chaveamento e realimentação dos sinais de erro.

Apesar dos comparadores analisarem os sinais de erro em cada um dos eixos independentemente, a seleção do vetor de tensão é baseada no resultado dos dois comparadores, de forma a minimizar o erro da corrente em ambos os eixos, ao contrário do método ‘bang-bang’, onde as chaves semicondutoras responsáveis por cada fase são comandadas por sistemas de controle independentes.

Em [2] é apresentada a utilização deste controlador com o armazenamento da tabela de chaveamento em uma memória do tipo EPROM (*Electrically Programmable Read-Only Memory*). Porém, como neste trabalho o controlador será totalmente implementado digitalmente, utilizando um computador e placas de aquisição e envio de dados, foi utilizada a própria memória do computador para armazenar a tabela de chaveamento.

3.3.1 Mudança de coordenadas para o referencial $\alpha\beta$

Na análise de circuitos trifásicos, o controlador trabalha independentemente com três variáveis do circuito, como no caso do ‘bang-bang’, mas caso o circuito seja a três fios, como no caso deste projeto, a independência na análise destas variáveis pode causar um desbalanço do sistema. Apesar da atuação no circuito ser através da tensão, o controle é da corrente e o controlador desconsidera a interação entre estas. Uma solução para evitar este desbalanço é a utilização de transformadas de variáveis, acarretando em uma mudança de referencial. Desta forma, o controlador trabalha com duas variáveis, mas que representam os sinais das três fases referenciados a este novo eixo.

Estas transformadas são muito utilizadas no controle de máquinas elétricas, uma vez que cada um destes eixos tem uma relação direta com o fluxo e o torque da máquina. Como estas transformações não mantêm seus referenciais na mesma posição relativa, são consideradas transformadas não-lineares. Este novo referencial desloca-se em relação ao referencial original, muito vantajoso no acionamento de máquinas elétricas [6].

Há duas transformadas muito comumente utilizadas na análise de máquinas elétricas, a Transformada de *Park* (eixos $d-q$) e a Transformada de *Clarke* (eixos $\alpha\beta$). Os novos eixos de referência utilizados no controlador apresentado neste capítulo não serão mais os eixo a,b,c , de onde foram coletados os sinais de corrente da carga, mas sim os eixos $\alpha\beta$. Este sistema de

referência está em quadratura e é considerado por padrão que o eixo α está em fase com o eixo da fase a. Será utilizada a *Transformada de Clarke* (Equação 3.2) para converter as correntes do eixo de referência trifásico para o $\alpha\beta$.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Equação 3.2 - Transformada de Clarke.

No controlador também será necessário converter as correntes do eixo de referência $\alpha\beta$ para o eixo trifásico. Para isto, será utilizada a *Transformação Inversa de Clarke*.

3.3.2 Análise pelos Vetores de Chaveamento

Como o controle será realizado em um novo eixo de referência, apresentado no item anterior, a análise do erro do sinal da corrente e a seleção dos estados de chaveamento do inversor deverão ser referenciados a este novo eixo. Portanto, é necessário converter as oito possíveis combinações de chaveamento do inversor (Figura 3.2) para este novo sistema de referência.

Esta transformação pode ser realizada com base na análise das tensões originadas destes possíveis vetores, no circuito da Figura 3.1. Por exemplo, quando o inversor está chaveando o vetor V_1 da Figura 3.2, onde as fases A e B estão conectadas ao terminal negativo da fonte e a chave C ao terminal positivo, as diferenças de potencial entre as três fases são as seguintes:

- $V_{ab} = 0;$
- $V_{bc} = -V_{DC};$
- $V_{ca} = -V_{DC};$

Na Tabela 3.1 é apresentado o resultado da mesma análise realizada para o vetor de chaveamento V_1 aplicada aos outros sete vetores.

Tabela 3.1 - Tensão de linha do inversor para os oito vetores de chaveamento.

U_k	S_a	S_b	S_c	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
U_0	0	0	0	0	0	0
U_1	0	0	1	0	$-V_{DC}$	V_{DC}
U_2	0	1	0	$-V_{DC}$	V_{DC}	0
U_3	0	1	1	$-V_{DC}$	0	V_{DC}
U_4	1	0	0	V_{DC}	0	$-V_{DC}$
U_5	1	0	1	V_{DC}	$-V_{DC}$	0
U_6	1	1	0	0	V_{DC}	$-V_{DC}$
U_7	1	1	1	0	0	0

Porém, como apresentado na Equação 3.2, a *Transformada de Clarke* utiliza os valores de tensão de fase e não de linha. Desta forma, os valores apresentados na Tabela 3.1 deverão ser transformados para valores de fase.

Como o sistema a ser controlado é trifásico em Y a três fios, a soma das correntes deverá ser sempre igual a zero.

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

Equação 3.3 - Soma das correntes igual a zero.

Substituindo na Equação 3.3 os valores das correntes pela relação entre a tensão de fase e a impedância em cada fase, obtém-se a Equação 3.4.

$$\frac{V_{AN} + V_{BN} + V_{CN}}{Z} = 0$$

Equação 3.4 - Soma das correntes igual a zero, utilizando tensão e impedância.

Substituindo a Equação 3.4 na matriz de equações apresentadas na Equação 3.5 e utilizando métodos algébricos simples, obtém-se a matriz de transformação apresentada na Equação 3.6.

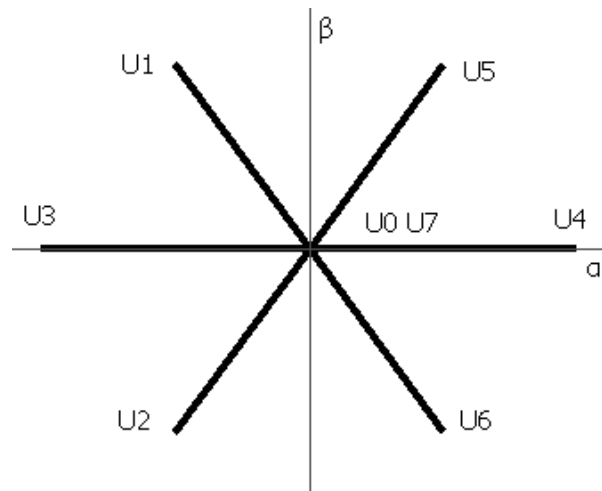


Figura 3.5 - Diagrama vetorial de tensão no eixo de referência $\alpha\beta$

3.3.3 Análise do Método de Controle

O objetivo do controlador é selecionar da tabela o vetor de chaveamento da Tabela 3.2 de forma a reduzir o erro do sinal de corrente na carga e também reduzir o número de chaveamentos. Neste controlador é utilizada uma lógica de comparação com dois comparadores de três níveis, onde cada um deles pode assumir na sua saída três valores distintos, de acordo com o valor do erro.

Em cada eixo os comparadores serão utilizados para verificar quando o erro do sinal está acima de um valor positivo determinado $+h$ (banda positiva), abaixo de um valor negativo também determinado $-h$ (banda negativa) ou entre estes dois limites, denominado banda de tolerância. Desta forma, o sinal de erro da corrente por eixo pode pertencer a três diferentes áreas: acima da banda positiva, abaixo da negativa e entre estes dois limites determinados, podendo assumir três valores na sua saída, -1 , 0 e 1 respectivamente.

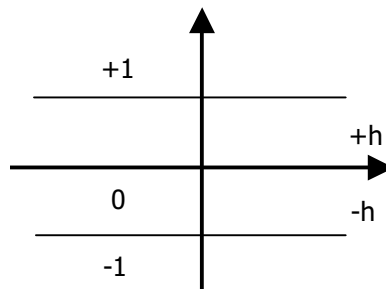


Figura 3.6 - Comparador de três níveis.

Como a saída do comparador de cada um dos eixos pode assumir três valores distintos e há dois eixos sendo analisados, há nove possíveis combinações dos valores de erro. Na Tabela 3.3 estão apresentadas as possíveis combinações nos eixos α e β . U_α e U_β representam os sinais de tensão, no novo eixo de referência, que devem ser aplicados de forma a reduzir o erro em cada um dos eixos. U_α e U_β podem assumir três valores distintos:

- **+** : Deverá ser selecionado um vetor que forneça tensão positiva no eixo indicado;
- **-** : Deverá ser selecionado um vetor que forneça tensão negativa no eixo indicado;
- **x** : Indiferente o sinal que será aplicado no eixo indicado;

Por exemplo, quando a saída do comparador indicar um erro da corrente em α igual a $+1$, acima da banda de comparação, e o erro em β igual a 0 , entre os limites das bandas de comparação, deverá ser escolhido um vetor de chaveamento que forneça um sinal positivo de tensão em α , ou seja, os vetores U_4 , U_5 ou U_6 apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.3 - Análise dos erros nos eixos $\alpha\beta$.

	Erro $_\alpha$	Erro $_\beta$	U_α	U_β	U_K
(i)	0	0	x	x	0,7
(ii)	0	1	x	+	1,5
(iii)	0	-1	x	-	2,6
(iv)	1	0	+	x	4,5,6
	1	1	+	+	5
	1	-1	+	-	6
(v)	-1	0	-	x	1,2,3
	-1	1	-	+	1
	-1	-1	-	-	2

Como pode ser visto na tabela acima, para algumas destas combinações há a possibilidade de se utilizar mais de um vetor de chaveamento. Nestes casos serão aplicadas lógicas de comparação para selecionar o melhor vetor de tensão, de forma a reduzir o erro de corrente e ao mesmo tempo evitar que a compensação do erro em um dos eixos não aumente o erro no outro.

Por exemplo, é analisado na Tabela 3.3 o caso onde a saída do comparador indica erro da corrente em α igual a zero e em β igual a 1. Nesta situação há dois possíveis vetores a serem selecionados: U_1 , e U_5 . Supondo que o vetor U_1 seja escolhido, pode ser visto na Tabela 3.2 que neste caso será aplicado um sinal negativo de tensão no eixo α , reduzindo o erro, e um positivo em β . No caso do vetor U_5 ser escolhido, será novamente aplicado um sinal negativo de tensão no eixo α e um sinal negativo em β . Porém, o valor igual a zero na saída do comparador em α não indica que o erro de corrente neste eixo é realmente igual a zero, somente que é pequeno, entre as duas bandas, podendo ser positivo, negativo ou de fato igual a zero. Caso ele seja positivo e seja aplicado o vetor U_1 , irá aumentar ainda mais o erro neste eixo. No caso contrário, sendo ele negativo, e seja aplicado o vetor U_5 , irá novamente aumentar o erro deste eixo. Em qualquer um destes dois casos, o controle irá desbalancear ainda mais o sistema.

Desta forma, pode ser visto que a utilização puramente de uma tabela de chaveamento não é suficiente para um controle satisfatório. Também se torna necessária a implementação de alguma lógica para selecionar a melhor combinação das chaves de forma a conseguir acompanhar o sinal de referência e também minimizar o desbalanço na carga.

Além disto, também há duas opções de chaveamento para o vetor de tensão zero, os vetores U_0 e U_7 . A utilização de qualquer um destes irá produzir o mesmo resultado na saída, porém, é possível reduzir o número de chaveamentos sabendo-se o estado atual das chaves do inversor, melhor explicado a seguir. Esta é uma das grandes vantagens deste tipo de controlador.

A lógica utilizada analisa os seguintes casos:

- **Caso (i)** - Quando ambos os comparadores são iguais a zero, será selecionado o vetor U_0 ou U_7 de acordo com o estado atual das chaves, reduzindo o número de chaveamentos. Caso o estado atual das chaves esteja com a maioria em baixa, vetores U_0 , U_1 , U_2 ou U_4 , utiliza-se o vetor U_0 . Caso contrário, vetores U_3 , U_5 , U_6 ou U_7 , utiliza-se o vetor U_7 ;
- **Caso (ii)** - Quando o erro em β for positivo, será selecionado o vetor U_5 quando o erro da corrente em α for positivo. No caso contrário, quando o erro em α for negativo, será selecionado o vetor U_1 ;

- **Caso (iii)** - Uma análise similar ao Caso (ii) pode ser feita a este caso, selecionando o vetor U_6 quando o erro da corrente em α for positivo. No caso contrário, quando o erro em α for negativo, será selecionado o vetor U_2 ;
- **Caso (iv)** - Neste caso, onde o erro em α é positivo, será selecionado o vetor U_5 ou U_6 quando o erro em β for positivo ou negativo, respectivamente. O vetor U_4 será selecionado quando o erro em β for desprezível (de acordo com as especificações de controle);
- **Caso (v)** - Neste caso, similar ao Caso (iv), onde o erro em α é negativo, será selecionado o vetor U_1 ou U_2 quando o erro em β for positivo ou negativo, respectivamente. O vetor U_3 será selecionado quando o erro em β for desprezível (de acordo com as especificações de controle);

Nos casos (iv) e (v) a amplitude de tensão aplicado ao eixo crítico α é de $0,41V_{DC}$ ($1/\sqrt{6} V_{DC}$), correspondentes aos vetores U_5 e U_6 para o caso (iv) e U_1 e U_2 para o caso (v). Esta amplitude é menor do que a amplitude de aproximadamente $0,82V_{DC}$ ($\sqrt{2/3} V_{DC}$), correspondente aos vetores U_3 e U_4 . Nas simulações realizadas, apresentadas na seção 4.2, e na análise experimental, apresentada na seção 5.2, foi verificado que para sinais de corrente de referência com grande amplitude o controlador não conseguia rastrear este sinal com a utilização dos vetores U_1 , U_2 , U_5 e U_6 . Desta forma, foram utilizados somente os vetores U_3 e U_4 .

Utilizando as combinações apresentadas na Tabela 3.3 e realizando a análise dos casos descritos anteriormente, foi gerada a tabela de chaveamento utilizada neste controle, apresentada na Tabela 3.4. Para cada combinação possível dos erros da corrente nos eixos $\alpha\beta$, o controlador irá selecionar um vetor de tensão U_i a ser aplicado à carga. Para os três casos da Tabela 3.4 que apresentam mais de um vetor possível, o controlador irá analisar os sinais de saída do comparador de três níveis e os sinais dos erros dos dois eixos e selecionar o melhor vetor U_i , de forma a atender os requisitos já explicados.

Tabela 3.4 - Tabela de chaveamento do controlador.

		Erro α		
		-1	0	1
Erro β	-1	U_2	$U_2 ; U_6$	U_1
	0	U_3	$U_0 ; U_7$	U_4
	1	U_1	$U_1 ; U_5$	U_5

Capítulo 4 - Simulação e Métodos de Análise dos Resultados

Antes da implementação dos métodos de controle de corrente apresentados no Capítulo 3, no controle real da carga trifásica no laboratório, estes controladores serão utilizados em simulações, através do aplicativo *Simulink* do *Matlab*, de forma a verificar se os algoritmos de controle estão configurados corretamente e também prever o comportamento do sistema ao serem implementados experimentalmente estes métodos.

A carga utilizada na simulação está ligada em estrela e é puramente indutiva. O modelo de inversor utilizado foi do próprio programa de simulação, que já possui um bloco com um inversor de ponte completa, onde o vetor de entrada deste bloco comanda o estado das seis chaves da ponte.

Na seção 4.1 serão apresentados os métodos que serão utilizados para análise e comparação dos resultados na etapa de simulações, seção 4.2, e também na etapa de controle real da carga, seção 5.2. Na seção 4.2 será apresentada uma explicação sobre alguns dos blocos, restrições de implementação e funções do programa de simulação utilizados, além dos resultados obtidos desta etapa.

4.1 – Métodos para Análise dos Resultados

Há diversas formas de se avaliar o desempenho de um controlador de corrente. Neste trabalho serão selecionados como critérios de análise a distorção harmônica dos sinais de corrente na carga e a quantidade de chaveamentos necessários para obter um mesmo sinal, apresentados nas seções 4.1.1 e 4.1.2 respectivamente.

4.1.1 Análise de Distorção Harmônica

Uma desvantagem de ambos os métodos selecionados neste projeto é o fato de não possuírem um espectro harmônico bem definido. Como estes controladores acionam as chaves dos inversores sempre que o erro da corrente atingir um valor de banda de tolerância definido, a frequência de chaveamento irá variar constantemente, dependendo largamente dos parâmetros da carga e da tensão em corrente alternada aplicada.

Um problema na implementação analógica destes tipos de controladores é a proteção das chaves de potência, que podem chavear em velocidades muito altas. Na implementação digital esta preocupação não é necessária, uma vez que se limita a frequência máxima de chaveamento dos dispositivos de potência através da definição de passos de simulação acima dos limites destes dispositivos, evitando danificar o inversor.

Um dos métodos para comparar o desempenho dos controladores estudados neste projeto, é o cálculo da distorção harmônica do sinal em corrente alternada. Os harmônicos no sinal da corrente aumentam as perdas no cobre da máquina. O valor *RMS* harmônico da corrente não depende apenas do sinal *PWM* gerado pelo controlador, mas também da impedância interna da máquina [4].

O nível de distorção harmônica em um sinal é definido pela Equação 4.1 [6], onde I_n são as amplitudes do sinal de corrente no harmônico n . Idealmente, deseja-se que o sinal de corrente só tenha o harmônico fundamental, ou seja, I_1 , logo o THD de um controlador ideal deveria ser igual a zero. Porém, na prática isto não ocorre. Através da simulação e dos experimentos no laboratório, serão determinados os níveis de distorção harmônica dos dois controladores para diversas combinações de variações de seus parâmetros. O *THD* resultante de cada caso será a média entre a distorção das três fases.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

Equação 4.1 - Distorção harmônica total de corrente.

Foi utilizada a função *FFT* do *Matlab* [7] para calcular a amplitude dos diversos harmônicos contidos nos sinais de corrente coletados. Pela teoria de amostragem, a frequência máxima de um espectro harmônico que pode ser obtida de um intervalo de pontos com período de amostragem igual a h é de $1/(2h)$ Hz [8]. Ao utilizar esta função do *Matlab* em um conjunto com n pontos, terá como resultado um vetor de tamanho também igual a n , com os valores da amplitude e ângulo em cada uma das frequências definidas, que variam desde a frequência máxima ($1/(2h)$ Hz) até zero, com intervalos constantes de $1/(2nh)$ Hz. Neste estudo não há interesse na análise do ângulo destes harmônicos, apenas no módulo.

Por exemplo: as simulações e as experiências têm um intervalo de amostragem igual a $200\mu s$ e um total de 50000 pontos por amostragem, que correspondem a uma janela de $10s$. Conseqüentemente, o espectro harmônico apresentado irá variar desde a frequência zero até $2500Hz$ com intervalos de $0,1Hz$ entre cada item do vetor resultante da função *FFT*.

A função *FFT* do *Matlab* aplica a Transformação Discreta de *Fourier* (“*Discrete Fourier Transform*”) ao conjunto de pontos fornecidos como entrada. Para cada intervalo de frequência, explicado no parágrafo acima, é calculada a amplitude deste harmônico. O conjunto de pontos selecionados como entrada é fornecido na forma de janelamento, ou seja, qualquer ponto fora deste intervalo selecionado assume valor igual a zero. Neste trabalho foram utilizadas janelas do tipo retangulares. Devido a esta não-linearidade na seleção dos pontos, ao realizar a transformada neste sinal, irão surgir diversos harmônicos de alta frequência.

Para reduzir este problema, multiplica-se ponto a ponto o vetor a ser analisado por um outro de mesma dimensão, gerado através do método proposto por *Hanning* [8]. Esta multiplicação irá gerar um novo sinal, com mesma dimensão, onde seus extremos foram suavizados, reduzindo os harmônicos de alta frequência. Um exemplo da aplicação do método de *Hanning* aplicado a um vetor de pontos está representado na Figura 4.1.

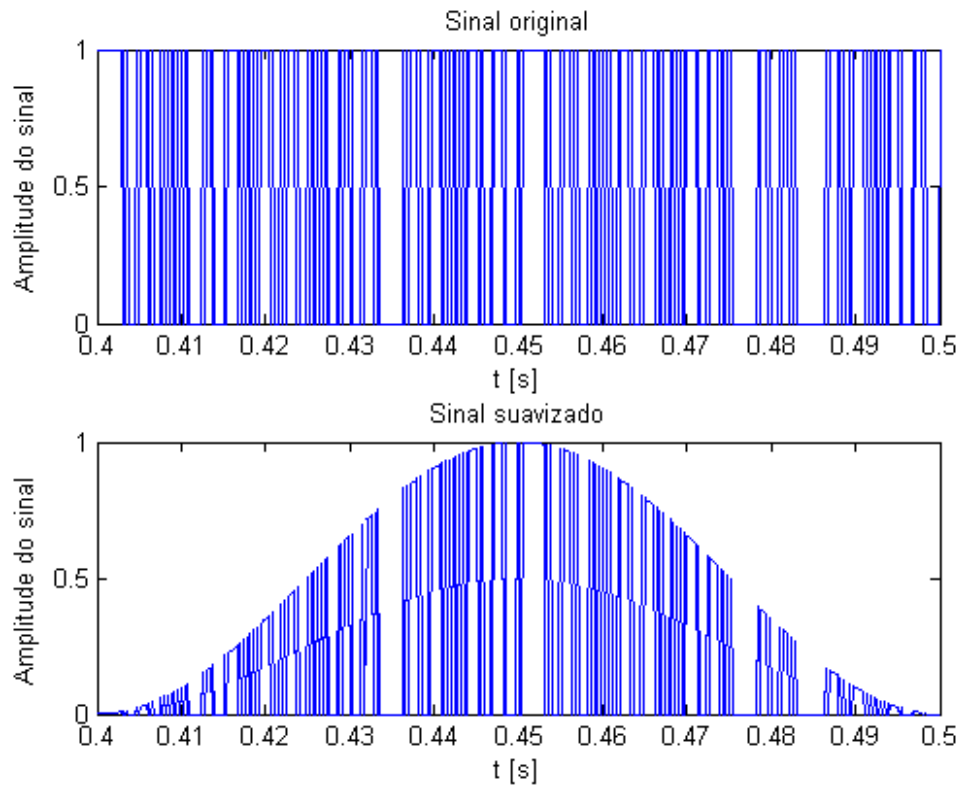


Figura 4.1 - Método de *Hanning* aplicado a um vetor de pontos.

No Apêndice 1 está apresentado um programa feito em linguagem *Matlab*, que dentre outras funções, calcula o *THD* de um intervalo de amostragem. O resultado de cada caso será a média do nível de distorção nas três fases.

4.1.2 Quantidade de Chaveamentos

Outro critério de análise de desempenho de controladores de corrente que será utilizado neste projeto é a contagem do número de chaveamentos necessários durante a execução, controlando a corrente em uma mesma carga, com o mesmo sinal de referência.

No caso do controlador “bang-bang”, a malha de controle é constituída por três controladores independentes, controlando as chaves de cada fase independentemente. Como já explicado, esta independência tende a gerar um maior desbalanço nos sinais de erro, logo, o número de chaveamentos esperado deve ser alto. O outro método analisado, com comparadores de três

níveis e a tabela de chaveamento, utiliza o método de espaço vetorial para atuar de forma combinada sobre o valor instantâneo das três correntes, no sistema de coordenadas $\alpha\beta$. Além disto, neste método também há a seleção do vetor de tensão zero, conseqüentemente, espera-se que se tenha um número de chaveamentos menor que no “bang-bang”.

No Apêndice 1, junto ao código utilizado para calcular a distorção harmônica, também foram implementados comandos para calcular o número de chaveamentos ocorridos em um intervalo de pontos fornecidos. Na resposta, será fornecido o número de chaveamentos necessários em cada fase para o período de um segundo, o que equivale ao valor de uma frequência de chaveamento equivalente média, em *Hertz*.

4.2 - Simulação

A simulação do sistema de controle foi realizada com auxílio do aplicativo *Simulink*. Foram gerados dois programas de simulação, com a implementação, em cada um, dos dois métodos de controle a serem analisados. A comparação de desempenho destes controladores será feita através da análise dos resultados obtidos nas simulações, utilizando os métodos descritos anteriormente. Para verificar o funcionamento destes controladores para diversas configurações dos parâmetros do controlador, as simulações foram executadas com a variação da amplitude do sinal de corrente de referência e os valores da banda de tolerância do controlador com comparadores de três níveis e tabela de chaveamento, uma vez que o “bang-bang” utiliza banda igual a zero.

Os resultados das simulações apresentados neste capítulo serão utilizados como verificação se os controladores estão implementados corretamente. Apesar da implementação do método “bang-bang” ser simples, há algumas restrições para a implementação do segundo método, com comparadores de três níveis e a tabela de chaveamento, descritas na seção 4.2.1. Na seção 4.2.2 serão apresentados os resultados obtidos das simulações.

4.2.1 Implementação da tabela de chaveamento no formato *S-Function*

Na implementação do controlador “*bang-bang*” podem ser utilizados comparadores do próprio *Simulink* para a geração dos sinais de comando do inversor. No caso do controlador com tabela de chaveamento isto não é possível, uma vez que há uma lógica um pouco mais complexa para a definição do vetor que deve ser aplicado no inversor. Devido à restrição do conjunto de funções *Real-Time Workshop* do *Simulink*, utilizados no controle em tempo real da carga, Capítulo 5, só podem ser utilizados os blocos do tipo *S-Function* para programação de linhas de códigos de comando. A programação utilizada na geração destes códigos é realizada em linguagem *C*. O *Matlab* compila estes códigos em uma biblioteca, sendo possível utilizá-la no controle da carga em tempo real.

O programa gerado analisa os sinais de entrada do bloco, que são os erros das correntes nos dois eixos α e β , e julga o melhor vetor de chaveamento a ser aplicado para reduzir o erro da corrente, de forma a minimizar o número de chaveamentos e evitar um maior desbalanço do sinal de erro das correntes na carga. Esta seleção dos vetores será através da análise dos cinco casos apresentados na Tabela 3.3. O código em linguagem *C* utilizado para geração do programa está apresentado no Apêndice 2.

4.2.2 Resultados das Simulações

No Apêndice 3 e no Apêndice 4 estão apresentados os diagramas de blocos dos dois controladores de corrente analisados neste projeto, implementados no programa *Simulink*. As simulações destes sistemas foram realizadas com um passo de execução h igual a $100\mu s$ e um tempo de amostragem de $200\mu s$.

O inversor utilizado na simulação foi implementado através de um bloco fornecido pelo próprio aplicativo, sendo o comando das chaves realizado através do fornecimento de um vetor de comando com dimensão igual a seis. O único cuidado que deve ser tomado no fornecimento do vetor de comando deste bloco é utilizar a mesma numeração das chaves do inversor do aplicativo, com as portas de saída da placa de envio de dados na etapa de controle da carga no laboratório. A numeração utilizada no *Matlab* está apresentada na Figura 4.2.

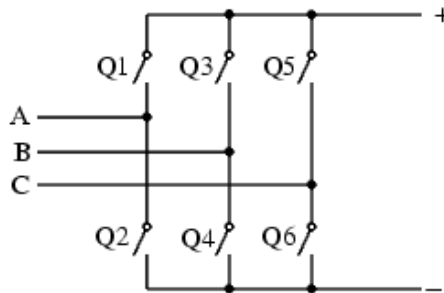


Figura 4.2 - Modelo do inversor utilizado na simulação.

Nas simulações, a alimentação do inversor será com uma tensão de $40V$ e a carga é ligada em estrela, com valor de indutância por fase igual a $10mH$.

Foram realizadas diversas simulações com a variação de alguns parâmetros do sistema de controle, como amplitude da corrente de referência e a banda de tolerância dos comparadores. Na Tabela 4.1 estão apresentados os resultados das simulações e os respectivos valores dos parâmetros utilizados para cada caso. Os métodos de análise dos resultados foram apresentados na seção 4.1. O número de chaveamentos para cada caso é referente a um intervalo de um segundo e os níveis de distorção apresentados são referentes à média das distorções nas três fases.

Tabela 4.1 - Resultados das simulações.

Amplitude	BANG-BANG					Banda	TABELA DE CHAVEAMENTO				
	THD	Chaveamentos					THD	Chaveamentos			
		A	B	C	Média			A	B	C	Média
1A	17,47%	1596	1596	1596	1596	0A	26,13%	1564	1572	1572	1569
						0,1A	16,81%	1564	1612	1597	1591
						0,2A	21,63%	1548	1588	1584	1573
						0,4A	14,96%	1092	860	972	975
3A	4,71%	1324	1340	1312	1325	0A	5,28%	996	1432	1432	1287
						0,1A	5,55%	1116	1380	1380	1292
						0,2A	7,06%	1180	1376	1240	1265
						0,4A	4,18%	1220	756	756	911
5A	6,18%	762	922	842	842	0A	8,01%	242	1038	1038	773
						0,1A	4,73%	442	1023	1037	834
						0,2A	3,38%	722	940	853	838
						0,4A	2,90%	922	690	680	764

Como esperado, o número de chaveamentos do método utilizando a tabela de chaveamento é menor do que o “bang-bang” em todos os casos apresentados. Isto ocorre principalmente pela técnica de seleção do vetor de tensão zero. Além disto, a compensação da interação entre as fases, minimizando o desbalanço do sistema, também auxilia na redução do número de chaveamentos do inversor.

Ao analisar o nível de distorção total dos casos apresentados, percebe-se que há uma oscilação de resultados dizer qual dos dois métodos tem um desempenho melhor, referente ao critério de distorção do sinal. Porém, pode-se constatar que o melhor desempenho do controlador com tabela de chaveamento ocorre para valores de banda de tolerância diferentes de nulo, também oscilando seu melhor desempenho entre os três valores de banda analisados, para diferentes amplitudes da corrente de referência.

Apesar de na etapa de implementação destes controladores realizada no laboratório, Capítulo 5, a carga utilizada possuir diferentes parâmetros em relação à utilizada nas simulações deste capítulo, os resultados da Tabela 4.1 serão utilizados como comparação, porém, irão diferir numericamente aos obtidos no experimento prático. Espera-se que, mesmo ocorrendo esta variação numérica, ao controlar cargas diferentes, não ocorra muita discrepância de desempenho dos métodos entre si, atendendo a um dos objetivos deste trabalho.

Os resultados de um dos casos estudados estão apresentados nas Figura 4.3 e Figura 4.4, para os dois controladores. Os parâmetros da simulação foram de amplitude de corrente igual a $3A$, bandas de tolerância dos comparadores de três níveis igual a $0,2A$. Nestas figuras está apresentado uma amostra do sinal de corrente da simulação em uma das fases e o espectro harmônico de todo sinal obtido na simulação. Pode-se perceber que na simulação a fundamental é muito superior aos outros harmônicos. A maior amplitude, em relação à fundamental, é de aproximadamente 5%.

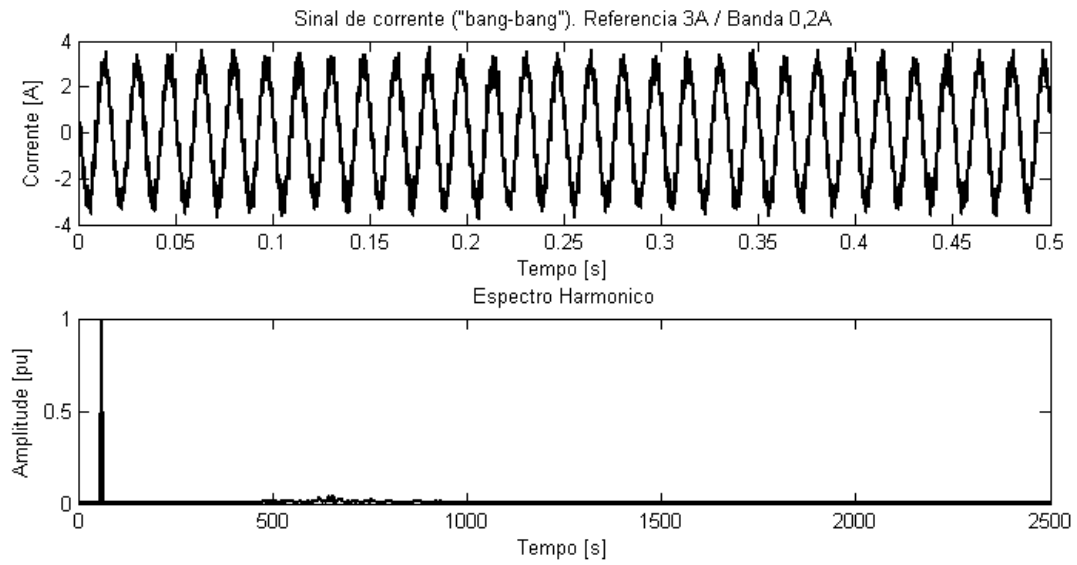


Figura 4.3 - Espectro harmônico da simulação do controlador “bang-bang”. Corrente 3A e banda de tolerância 0,2A

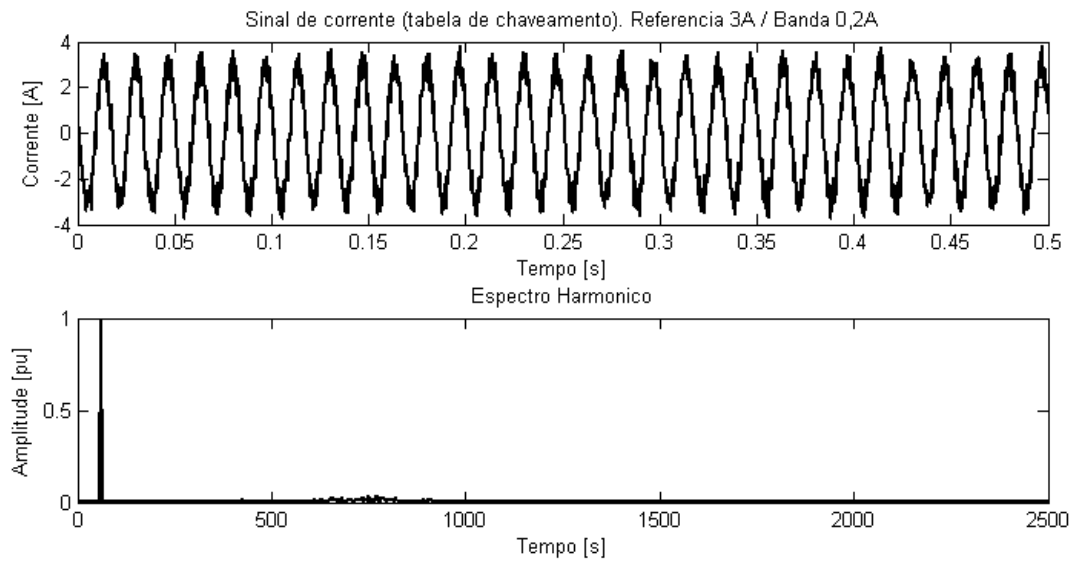


Figura 4.4 - Espectro harmônico da simulação do controlador com tabela de chaveamento. Corrente 3A e banda de tolerância 0,2A

Capítulo 5 - Resultados Experimentais

Após a verificação do funcionamento dos algoritmos de controle dos dois métodos analisados, apresentada no Capítulo 4, já se torna possível implementar com segurança estes métodos no controle em tempo real de uma carga trifásica. Novamente, o aplicativo utilizado para realizar o controle será o *Simulink*, com a utilização do conjunto de aplicativos *Real Time Workshop* para o controle em tempo real da carga nesta etapa prática.

No Capítulo 4 foram apresentados os principais padrões utilizados na simulação, como a numeração das chaves do inversor e a criação da *S-Function*. No acionamento prático serão utilizados estes mesmos padrões, porém, o inversor será uma ponte completa trifásica disponível no laboratório e o envio dos sinais de comando do inversor e a coleta de dados do circuito serão realizados através de uma placa de aquisição e envio de dados.

Na Figura 5.1 está apresentado o diagrama esquemático destas ligações. O computador funciona como controlador, recebendo os dados do circuito através da conversão analógica-digital (A/D) realizada pela placa de aquisição de dados, processando as informações, calculando os algoritmos do controle e gerando o sinal PWM de comando das chaves, sendo externalizado pela placa de envio de dados, que realiza a conversão digital-analógica (D/A).

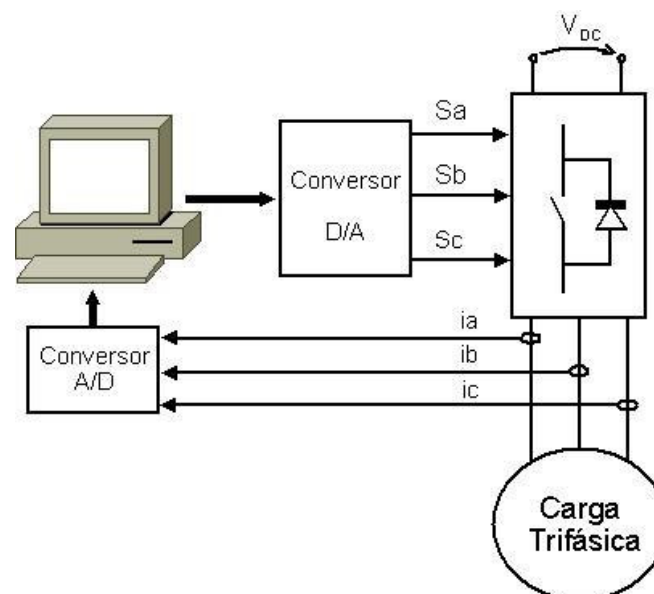


Figura 5.1 - Diagrama esquemático computador e sistema analógico.

Apesar de na simulação serem utilizados os próprios blocos do aplicativo para medir os sinais de corrente na carga controlada, na prática são necessários medidores de corrente acoplados ao circuito controlado, para enviarem ao computador os sinais medidos. Na seção 5.1 será brevemente descrito o funcionamento destes dispositivos de medição e na seção 5.2 serão apresentados os resultados experimentais dos dois controladores. Para demonstrar a aplicação prática destes métodos estudados, na seção 5.3 serão apresentados e analisados os resultados obtidos no acionamento de uma máquina trifásica de indução com a implementação dos dois métodos.

5.1 - Medidores de Corrente

A realimentação da malha de controle dos controladores de corrente é realizada através dos sinais de corrente das três fases medidos da carga. A coleta destes sinais é realizada por medidores de corrente por *Efeito Hall* e enviados ao computador através das portas analógicas de entrada da placa de aquisição de dados.

Estes medidores de corrente geram em seus terminais de saída um sinal de tensão proporcional ao sinal de corrente real, sendo possível processar estas informações digitalmente por meio de uma interface A/D. Como os sinais enviados ao computador possuem uma amplitude de tensão proporcional ao valor real da corrente na carga, torna-se necessário realizar uma calibração destes dispositivos de forma a realimentar a malha de controle sempre com os valores reais de corrente [9]. Como os medidores de corrente utilizados nesta etapa experimental já haviam sido utilizados em outro projeto, eles já estavam configurados e calibrados. Para cada um deles foi estimada uma equação de reta que transforma em valores reais o sinal de tensão proporcional à corrente medida.

Apesar de serem necessários apenas dois medidores de corrente neste tipo de circuito, a três fios, neste projeto foram utilizados três medidores para reduzir o número de cálculos do algoritmo de controle e também evitar a propagação de erros na medição.

5.2 - Resultados Experimentais

Nesta etapa prática tentou-se seguir o mais próximo possível os mesmos parâmetros utilizados na simulação, de forma a obter resultados equivalentes aos da simulação. A alimentação do inversor foi em 40V corrente contínua, tempo de passo de execução $100\mu\text{s}$ e de amostragem $200\mu\text{s}$.

A carga utilizada no laboratório foi a mesma para todos os casos, um motor de indução do tipo gaiola. Como neste trabalho não há a implementação de um controlador de velocidade, a análise dos controladores de corrente foi realizada com o motor parado. O circuito que representa um motor de indução está apresentado na Figura 5.2. Ele não será explicado de forma aprofundada pois seu entendimento não é um objetivo deste projeto, mas pode-se perceber que ele é constituído de resistências e indutâncias. O valor do escorregamento, s , é igual a zero no circuito controlado, uma vez que o motor está com seu rotor parado.

Como os controladores estudados neste projeto devem controlar a corrente em qualquer circuito, independente da identificação e variação dos parâmetros da carga, mesmo utilizando circuitos diferentes na simulação e na aplicação prática, os resultados obtidos nesta etapa não serão iguais numericamente aos resultados da simulação, porém, a comparação entre os controladores não deve diferir muito.

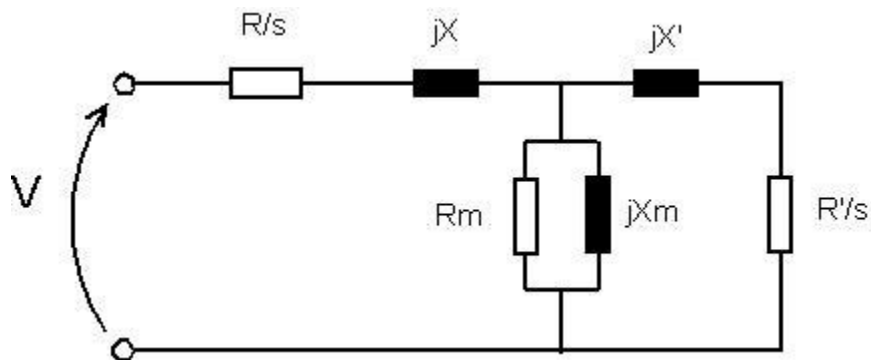


Figura 5.2 - Circuito equivalente de um motor de indução.

No método com implementação da tabela de chaveamento foi utilizado o mesmo bloco *S-Function* da simulação. Além disto, a numeração das saídas digitais da placa de envio de dados

acopladas ao inversor do laboratório seguiu o mesmo critério de numeração das chaves apresentado na seção 4.2.2 e exemplificada na Figura 4.2.

Nos Apêndice 5 e Apêndice 6 estão apresentados os diagramas de blocos dos controladores implementados no *Simulink*, para o controle em tempo real de uma carga trifásica no laboratório. Foram utilizados os blocos de entrada analógica e saída digital do conjunto de blocos *Real-Time Workshop* disponível no *Simulink* para a coleta dos sinais de corrente na carga e o comando das chaves do inversor, respectivamente.

Os métodos de análise de resultados adotados nesta etapa são os mesmos apresentados na seção 4.1. Os resultados já analisados da implementação prática do controlador estão apresentados na Tabela 5.1, lembrando que o valor de THD é a média dos sinais nas três fases e a contagem do número de chaveamentos de cada chave do inversor é para o intervalo de um segundo.

Tabela 5.1 - Resultados experimentais.

Amplitude	BANG-BANG					Banda	TABELA DE CHAVEAMENTO				
	THD	Chaveamentos					THD	Chaveamentos			
		A	B	C	Média			A	B	C	Média
1A	20,93%	4599	4087	2458	3715	0A	21,70%	4355	2690	2690	3245
						0,1A	17,83%	4201	2707	2628	3179
						0,2A	16,47%	4063	2896	2496	3152
						0,4A	17,75%	3740	3436	3068	3415
3A	7,02%	4276	3583	2568	3476	0A	7,48%	3784	2290	2290	2788
						0,1A	6,96%	3800	2504	2326	2877
						0,2A	6,91%	3759	2699	2228	2895
						0,4A	6,68%	3584	3161	2510	3085
5A	4,35%	4095	3555	2629	3426	0A	4,35%	3394	2552	2552	2833
						0,1A	3,87%	3459	2570	2363	2797
						0,2A	4,00%	3548	2646	2240	2811
						0,4A	4,00%	3276	3016	2423	2905

Novamente, a média do número de chaveamentos do método com implementação da tabela foi menor em todos os casos do que no “bang-bang”, assim como já apresentado nas simulações. Além disto, os níveis de distorção com a implementação dos dois métodos também não diferem muito entre si.

No caso da corrente de referência com amplitude igual a $1A$, os níveis de distorção foram muito elevados, assim como o número de chaveamentos de ambos os métodos. Isto ocorreu pois a impedância do circuito controlado é baixa, logo, quando ocorria a comutação do inversor, circulava uma alta corrente no circuito, distorcendo bastante o sinal na carga. Conforme a amplitude da corrente foi aumentando, o nível de distorção foi reduzindo e os controladores obtiveram um melhor desempenho.

Novamente pode-se constatar que o controlador com implementação da tabela de chaveamento não possui o seu melhor desempenho com banda de tolerância igual a zero. Para diferentes valores de amplitude do sinal de corrente, seu melhor desempenho, em relação tanto à distorção quanto ao número de chaveamentos, variou entre os diversos valores de banda, como igual a $0,2A$ e $0,4A$.

Assim como apresentado na seção 4.2.2, nas Figura 5.3 e Figura 5.4 estão apresentados os resultados de um dos casos analisados no laboratório, com amplitude de corrente igual a $3A$ e banda de tolerância de $0,2A$. Os sinais apresentados são de uma amostra da corrente em uma das fases e o espectro harmônico de todo sinal coletado desta fase.

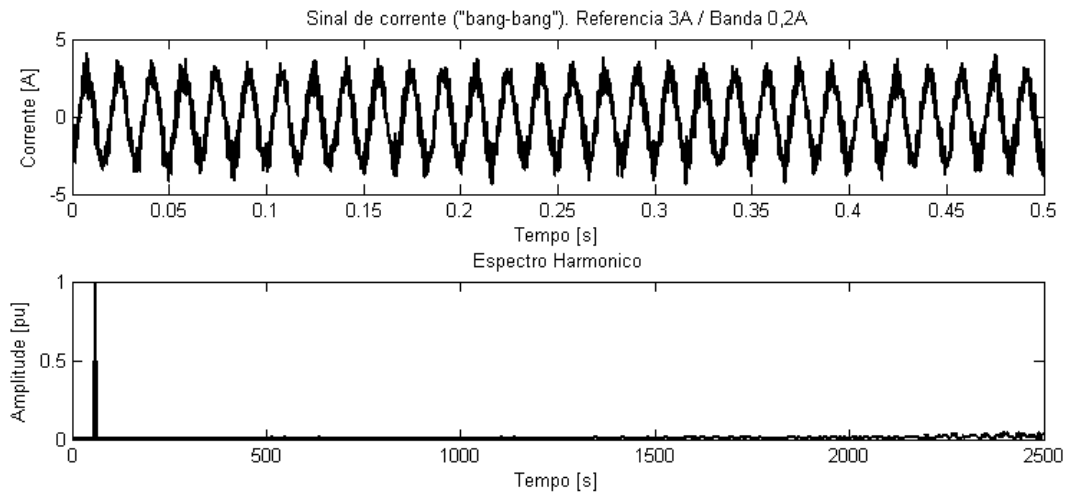


Figura 5.3 - Espectro harmônico da experiência prática do controlador “bang-bang”. Corrente 3A e banda de tolerância 0,2A

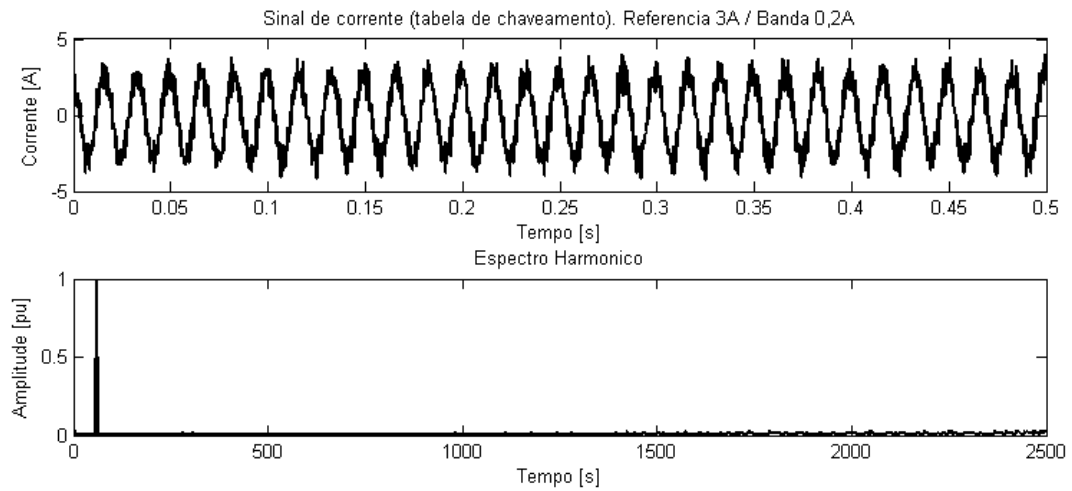


Figura 5.4 - Espectro harmônico da experiência prática do controlador “bang-bang”. Corrente 3A e banda de tolerância 0,2A

5.3 - Aplicação Prática

Dentre as diversas aplicações práticas dos controladores de corrente, a principal é no acionamento de máquinas elétricas de indução trifásicas. Para demonstrar praticamente a aplicação dos métodos estudados neste trabalho, será realizado o acionamento real de uma destas. A mesma bancada utilizada para coletar os resultados experimentais na seção 5.3 será utilizada para o acionamento do motor elétrico, porém, nesta etapa o controle de corrente será executado com o motor em funcionamento. Pelo mesmo problema descrito na seção 5.3, para o acionamento correto de uma máquina de indução também é necessária a implementação de um controle de velocidade, caso contrário, o controle desta máquina não é assegurado.

Como este projeto focou somente no estudo de controladores de corrente, foi utilizado o controlador de velocidade descrito em [10], que tem uma estrutura PI, com parâmetros obtidos pelo método H Infinito. Neste artigo, as referências de corrente (a,c,b) são obtidas a partir das componentes $d-q$ no referencial do fluxo enlaçado pelo rotor (controle orientado por capo) e o controle de corrente implementado é o do método “bang-bang”. O sistema de controle do acionamento deste motor será novamente executado, com a coleta dos sinais de corrente, de chaveamento e da resposta do sistema, com a implementação dos dois métodos estudados neste projeto: o “bang-bang”, já implementado no acionamento, e o controlador de corrente com utilização de tabela de chaveamento.

O acionamento deste motor será realizado com a mesma configuração utilizada no acionamento de [10], porém, o controlador de corrente com tabela de chaveamento será utilizado com diferentes valores de banda de tolerância, de forma a verificar a variação da resposta de acordo com a modificação deste limite.

A análise de desempenho dos sistemas de controle será através da comparação do número de chaveamentos realizados e também pela velocidade de resposta do sistema com a implementação de cada um dos controladores. Como pode ser visto na Figura 5.5, a referência de velocidade do motor assume sete valores distintos: 0, 200, 250, 150, reversão para -50, 100 e 250 m/s. A análise do número de chaveamentos será feita para cada trecho separadamente.

Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados da utilização dos dois métodos de controle no acionamento do motor elétrico de indução para uma mesma referência.

Os acionamentos foram feitos para o método “bang-bang” e para o método com utilização da tabela de chaveamento para quatro valores de bandas de tolerância: 0; 0,1; 0,3; e 0,4A. A soma da média do número de chaveamentos em todos os trechos é apresentada na coluna *total*. Na Figura 5.5 está representado graficamente o resultado do acionamento do motor para dois casos diferentes, “bang-bang” e controle com tabela de chaveamento com banda de tolerância de 0,2A. Como as respostas dinâmicas do acionamento com os dois métodos são muito próximas, na Figura 5.6 é apresentada uma ampliação de um dos trechos onde ocorre variação da referência da velocidade do motor.

Tabela 5.2 - Resultados do acionamento do motor de indução.

Método de Controle	Velocidade de Referência no Trecho [m/s] / Tempo [s]							Soma
	0 / 3	200 / 3	250 / 6	150 / 3	-50 / 6	100 / 4	250 / 5	
	Média do Número de Chaveamento nas Três Fases							
Bang-Bang	0	4260	8527	4406	9113	5551	7076	38933
Banda 0A	0	3989	8036	4116	7456	5248	6811	35656
Banda 0,1A	0	4062	7947	4107	7673	5025	6657	35471
Banda 0,2A	0	3945	7453	4059	7546	5074	6239	34316
Banda 0,4A	0	3900	7578	4062	7861	5039	6270	34710

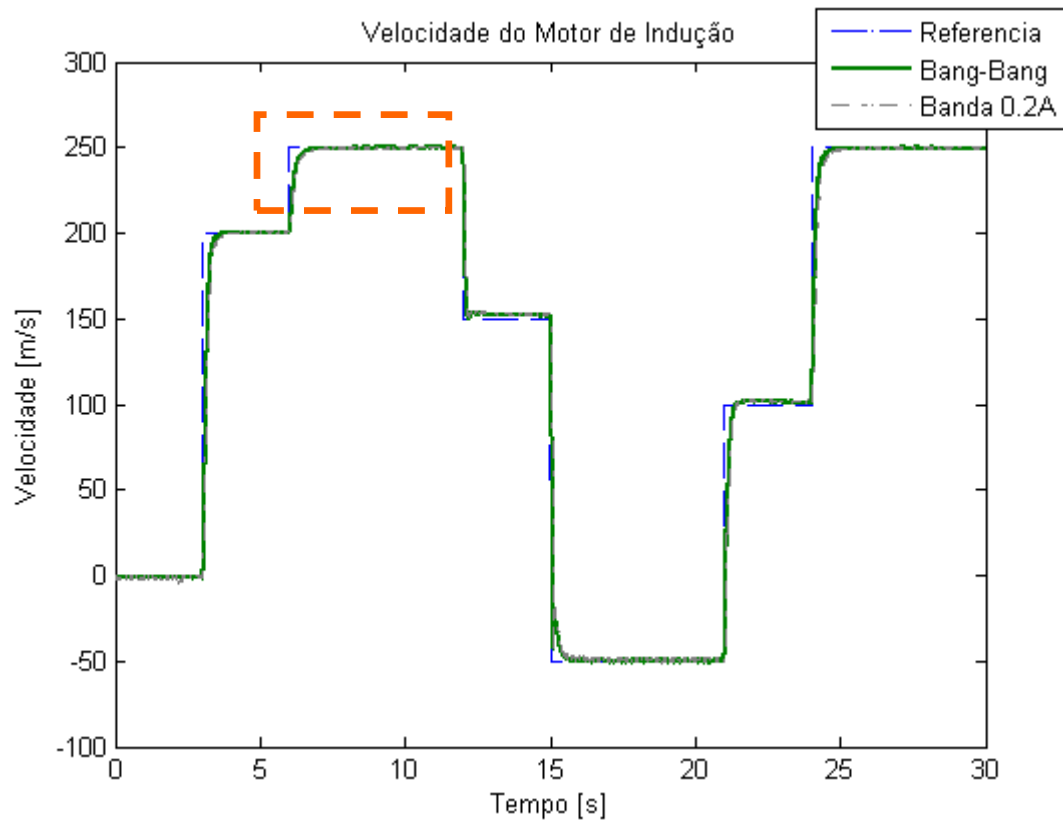


Figura 5.5 - Velocidade do motor de indução com a implementação dos dois controladores.

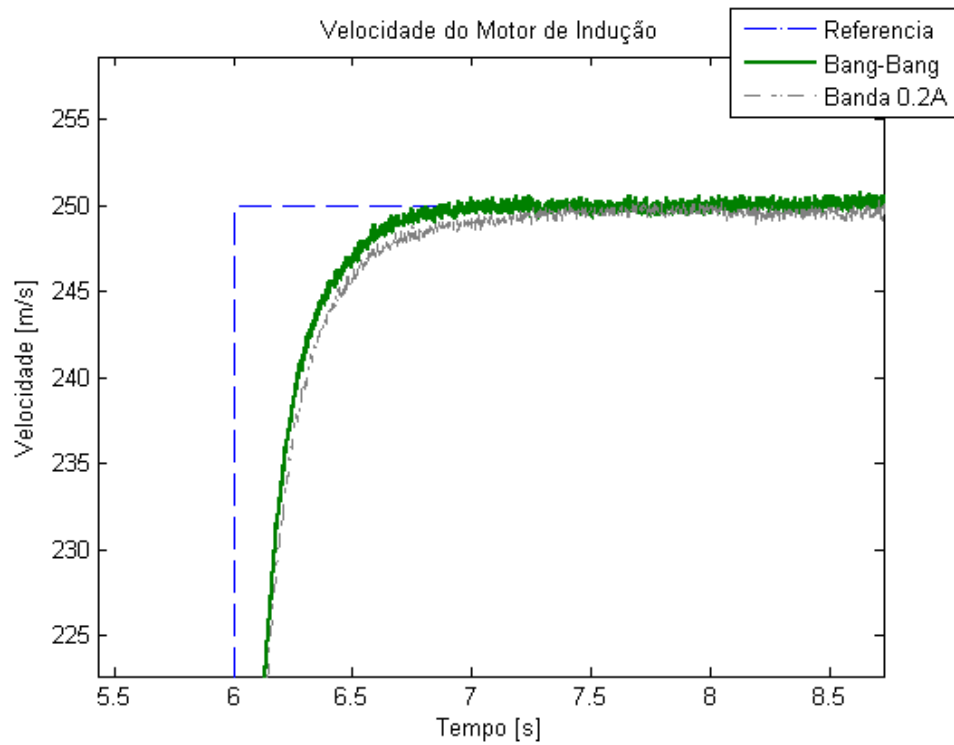


Figura 5.6 - Ampliação de um trecho da resposta dinâmica do motor.

Pela análise da Tabela 5.2 pode-se concluir que o método “bang-bang” teve um maior número de chaveamentos em relação a todos os casos analisados com a utilização do método com tabela de chaveamento. Com isto, pode-se confirmar a eficiência de uma das principais vantagens deste último método, a redução do número de chaveamentos através da seleção do vetor de tensão zero. O caso com menor número, com banda de tolerância de $0,2A$, teve uma redução de praticamente 12% em relação à média do número de chaveamentos com implementação do método “bang-bang”.

Além disto, pode-se confirmar que o maior número de chaveamentos ocorre nos trechos logo após a partida e na reversão de velocidade do motor. Estes são os momentos onde se exige mais do inversor e em ambos os casos o método com tabela de chaveamento e banda de tolerância de $0,2A$ se sobressaiu em relação ao “bang-bang”, conseguindo reduzir em 14% o número total de chaveamentos no trecho de reversão de velocidade.

Apesar do número de chaveamentos ser menor no método com implementação da tabela de chaveamento, analisando a Figura 5.5 é praticamente impossível identificar a diferença das respostas dinâmicas no acionamento com os dois controladores. Apenas na Figura 5.6 consegue-se identificar a diferença dinâmica destes acionamentos, verificando que na utilização do método “bang-bang” a resposta dinâmica do sistema foi levemente superior do que com a implementação do outro método.

Capítulo 6 - Conclusão

Diversos tipos de ensaio foram realizados ao longo deste projeto para analisar e comparar o desempenho dos dois controladores de corrente, “bang-bang” e o com utilização de comparadores de três níveis e a tabela de chaveamento. Os ensaios realizados foram a simulação, o controle de um circuito trifásico e o acionamento de um motor de indução. Em cada uma destas etapas foram coletados dados para diversas configurações dos parâmetros dos controladores.

Analisando todos estes resultados, pode-se constatar que, em relação à distorção do sinal na carga, os resultados de ambos os controladores foram similares. Os níveis de THD em praticamente todos acionamentos diferem pouco, não sendo possível distinguir qual dos dois controladores é superior neste critério.

Em relação ao número de chaveamentos, pode-se constatar que o controlador com utilização da tabela de chaveamento é superior ao “bang-bang”. Isto ocorre principalmente devido à seleção do vetor de tensão zero, o que reduz consideravelmente o número de chaveamentos. Esta superioridade pode ser vista em todos resultados apresentados ao longo deste projeto: simulação, controle de uma carga trifásica e no acionamento do motor de indução. Um comparativo entre os dois métodos está apresentado na Figura 6.1, para o controle da carga trifásica apresentada na seção 5.2, com os parâmetros configurados da seguinte forma: amplitude do sinal de corrente igual a $3A$ e banda de tolerância de $0,2A$ para o comparador de três níveis.

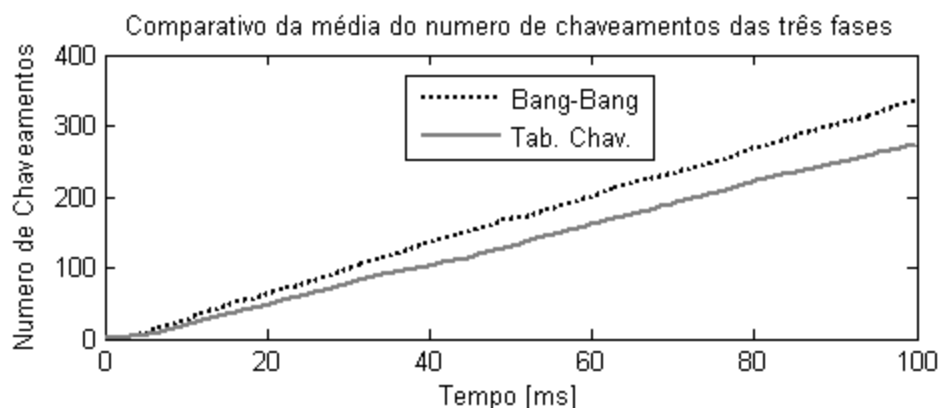


Figura 6.1 - Comparativo entre número de chaveamentos.

O intervalo amostrado na Figura 6.1 é de $100ms$, o que representa um total de seis ciclos completos do sinal de referência. Neste pequeno intervalo de tempo, o método com utilização da tabela de chaveamento tinha comutado aproximadamente 15% menos do que o “bang-bang” em cada perna do inversor.

Apesar do controlador com utilização da tabela de chaveamento ter um número menor de comutações de suas chaves durante a execução e ter resultados de distorção bastante similares ao método “bang-bang”, este último teve um desempenho dinâmico levemente superior ao método com tabela de chaveamento. Esta diferença de desempenho foi verificada no acionamento do motor de indução e pode ser vista nas Figura 5.5 e Figura 5.6.

Conforme a frequência de chaveamento aumenta dos dispositivos de potência, como os IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), se torna mais fácil a obtenção de bons resultados. Com isto, as vantagens de métodos complexos, como os de otimização por exemplo, perdem importância com o avanço dos dispositivos de potência, onde mesmo métodos simples, como o “bang-bang” por exemplo, se tornam adequados para o acionamento [1].

Portanto, no acionamento de um motor elétrico ou no controle de qualquer carga trifásica, a utilização de qualquer um dos dois controladores irá resultar em um acionamento satisfatório. Porém, caso o problema crítico do acionamento seja o alto número de chaveamentos, deve-se preferir a utilização do método com tabela de chaveamento. Apesar deste método ser mais complexo de implementar e seu resultado dinâmico ser levemente inferior ao “bang-bang”, a grande vantagem é que há uma redução do número de chaveamentos. Caso o número de chaveamentos não seja uma condição crítica no acionamento, a implementação do método “bang-bang” é satisfatória, além de que seus ótimos resultados dinâmicos e sua simples implementação favorecem a utilização deste método na maioria das aplicações.

A grande vantagem destes dois métodos em relação a outros vários disponíveis na literatura, especialmente os controladores lineares, é que as pesquisas têm focado no desenvolvimento de métodos que consigam ser totalmente implementados digitalmente. Portanto, estes métodos com possível implementação digital têm preferência de serem utilizados, mesmo que isto acarrete em uma redução da precisão e desempenho dinâmico do acionamento [1].

Como trabalhos futuros podem ser propostos:

- Análise da influência de tensões de perturbação (e.g. tensão da rede, força eletromotriz) na resposta dinâmica do controlador de corrente;
- Implementação da tabela de chaveamento na forma de máquina de estados;
- Otimização global do chaveamento, considerando estados anteriores a cada chaveamento.

Referências

- [1] Kazmierkowski M. P., e Malesani L., “Current Control Techniques for Three-Phase Voltage-Source PWM Converters: A Survey”. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 45, pp. 691-703, Outubro 1998.
- [2] Martins J. F. A., Pires A. J., e Sulkowski W., “A Novel and Simple Current Controller for Three-Phase PWM Power Inverters”. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 45, pp. 802-805, Outubro 1998.
- [3] Liu Y. H., e Chen C. L., “A Novel Space-Vector Current Regulation Scheme for a Field-Oriented-Controlled Induction Motor Drive”. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 45, pp. 730-737, Outubro 1998.
- [4] J. Holtz, “Pulsewidth modulation for electronic power conversion”. *Proc. IEEE*, vol. 82, pp. 1194-1214, Agosto. 1994.
- [5] Torrico J., “Análise Dinâmica de Controladores de Corrente para Máquinas de Indução Trifásicas Alimentadas por Inversor PWM”. Campinas, 2002. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 2002.
- [6] Stephan R. M., “Acionamento, Comando e Controle de Máquinas Elétricas”. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.
- [7] “MATLAB for Windows User’s Guide”, The Math Works Inc., 1991.
- [8] Diniz, P. S. R., Silva, E. A. B. D., Netto, S. L., “Digital Signal Processing: System Analysis and Design”. Cambridge University Press: Cambridge, Reino Unido, 2002.
- [9] Salama A., L. R., “Sistema de Acionamento para Máquinas Elétricas Baseado no Ambiente ‘Real-Time Workshop’ (RTW) do MatLab/Simulink” PIBIC-UFRJ. Rio de Janeiro, 2007. XXIX Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural da UFRJ, 2007.
- [10] Basílio, J. C. S. ; Silva Jr, J. A. ; Rolim, L. G. B., “H-infinity Optimal Design of Rotor Flux Oriented Controlled Induction Motor Drives”. In: ISIE'03 - International Symposium on Industrial Electronics, 2003, Rio de Janeiro. Anais do ISIE'03 - International Symposium on Industrial Electronics, 2003. v. 1. p. 556-561.

Apêndices

Apêndice 1 - Código para cálculo de THD e contagem de número de chaveamentos.

```

%%CODIGO DESENVOLVIDO POR LUIZ RAFAEL SALAMA ANDRADE
%%CALCULO DE THD E NUMERO DE CHAVEAMENTOS

vTHD=[iabc.signals(1).values(:,2) iabc.signals(2).values(:,2) iabc.signals(3).values(:,2)];
vTHDart14red=[art14red_iabc.signals(1).values(:,2) art14red_iabc.signals(2).values(:,2) art14red_iabc.signals(3).values(:,2)];
vPulso=[iachave.signals(2).values iachave.signals(3).values iachave.signals(4).values];
vPulsoart14red=[art14red_iachave.signals(2).values art14red_iachave.signals(3).values art14red_iachave.signals(4).values];

fs = 1/hnovo;
IntervMin=2000;
IntervMax=52000;

t = IntervMin*hnovo:1/fs:IntervMax*hnovo;
sprintf('I= %d / Banda = +- %d / Taxa de Amostragem = %d / Resample = %d', AmplitudeI,halta,h,hnovo)

for j=1:2
    if j==1 %Bang-Bang
        disp('Bang-Bang')
        vtemp=vTHD;
        vtemppulso=vPulso;
    elseif j==2
        disp('Tabela de Chaveamento')
        vtemp=vTHDart14;
        vtemppulso=vPulsoart14;
    end

    for i=1:3
        %CALCULA THD
        %Amostragem = 2e-4 => Pegando 50000 => 0,1 0,2...Hz

        %Metodo utilizado para suavizar distorcao
        vetormult=hanning(length(vetor));
        Fmult=fft(vetormult.*vetor);

        figure,
        subplot(2, 1, 1)
        plot(t(1:length(vetor)), vetor);
        subplot(2, 1, 2)

        lf=linspace(0, fs/2, round(length(F)/2));
        plot(lf,abs(Fmult(1:round(length(F)/2))))
        title('Suavizado')

        fd=abs(Fmult(1:round(length(F)/2)));

        I=find(lf==60);
        lf=find(mod(lf,60)==0);
        THDd(i)=sqrt(sum(fd(lf).^2)-fd(I(1))^2) / fd(I(1));

        %CONTA PULSO
        vetor=vtemppulso(IntervMin:IntervMax,i); %Elimina a imperfeição do inicio do sinal
        conti=1;%Indice que inicia a contagem
        confim=length(vetor);%indice que termina a contagem

        if vetor(conti)>0
            statusc=1;%ALTO
        else
            statusc=0;%BAIXO
    end
end

```

```
end
contador=1;

for l=conti:confim
    if vetor(l)>0.5
        if statusc==0
            statusc=1;
            contador=contador+1;
        end
    elseif vetor(l)<=0.5
        if statusc==1
            statusc=0;
            contador=contador+1;
        end
    end
end
%clear vetor
contadorfim(i)=contador;
end
valorTHD=( [THD(1) THD(2) THD(3)] )*[1;1;1]/3;
[THD(1) THD(2) THD(3)]

valorTHD
contadorfim
end
```

Apêndice 2 - Código para geração de S-Function.

```

/*
 *
 * --- THIS FILE GENERATED BY S-FUNCTION BUILDER: 3.0 ---
 *
 * This file is a wrapper S-function produced by the S-Function
 * Builder which only recognizes certain fields. Changes made
 * outside these fields will be lost the next time the block is
 * used to load, edit, and resave this file. This file will be overwritten
 * by the S-function Builder block. If you want to edit this file by hand,
 * you must change it only in the area defined as:
 *
 *     %%-SFUNWIZ_wrapper_XXXXX_Changes_BEGIN
 *     Your Changes go here
 *     %%-SFUNWIZ_wrapper_XXXXXX_Changes_END
 *
 * For better compatibility with the Real-Time Workshop, the
 * "wrapper" S-function technique is used. This is discussed
 * in the Real-Time Workshop User's Manual in the Chapter titled,
 * "Wrapper S-functions".
 *
 * Created: Wed Nov 26 18:50:08 2008
 */

/*
 * Include Files
 *
 */
#if defined(MATLAB_MEX_FILE)
#include "tmwtypes.h"
#include "simstruc_types.h"
#else
#include "rtwtypes.h"
#endif
/* %%-SFUNWIZ_wrapper_includes_Changes_BEGIN --- EDIT HERE TO _END */
#include <math.h>
#include <mclcppclass.h>
/* %%-SFUNWIZ_wrapper_includes_Changes_END --- EDIT HERE TO _BEGIN */
#define u_width 1
#define y_width 1
/*
 * Create external references here.
 *
 */
/* %%-SFUNWIZ_wrapper_externs_Changes_BEGIN --- EDIT HERE TO _END */
/* extern double func(double a); */
/* %%-SFUNWIZ_wrapper_externs_Changes_END --- EDIT HERE TO _BEGIN */

/*
 * Output functions
 *
 */
void TabelaReducao_Testes_Outputs_wrapper(const real_T *ebeta1,
    const real_T *ebeta2,
    const real_T *ealfa1,
    const real_T *ealfa2,
    const real_T *ebeta,
    const real_T *ealfa,
    const real_T *chaveanterior,
    real_T *saidabeta,
    real_T *saidaalfa,
    real_T *chave)
{

```

```
/* %%%-SFUNWIZ_wrapper_Outputs_Changes_BEGIN --- EDIT HERE TO _END */
```

```
/*
```

Script que calcula o melhor vetor de chaveamento de acordo com os dados de entrada:

Desenvolvido por: Luiz Rafael Salama Andrade

Dezembro 2008

- ebeta1, ealfa1 => Resultados do comparador HIGH (Resulta 1 acima da banda e 0 abaixo)

- ebeta1, ealfa1 => Resultados do comparador LOW (Resulta -1 abaixo da banda e 0 acima)

- ebeta, ealfa => Valores de erro, para verificar se são positivos ou negativos. Usados na lógica

- chaveanterior => O vetor de chaveamento atual. No caso de vetor de tensão 0 seleciona o vetor 0 ou 7. Pode ser um numero entre 0 e 7.

A saída deste aplicativo serão as coordenadas do item a ser selecionado na tabela de chaveamento.

Esta tabela é 3x3, contendo as 9 possibilidades de erro de corrente em alfa e beta. Os índices da tabela podem variar de 0 a 2 na linha e coluna.

Ex. (1,2) => Linha 2 da tabela e coluna 3.

```
*/
```

```
double alfa;
```

```
double beta;
```

```
if (ebeta1[0]==1) {
```

```
    beta=1; }
```

```
else if (ebeta2[0]==-1){
```

```
    beta=-1;}
```

```
else {
```

```
    beta=0;}
```

```
if (ealfa1[0]==1) {
```

```
    alfa=1; }
```

```
else if (ealfa2[0]==-1) {
```

```
    alfa=-1; }
```

```
else {
```

```
    alfa=0; }
```

```
if ((alfa==0) && (beta ==1)) { //1 ou 5
```

```
    if (ealfa[0] >0) {
```

```
        //chave=5;
```

```
        beta=2;
```

```
        alfa=2;
```

```
    }
```

```
    else {
```

```
        //chave=1;
```

```
        beta=2;
```

```
        alfa=1; }
```

```
    }
```

```
else if ((alfa==0) && (beta ==-1)) { //2 ou 6
```

```
    if (ealfa[0] >0) {
```

```
        //chave=6;
```

```
        beta=0;
```

```
        alfa=2;
```

```
    }
```

```
    else {
```

```
        //chave=2;
```

```
        beta=0;
```

```
        alfa=0;
```

```
    }
```

```
    }
```

```
else if ((alfa==0) && (beta ==0)) { // 0,7
```

```
    if ((chaveanterior[0]==0) || (chaveanterior[0]==1) || (chaveanterior[0]==2) || (chaveanterior[0]==4)) {
```

```
        //chave=0;
```

```
        beta=0;
```

```
        alfa=1;
```

```
    }
```

```
    else {
```

```
        //chave=7;
```

```
        beta=1;
```

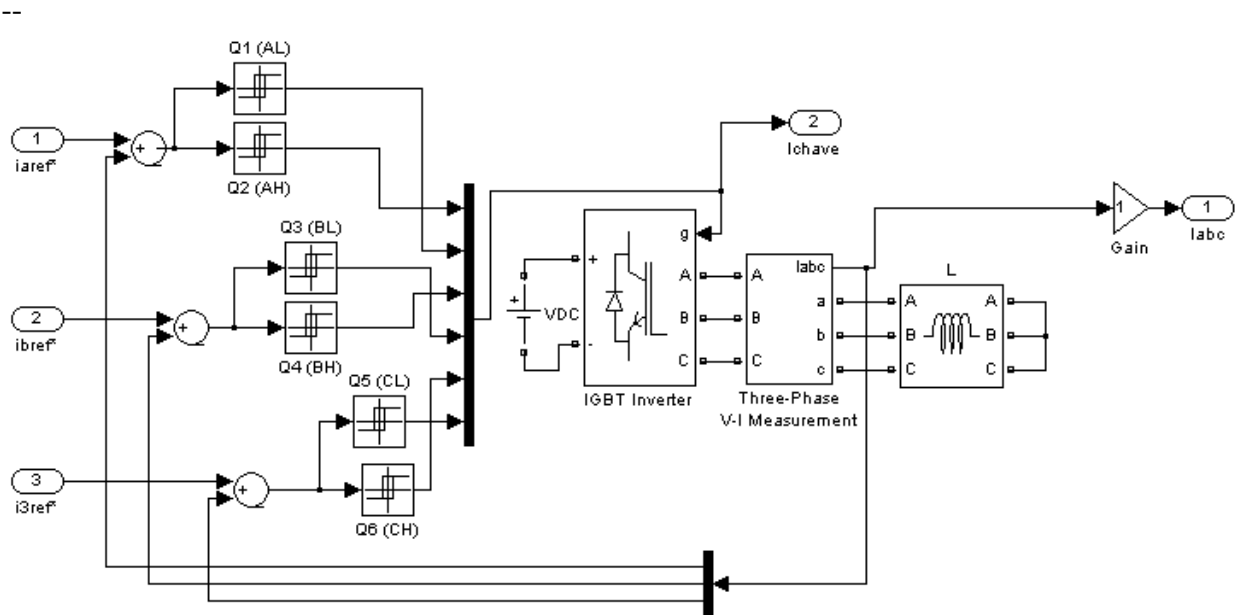
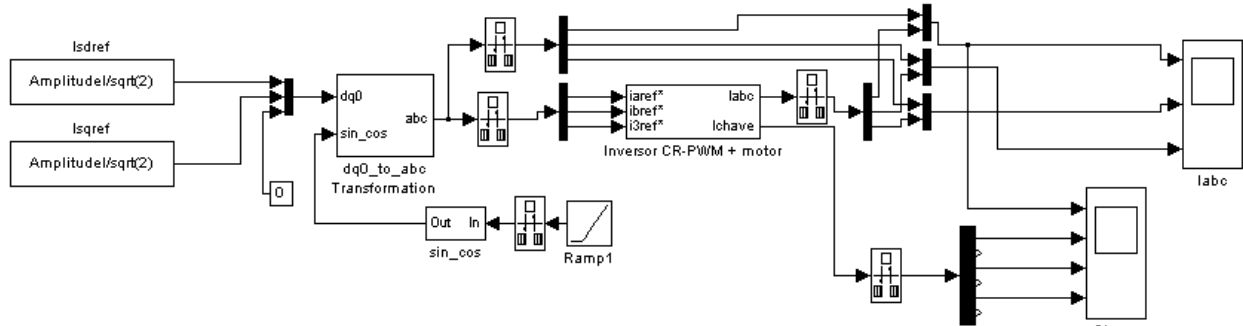
```
        alfa=1;
```

```
    }
```

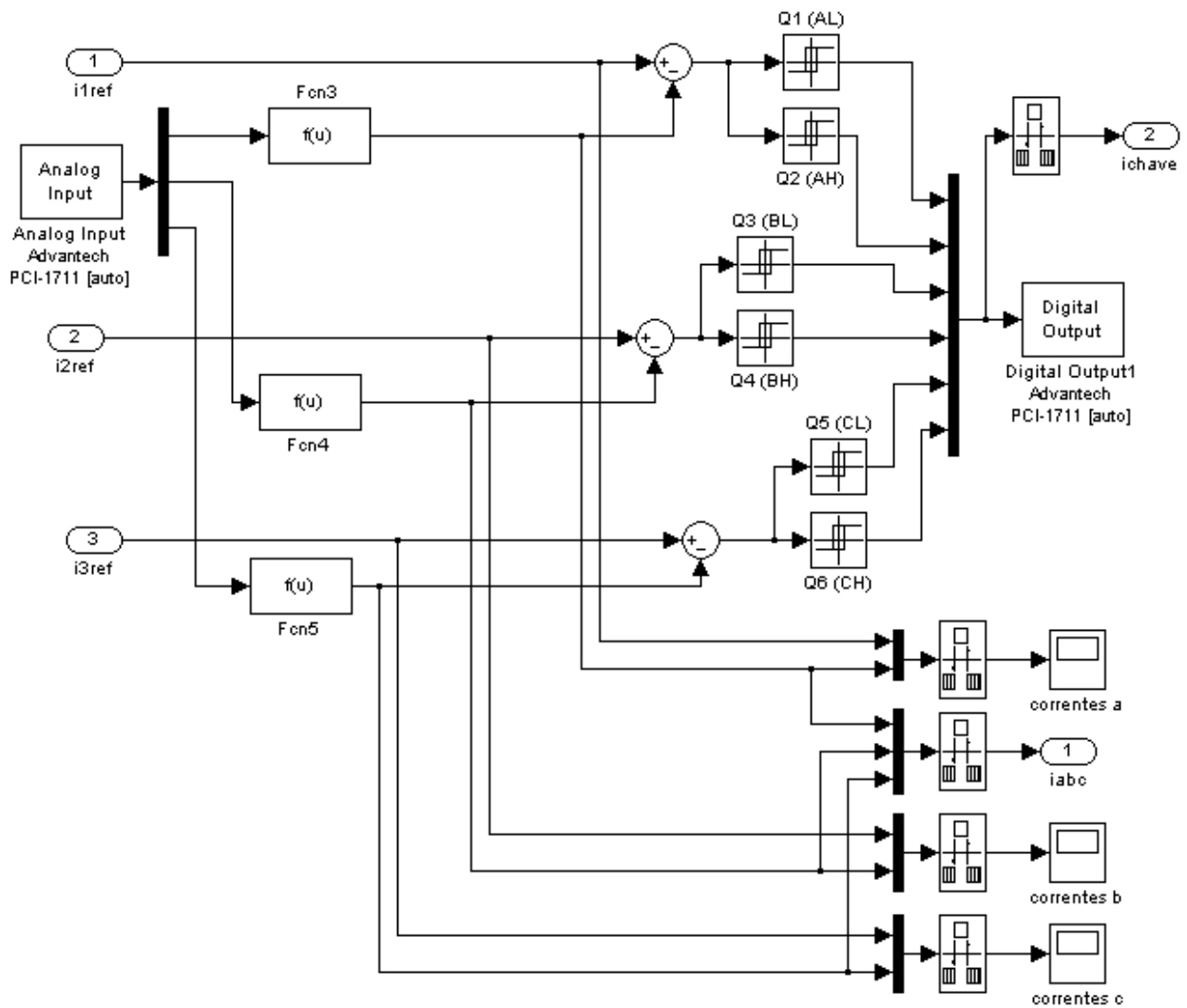
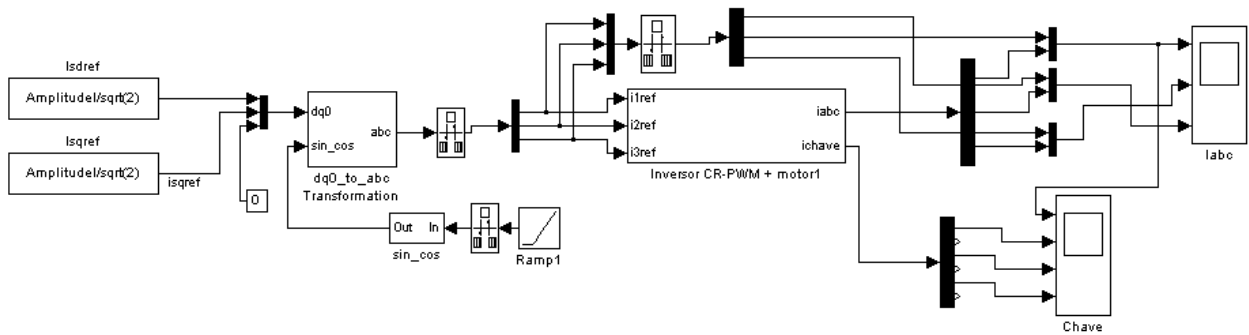
```
    }
```

```
else {
    beta=beta+1;
    alfa=alfa+1;
}
saidabeta[0]=beta;
saidaalfa[0]=alfa;
chave[0]=chaveanterior[0];
/* %%%-SFUNWIZ_wrapper_Outputs_Changes_END --- EDIT HERE TO _BEGIN */
}
```

Apêndice 3 - Controlador “bang-bang” implementado no Simulink.



Apêndice 5 - Controlador “bang-bang” implementado no Simulink para controle em tempo real.



Apêndice 6 - Controlador com tabela de chaveamento implementado no Simulink para controle em tempo real.

