

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MODELO DINÂMICO DE UM MOTOR ASSÍNCRONO DE ACIONAMENTO INTERMITENTE

por

Vinícius Dalla Vechia

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2011

MODELO DINÂMICO DE UM MOTOR ASSÍNCRONO DE ACIONAMENTO INTERMITENTE

por

Vinícius Dalla Vechia

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Dr. Mário Roland Sobczyk Sobrinho

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzales

Prof. Dr. Eduardo Andre Perondi

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Porto Alegre, 05 de Dezembro de 2011.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Roque e Vera, por terem me apoiado e incentivado durante toda a graduação. Agradeço a minha irmã, Jacqueline, por estar ao meu lado em todos os momentos difíceis.

A todos os meus colegas e amigos pelo apoio e companheirismo, fundamental nos momentos de descontração. Em especial aos amigos da Gang.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Mário Roland Sobczyk Sobrinho, por todo esforço dedicado a me ajudar nesta última etapa da graduação.

A todos os professores da UFRGS que de alguma maneira ajudaram na minha formação. Em especial ao professor Laranja por tornar possíveis os testes realizados neste trabalho. Ao técnico de laboratório, Mateus Marchioro, pela dedicação em ajudar a resolver os problemas enfrentados na realização deste trabalho.

A Metalúrgica MS por entender as faltas no estágio, em especial ao amigo Ciro pela colaboração neste trabalho.

DALLA VECHIA, V. **Modelo Dinâmico de um Motor Assíncrono de Acionamento Intermitente**. 2011. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

Este trabalho aborda a modelagem dinâmica do comportamento de um motor elétrico de indução com gaiola de esquilo tendo a finalidade de auxiliar futuros trabalhos que necessitem de resultados teóricos preliminares ou ultrapassem o limite de funcionamento das bancadas experimentais. O objetivo é obter um modelo através do pacote computacional Simulink/Matlab® e confrontá-lo com resultados obtidos experimentalmente para validação. A modelagem foi realizada separando suas partes elétrica e mecânica. A parte elétrica ainda foi dividida em estática e dinâmica, onde a primeira foi modelada através de um mapa estático, e a segunda foi representada através de uma função de transferência do circuito elétrico equivalente. A parte mecânica é modelada com uma função de transferência obtida através de analogias entre o comportamento dinâmico de sistemas mecânicos e circuitos elétricos passivos lineares. O modelo apresentou resultados qualitativos satisfatórios, mostrando um comportamento indicativo de que pode vir a ser uma ferramenta adequada para análise de motores de indução, porém não pôde ser validado devido a dificuldades encontradas nos testes experimentais.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem, Motor de indução, Função de transferência.

DALLA VECHIA, V. **Dynamic Model of an Asynchronous Motor of Intermittent Actuation.** 2011. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

The present work deals the dynamic modeling of the behavior of an induction electric motor with squirrel cage with the purpose of assisting future works requiring preliminary theoretical results or that exceed the operating limit of the experimental bench. The goal is to obtain a model by computational package Simulink/Matlab® and confronts its results with experimental data. The modeling is performed by separating electrical and mechanical parts. The electrical has been divided into static and dynamic, where the first was modeled through a static mapping, and the second, represented by the transfer function of the electrical equivalent circuit. The mechanical part is represented through a transfer function obtained by means of analogies between the dynamic behavior of mechanical systems and passive linear electrical circuits. The model showed satisfactory qualitative results, presenting behavior that indicating it may be a suitable tool for analysis of induction motors, but could not be experimentally validated because of difficulties encountered in the practical tests.

KEYWORDS: Modeling, Induction Motor, Transfer Function.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO.....	3
4.1 Modelagem da Parte Elétrica.....	4
4.1.1 Inversor de Frequência.....	7
4.2 Modelagem da Parte Mecânica.....	8
4.3 Modelo em Diagrama de Blocos.....	9
5. BANCADA EXPERIMENTAL.....	10
5.1 Identificação dos Parâmetros da Bancada.....	11
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	12
7. CONCLUSÕES	14
7.1 Sugestões para os próximos trabalhos.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
Apêndice I	16

1. INTRODUÇÃO

A exemplo do que ocorre em diversos países, devido ao ritmo acelerado com que o Brasil vem se urbanizando, a demanda por energia elétrica tem crescido significativamente em quase todas as suas localidades [g1.globo.com, 2011]. Por outro lado, existem limites para a capacidade de produção e distribuição dessa energia, que são agravados quando se levam em consideração os aspectos sociais e ambientais envolvidos neste processo. Finalmente, as condições de alta competitividade do mercado econômico também exigem grande eficiência no desenvolvimento, fabricação e distribuição de qualquer produto comercial. Por essas razões, a busca por meios mais econômicos e eficientes para a utilização da energia elétrica é intensa e constante em todos os setores da atividade industrial moderna.

O setor industrial consome grande parte da energia produzida no Brasil. Um estudo realizado pela ELETROBRÁS/PROCEL, 2009, mostra a participação dos principais gêneros de consumo de energia elétrica no setor industrial nacional, destacando-se a expressiva participação dos motores elétricos com 62% de toda a energia consumida. Sabe-se também que a grande maioria destes motores é do tipo indutivo, o qual tem como principal vantagem a eliminação do atrito de todos os contatos elétricos deslizantes e uma construção bastante simples, o que reduz o custo de fabricação, sendo que estes modelos são fabricados para uma grande variedade de aplicações, desde alguns watts até muitos megawatts [Leonhard, 1985].

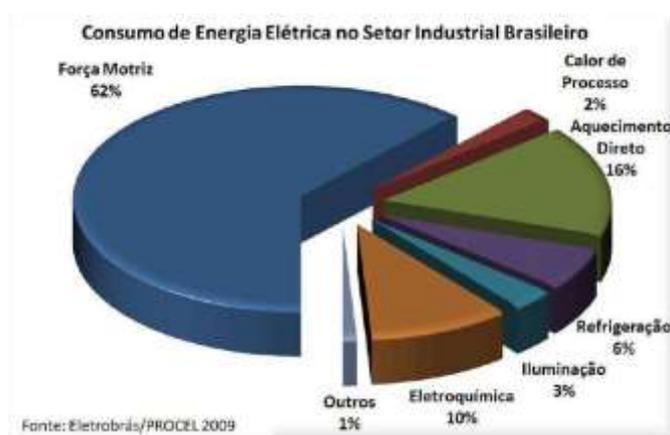


Figura 1.1 - Estrutura de consumo por gênero de carga [Eletrobrás, 2009]

Por serem utilizados em larga escala no setor industrial, os motores elétricos são assunto para diversos trabalhos de pesquisa. Um exemplo disto são os trabalhos que estão sendo realizados na UFRGS, onde alunos e professores do Departamento de Engenharia Mecânica iniciaram um projeto que visa a estudar o consumo de energia elétrica de motores. Para que tal projeto seja efetuado de forma satisfatória, é necessário desenvolver modelos de simulação dos motores em questão, de modo a flexibilizar a avaliação das etapas teóricas de seu desenvolvimento. Com tais modelos, será possível realizar testes preliminares das soluções teóricas propostas, antevendo as eventuais dificuldades envolvidas na implementação de tais soluções no momento da sua avaliação experimental. Além disso, os mesmos modelos também poderão extrapolar as previsões de comportamento do sistema, permitindo o estudo dos motores de interesse para condições de operação que não poderiam ser obtidas na prática com os equipamentos experimentais disponíveis.

O presente trabalho tem a finalidade de obter um modelo simplificado do comportamento dinâmico de um motor de indução, omitindo os detalhes referentes aos fenômenos eletromagnéticos envolvidos no sistema. O objetivo de tal modelo é permitir a simulação do referido motor quando os parâmetros de interesse se referem mais

especificamente à parcela mecânica de seu comportamento. O modelo é desenvolvido com base em uma clara separação entre os fenômenos de natureza elétrica e mecânica envolvidos no funcionamento do sistema estudado. O modelo será programado numericamente por meio do pacote Simulink/Matlab® e sua validação será feita através de medidas experimentais realizadas em uma bancada de testes.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é obter um modelo para simulação do comportamento dinâmico de um motor elétrico de indução, utilizando somente parâmetros fornecidos pelo fabricante e dados experimentais de obtenção relativamente simples. Para este fim, é necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- modelagem da parte elétrica;
- modelagem da parte mecânica;
- identificação dos parâmetros físicos;
- montagem do modelo no ambiente Simulink/Matlab® usando a representação por diagramas de blocos;
- validação experimental;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A modelagem computacional é uma alternativa de custo relativamente baixo para analisar o comportamento de sistemas físicos diversos, uma vez que, nos últimos anos, o avanço da tecnologia tem contribuído para facilitar e melhorar as técnicas de modelagem. No caso dos motores elétricos de indução, os exemplos de modelos de simulação encontrados na literatura pesquisada têm sido usados com frequência para dois tipos de propósitos: ilustração didática e projeto de controladores de velocidade.

No que diz respeito à modelagem teórica de sistemas dinâmicos, uma abordagem bastante ampla referente à obtenção de um modelo matemático válido por meio de leis constitutivas básicas, analogias, transformadas de Laplace e diagramas de blocos pode ser encontrada em Ogata, 1985. No caso de máquinas elétricas em geral e de motores de indução em particular, Chapman, 2005 e Fitzgerald, 1975, são exemplos clássicos de referências, caracterizando os princípios de funcionamento não somente dos diversos tipos de motores elétricos como também de seus dispositivos acessórios mais comuns, como inversores de frequência e transformadores. Já, em Ong, 1997 e em Chiasson, 2005, aborda-se o desenvolvimento específico de modelos aprofundados de simulação de sistemas elétricos, apresentando técnicas para a modelagem minuciosa e de elevada fidelidade de sistemas elétricos de alto desempenho e/ou voltados para aplicações especiais. No caso específico do controle de velocidade desses motores, Araújo, A. D et al., 2001, apresenta um sistema cuja monitoração é feita através de um controlador vetorial não-linear com orientação pelo fluxo do rotor indireto. O sistema é formado por um motor de indução de 0,25 HP com rotor em gaiola de esquilo, acionado por um inversor de tensão com modulação por largura de pulso e controle de corrente. Os resultados comprovam a eficiência da estratégia de controle proposta apresentando baixa sensibilidade a distúrbios e robustez a variações paramétricas.

Em termos da modelagem de motores de indução trifásicos para propósitos genéricos, Teixeira, et al., 2000, realizou testes simulando o efeito da digitalização das curvas de rendimento dos mesmos, a fim de formar um banco de dados para automação do processo de estudo técnico e econômico da adequação da força motriz. Os resultados foram comparados com as curvas fornecidas pelo fabricante, chegando a altos coeficientes de correlação. Em outro trabalho, Machado, 2000, modelou o motor de indução utilizando diversos ambientes computacionais de simulação a fim de comparar o desempenho quanto a apresentação de resultados e tempo de processamento. Segundo o autor, o desempenho do ambiente Simulink/Matlab® pode ser considerado excelente em ambos aspectos. Finalmente, uma

modelagem por meio de redes neurais artificiais (RNA) do comportamento de um motor de indução trifásico de 1 cv alimentado por tensões desequilibradas foi conduzida por Oliveira, J. E. A et al., 2010. Segundo os mesmos, o método proposto reduz substancialmente a tarefa de modelagem por permitir sua utilização sob condições de assimetria e não-linearidade. Os resultados obtidos foram confrontados com os de um modelo dinâmico, e, ainda de acordo com os autores, a técnica utilizada apresenta grande potencial em termos de fidelidade e tempo de resposta.

Um trabalho de pesquisa sobre eficiência de motores está sendo desenvolvido por professores e alunos do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS [Bonilha, 2011]. No referido trabalho, um motor elétrico de indução acoplado por embreagem eletromagnética a volantes de inércia foi testado em situações de partida. Os resultados experimentais mostram que, quando o motor é acionado “a vazio” e a carga inercial é acoplada somente depois de a velocidade estabilizar, podem-se obter reduções de até 25% do consumo energético em relação às situações em que o acoplamento é feito desde a partida.

4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Em linhas gerais, todas as máquinas elétricas se baseiam na aplicação de forças provenientes da interação entre um campo magnético e uma espira condutora de corrente elétrica posicionada em seu interior (veja Chapman, 2005, por exemplo). No caso de motores rotativos, o conjunto de espiras responsável pela geração do campo magnético é denominado *enrolamento de estator*, enquanto que as espiras que conduzem a corrente elétrica utilizada para gerar o torque mecânico compõem o *enrolamento de rotor*. Os valores de torque e velocidade gerados pelo motor podem ser regulados por meio das correntes elétricas aplicadas a cada enrolamento. Na Figura 4.1, pode-se observar um exemplo de motor elétrico e seus principais componentes.

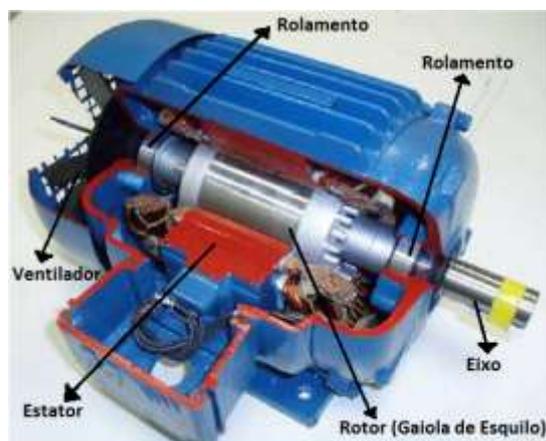


Figura 4.1 – Componentes de um motor de indução

Em motores elétricos a corrente contínua (CC), a regulação das duas correntes elétricas responsáveis pela operação dos mesmos pode ser feita de modo independente. Isso permite que tanto sua modelagem matemática como o controle de sua velocidade sejam feitas de forma relativamente simples. Por outro lado, por necessitarem de contatos especiais para o fornecimento de corrente elétrica para o rotor, estes motores são de complexidade construtiva relativamente grande e requerem níveis altos de manutenção, o que resulta em custos de operação elevados.

No caso de motores a indução, os princípios físicos de operação são essencialmente os mesmos dos demais tipos de máquinas elétricas. No entanto, conforme será explicado de forma mais detalhada na Seção 4.1, estes motores utilizam o fenômeno da indução eletromagnética para eliminar a necessidade de contatos especiais para a condução de

corrente elétrica no enrolamento do rotor. Por essa razão, esses motores são de construção mais simples e robusta, não requerendo níveis elevados de manutenção, sendo por isso largamente utilizados em ambiente industrial. No entanto, sua modelagem matemática apresenta um grau de complexidade muito mais elevado que aquele necessário no caso dos motores CC, pois a corrente elétrica do rotor não pode ser regulada de forma independente nem da corrente do estator, nem da velocidade de rotação [Chapman, 2005].

Neste trabalho, a exemplo dos modelos normalmente utilizados para representar motores CC (veja Ogata, 1985, por exemplo), o comportamento do motor de indução é modelado em termos de duas partes distintas: mecânica e elétrica. Na parte mecânica, utiliza-se um modelo teórico linear, largamente utilizado na literatura especializada. Na parte elétrica, devido à sua característica fortemente não-linear, o comportamento do motor é aproximado por meio de uma interpolação da relação estática entrada-saída informada pelo fabricante, acrescida de uma função de transferência de 1ª ordem para representar o comportamento transiente da mesma. As duas partes são desenvolvidas e interconectadas utilizando-se a representação por diagramas de blocos, implementada por meio do pacote computacional Matlab-Simulink®.

4.1 Modelagem da Parte Elétrica

A geração de torques em um motor de indução se baseia no fenômeno da indução eletromagnética, isto é, na geração de correntes elétricas em uma espira condutora fechada devido à variação do fluxo eletromagnético que atravessa a mesma. Em um motor de indução trifásico, esse fenômeno é ocasionado pela geração de um campo magnético “girante” no estator, resultante dos campos induzidos por três correntes elétricas senoidais, com mesma amplitude e defasadas de 120° no tempo. Os campos induzidos por cada corrente elétrica apresentam a mesma defasagem também em termos espaciais, através do posicionamento adequado de suas bobinas correspondentes, conforme ilustrado na Figura 4.2. A interação entre os três campos individuais resulta em um campo de amplitude constante, cuja orientação no espaço gira com velocidade constante [Fitzgerald, 1975].

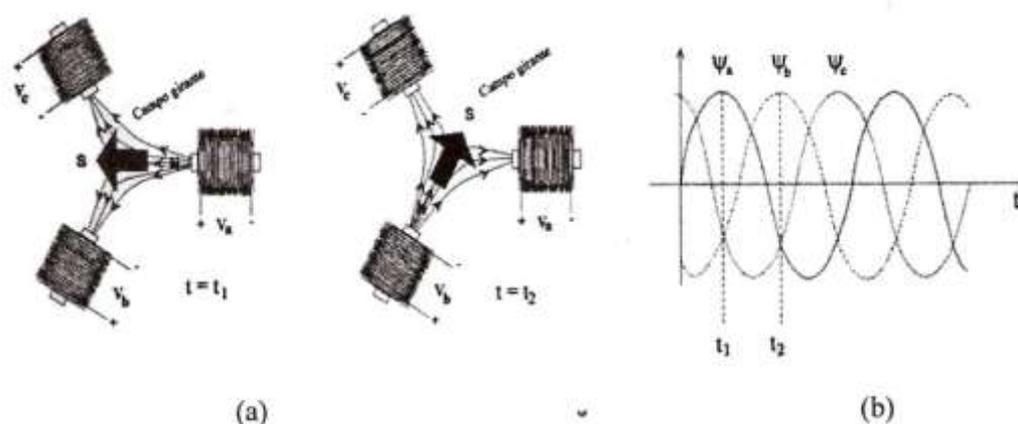


Figura 4.2 – Campo magnético girante [Fitzgerald, 1975]

A geração de torque no rotor devida à presença do campo magnético girante induzido pelo estator pode ser compreendida com o auxílio da Figura 4.3. No que diz respeito às espiras que compõem o enrolamento do rotor, o campo girante induzido pelo estator \vec{B} pode ser interpretado como dois campos diferentes: uma componente (\vec{B}_x) é perpendicular ao plano da espira, enquanto a outra (\vec{B}_y) é paralela ao mesmo. Como o campo induzido pelo estator é girante, essas duas componentes são percebidas pela espira como variáveis no tempo. Assim, de acordo com a Lei de Faraday, a variação do fluxo magnético decorrente da componente

perpendicular \vec{B}_x induz uma corrente elétrica na espira. Essa corrente interage com a componente paralela \vec{B}_y do campo girante, criando forças que geram um par binário sobre a espira em torno do eixo de giro do motor, aplicando o torque mecânico responsável pelo giro do motor.

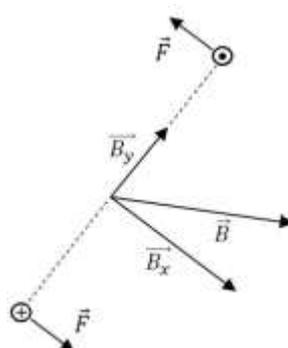


Figura 4.3 – Geração de torque sobre as espiras

Uma vez que a corrente do rotor só pode ser induzida se a componente perpendicular do campo do estator estiver variando em relação ao plano das espiras, tem-se que o torque gerado por meio deste sistema é dependente da *diferença* entre as velocidades de rotação do campo e do rotor, de modo que o mesmo é necessariamente nulo à velocidade síncrona. Além disso, ainda devido ao giro do campo do estator, as duas componentes de campo percebidas pelas espiras do rotor são variáveis no tempo. Finalmente, as taxas de variação dessas componentes também mudam com o tempo, em função da própria velocidade do rotor. Dessa forma, o torque aplicado ao eixo do rotor tem dependência fortemente não-linear em relação à velocidade angular do mesmo, conforme ilustrado na Figura 4.4. Assim, pode-se perceber que um modelo matemático detalhado do funcionamento de um motor de indução trifásico apresenta níveis relativamente elevados de complexidade.

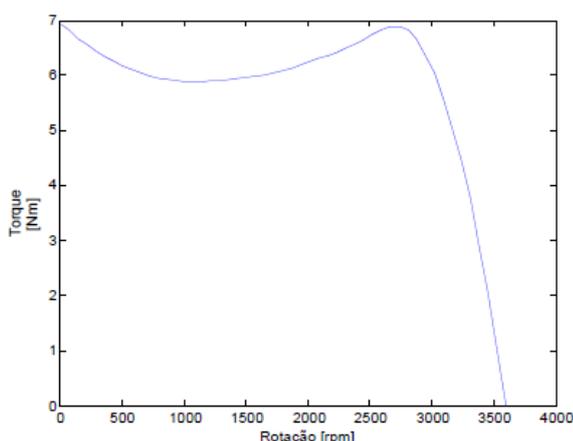


Figura 4.4 – Torque aplicado ao rotor em função da velocidade (WEG, 2011)

Neste trabalho, devido ao alto nível de complexidade envolvido na sua modelagem matemática detalhada, a representação dos fenômenos eletromagnéticos responsáveis pela geração do torque aplicado pelo motor de indução será efetuada por meios aproximados. Para tanto, os principais aspectos de sua operação foram separados em dois modelos simplificados: um para os efeitos *estáticos*, outro para os *dinâmicos*. No primeiro caso, a intenção é modelar a dependência entrada/saída em termos das *amplitudes* dos dois sinais. No segundo, pretende-se representar os atrasos existentes entre a aplicação do sinal de entrada (escorregamento) e a estabilização da resposta verificada na saída (torque aplicado ao motor).

Para modelar a parte estática da relação torque x velocidade de rotação, foi realizada a representação matemática discreta da curva característica fornecida pelo fabricante do motor em questão, gerando-se um conjunto de pares de valores representativos da relação entrada-saída. Esses valores são configurados em um bloco do Simulink denominado *Lookup Table*, que realiza interpolações para estimar os valores do torque de saída em função da velocidade do rotor à medida que a simulação progride. Dessa forma, é possível representar os aspectos essenciais do comportamento estático entrada-saída da parte elétrica do motor de indução sem lidar com os intrincados fenômenos eletromagnéticos envolvidos no funcionamento do mesmo.

A fim de facilitar a manipulação do modelo em termos da solicitação de velocidades diferentes, os dados originais do fabricante foram rearranjados de modo a representar o torque de saída do motor em termos do *escorregamento* s do mesmo. O escorregamento é uma medida normalizada da diferença entre a velocidade do rotor ω_r e a velocidade síncrona ω_d de sua tensão de excitação, sendo definido matematicamente como:

$$s = \frac{\omega_d - \omega_r}{\omega_d} \quad (4.1)$$

Como se pode perceber na equação 4.1 a transformação de variáveis realizada pode ser caracterizada como uma translação de origem acompanhada de uma mudança de escala. Assim, uma vez que as interpolações realizadas pelo bloco *Lookup Table* são de ordem 1, esse procedimento não gera modificações no comportamento originalmente apresentado pelo motor, isto é, exceto pela mudança na variável de excitação escolhida, a relação entrada-saída fornecida pelo fabricante permanece inalterada.

Para modelar a parte dinâmica dos efeitos elétricos presentes no motor de indução, é necessário obter a constante de tempo τ da função de transferência que caracteriza seu circuito equivalente. De acordo com Chapman, 2005, o referido circuito pode ser modelado conforme o esquema ilustrado na Figura 4.5, onde, V_1 é a tensão de entrada no estator, X_1 é a reatância do enrolamento do estator, R_1 é a resistência do estator, X_m é a reatância de magnetização, X_2 é a reatância do enrolamento do rotor, R_2 é a carga relativa a resistência do rotor, R_{fe} são as resistências associadas às perdas de núcleo e s é o escorregamento.

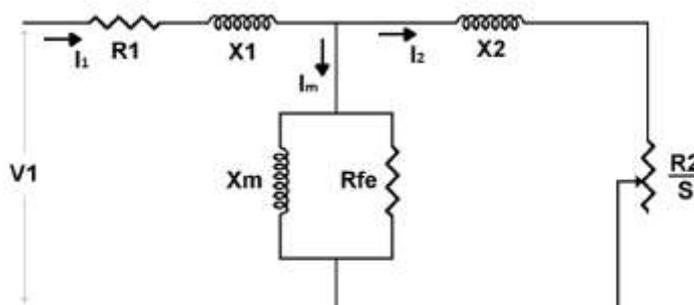


Figura 4.5- Circuito equivalente do motor de indução (adaptada de Chapman, 2005)

Para obter-se a constante de tempo, é necessário conhecer as indutâncias do circuito (L) que são calculadas a partir das reatâncias da Figura 4.5 por meio da Equação 4.2.

$$X = \omega L \quad (4.2)$$

onde, $\omega = 2\pi f$ é a velocidade angular [rad/s] e f é a frequência de excitação da potência [Hz].

Ainda de acordo com Chapman, 2005, devido à grande impedância do conjunto formado por X_m e R_{fe} , para as condições usuais de operação de motores de indução, praticamente toda a corrente elétrica tende a passar pelo ramo correspondente ao rotor. Dessa

forma, é possível fazer algumas simplificações no circuito original, resultando no circuito equivalente mostrado na Figura 4.6.

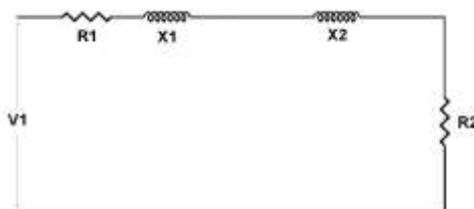


Figura 4.6 – Circuito simplificado [adaptado de Chapman, 2005]

Neste modelo, é estudado o caso em que o motor está inicialmente em repouso quando é subitamente alimentado por tensões senoidais, estando neste momento submetido ao escorregamento máximo $s = 1$. Neste momento, a resistência elétrica do rotor fica restringida a R_2 . Com estas considerações a *Função de Transferência* que representa este circuito pode ser obtida na literatura de controle como [Ogata, 1985]:

$$Y(s) = \frac{I(s)}{V_1(s)} = \frac{1}{Ls + R} = \frac{1}{L} \frac{1/\tau}{s + 1/\tau} \quad (4.3)$$

onde $\tau = \frac{L_{eq}}{R_{eq}}$, com $L_{eq} = L_1 + L_2$ e $R_{eq} = R_1 + R_2$ para o circuito simplificado da Figura 4.6.

Uma vez que a relação de dependência entre as amplitudes da entrada e da saída é representada por um mapa estático correspondente à Figura 4.4, a função de transferência necessária à modelagem da parcela dinâmica da parte elétrica do motor deve ter ganho estático unitário, de modo a representar somente a dependência no tempo para a estabilização da velocidade. Assim, o termo $1/L$ da Equação 4.3 pode ser suprimido da função de transferência a ser modelada no programa em ambiente Simulink, resultando:

$$Y(s) = \frac{1/\tau}{s + 1/\tau} \quad (4.4)$$

4.1.1 Inversor de Frequência

Os inversores de frequência são dispositivos eletrônicos que convertem a tensão alternada monofásica da rede elétrica em uma tensão trifásica com amplitude e frequência reguláveis, usada para alimentar o motor de indução. Para tanto, a tensão alternada da rede é retificada, e a tensão contínua resultante é posta em contato com os três enrolamentos do motor por meio de chaveamentos sucessivos e de alta frequência, alternando a polaridade da tensão percebida pelos mesmos. Um diagrama simplificado de um inversor de frequência pode ser observado na Figura 4.7.

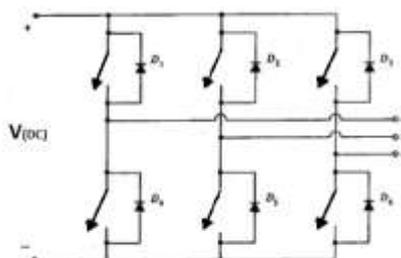


Figura 4.7 – Diagrama esquemático simplificado de um inversor de frequência (adaptado de Chapman, 2005).

Em diversos inversores de frequência, o processo de chaveamento é utilizado para gerar um padrão de excitação conhecido como modulação por largura de pulsos (*Pulse Width Modulation - PWM*), onde a tensão de saída é aproximada por um trem de pulsos controlado. Quanto maior a tensão desejada na saída, maior é a duração do pulso de entrada aplicado, produzindo uma forma de onda de alta frequência cujo valor médio se aproxima de um formato senoidal. Este processo pode ser observado na Figura 4.8.

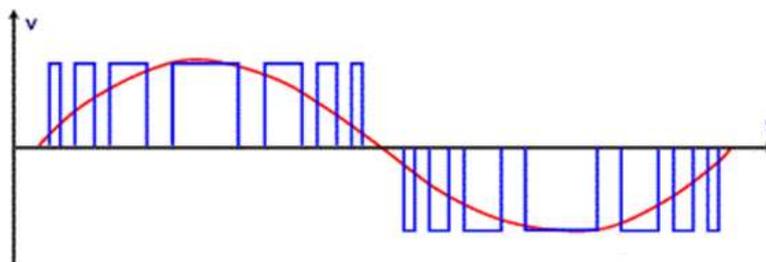


Figura 4.8 – Aproximação de uma corrente senoidal por meio de uma sequência de pulsos de tensão (adaptado de Chapman, 2005).

O inversor de frequência também tem a função de controlar a tensão de excitação do motor evitando que o mesmo atinja picos de demanda de corrente. Isso é feito através do aumento gradativo da frequência de excitação, impedindo o surgimento de um escorregamento muito alto na partida. No caso do inversor utilizado neste trabalho, a frequência é acelerada linearmente até a frequência nominal (60 Hz) em um tempo de 5 segundos. No modelo de simulação, este comportamento é emulado através de uma rampa de aceleração linear com saturação na frequência desejada.

Devido às características do circuito de entrada utilizado na maioria dos inversores no mercado, constituído de um retificador a diodos e um banco de capacitores de filtro, a corrente elétrica circulante nestes sistemas possui uma forma de onda que não é perfeitamente senoidal, contendo harmônicas da frequência fundamental da rede elétrica (60 Hz ou 50 Hz, dependendo da localidade). Essas correntes harmônicas circulando pelas impedâncias da rede de alimentação provocam quedas de tensão harmônicas, distorcendo a tensão de alimentação do próprio inversor e de outros dispositivos consumidores atrelados à rede. Como efeito dessas distorções harmônicas de corrente e tensão, pode ocorrer um aumento de perdas elétricas nas instalações, resultando em diminuição de rendimento, sobreaquecimento de componentes (cabos, transformadores, bancos de capacitores, motores, etc.) e redução do fator de potência global da rede [Chapman, 2005].

4.2 Modelagem da Parte Mecânica

Para modelar a parte mecânica do motor de indução usa-se o método de explorar as analogias existentes entre o comportamento dinâmico dos sistemas mecânicos com o de circuitos elétricos passivos equivalentes (veja Ogata, 1985, por exemplo).

A parte mecânica de funcionamento do motor de indução pode ser modelada como um sistema rotor/mola torcional/amortecedor torcional. Devido ao fato de o eixo do motor ser de um aço (AISI 1045), pode ser considerado rígido, o que leva a uma simplificação do modelo para um sistema rotor/amortecedor torcional. Uma representação deste sistema pode ser observada na Figura 4.9.

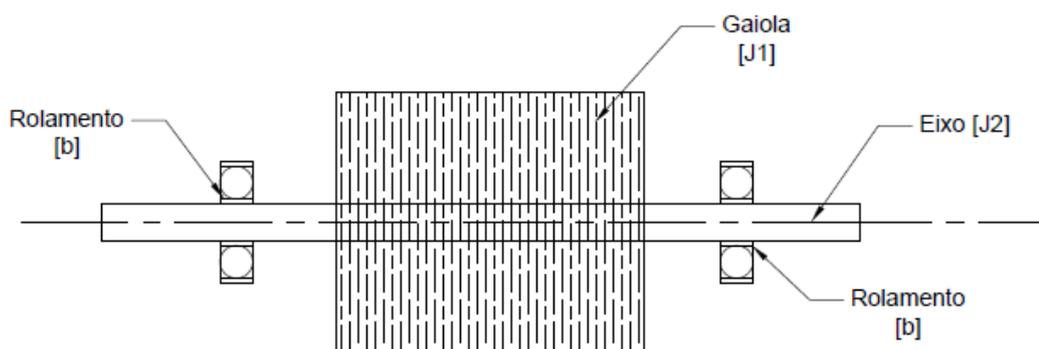


Figura 4.9 – Sistema rotor/amortecedor torcional representando rotor e mancais do motor.

Utilizando as analogias entre sistemas elétricos e mecânicos, obtém-se o seguinte circuito elétrico equivalente para este sistema:

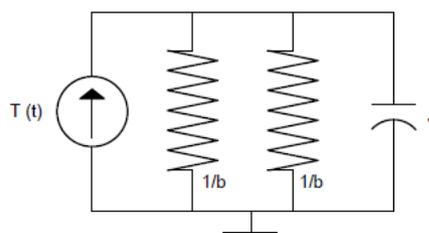


Figura 4.10 – Circuito elétrico análogo para o motor

Aplicando a Lei de Kirchhoff das correntes, a equação que descreve o comportamento dinâmico do circuito é:

$$J \frac{d\Omega(t)}{dt} + 2b\Omega(t) = T(t) \quad (4.5)$$

onde $T(t)$ é o Torque de entrada, J é o momento de inércia do eixo e gaiola, $\Omega(t)$ é a velocidade de resposta do motor e b é o coeficiente de atrito nos mancais.

A fim de representar esta parcela do sistema no modelo a ser simulado, aplica-se a Transformação de Laplace à Eq. (4.5) para obter a Impedância de Transferência da parte mecânica do motor:

$$Z(s) = \frac{\Omega(s)}{T(s)} = \frac{1}{Js+2b} \quad (4.6)$$

4.3 Modelo em Diagrama de Blocos

Através dos métodos descritos nas seções 4.1 e 4.2, foi montado o seguinte diagrama de blocos para simular o comportamento do motor de indução no pacote Simulink/Matlab®. Todas as simulações são obtidas através deste modelo, onde as integrações são calculadas com passo fixo de $5 \cdot 10^{-5}$ para o método de *Runge-Kutta*. O modelo obtido pode ser observado na Figura 4.11.

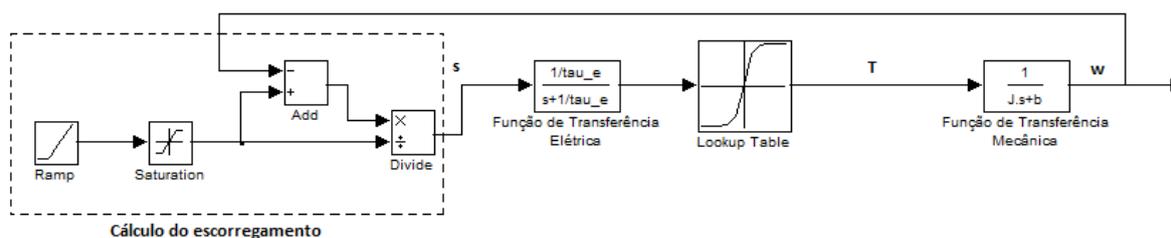


Figura 4.11 – Modelo de simulação para o motor de indução

5. BANCADA EXPERIMENTAL

Para realizar as medidas experimentais, é utilizada uma bancada de testes composta por um motor, inversor de frequência, fonte de tensão, osciloscópio, balança digital de precisão, roda dentada, sensor de frequência e placa de conversão frequência/tensão. A bancada de testes utilizada pode ser observada na Figura 5.1.

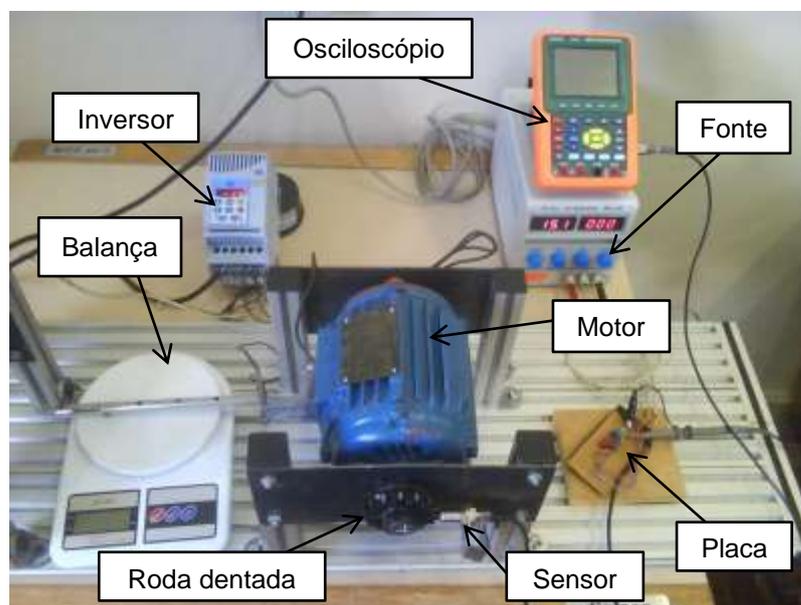


Figura 5.1 – Bancada de testes experimentais

O inversor de frequência utilizado na bancada experimental é da marca WEG e apresenta as características apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dados técnicos do inversor de frequência utilizado

200 / 240 VAC 1 fase +10%/- 15%	CFW-08				
	Corrente Nominal de Saída [A]	Potência de Saída [kVA]	Potência Máxima do Motor [hp]	Corrente de Saída Máxima. [A]	Corrente Nominal de Entrada [A]
Código					
MSCFW080040S2024SOA1Z	4,0	1,5	1,0	6,0	8,8

O inversor de frequência CFW-08 proporciona duas opções de controle, uma vetorial e outra escalar, ambas programáveis de acordo com a aplicação. O modo utilizado neste trabalho é o escalar. Este método é baseado na aplicação de uma curva Tensão/Frequência constante (e neste caso linear) à saída do inversor. O desempenho desta abordagem em baixas frequências de saída é limitado em função da queda de tensão na resistência do estator, que provoca uma redução significativa no fluxo do entreferro do motor e

consequentemente na sua capacidade de torque. O inversor tenta corrigir esta deficiência com a utilização de estratégias de compensação de escorregamento e *boost* de torque, que não serão discutidas neste trabalho devido às complexidades envolvidas no seu detalhamento. Neste modo de operação, a regulação da velocidade que pode ser obtida com um ajuste adequado dos meios de compensação fica em torno de 1 a 2% da rotação nominal. No caso do motor utilizado, portanto, a variação de velocidade esperada é um valor entre 36 e 72 rpm. Na maioria das aplicações, esse nível de regulação é considerado satisfatório. Em aplicações mais sofisticadas, o fabricante aconselha a utilização do modo de controle vetorial.

O motor utilizado é de indução, trifásico, 2 pólos, da marca WEG, modelo W22 Plus e potência nominal de 1 cv, possuindo as características apresentadas na Tabela 5.1. O motor é controlado por um inversor de frequência da marca WEG, modelo CFW-08 e suas características técnicas são descritas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Dados técnicos do motor utilizado

Fabricante	WEG	Rotação nominal (rpm)	3600
Potência cv (kW)	1 (0,75)	Corrente nominal (A)	2,91
Tensão (V)	220	Conjugado nominal (kgfm)	0,214
Frequência (Hz)	60	Corrente de partida (A)	19,2
Peso (kg)	8,5	Momento de Inércia (g.m ²)	0,47
$R_1 (\Omega)$	6,8910	$X_1 (\Omega) / L_1 (H)$	8,2579 / 0,0220
$R_2 (\Omega)$	5,5489	$X_2 (\Omega) / L_2 (H)$	7,7552 / 0,0206
$R_{fe} (\Omega)$	3925.6910	$X_m (\Omega) / L_m (H)$	249.7070 / 0,6623
Carga:	100%	75%	50%
Rendimento	80,5%	80%	77%
Fator de Potência	0,84	0,76	0,64

Através das equações apresentadas na seção 4.1 para a representação da parte elétrica dinâmica do motor de indução, chega-se a uma constante de tempo de $\tau = 0,00343$ s.

A velocidade do motor foi captada através de um sensor indutivo da marca Autonics, modelo PR12-2DP, fixado na borda da roda dentada de maneira a ler a passagem dos dentes como pulsações. O mesmo possui uma capacidade de leitura máxima de resposta em frequência de 800 Hz. O sinal fornecido pelo sensor indutivo é repassado para uma placa de conversão frequência/tensão adaptada ao experimento. Essa tensão é lida por um osciloscópio de marca Extech, modelo MS420, com incerteza na medição no tempo de 0,001 s para a configuração utilizada. O osciloscópio é então conectado ao computador via USB e, mediante software específico, obtêm-se as curvas do comportamento da velocidade do conjunto em função do tempo. Essas curvas são exportadas em formato .txt para o software Microsoft Office e posteriormente convertidas e tratadas pelo programa Matlab®.

5.1 Identificação dos Parâmetros da Bancada

A fim de identificar os parâmetros da bancada, foi necessário realizar a calibração da relação de conversão entre a velocidade de rotação e a tensão elétrica fornecida pelo sistema de condicionamento. Um tacômetro de marca Minipa, modelo MDT-2238A, com incerteza de medição de ± 1 rpm, foi utilizado para fazer essa calibração, que foi baseada em testes realizados para 5 velocidades diferentes. As velocidades foram medidas com o tacômetro e, para cada teste, o osciloscópio foi usado para medir a tensão gerada na placa de conversão. Posteriormente, os valores de tensão medidos foram comparados com as leituras de velocidade fornecidas pelo tacômetro, gerando a curva de calibração.

Os valores dos momentos de inércia dos componentes girantes foram obtidos por meio de informações do fabricante do motor ou de estimativas calculadas por modelagem no pacote computacional SolidWorks. A Tabela 5.1 mostra os valores resultantes dessa identificação.

Tabela 5.1 – Inércia dos componentes girantes

Componente Girante	Momento de Inércia [g·m ²]
Eixo e rotor do motor*	0,47
Roda dentada	0,04
Inércia Total	0,51

* Dados obtidos do fabricante

O atrito gerado pelo conjunto é causado principalmente nos mancais de rolamento do rotor e os rolamentos que prendem o motor na bancada. O coeficiente de atrito total para esta situação foi obtido utilizando um aparato com uma haste de comprimento conhecido e uma balança da marca Electronic, modelo Kitchen Scale e com incerteza de $\pm 1g$, como se pode observar na Figura 5.1. Com o valor lido na balança (m) é possível obter o torque (T) de atrito gerado pelo motor através da Equação 5.1.

$$T = Fd \quad (5.1)$$

onde, d é o comprimento da haste, $F = m \cdot g$ e g é a aceleração da gravidade.

O coeficiente de atrito dinâmico agora pode ser calculado por $b = T/w$, onde w é a velocidade de regime lida no tacômetro, em rad/s . Os valores encontrados para estes parâmetros são descritos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Parâmetros da bancada para cálculo do coeficiente de atrito

Parâmetro	Valor
m (kg)	0,06
d (m)	0,3020
w (rad/s)	374,9

Através destas equações chega-se ao valor do coeficiente de atrito dinâmico de $b = 0,00047 \frac{Kg \cdot m^2}{s}$.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para validação do modelo, o método escolhido foi o de realizar medições experimentais em que a frequência do inversor é variada de 5 em 5 Hz até a frequência nominal do motor (60 Hz), para comparação com os resultados das simulações correspondentes. Com os resultados experimentais coletados partiu-se para o tratamento e filtragem dos mesmos no programa Matlab®. A filtragem foi realizada através de média móvel de vinte pontos para trás e para frente.

Quando os dados experimentais foram avaliados, constatou-se que os mesmos apresentavam características inconsistentes com o comportamento esperado para o sistema. Como se pode observar nos gráficos do Apêndice I, estes resultados sugerem que a velocidade do motor estaria saturando em valores que não condizem com os lidos pelo tacômetro. Isto sugere que a saturação aparente na velocidade do rotor era devida a uma “perda de sensibilidade” do sensor à medida que a velocidade aumentava. Esta perda de sensibilidade pode ser atribuída ao fato de a roda dentada escolhida não se adequar a capacidade de leitura do sensor a tão altas velocidades. Os resultados também sugerem que a placa de conversão frequência/tensão estaria perdendo linearidade para frequências maiores do que 25 Hz, linearidade esta constatada anteriormente através de testes preliminares com

um gerador de frequências conectado a placa de conversão. Por essa razão, decidiu-se não utilizar os resultados experimentais obtidos para frequências superiores a 25 Hz. Para os cinco experimentos cujos resultados foram considerados utilizáveis, a comparação entre os mesmos e os resultados previstos pelo modelo de simulação pode ser feita com a ajuda dos gráficos mostrados nas Figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5.

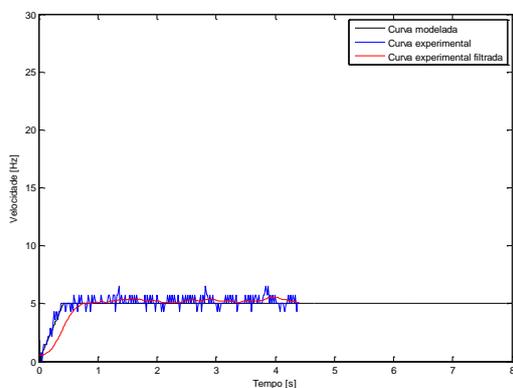


Figura 6.1 - Resposta para excitação de 5 Hz

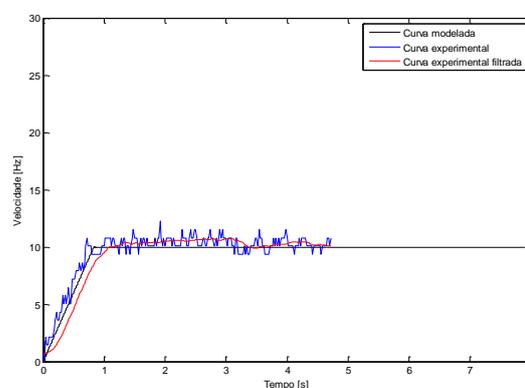


Figura 6.2 – Resposta para excitação de 10 Hz

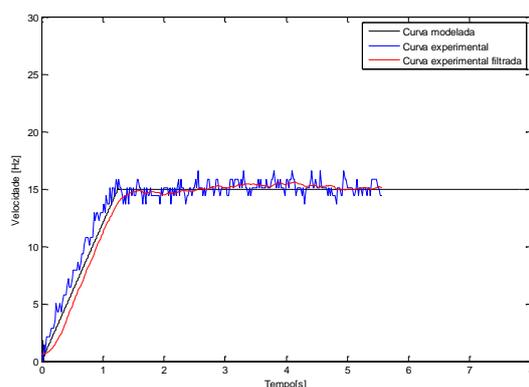


Figura 6.3 – Resposta para excitação de 15 Hz

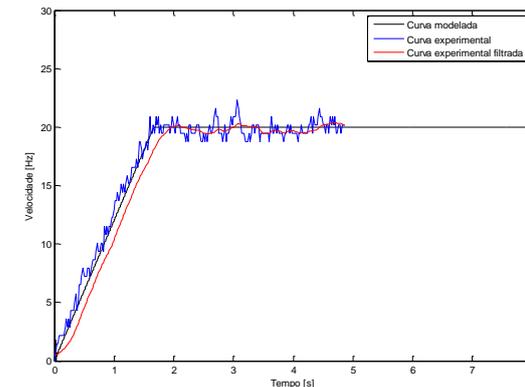


Figura 6.4 – Resposta para excitação de 20 Hz

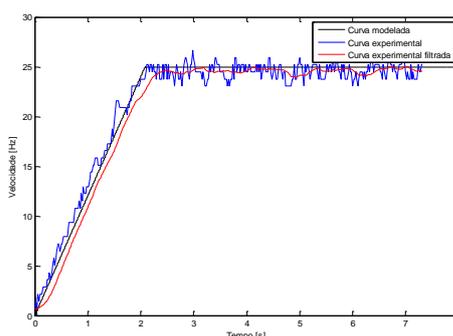


Figura 6.5 – Resposta para excitação de 25 Hz

É possível constatar que, quantitativamente, a análise está prejudicada em decorrência da flutuação da curva experimental. Esta flutuação tem uma parcela devida ao ruído eletromagnético presente na própria bancada, acrescida do efeito devido ao modo de controle utilizado pelo inversor, que pode gerar uma variação da ordem de 1,2 Hz na frequência de rotação do motor [WEG, 2009]. Finalmente, há também a influência das harmônicas de ordem superior envolvidas no processo de controle, que também são interpretadas como excitações espúrias aplicadas ao motor.

Em termos qualitativos, os gráficos mostram similaridade satisfatória, principalmente no que se refere ao valor médio da velocidade de estabilização. Além disso, na Figura 6.4, a aplicação de *zoom* sobre a região indicada permite verificar a existência de um pequeno *overshoot* na resposta esperada para o motor. Este é um comportamento característico de sistemas de segunda ordem subamortecidos, o que é compatível com os baixos valores de resistência elétrica e atrito identificados para o motor em questão e normalmente encontrados para motores de indução em geral. Assim, embora a confiabilidade dos resultados experimentais utilizados na sua validação seja pequena, percebe-se que o modelo proposto pode fornecer previsões adequadas para o comportamento de um motor de indução pelo menos sob o ponto de vista qualitativo.

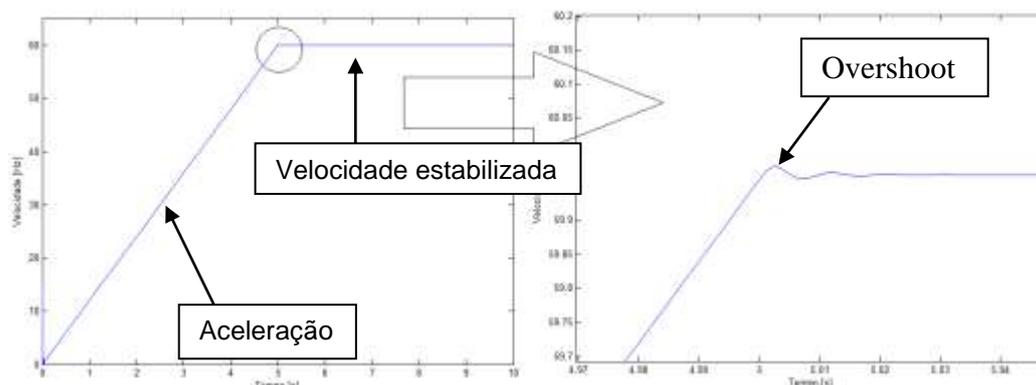


Figura 6.6 – Curva do modelo para frequência nominal

7. CONCLUSÕES

O presente trabalho conseguiu atingir a maior parte dos objetivos propostos. Foi construído um modelo para o motor de indução que contorna a complexidade envolvida na modelagem matemática detalhada dos fenômenos de interação eletromagnética envolvidos em seu funcionamento. O modelo utiliza somente curvas e parâmetros fornecidos pelo fabricante ou que podem ser identificados por meio de ensaios experimentais simples, o que facilita sua utilização prática no estudo de problemas cujo foco de interesse seja referente aos aspectos mecânicos de sua operação.

O modelo obtido não pôde ser validado adequadamente devido a dificuldades constatadas nos testes experimentais realizados, que tornam inconclusivos os resultados correspondentes. Por outro lado, os resultados obtidos por meio do modelo proposto são qualitativamente coerentes com o comportamento observado experimentalmente, e também apresentam características similares aos de outros resultados encontrados na literatura especializada. Assim, embora ainda careça de um procedimento adequado de validação experimental, o modelo proposto poderá vir a se configurar em uma ferramenta válida de análise dos motores de indução trifásicos para as condições de operação inerentes ao projeto a que se destina.

7.1 Sugestões para os próximos trabalhos

Para os próximos trabalhos que por ventura venham a dar sequência a este estudo, sugere-se uma nova abordagem experimental, utilizando uma roda dentada mais adequada para o sensor indutivo, ou mesmo utilizando outro tipo de sensor para leitura da velocidade. Também se sugere que seja utilizado o modo de controle vetorial do inversor de frequências, com o fim de comparar com os resultados experimentais obtidos por meio do modo escalar. Outra opção seria confrontar o modelo obtido neste trabalho com outros motores de indução e

com os modelos computacionais utilizados em outros trabalhos técnicos, visando a obter mais consistência para a análise dos resultados fornecidos pelo mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo, A. D.; Furtunato, A. F. A.; Salazar, A. O.; **“Controlador de Velocidade Usando Modos Deslizantes Suaves Para um Motor de Indução Trifásico”**, Revista Controle & Automação, Vol. 12, nº 2, 2001.

Bonilha, M. Z.; **“Análise Experimental do Consumo Energético de Um motor Elétrico Com Fracionamento de Carga na Partida”**, Trabalho de Conclusão de Graduação, UFRGS, 2011.

Chapman, S. J.; **“Electric Machinery Fundamentals”**, McGraw-Hill, 4th edition, 2005.

Chiasson, J. N.; **“Modeling and High Performance Control of Electric Machines”**, John Wiley & Sons, 2005.

Eletronbras, **“Aspectos Socioeconômicos”**, www.eletronbras.com. Acessado em 14/11/2011

Fitzgerald, A.E.; Kingsley, C.; Kusko, A.; **“Máquinas Elétricas”**, McGraw-Hill, Brasil, 1^a edição, 1975.

Globo, **“Residências e Comércio Puxam Alta do Consumo de Energia”**, g1.globo.com. Acessado em 14/11/2011

Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J.; **“Fundamentos de Física – Eletromagnetismo”**, J.C, vol. 3, 4^a edição, 1996.

Leonhard, W.; **“Control of Electrical Drives”**, Springer, 3rd edition, 2001.

Machado, C.M.; **“Estratégias de Modelagem Dinâmica e Simulação Computacional do Motor de Indução Trifásico”**, Universidade de São Paulo, 2000.

Ogata, K.; **“Engenharia de Controle Moderno”**. Prentice Hall, Brasil, 3^a edição, 1985.

Oliveira, J. E. A.; Serni, P. J. A.; Ulson J. A. C.; Andreoli, A. L.; Aguiar, P. R.; Goedel, A.; **“Modelagem de um Motor de Indução Trifásico Acionado com Tensões Desequilibradas por meio de Redes Neurais Artificiais”**, Universidade Estadual Paulista, 2010.

Ong, C.M.; **“Dynamic Simulation of Electric Machinery Using MATLAB®/SIMULINK”**, Prentice Hall, 1997.

Teixeira, C.A.; Oliveira Filho, D.; Santos, W.L.; **“Digitalização de Curvas Características de Rendimento de Motores Elétricos Para Adequação do Uso de Força Motriz”**, UFV-MG, 2000.

WEG, **“Guia de Especificação de Motores Elétricos”**, www.weg.net. Acessado em 21/08/2011

WEG, **“CFW-08 Manual do Usuário”**, 2009

APÊNDICE I – CURVAS DE VELOCIDADE EXPERIMENTAIS

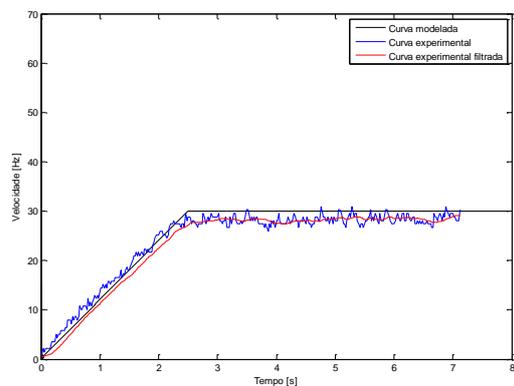


Figura 1 – Resposta para excitação de 30 Hz

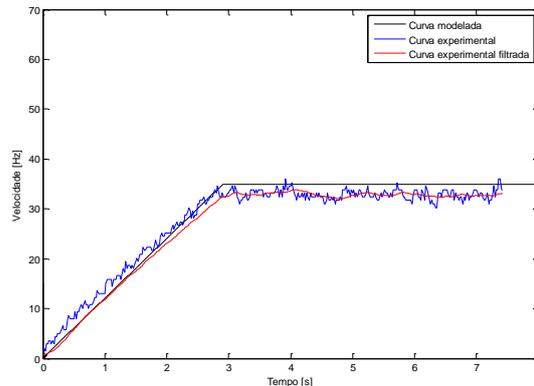


Figura 2 – Resposta para excitação de 35 Hz

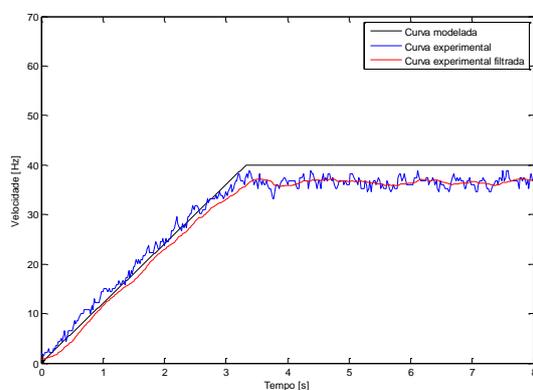


Figura 3 – Resposta para excitação de 40 Hz

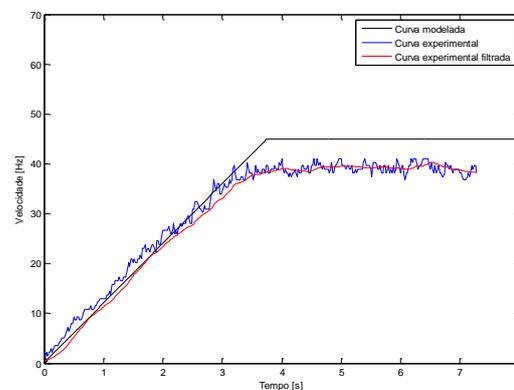


Figura 4 – Resposta para excitação de 45 Hz

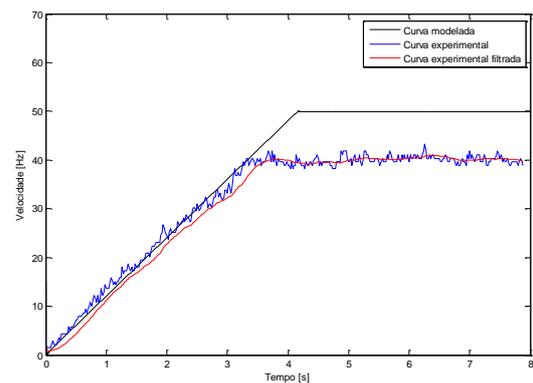


Figura 5 – Resposta para excitação de 50 Hz

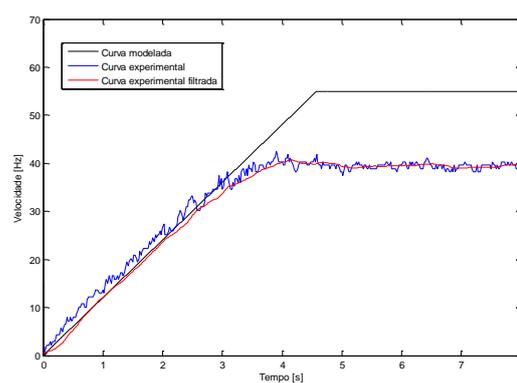


Figura 6 – Resposta para excitação de 55 Hz

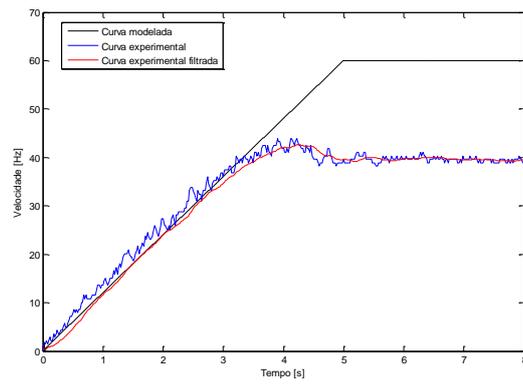


Figura 7 – Resposta de excitação para 60 Hz