Ambiente de Simulação para o Desenvolvimento e Validação de Técnicas de Controle Vetorial em Motores de Indução

Luís Fernando Alves Pereira e José Felipe Haffner
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Departamento de engenharia elétrica
CEP: 90619-900 - Porto Alegre, RS - Brasil
Pereira@ee.pucrs.br - jfelipe@ee.pucrs.br

***Resumo* - Apresenta-se neste artigo um ambiente de simulação completamente desenvolvido em Matlab e Simulink, empregado na concepção e projeto de controladores de alta performance utilizados em máquinas de indução. A idéia principal deste ambiente de simulação é proporcionar ao usuário, seja ele projetista ou pesquisador, a utilização simples de ferramentas complexas normalmente necessárias para simulação e obtenção de resultados relacionados ao controle vetorial de motores de indução. O ambiente é constituído por um conjunto de blocos individuais, normalmente necessários na etapa de implementação em tempo real, sendo cada um destes blocos projetados de forma a reproduzir, ainda em simulação, o comportamento observado em situações reais de operação. Tais blocos dividem-se no próprio motor de indução, nos estimadores de fluxos e/ou parâmetros da máquina, no controle por campo orientado para servomecanismos de velocidade ou posição, no PWM de corrente - CRPWM, e finalmente no inversor de freqüência. Cada um destes blocos operam com o seu próprio incremento de integração ou taxa de amostragem, porém sincronizados entre si.**

***Abstract* - This paper presents a simulation environment for conception and design of induction machine high performance controllers developed using Matlab and Simulink. The main idea is to provide designers and researchers with a simulation environment that simplifies the use of complex tools required in the vector control of induction motors. This environment consists of a complete set of individual blocks required for the real time implementation of vector control. Each one of this blocks is carefully designed to reproduce the actual behavior of the overall system. These blocks include the induction motor, the flux and parameter estimators, the control algorithms, the current PWM (CRPWM), the antialiasing filter, and the frequency converter. To reflect the situation encountered in actual implementations, each block has its own integration increment and sample rate. This environment was used to simulate a direct vector control to regulate the rotor speed of an induction motor. The use of this environment allowed the simulator to take in consideration the dynamic behavior of each individual block.**

I. INTRODUÇÃO

Máquinas elétricas tem sido utilizadas na indústria há mais de um século, porém diferente de outras tecnologias, sua evolução tem sido lenta [1]. O uso de sistemas de coordenadas determinadas pela posição do fluxo, conhecidos por controle orientado pelo campo (FOC - Field Oriented Control) possibilitou novos métodos de análise de máquinas elétricas. O FOC pode ser utilizado em todos os tipos de máquinas elétricas de corrente alternada com diferentes tipos de conversores [2]. Utilizando FOC em motores de indução obtém-se desempenho equivalente ao motor de corrente contínua, sem os inconvenientes que esses apresentam, como comutadores mecânicos e a conseqüente necessidade periódica de manutenção.

A performance de técnicas de FOC, comumente chamado de controle vetorial, pode ser analisada de duas maneiras. A primeira utiliza a máquina real com controle vetorial e modulação por largura de pulso *(PWM - pulse width modulation)*, usualmente implementado em microprocessadores ou em microcomputadores com algoritmos codificados em linguagens assembler ou C [7]. É claro que resultados experimentais incluem fatores como o chaveamento dos transistores, indutâncias de dispersão, capacitâncias parasitas, saturações magnética e características dinâmicas dos sensores. Estes efeitos são importantes e devem ser considerados.

A segunda maneira baseia-se na simulação do sistema. Para que os resultados obtidos via simulação sejam válidos é aconselhável que o comportamento intrínseco aos componentes do sistema sejam levados em conta. No processo físico não é possível remover estes efeitos do comportamento fundamental do sistema. Utilizando simulação qualquer parte do sistema pode ser facilmente monitorada com ou sem a introdução de ruídos de medida ou outros efeitos parasitas. Desta forma novos algoritmos podem ser facilmente depurados e validados. Mudanças na topologia dos circuitos não envolvem nenhum custo adicional [8]. A simulação é uma etapa natural no desenvolvimento, onde pode-se testar exaustivamente novas estratégias de controle.

Ferramentas confiáveis de simulação são muito vantajosas quando empregadas no projetos de controle de máquinas elétricas por reduzirem substancialmente o tempo de desenvolvimento e o custo do protótipos necessários a fase de validação de resultados. O programa MatLab/Simulink admite o conceito de prototipagem rápida [13]. Portanto um ambiente de simulação desenvolvido em Simulink pode ser empregado em tempo real no processo utilizando um *hardware* adequado [1]

A concepção deste simulador utiliza o programa Matlab/Simulink para realizar o ambiente de simulação, apresentando como exemplo um controle vetorial direto com modulação CRPWM *(Current-Regulated PWM)*. O ambiente de simulação desenvolvido tem a mesma estrutu-

[1]Utilizando por exemplo os aplicativos *Real-Time Workshop* e *Data Acquisition Toolbox* desenvolvido pela MathWorks [13].

ra do sistema real. O modelo do motor de indução é considerado contínuo. O controle por campo orientado bem como o controle de velocidade e/ou de posição e o algoritmo de estimação de fluxo e da resistência do rotor são implementados na forma discreta. A dinâmica de componentes adicionais, tais como *encorders*, filtro *antialiasing*, conversores A/D e o inversor são consideradas.

De forma geral pode-se dizer que a principal finalidade deste simulador concerne ao desenvolvimento e validação de técnicas de controle avançadas aplicadas a motores de indução. Este ambiente também pode ser empregado com fins didáticos, pois além da própria implementação do controle de campo orientado direto, são empregadas varias técnicas de estimação do fluxo e diferentes técnicas de controle de corrente.

II. ESTRUTURA DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

O reconhecimento no meio acadêmico e industrial do programa Matlab/Simulink foi a motivação básica para o desenvolvimento do ambiente de simulação proposto. O emprego deste programa permite a fácil e rápida utilização de avançadas técnicas de controle e de processamento de sinais, o emprego conjunto de diagramas de blocos e máquinas de estado com funções escritas na própria linguagem do Matlab ou em linguagem C. O uso de sistemas contínuos e/ou discretos e a possibilidade de rápida prototipação são outras características importantes deste ambiente de simulação que justificam a escolha do Matlab/Simulink.

O ambiente de simulação proposto neste trabalho é composto basicamente de sete blocos fundamentais. Os blocos que compõem este ambiente são relativos ao motor de indução, o CRPWM, o inversor, a medição, o estimador, o controle e o FOC. Cada um destes blocos que compõe o ambiente de simulação esquematizado na Figura 1 é integralmente constituído por diagramas de blocos e funções desenvolvidas em Matlab. Todas as variáveis utilizadas no ambiente são armazenadas em um arquivo de dados, facilitando o emprego de diferentes tipos de motor. Outra característica importante deste ambiente é que cada bloco pode ser especificado como contínuo ou como discreto. Além disso, a medição de velocidade, a modulação CRPWM, a estimação de parâmetros do motor e o controle por campo orientado podem ser especificados com diferentes períodos de discretização.

A. Bloco motor de indução

O bloco responsável pela simulação do modelo dinâmico da máquina de indução, foi realizado consoante ao conjunto de equações diferenciais em coordenadas estacionárias apresentadas por Krause em [9]. Estão incluídos neste bloco, a transformação das variáveis trifásicas em coordenadas estacionárias e vice-versa. Além disso, é implementada a equação que caracteriza a carga aplicada ao eixo do motor. Todos os parâmetros do motor e da carga podem ser especificados pelo projetista, inclusive com possibilidade de variações temporais.

A simulação dinâmica do motor é realizada através de algoritmos de integração numérica de forma contínua, com incremento de integração suficientemente pequenos, determinado pelo usuário.

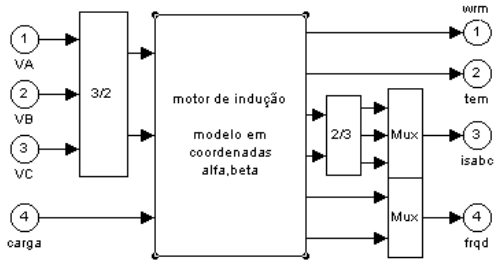

Fig. 2: Bloco do motor de indução.

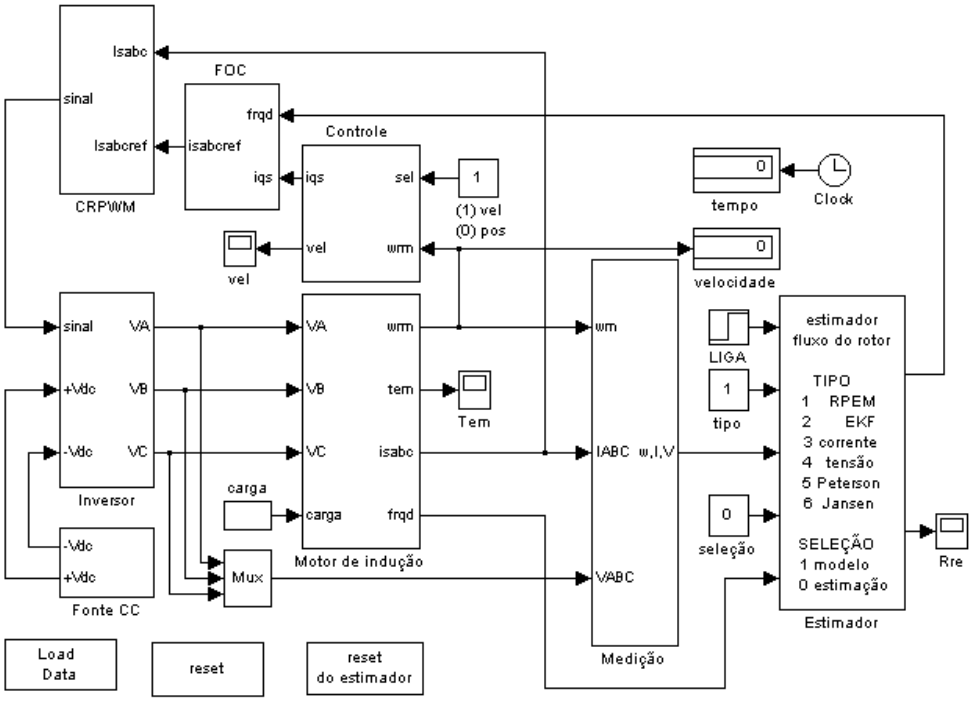

Fig. 1: Diagrama em Simulink do ambiente de simulação proposto

B. Bloco CRPWM

Outro bloco integrado ao ambiente de simulação apresentado na Figura 1 é o CRPWM. A razão básica para utilizar a corrente como variável a ser controlada é que tanto o fluxo do rotor quanto o torque eletromagnético são associados diretamente a estas variáveis quando empregadas técnicas FOC. Dois métodos de controle de corrente são empregados. O controle por histerese e o controle preditivo.

No controle por histerese, conforme observa-se na Figura 3, as correntes do motor são detectadas e comparadas com a com as correntes de referência usando comparadores com histerese.

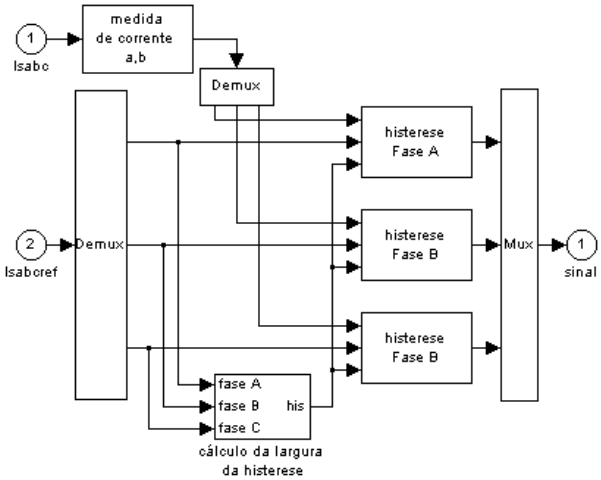

Fig. 3: Controle de corrente por histerese

Os sinais de saída dos comparadores são usados para produzir os sinais de base dos transistores do inversor. A atuação do comparador mantém a corrente de fase dentro da banda de histerese. Para diminuir o *ripple* de corrente são utilizadas bandas de histereses proporcionais às correntes de referência. A limitação da freqüência de chaveamento é efetuada mediante a escolha da freqüência de amostragem do *sample and hold* ligados aos sensores de corrente.

O controle de corrente por histerese não é uma técnica ótima, porem é simples de implementar, tem bom desempenho dinâmico e pode ser utilizado com altas freqüências de chaveamento. Já o controle de corrente preditivo, esquematizado na Figura 4, é baseado no cálculo ótimo do tempo de chaveamento de cada fase em função da predição do vetor de tensão necessário para que a corrente medida siga o valor esperado. Os sinais de tempo calculados são transformados em sinais de chaveamento utilizando um temporizador programável. O tempo de processamento do controle preditivo é maior que o controle por histerese, pois para cálculo do vetor de tensão é efetuado em coordenadas estacionárias e utiliza as equações do motor.

Em muitos trabalhos de simulação as não linearidades provenientes dos elementos chaveadores do inversor são desconsideradas [7] [10]. Nestes trabalhos considera-se somente a componente fundamental da forma de onda produzida pelo inversor admitindo-se que o motor atua como um filtro passa baixas e, conseqüentemente, atenua componentes de correntes com freqüências mais elevadas. Neste trabalho, o efeito da modulação CRPWM aparece na forma da corrente do motor, conforme mostra a Figura 5. Observa-se que, apesar do controle preditivo de corrente trabalhar com uma freqüência de chaveamento inferior ao controle por histerese, produz uma forma de onda de corrente com menor *ripple.*

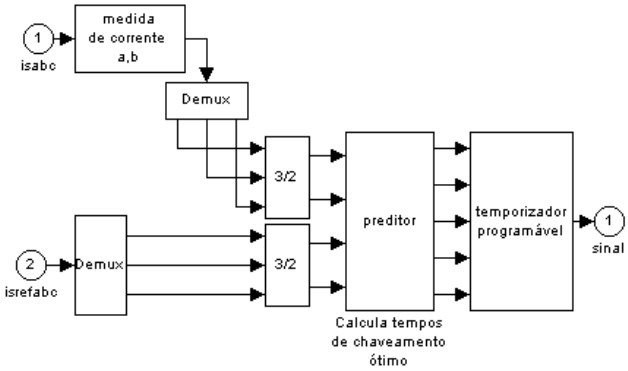

Fig. 4: Controle de corrente preditivo

C. Bloco Inversor

A finalidade do bloco inversor, Figura 6, é converter a tensão contínua de entrada em tensão trifásica de freqüência e amplitude variáveis. O inversor consiste de uma ponte com seis transistores e seis diodos. Em função dos sinais de base dos transistores fornecidos pelo CRPWM e do sentido de corrente, que circula nos enrolamentos do estator, três destes elementos conduzem formando a tensão de saída do bloco inversor.

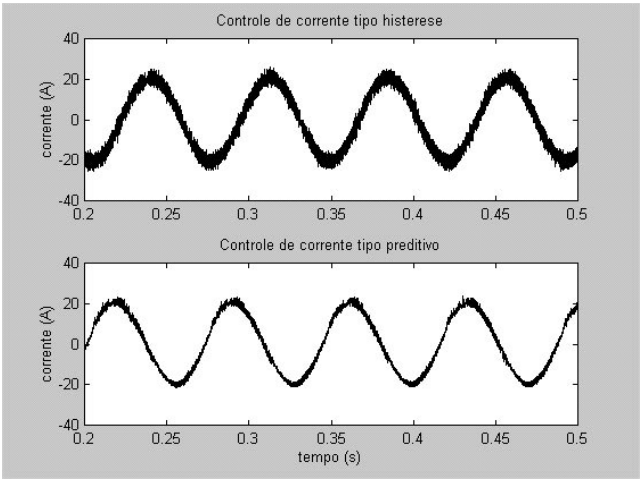

Fig.5: (a) Controle de corrente tipo histerese com 20 kHz , (b) Controle de corrente tipo preditivo com 4 kHz.

O bloco inversor é modelado utilizando a propriedade que a tensão entre as fases (tensão de linha) tem a mesma forma que os sinais de tensão modulados pelo CRPWM. A tensão de saída é a tensão de fase do motor, que é obtida pela transformação da tensão de linha para tensão de fase. Além disso, é previsto a imposição simultânea das tensões de fase nulas, devido ao funcionamento em *free-wheeling* que acontece por exemplo quando se liga ao mesmo tempo os transistores superiores ou inferiores do inversor.

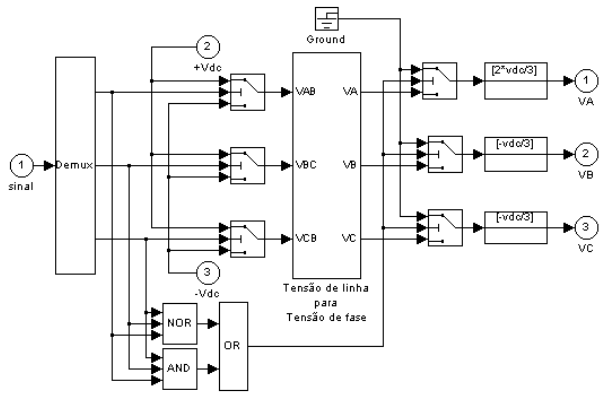

Fig. 6: Diagrama de blocos do inversor.

D. Bloco de medição

O bloco de medição apresentado na Figura 7, concentra os sinais necessários para a estimação do fluxo do rotor e de parâmetros do motor. A medição de velocidade e de corrente é reproduzida nos blocos do controle e do CRPWM.

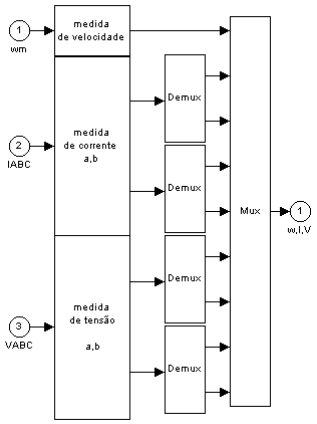

Fig. 7: Diagrama de blocos da medição.

A medição de velocidade é obtida de um *encoder* do tipo incremental, cujo comportamento foi reproduzido com base no diagrama apresentado na Figura 8. O número de pulsos por volta e o intervalo de tempo utilizado para calcular a velocidade é definido pelo usuário.

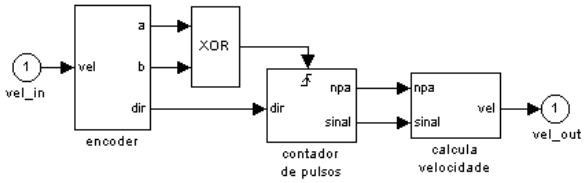

Fig. 8: Medição de velocidade com *encoder*.

O bloco de medição processa a leitura dos sinais de corrente e tensão através de filtros *antialiasing* de segunda ordem em cujas saídas são ligadas a conversores A/D, conforme o diagrama da Figura 9. Em todos os sinais medidos pode-se acrescentar ruído gaussiano de media e variância definidas pelo usuário.

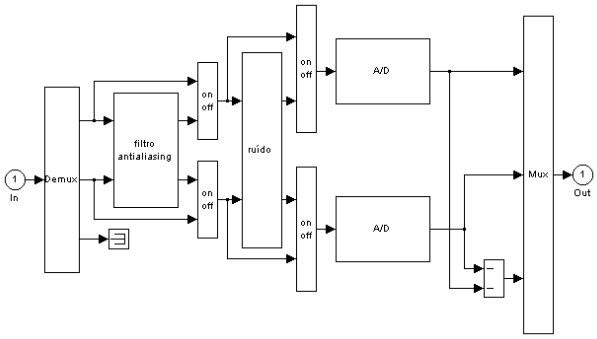

Fig. 9: Medição de corrente e de tensão

A Figura 10 mostra a interface para especificação das características dos conversores A/D e D/A. Para especificar os parâmetros é usada uma interface semelhante em cada bloco.

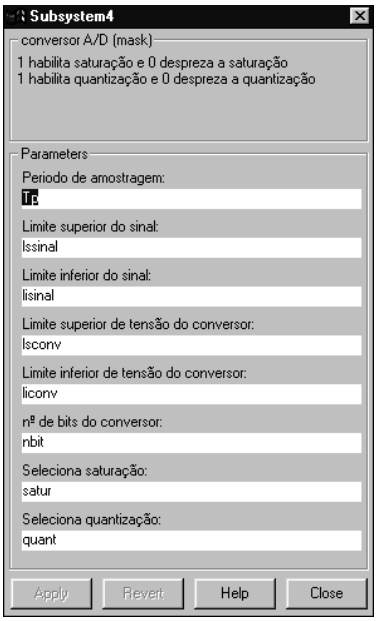

Fig. 10: Parâmetros do conversor AD

E. Bloco estimação do fluxo e da resistência rotórica

O bloco relativo a estimação, Figura 11, é composto por vários algoritmos de estimação do fluxo do rotor. Estão a disposição do usuário diversos algoritmos para obtenção dos fluxos do motor, desde aqueles baseados em observadores clássicos [4] até aos estimadores com parâmetros adaptativos que empregam filtro de Kalman [5] [6]. Também faz parte deste blocos algoritmos que estimam parâmetros do motor, no caso a resistência rotórica. O bloco possui a opção de utilizar os fluxos estimados ou o próprio fluxo do modelo como saída, normalmente empregado para comparação de resultados. A atualização dos fluxos e da resistência do rotor são efetuadas a cada intervalo de amostragem. Primeiramente os sinais de entrada são fornecidos pelo bloco de medição, em seguida é processado o algoritmo que fornece o valor do fluxo estimado para o bloco responsável pela geração do sinal de controle.

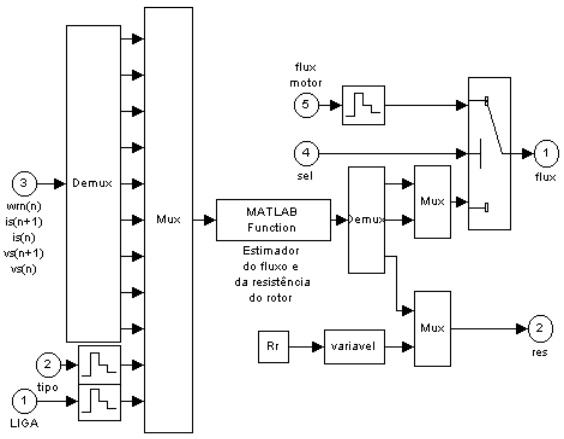

Fig. 11: Diagrama de blocos do estimador.

F. Bloco de controle

O bloco de controle, apresentado na Figura 12, permite a opção de selecionar o controle de velocidade ou o controle de posição. Para a alternativa de velocidade, é usado um controlador integral-proporcional (IP). Para o controle de posição é empregado um controlador PID em conjunto com um compensador *feedforward*. Detalhes da implementação do controle de velocidade e do controle de posição podem serem obtidos nas referências [11] e [12] respectivamente.

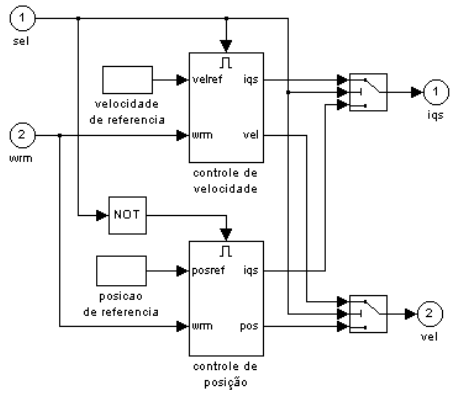

Fig. 12: Diagrama de blocos do controle.

G. Bloco controle do campo orientado

Por último o bloco de controle de campo orientado implementa a técnica FOC direta e um controlador PI para regular o módulo do fluxo. Também faz parte deste bloco a transformação de coordenadas estacionárias para síncronas e de síncronas para estacionárias. Este bloco fornece os valores de referência de corrente para o bloco CRPWM.

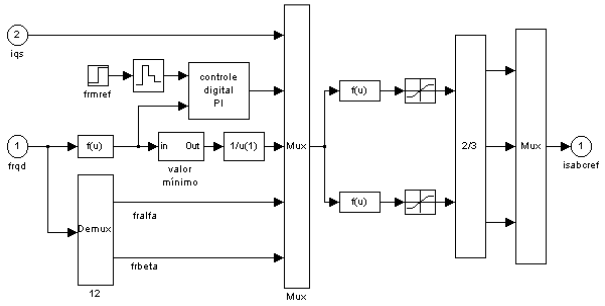

Fig. 13: Diagrama de blocos do FOC.

Naturalmente o diagrama de blocos exposto nas Figuras 2-13 ilustra somente o conjunto de blocos disponíveis para o usuário sem levar em conta os detalhes construtivos associados a cada um deles.

III. RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir são relativos ao servomecanismo de velocidade utilizando o controle de campo orientado direto apresentado em [11]. O motor de indução usado na simulação possui os dados presentes na Tabela 1.

TABELA 1
DADOS DO MOTOR DE INDUÇÃO

Potência nominal	7.5 kW
Tensão nominal	380 V
Velocidade nominal	1420 rpm
Número de pólos	4
Inércia do Sistema	0.062 kg.m^2
Resistência do Estator	0.728Ω
Resistência do Rotor	0.706Ω
Indutância do Estator	0.0996H
Indutância do Rotor	0.0996H
Indutância Mútua	0.0969H

Considera-se o incremento de integração para a dinâmica da simulação do motor igual a 10μs, a razão de amostragem usado no algoritmo de controle e de estimação igual a 1ms e no CRPWM de histerese, a freqüência máxima de chaveamento é de 20 kHz.

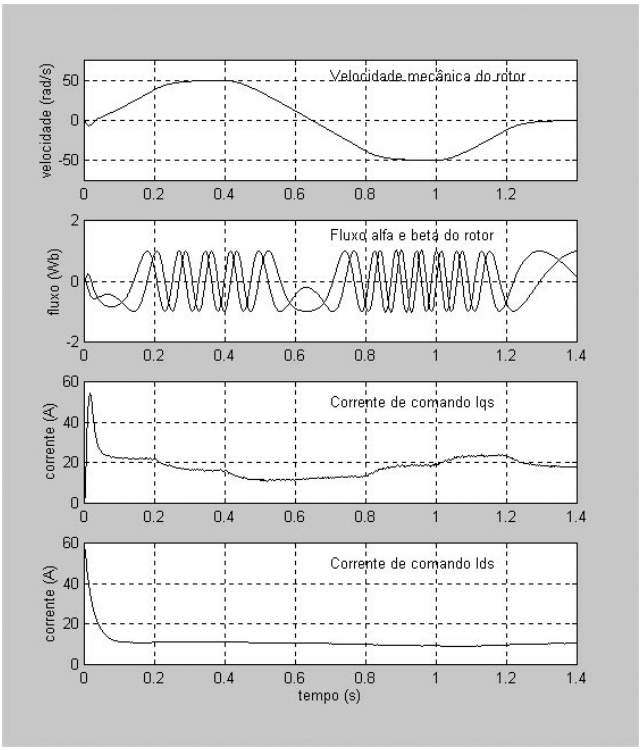

Fig. 14: (a) Velocidade do rotor controlada através dos fluxos estimados, (b) fluxos estimados do rotor em coordenadas estacionarias, (c)-(d) correntes de controle em coordenadas síncronas

A velocidade de referência, 100 rad/s, é comparada com a velocidade medida do rotor e o fluxo de referência, 1 Wb, é comparado com o fluxo estimado utilizando o algoritmo descrito em [6]. O torque de carga considerado na simulação é igual a 50.4 Nm. O sinal de erro de velocidade e do fluxo rotórico são aplicados em dois controladores PI independentes, que geram dois sinais de controle discretos mostrados na Figura 14c e 14d. Estes sinais de controle, após transformação de coordenadas, geram as correntes de referência por fase. Tais correntes são comparadas com o valor de corrente de fase medida, resultando nos sinais PWM usados como comando de base dos transistores do inversor que alimenta o motor de indução.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um ambiente de simulação totalmente desenvolvido em Matlab/Simulink, usado para o desenvolvimento de técnicas de controle de máquinas de indução.

Diferentemente de [7], o ambiente proposto neste trabalho foi projetado de forma a oferecer ao usuário todo o conjunto de dispositivos necessários a fase de implementação do controle vetorial. Com um *hardware* adequado é possível utilizar esse ambiente para controlar diretamente um motor. Também são inseridos técnicas de controle de corrente do estator e um conjunto de estimadores, adaptativos ou não, do fluxo do rotor.

Outro aspecto importante refere-se a fácil utilização do ambiente proposto para fins didáticos. O emprego deste ambiente de simulação constitui-se em um eficiente meio para análise e/ou projeto de controladores de alto desempenho em máquinas de indução, contemplando todas as fases relevantes e presentes durante a etapa de construção de um protótipo e aplicação em tempo real.

V. BIBLIOGRAFIA

[1] B. K. Bose, *Power Electronics and Variable Frequency Drives - Technology and Applications*, IEEE Press, 1996.

[2] W. Leonard, “30 Years Space Vectors, 20 Years Field Orientation, 10 Years Digital Signal Processing with Controlled AC-Drives, a Review (Part I), *EPE Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 13-20, 1991.

[3] R. D. Lorenz, T. A. Lipo, D. W. Novotny, *Power Electronics and Variable Frequency Drives - Technology and Applications*, IEEE Press, pp. 209-276.

[4] P. L. Jansen, and R. D. Lorenz, “A Physically Insightful Approach to the Design and Accuracy Assessment of Flux Observers for Field Oriented Induction Machine Drives”, *IEEE Trans. Ind. Applications*, vol. 30, no. 1, pp. 101-109, 1994.

[5] L. Salvatore, S. Stasi, and L. Tarchioni, “A New EKF-Based Algorithm for Flux Estimation in Induction Machines”, *IEEE Trans. Ind. Electronics*, vol. 40, no. 5, pp. 496-504, 1993.

[6] E. M. Hemerly, H. A. Gründling, and L. F. A. Pereira, “Algoritmo Adaptativo para Estimação do Fluxo em Motores de Indução”, *XI CBA*, vol. 3, 1996, pp. 1119-1124.

[7] S. Wade, W. Dunnigan and B. W. Williams, "Modeling and Simulation of Induction Machine Vector Control with Rotor Resistance Identification", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 12, no. 3, pp. 495-506, May, 1997.

[8] N. Mohan, W. P. Robbins, Undeland, T.M., Nilssen, R. and O. Mo, ”Simulation of Power Electronics and Motion Control System - An Overview”, *Proceedings. of the IEEE*, vol. 82, no. 8, pp. 1287-1302, 1994.

[9] P. C. Krause, O. Wasyncsuk and S. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery*, New York, IEEE Press, 1994.

[10] C. M. Ong,, *Dynamic Simulation of Electric Machinery*, Prentice-Hall, 1997.

[11] J. F. Haffner, L. F. A. Pereira, E. M. Hemerly, H. A. Gründling, “Controle por Campo Orientado Direto do Motor de Indução Utilizando um Algoritmo Alternativo de Estimação do Fluxo do Rotor”, *IV Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência*, 1997, pp. 480-485.

[12] L. F. A. Pereira, J. F. Haffner, E. M. Hemerly, H. A. Gründling, “Direct Vector Control for a Servopositioner Using an Alternative Rotor Flux Estimation Algorithm”, *IECON-98*, vol. II, 1998, pp. 603-1608.

[13] MathWorks, *Real-Time Workshop User’s guide*, MathWorks, 1999.