

1 Introdução

Na atualidade, os motores de indução apresentam um desenvolvimento muito forte nas aplicações de controle com variação de velocidade, definindo assim, uma importante linha de pesquisa.

Com o aparecimento da eletrônica de potência [1 - 4], o acionamento do motor de indução com variação de frequência tornou-se viável de uma forma mais simples e ampla, aumentando assim a sua utilização na indústria.

Este avanço não tem sido fácil. Muita pesquisa tem sido necessária para conseguir que o desempenho do motor de indução seja o mais próximo possível do comportamento do motor de corrente contínua, mantendo as grandes vantagens do motor de indução: robustez, construção simples, necessidade de pouca manutenção, possibilidade de ter um motor totalmente fechado (motor de gaiola), o que possibilita sua utilização, por exemplo, em lugares profundos ou com alta poluição.

O controle de velocidade, mantendo-se a razão de “tensão frequência constante (V/f)” [5,6] foi uma das soluções obtidas com estas pesquisas, quando o motor era utilizado com uma fonte de alimentação de frequência variável, melhorando seu funcionamento, mas trazendo para si um problema de capacidade de torque constante em velocidade menor que a velocidade base (velocidade na frequência da rede de alimentação, 60 ou 50 Hz). O controle anterior é muito simples na hora de ser implementado.

Outros trabalhos permitiram a implementação do controle vetorial [7 – 10] usando microprocessadores rápidos, possibilitando a aplicação do motor de indução de gaiola em aplicações de grande desempenho onde, tradicionalmente, só os motores de corrente contínua podiam ser aplicados. No passado, tais técnicas de controle não tinham sido possíveis, porque as necessidades de hardware e software eram muito grandes. Assim, como para a máquina de corrente contínua, o controle do torque nas máquinas de corrente alternada é

realizado pelo controle das correntes do motor. Porém, em contraste com a máquina de corrente contínua, na máquina de corrente alternada devem ser controlados o módulo e o ângulo de fase da corrente, ou seja, o vetor espacial da corrente do estator. Na máquina de corrente contínua, a orientação do fluxo de campo e a força magnetomotriz da armadura são fixadas pelo comutador e pelas escovas, enquanto que na máquina de corrente alternada o fluxo de campo e o ângulo espacial da força magnetomotriz da armadura requerem controle externo. Na ausência deste controle, os ângulos espaciais entre os diferentes campos das máquinas de corrente alternada variam com a carga e produzem respostas dinâmicas com oscilações não desejadas.

Com o controle vetorial das máquinas de corrente alternada, as componentes das correntes que produzem o torque e o fluxo são desacopladas, e as características de resposta transitória são similares às das máquinas de corrente contínua de excitação independente. O sistema poderá se adaptar a qualquer variação de carga e/ou variação do valor de referência tão rápido quanto a máquina de corrente contínua.

Para a aplicação do controle vetorial é necessário conhecer a posição exata dos eixos $d - q$, ou seja, a posição correta do fluxo do rotor (se é utilizado este fluxo como referência). Assim, se faz obrigatório ter conhecimento de algum parâmetro que permita ajudar a encontrar o ângulo do fluxo do rotor ou a posição dele. Portanto, é necessário medir (ou estimar) a velocidade do rotor, e, com o cálculo da velocidade do escorregamento, pode-se achar a velocidade do fluxo do rotor.

A medição de velocidade vem sendo feita, até agora, utilizando dispositivos acoplados ou próximos do eixo do motor, tais como: tacogeradores, *resolvers*, *encoders*, sensores indutivos de proximidade, etc, provocando manutenção adicional [11-13]: alinhamento, calibração, ruídos elétricos, etc. Portanto, faz-se necessário aplicar o controle vetorial sem necessidade de utilizar estes elementos acoplados ou perto do eixo. Nasce assim o controle sem sensor (*sensorless control*) que oferece: robustez, segurança e confiabilidade ao controle.

Muitos controladores sem sensor têm sido produzidos. Os mais utilizados são os que utilizam Modelos Referenciais Adaptativos (MRAS) [14-16], que

apresentam problemas em baixa velocidade pela influência dos erros dos parâmetros do modelo com os parâmetros da máquina atual, produzindo valores de velocidade errados em regime permanente. Tem sido produzidos controladores utilizando Inteligência Artificial [17 – 19] para a estimação de velocidade. Apresentam um bom desempenho, mas com problemas de desempenho quando ocorrem mudanças bruscas de velocidade, além da necessidade da execução de um treinamento *off-line*. Os Observadores Adaptativos, que utilizam observadores de estado em malha fechada [20 – 22] apresentam robustez nas mudanças de parâmetros. Um destes observadores adaptativos é o filtro de Kalman estendido [23 – 25], que tem mostrado bom desempenho, mas suas desvantagens vêm sendo seu custo computacional e a necessidade do conhecimento prévio de valores especiais das matrizes de covariância do ruído do sistema e do medição, valores estes necessários para o bom funcionamento do filtro.

Este tipo de problema já foi resolvido em outras aplicações pelo algoritmo de Bélanger [26 – 27], para o caso em que as estatísticas do ruído podem ser modeladas como funções lineares de parâmetros desconhecidos. Nestes trabalhos, usou-se o filtro de Bélanger dentro do algoritmo de filtro estendido de Kalman, produzindo um algoritmo que requer quase a mesma quantidade de cálculos que o algoritmo convencional. Chamaremos este algoritmo de "filtro quadrático".

O presente trabalho pretende apontar uma solução inovadora para o controle sem sensor quando é utilizado um filtro estendido de Kalman, supondo que há muito pouco conhecimento sobre as matrizes de covariância do ruído de medição e do sistema. Para isso será utilizado um segundo filtro – usando as idéias de Bélanger e seu filtro quadrático - que forneça os valores ótimos da matriz de covariância de ruído do sistema e da medição, permitindo uma operação do controle totalmente *on-line*.

No Capítulo 2, será feito um estudo do modelo do motor de indução e suas equações, para a realização de seu controle junto com o estudo da velocidade e do controle vetorial. No Capítulo 3 será apresentada a estimação de velocidade. Primeiro a medição em forma direta com transdutores e depois a estimação propriamente dita, apresentando alguns resultados obtidos com alguns algoritmos tradicionais. No Capítulo 4 será apresentado um estudo sobre os

conceitos básicos da filtragem incluindo o filtro de Kalman e um estudo das características mais importantes deste algoritmo. Em seguida será feito um estudo da extensão do filtro de Kalman para sistemas não lineares, ou seja, um estudo do filtro de Kalman estendido, junto com suas limitações no conhecimento dos valores das matrizes de covariância do ruído do sistema e da medição. Depois serão apresentadas algumas técnicas para a obtenção dos valores ótimos das matrizes de covariância dos ruídos de sistema e de medição, apresentando o estudo do filtro quadrático junto com suas equações.

No Capítulo 5 será apresentada a solução para a estimação da velocidade do motor de indução utilizando um filtro de Kalman estendido, que encontra os valores ótimos das matrizes de covariância de ruído do sistema e da medição por meio de um filtro secundário que re-processa o erro (a inovação, de fato) do filtro de Kalman, para produzir estes valores de covariância. Serão apresentadas as respostas da implementação do controle vetorial do motor de indução sem sensor utilizando o filtro de Kalman estendido com os valores das matrizes de covariância de ruído do sistema e da medição, inicialmente achados pelos ensaios de acerto e erro, para logo introduzir o filtro quadrático, onde, também em forma inicial, serão introduzidos os valores iniciais das matrizes de ponderação e de covariância dos ruídos aleatoriamente, obtendo em cada caso estudado as respostas do sistema. Por último, com ajuda dos valores achados por tentativa e erro, será mostrado como o filtro consegue operar em forma ótima quando se tem algum conhecimento da natureza dessas matrizes de ponderação e de covariância dos ruídos. Por último, serão apresentadas conclusões e recomendações para trabalhos futuros.