

1 Introdução

Motores de passo são atuadores eletromagnéticos capazes de converter pulsos digitais na entrada em rotações incrementais do eixo do rotor. São utilizados em aplicações que necessitam de um movimento rotativo preciso. Esses motores estão difundidos em impressoras, discos rígidos de computador, máquinas-ferramenta e robôs. O interesse neste sistema é motivado por sua precisão, reduzida manutenção e baixo custo.

Motores de passo de ímã permanente fornecem mais torque por unidade de peso e melhor relação entre torque e inércia que motores de corrente contínua (DC) [1]. Além disso, como não utilizam escovas, são mais confiáveis e necessitam de menor manutenção [2]. A maior parte dos manipuladores robóticos industriais e máquinas operatrizes utilizam motores de corrente alternada acoplados a um sensor de posição (servo AC). Este motor também possui baixa manutenção, pois não utiliza escovas, mas seu custo é quatro ou cinco vezes maior que o de um motor de passo de mesma capacidade de torque.

Como o motor de passo realiza rotações incrementais precisas, a partir de uma entrada digital de pulsos, a posição do rotor pode ser estimada sem um sensor de posição. Isso permite um controle preciso em malha aberta. A partir da contagem dos pulsos enviados para o sistema, e sua frequência, a posição e velocidade do motor são estimadas [3]. Entretanto, quando o motor é demandado acima de seu limite, a resposta à excitação da entrada diverge do esperado. Isso cria um erro permanente na estimativa de posição do motor. Em aplicações onde a carga varia significativamente, o sistema deve ser ajustado para a pior condição, a fim de garantir que o motor realize todos os passos programados. Ou seja, em malha aberta, a aceleração imposta ao motor deve estar significativamente abaixo da ótima, para garantir confiabilidade da estimativa de posição. Devido à quantidade de torque disponível no eixo ser substancialmente reduzida com o aumento da velocidade, a velocidade demandada ao motor também deve ser reduzida.

As limitações do controle em malha aberta motivaram o desenvolvimento de técnicas de controle em malha fechada para motores de passo. Algumas técnicas são chamadas de *sensorless*, pois se baseiam em estimar a posição do motor a partir da análise da corrente e tensão nos seus enrolamentos. A estimativa através do retorno da força eletromotriz (Back-EMF) do motor é utilizada em algumas técnicas *sensorless* [4]. A principal desvantagem deste método é a baixa precisão em baixas velocidades, quando a força eletromotriz é muito pequena. Outro método se baseia na variação da indutância do motor em função da posição do rotor [5]. Os dois métodos também são combinados [6]. A variação da indutância é utilizada para estimativas em baixas velocidades, e Back-EMF para altas velocidades. Como a precisão deste sistema é muito afetada pelos ruídos das medições de tensão e corrente, muitas vezes são empregados filtros Kalman Extendidos (EKF, *Extended Kalman Filter*) [7]. Um controle SMC (Sliding Mode Control) pode ser utilizado com realimentação da corrente elétrica e posição do rotor [8]. Controles *sensorless* devem incluir o modelo do motor de passo e o algoritmo de controle, e isto torna o custo computacional alto para um microcontrolador PIC típico [9].

Os sistemas de controle de motor de passo, que usam sensores de posição, normalmente se baseiam em retardar a excitação das fases do motor até que ele tenha respondido satisfatoriamente à última excitação [10]. Assim, o motor não perde passos. A comutação entre as fases pode ser antecipada para gerar mais torque no eixo. Este ângulo entre o rotor e o que está sendo demandado eletricamente é chamado de *switching angle*, ou ângulo de controle. Ele pode ser otimizado em função do torque e velocidade no eixo do motor. Um controle ótimo pode ser obtido para melhor desempenho do motor de passo [11]. O ângulo de controle ótimo é obtido maximizando a equação do torque do motor de passo.

Entretanto, estas técnicas exigem que o sensor de posição seja diretamente acoplado ao eixo do motor, o que limita seu campo de aplicações, necessitando em muitos casos a alteração do projeto do manipulador ou a modificação do motor de passo. Outra desvantagem desta técnica ocorre quando o motor está acoplado a um redutor mecânico, sistema de polias ou um acoplamento elástico. Estes dispositivos dificultam a estimativa da posição do sistema em função da posição do eixo do motor, pois introduzem uma flexibilidade que induz um sistema não-colocado.

As limitações das técnicas para controle em malha fechada apresentadas motivaram este trabalho. O sistema desenvolvido neste trabalho, um manipulador robótico controlado por motores de passo, utiliza um *encoder* não diretamente acoplado ao motor, e sim ao elemento cuja posição será controlada. O algoritmo de controle não necessita de um alto custo computacional, sendo possível ser implementado em um microcontrolador PIC. Este trabalho propõe uma técnica de controle que recebe a realimentação de um *encoder* e gera uma sequência de pulsos para o *driver* do motor de passo. Esse trem de pulsos é feito de modo a não exigir acelerações excessivas, e assim prevenir a perda de passo. O controle proposto utiliza um controlador PID modificado. As características não lineares do motor de passo tornam o controle PID clássico ineficiente [12]. A partir de um modelo de motor de passo, uma simulação do controle proposto é feita usando o ambiente computacional Simulink/MATLAB. A estrutura deste modelo é replicada na simulação deste controle aplicado a um manipulador robótico que utiliza seis motores de passo. Este manipulador é projetado especialmente para esse trabalho, usando ferramentas de CAD (*Computer-Aided Design*). O modelo dinâmico do manipulador é incluído na simulação para incluir os torques gerados pelo seu movimento. A inércia dos elos, forças inerciais centrífugas e de Coriolis, e forças gravitacionais são incluídas no modelo.

Após a simulação demonstrar que o manipulador possui um desempenho adequado, quantificado no Capítulo 7, o manipulador é construído para validar a técnica de controle proposta. O circuito do controlador utiliza um microcontrolador PIC18F2431. Este controlador recebe a realimentação de *encoders* instalados nas juntas do manipulador. A trajetória do manipulador é gerada em um controlador CNC (Controle Numérico Computadorizado). Este controlador CNC possui uma interface na qual um código pode ser inserido. A linguagem utilizada é baseada em código G, que é largamente difundida na indústria, por ser utilizada em máquinas-ferramenta. Cada fabricante de manipulador robótico comercial possui sua própria linguagem [13], o que dificulta sua implementação na pequena e média indústria. O sistema de programação de trajetórias utilizado neste projeto apresenta esta vantagem sobre os comerciais. Outra vantagem do manipulador proposto é seu baixo custo, devido ao uso de motores de passo. Testes de precisão absoluta e repetibilidade são feitos neste manipulador.

Esta dissertação esta organizada em nove capítulos. O Capítulo 2 apresenta uma revisão do funcionamento dos motores de passo e técnicas de controle. No Capítulo 3 é feita a modelagem de motores de passo. O Capítulo 4 descreve a técnica de controle proposta. O Capítulo 5 apresenta em detalhes o sistema experimental desenvolvido. No Capítulo 6 o modelo do sistema experimental com o controle proposto é apresentado. O Capítulo 7 trata das simulações do sistema completo. O Capítulo 8 relata os resultados obtidos. E, finalmente, o Capítulo 9 apresenta a discussão dos resultados, as conclusões do trabalho e as propostas de trabalhos futuros.