

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

LABORATÓRIO DE CONTROLE (PEE/COPPE)

RELATÓRIO TÉCNICO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

INTRODUÇÃO AO FUNCIONAMENTO E AO ACIONAMENTO DE MOTORES DC

André Euler Torres

Orientador: Prof. Liu Hsu

Revisão: José Paulo V. S. da Cunha

Janeiro de 1995

Última revisão: 21 de abril de 2004

I – INTRODUÇÃO

Com a evolução da automação, que se encontra em processo acelerado, precisa-se a cada dia ultrapassar novos obstáculos. Um dos sonhos dos cientistas, que até algum tempo era considerado ficção mas que começa a se tornar realidade é a criação de um robô bípede, imagem do próprio homem. Contudo, isso ainda é tarefa árdua e que encontra muitos obstáculos a serem transpostos. Pode-se citar, por exemplo, um problema ainda sem solução completa mas que já está em estudo: como equilibrar este robô? Como poderia uma máquina bípede se manter de pé ou até andar? Analisando-se esta questão mais a fundo vê-se que o robô, bem como um foguete de lançamento de satélites, comporta-se como um *pêndulo invertido*. Assim, caso a técnica de controle de pêndulos invertidos fosse dominada poderia se dizer que o controle do equilíbrio do robô não estaria muito longe de ser conseguido.

Aqui se coloca este trabalho: implementar o controlador de um pêndulo invertido simples, isto é, com apenas um grau de liberdade. O tema foi proposto e defendido por Lin Jwo Min (1994).

Este relatório descreve o funcionamento e o controle de um servomotor DC. Um motor deste tipo será usado no acionamento do pêndulo. Enfatiza-se o controle do torque que o motor fornecerá ao pêndulo.

II – CLASSIFICAÇÕES BÁSICAS DE MOTORES DC

Segundo KUO [1] há alguns anos os servomotores do tipo AC eram os mais utilizados para fins de controle onde pequenos servomotores eram necessários. Os motores AC foram sendo substituídos pelos servomotores DC, que apesar de mais caros e de geralmente exigirem manutenção mais freqüente, demonstraram ser mais vantajosos pelos seguintes aspectos: maior facilidade de controle, especialmente de posição e características mais lineares. Atualmente a tendência volta a se inverter levando a uma substituição dos motores DC por AC, mas ainda se usam os servomotores DC em larga escala.

Os motores DC são classificados em várias categorias, de acordo com a forma de produção do campo magnético e conforme o projeto e construção da armadura. De maior interesse é a classificação quanto à forma de produção do campo magnético, sendo classificados como *Motores de Fluxo Magnético Variável* e *Motores de Fluxo Magnético Constante*.

II.1 – Motores de Fluxo Magnético Variável:

O campo magnético é produzido pelo enrolamento de campo que é conectado a fontes externas, e pode ser classificado em *Campo Série* (figura 1) e *Campo Independente* (figura 2), dentre outras categorias (e.g., *shunt* e composto).

Campo Série: O Fluxo magnético é proporcional a corrente de campo, assim tem-se uma relação não-linear entre corrente de armadura, torque e velocidade. São usados em aplicações onde são necessários torques grandes em velocidades baixas.

Campo Independente: O fluxo magnético é independente da corrente de armadura, tornando o controle do motor bastante flexível.

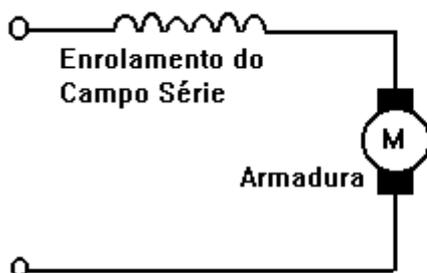


Figura 1 – Campo série.

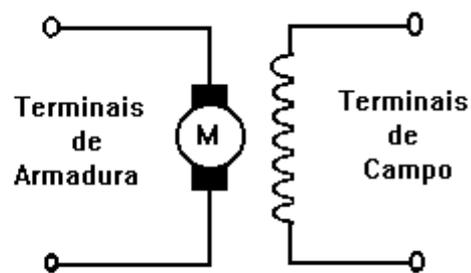


Figura 2 – Campo Independente.

II.2 – *Motores de Fluxo Magnético Constante:*

São conhecidos como motores de *Ímã Permanente* (PM – *Permanent Magnet*), pois o campo magnético é constante e produzido por um ímã permanente, gerando características de torque, de corrente e de velocidade bastante lineares.

Com o desenvolvimento da tecnologia de terras raras tornou-se possível fabricar ímãs com grande campo magnético, permitindo a obtenção de relações torque/volume muito altas. Outras tecnologias recentes têm tornado as partes mais delicadas (escovas e comutadores) praticamente livres de manutenção. Produziram-se também motores com rotores sem enrolamento e com inércia muito baixa, resultando assim em relações torque/inércia (aceleração) muito altas. Assim, essas propriedades tornaram possíveis novas aplicações para os motores DC, por exemplo em equipamentos periféricos de computador, superando quase que totalmente os servomotores AC utilizados anteriormente e superando também os servomotores DC de Campo Magnético Variável.

Os motores DC PM são ainda subdivididos de acordo com o esquema de comutação e o projeto da armadura. Os motores convencionais possuem escovas e comutadores mecânicos, que é o tipo de motor que será utilizado no projeto do controlador do pêndulo invertido; enquanto em alguns a comutação é feita eletronicamente (motor DC sem escovas).

Os motores DC podem ser classificados conforme a construção da armadura, segundo KUO [1], em três tipos: (1) *de núcleo de ferro*, (2) *de enrolamento superficial* e (3) *de bobina móvel*. Neste projeto será utilizado um motor de núcleo de ferro, que é o mais amplamente empregado.

III – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SERVOMOTOR DC COM ÍMÃ PERMANENTE

A figura 3 (extraída de KENJO [2]) mostra a vista em corte de um motor DC PM genérico com dois ímãs-permanentes. A armadura é equipada com fios de cobre uniformemente colocados num núcleo de ferro laminado cilíndrico. A corrente de armadura

é recebida pelos comutadores através de duas escovas. As escovas são montadas na carcaça de maneira a deslizar pela superfície do comutador quando a armadura girar mantendo o contato elétrico.

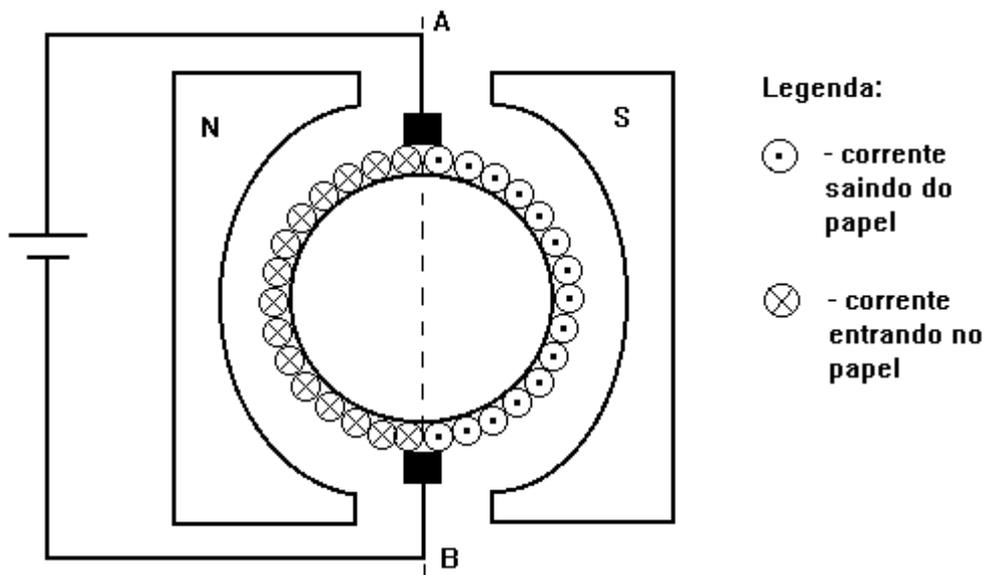


Figura 3 – Corte esquemático de um motor DC ímã-permanente.

O princípio da força agindo na armadura pode ser facilmente entendido através da utilização da regra da mão direita de Fleming. Esta regra determina a direção da força relativa à direção da corrente e do campo. Sendo o sentido da corrente indicada pelo dedo médio e o sentido do campo magnético pelo indicador, obtém-se o sentido de atuação da força dado pelo polegar. Matematicamente tem-se que a força F está relacionada com o comprimento L do condutor, a densidade de fluxo magnético B e a corrente I por:

$$F=IBL \quad (III.1)$$

Aplicando esta regra ao modelo da figura 3 vê-se que a armadura está sujeita a um torque eletromagnético que gera um movimento de rotação no sentido anti-horário.

Outro efeito importante para se compreender o funcionamento do motor é a Força Eletromotriz gerada pelo movimento dos condutores da armadura no campo magnético. A regra da mão direita de Fleming facilita a compreensão deste efeito.

Quando um condutor se move em um campo magnético, uma tensão, chamada de força eletromotriz, é induzida no condutor. Se a velocidade linear relativa entre o condutor e o campo for v , a força eletromotriz (e) é dada por:

$$e=vBL \quad \text{(III.2)}$$

A regra da mão direita determina que apontando com o indicador o sentido do fluxo magnético e com o polegar o sentido do movimento tem-se o sentido da força eletromotriz dada pelo dedo médio.

Aqui percebe-se o grande paralelo existente entre os dois fenômenos acima mencionados. Quando se fornece corrente a um motor, este tende a girar fornecendo torque proporcional à corrente. Por outro lado, a rotação da armadura dentro do campo gera uma força eletromotriz que se opõe ao movimento da armadura. Assim, se o motor é alimentado com tensão constante, sua velocidade aumentará até que se atinja um equilíbrio entre os fenômenos descritos acima.

Por exemplo se é aplicada uma corrente constante a um motor, este giraria a velocidades cada vez maiores até se destruir. Porém, isto geralmente não ocorre devido ao atrito que impede que a velocidade cresça indefinidamente.

IV – MODELO DINÂMICO

Para possibilitar o controle em malha fechada de um motor DC PM, torna-se necessário o estabelecimento de um modelo matemático de sua dinâmica para fins analíticos.

Primeiramente isola-se o sistema e se cria um modelo físico, que contenha as suas características de interesse e as suas possíveis iterações com o meio.

O modelo físico do circuito elétrico do servomotor utilizado neste projeto é apresentado na figura 4.

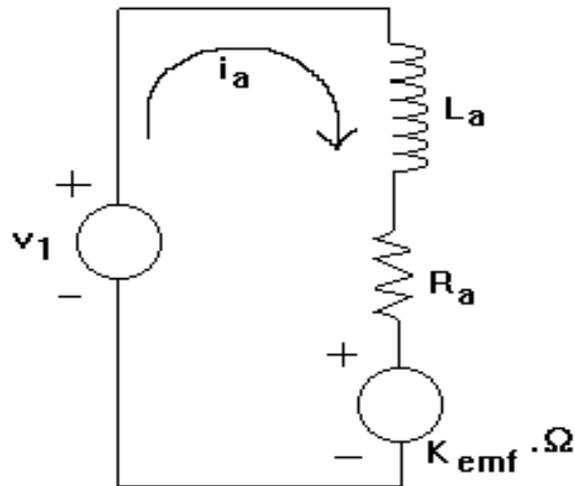


Figura 4 – Modelo físico do circuito elétrico de um servomotor do tipo ímã–permanente.

Onde: v_1 – tensão aplicada ao motor

i_a – corrente da armadura

Ω – velocidade angular do rotor

R_a – resistência da armadura

L_a – indutância da armadura

K_{emf} – constante da força contra–eletromotriz

Um modelo físico da parte mecânica do servomotor é apresentado na figura 5, onde são também mostradas as forças que agem sobre o motor (inclusive atritos).

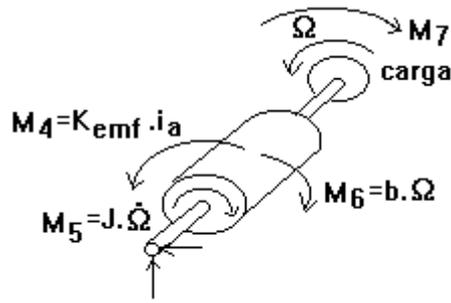


Figura 5 – Modelo físico (mecânico) de um servomotor ímã-permanente.

Na figura 5, M_4 é o momento eletromagnético resultante da ação da corrente de armadura (i_a) e é um momento de entrada do sistema (responsável pelo movimento de rotação da armadura). M_5 é o momento inercial e M_6 é o torque de Atrito Viscoso (onde J é o momento de inércia da armadura e b é o coeficiente de atrito viscoso). M_7 é a reação da carga e é um momento que se opõe ao movimento de rotação do motor. As duas setas perpendiculares ao eixo de rotação do servomotor são resultantes da ação de sustentação deste eixo e não realizam trabalho, portanto, não influem no modelo dinâmico aqui descrito.

Analisando o modelo elétrico, tem-se:

$$i_a R_a + L_a \left(\frac{di_a}{dt} \right) + K_{emf} \Omega = v_1 \quad (IV.1)$$

Analisando o modelo mecânico, tem-se:

$$M_4 - M_5 - M_6 - M_7 = 0 \quad (IV.2)$$

Combinando as equações (IV.1) e (IV.2) obtém-se as seguintes equações dinâmicas para o sistema:

$$K_{emf} i_a - J \dot{\Omega} - b \Omega = M_7 \quad (IV.3)$$

$$i_a R_a + L_a \left(\frac{di_a}{dt} \right) + K_{emf} \Omega = v_1 \quad (IV.4)$$

A solução dessa equação diferencial é $\Omega(t)$ e $i(t)$.

Se o motor for controlado por corrente tem-se uma dinâmica bem mais simples e rápida (o único estado é Ω), na qual a equação diferencial (IV.4) é substituída pela seguinte equação algébrica (conforme o esquema na figura 6):

$$i_a = K_1 v_2 \quad (IV.5)$$

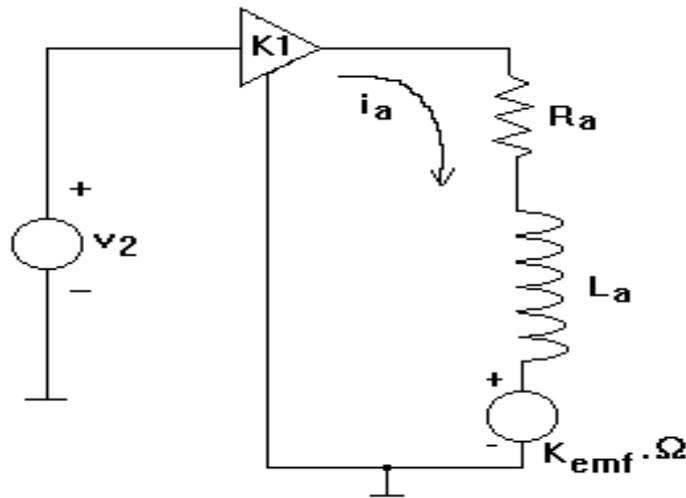


Figura 6 – Servomotor ímã-permanente controlado por fonte de corrente.

V – ACIONAMENTO DE MOTORES DC

V.1 – MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO (PWM)

O acionamento de motores DC pode ser feito através da variação contínua da tensão aplicada ao motor. Porém usam-se atualmente técnicas de *Pulse-Width Modulation* (PWM), que são mais modernas e que diminuem as perdas de energia e por conseguinte reduzem o aquecimento dos componentes do acionador permitindo a redução de seu custo e tamanho. Esta técnica é utilizada neste projeto.

O PWM consiste num método de controle chaveado de tensão em frequências relativamente altas (usualmente da ordem de kHz), conforme apresenta KENJO [2] (vide

figura 7). Nesta figura o tempo T_{ON} corresponde ao tempo que a chave permanece na posição ① e T_{OFF} o tempo que a mesma permanece na posição ②.

Normalmente o chaveamento é, de fato, realizado por transistores como no circuito mostrado por KENJO [2] na figura 8. Nesta figura também se utiliza um diodo em paralelo com a armadura para permitir o fluxo de corrente pela mesma quando o transistor está cortado (denominado diodo de *free wheeling*). Neste circuito, o sinal PWM é aplicado à base (B) do transistor. Quando uma tensão positiva adequada é aplicada em B com relação ao emissor (E), o transistor satura comportando-se como uma chave fechada fazendo com que a tensão de alimentação (V_{CC}) seja aplicada ao motor. De maneira contrária, se a tensão na base com relação ao emissor é zero, então o transistor é cortado comportando-se como uma chave aberta e nenhuma tensão é aplicada ao motor. A tensão média no motor é então:

$$V_m = V_{CC} \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad (V.1)$$

onde V_{CC} é tensão de alimentação do circuito.

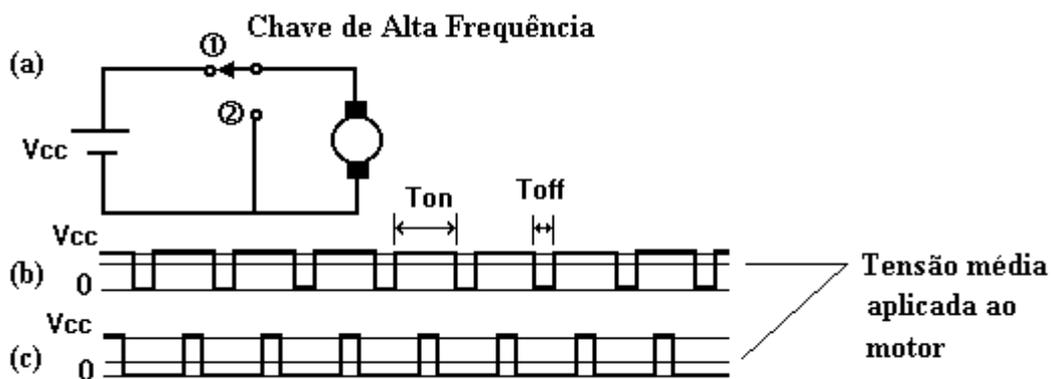


Figura 7 – Chaveamento PWM: (a) Circuito simplificado; (b) e (c) são duas formas de onda da tensão aplicada ao motor para ciclos de condução distintos.

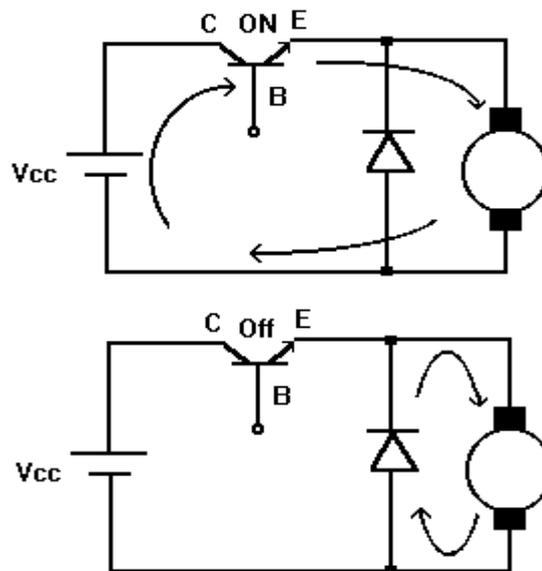


Figura 8 – Transistor funcionando como chave na 'geração' do sinal PWM.

V.2 – CONTROLE BIDIRECIONAL DE ROTAÇÃO

Um circuito conhecido como *H-bridge*, que consiste de quatro transistores arranjados como na figura 9, (extraída de KENJO [2]), é utilizado no projeto como controlador bidirecional para motor DC em modo PWM. O *H-bridge* pode ser usado de diversas maneiras, sendo a mais simples descrita a seguir. Quando os transistores T1 e T4 estão abertos, T2 e T3 estão fechados, causando um fluxo positivo de corrente na armadura da direita para a esquerda conforme na figura 9. Caso contrário, T1 e T4 abertos e T2 e T3 fechados e, então, o sentido do fluxo de corrente é invertido. Isso permite o controle do sentido de rotação do motor. A forma de onda pelos terminais do motor é mostrada na figura 10, onde é mostrado também a tensão média variando "continuamente" de acordo com a variação da largura do pulso do sinal de controle.

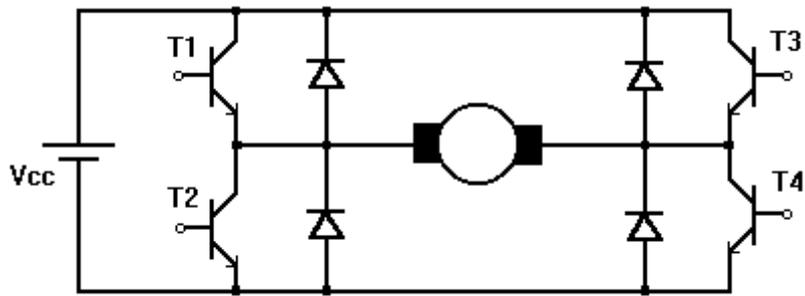


Figura 9 – Circuito de controle de rotação bidirecional *H-bridge*.

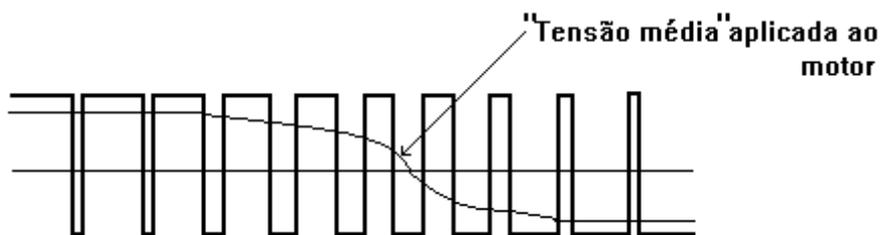


Figura 10 – Tensão PWM aplicada ao motor.

V.3 – ACIONAMENTO POR CORRENTE

O projeto do pêndulo invertido proposto por Min [4] exige um motor cujo torque possa ser controlado continuamente. Como o torque é proporcional à corrente de armadura é natural que se faça o controle dessa corrente de forma a se ter controle sobre o torque. Assim além da utilização do *H-bridge*, para permitir o controle do sentido de rotação, tem-se um circuito responsável pelo controle da corrente de armadura.

Um exemplo simples de controle de corrente, que pode ser comparado diretamente com o circuito do acionamento usado é mostrado na figura 11. O resistor R_s é o "sensor" da corrente de armadura. Nesta configuração, a corrente de armadura i_a pode ser determinada pela tensão de entrada v_{in} de acordo com a seguinte equação:

$$i_a = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)R_s} v_{in} \quad (V.2)$$

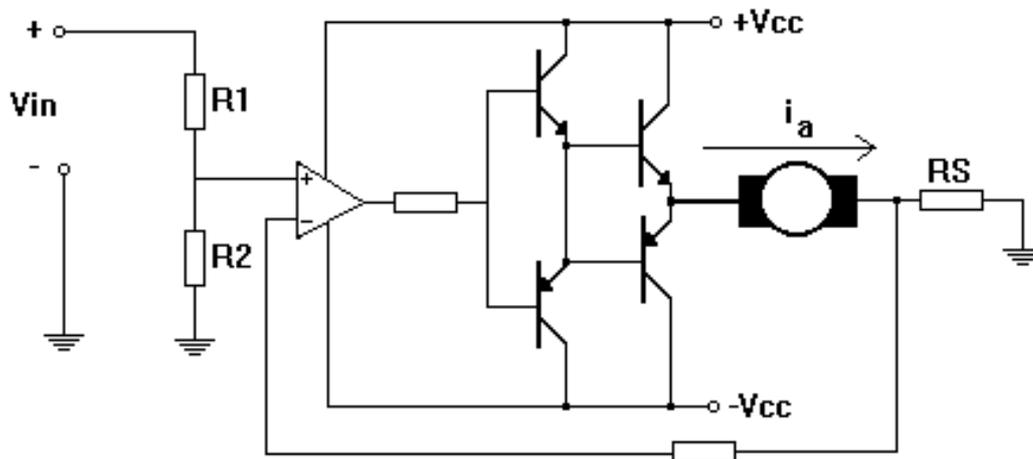


Figura 11 – Servo–amplificador bidirecional com controle de corrente.

Neste circuito ao invés de se usar um circuito *H–bridge* foi usado um amplificador do tipo simetria complementar e alimentação bipolar para permitir a reversão do sentido da rotação. A desvantagem é que são necessárias duas fontes de alimentação ao invés da única fonte necessária para o *H–bridge*.

O circuito na figura 11 poderia ser transformado num comutador se o amplificador operacional fosse substituído por um modulador PWM.

VI – CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados modelos bastante simples de controle de servomotores DC com ímã–permanente. O acionador que será utilizado no projeto do Pêndulo Invertido utiliza algumas dessas técnicas de forma a obter um controle mais robusto. Este acionador utiliza um sinal do tipo PWM, para reduzir a dissipação de potência e fazer o controle de corrente tornando a dinâmica elétrica bastante rápida.

O acionamento constitui-se de um circuito *H-bridge* (figura 9), que permite a utilização de sinal PWM, juntamente com o controle bidirecional de rotação. Associado a este tem-se também um circuito semelhante ao apresentado na figura 11 no qual o amplificador operacional foi substituído por um comparador com histerese (*Schmitt Trigger*) que gera o sinal de chaveamento, permitindo o controle de corrente, como explicado neste texto.

VII – REFERÊNCIAS

[1] Kuo, Benjamin C, "Sistemas de Controle Automático"

Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro, RJ, 1985.

[2] Kenjo, Tak, "Eletric Motors and Their Controls"

Oxford Science Publications, Oxford, 1991.

[3] Paula, Marco A. B., "Contribuições para o Desenvolvimento de uma Linguagem de Controle de Robôs – LICOR", Tese de Mestrado, UFRJ, RJ, 1989.

[4] Min, Lin Jwo, "Modelagem, Simulação e Controle de um Conjunto de Dois Pêndulos Invertidos", Projeto Final, UFRJ, RJ, 1994.