

2 Fundamentos teóricos

2.1. Motores de passo

Motores de passo são atuadores eletromecânicos incrementais não-lineares. Permitir um controle preciso de posição e velocidade, aliado a um baixo custo, faz do motor de passo a escolha ideal para um grande número de aplicações [14].

A propriedade que diferencia o motor de passo dos demais motores elétricos é a capacidade de fazer movimentos incrementais precisos em malha aberta. Essas rotações discretas são chamadas de passo [10].

As subseções abaixo apresentam os vários tipos de motores de passo e suas formas de excitação.

2.1.1. Motores de passo de relutância variável

Os motores de passo mais simples são os de relutância variável (VR, *Variable-Reluctance*). A Figura 1 mostra a seção esquemática de um motor deste tipo com seis dentes no estator.

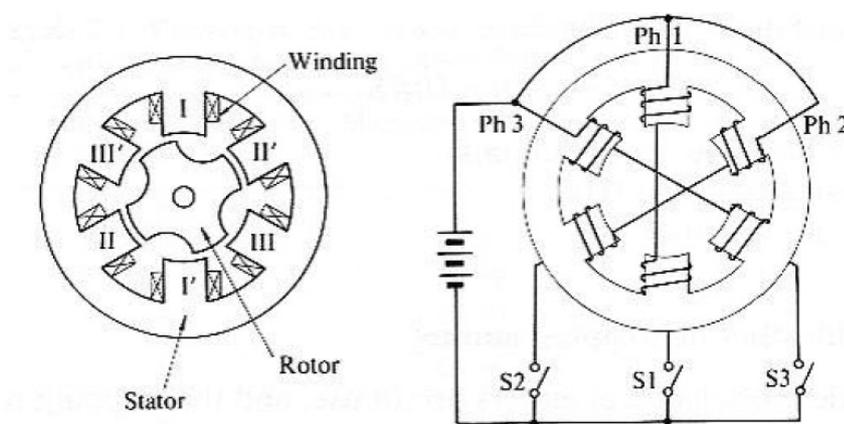


Figura 1 – Esquema motor VR [15]

Na Figura 1, cada par de dentes opostos do estator estão ligados na mesma fase. O rotor possui quatro dentes. O estator e o núcleo do rotor normalmente são feitos em aço.

Se a corrente é aplicada na fase 1, *Ph1* na Figura 1, um campo magnético é criado e um dente do rotor tenta se alinhar a ele. A Figura 2 mostra como isso ocorre.

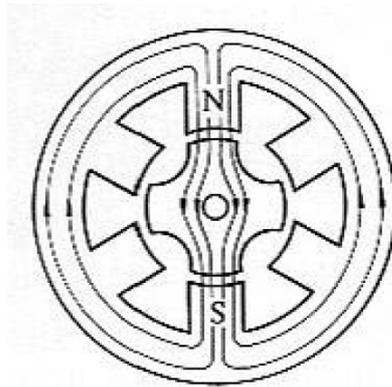


Figura 2 – Fluxo motor VR [15]

Quando o rotor se alinha ao campo magnético, a relutância magnética é minimizada. Se o rotor se desalinhar do campo magnético, um torque é gerado no sentido de retornar à posição de equilíbrio.

2.1.2. Motores de passo de ímã permanente

Estes motores de passo se caracterizam por seu rotor ser formado por um ímã permanente. O estator é formado por dentes envoltos por bobinas. Pode-se observar como é a estrutura básica de um motor de passo de quatro fases na Figura 3.

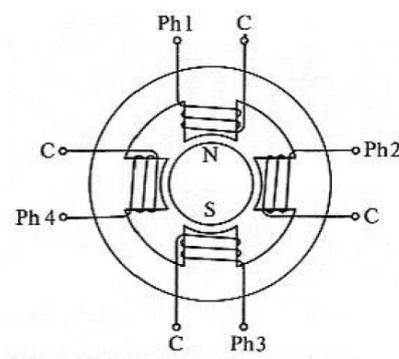


Figura 3 – Motor 4 fases [15]

Ao energizar uma das fases, é criado um campo magnético. Assim, um torque é gerado pela atração do pólo gerado com o pólo oposto do ímã permanente. Um *driver* básico para controlar esse motor de passo é mostrado na Figura 4.

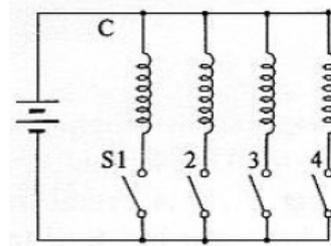


Figura 4 – Driver 4 fases [15]

Se a chave “S1” estiver ligada, e depois ligarmos a chave “S2”, o motor irá efetuar uma rotação de 45° . A Figura 5 ilustra como isso é feito.

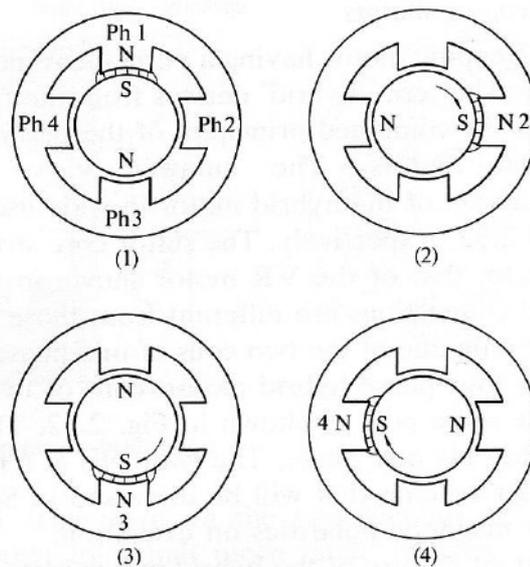


Figura 5 – Sequência motor de 4 fases [15]

2.1.3. Motores de passo híbridos

Outro tipo de motor de passo com um ímã permanente em seu rotor é o híbrido. Esse tipo de motor é chamado de híbrido porque opera usando os princípios do motor de ímã permanente e de relutância variável [15]. O desenho esquemático de um motor de passo híbrido é mostrado na Figura 6.

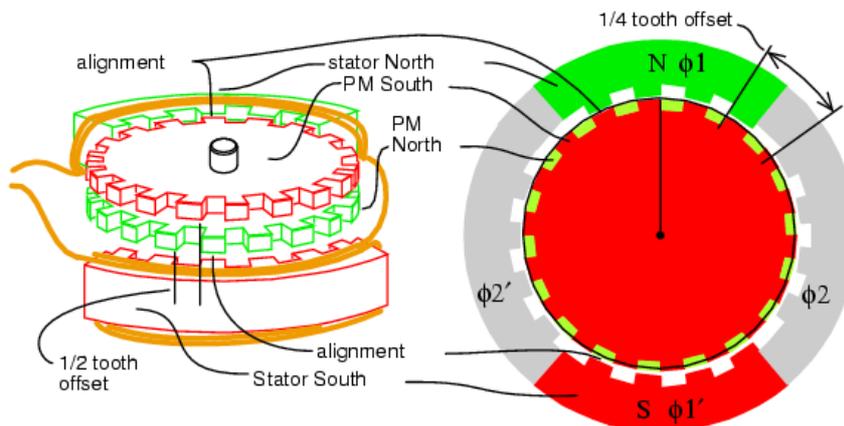


Figura 6 – Esquema motor híbrido [10]

O estator deste motor é muito semelhante ao motor VR, mas os enrolamentos e as bobinas são conectados de forma diferente. No motor VR somente uma das duas bobinas de cada fase está em cada pólo. No motor híbrido, bobinas de duas fases diferentes estão no mesmo pólo. Ou seja, cada pólo não pertence a apenas uma fase. Desta forma, elas produzem polaridades magnéticas diferentes quando excitadas.

O núcleo do rotor do motor híbrido é permanentemente magnetizado, de modo a gerar um campo unipolar. Ao redor do rotor existe um “sanduíche” de engrenagens que são polarizadas pelo ímã do núcleo. Na Figura 6, a parte superior do rotor é o pólo sul e a parte inferior o norte. Os dentes dos pólos estão defasados de um dente.

2.1.4. Modos de excitação

A forma como as fases do motor de passo são excitadas determina o tamanho do incremento de rotação e o torque disponível. Existem três modos de excitação: passo completo, meio passo e micropasso. O modo passo completo pode ser obtido energizando as fases de forma sequencial, um ou duas de cada vez. Energizar duas fases de cada vez gera mais torque no rotor. Outra forma é energizar duas fases e desenergizar uma na sequência, obtendo assim um meio passo. No modo micropasso, é feita uma variação quase contínua da energização das fases – assim, um passo pode ser subdividido. O passo é dividido, tipicamente, por 4, 8 ou 16. Entretanto, existem sistemas capazes de subdividir um passo milhares de vezes. A desvantagem deste método é a maior complexidade do *driver* e menor precisão.

Motores híbridos permitem serem alimentados por um *driver* bipolar, assim os enrolamentos podem ser ligados de modo que o motor tenha duas fases, e cada fase duas polaridades. Desta forma, quando uma fase é acionada, metade dos enrolamentos do motor fica ligada. Em quanto que em motores unipolares, um quarto dos enrolamentos ficam ligados de cada vez. Isso permite ao motor híbrido ter até 50% mais eficiência e até 70% mais torque. A Figura 7 mostra a sequência de energização de um motor híbrido acionado por um *driver* bipolar.

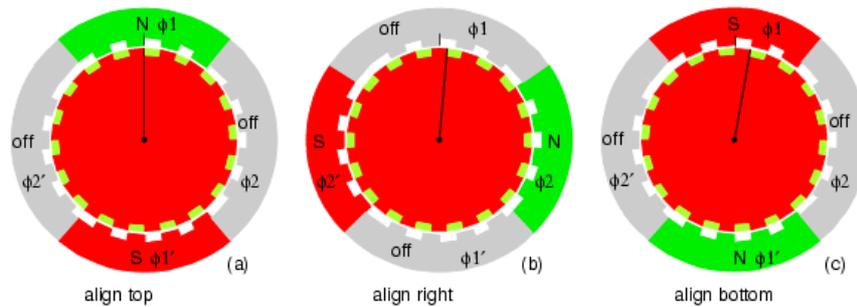


Figura 7 – Sequência motor híbrido [10]

Na Figura 7-(a) o *driver* fornece um tensão positiva nos terminais da fase 1. Na Figura 7-(b) o *driver* fornece um tensão positiva nos terminais da fase 2, assim o motor realiza a rotação de um passo. Na Figura 7-(c) o *driver* fornece um tensão negativa nos terminais da fase 1, assim o motor realiza a rotação de mais um passo. A Figura 8 mostra como os terminais estão conectados ao estator.

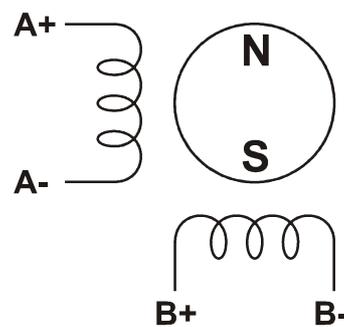


Figura 8 – Terminais de um motor com ligação bipolar

A Tabela 1 apresenta a sequência de polaridades que devem ser aplicadas aos terminais do motor para realizar passos no sentido horário. Para realizar passos no sentido anti-horário, basta seguir a tabela de baixo para cima.

Tabela 1 – Sequência para passo completo

Passo	A +	A -	B +	B -
0	+	-	+	-
1	-	+	+	-
2	-	+	-	+
3	+	-	-	+

A Tabela 2 apresenta a sequência de polaridades para o motor operar em modo de meio passo no sentido horário. O incremento na rotação é metade do modo passo completo.

Tabela 2 – Sequência para meio passo

Passo	A +	A -	B +	B -
0	+	-	+	-
1	-	-	+	-
2	-	+	+	-
3	-	+	-	-
4	-	+	-	+
5	-	-	-	+
6	+	-	-	+
7	+	-	-	-

A seção seguinte apresenta como o motor deve ser excitado em malha aberta.

2.2. Motores de passo em malha aberta

O motor de passo realiza rotações precisas a cada energização de seus enrolamentos. A sequência de excitação é feita pelo driver em função de um conjunto de sinais de entrada. Na maioria das aplicações é utilizado um sinal chamado passo e outro chamado direção. O sinal de direção determina o sentido da rotação do motor, horário ou anti-horário. A cada pulso no sinal de passo, o motor deve realizar a rotação de um incremento.

Como o valor do incremento é conhecido, a partir da contagem dos pulsos do sinal passo, a posição do rotor pode ser determinada. Isto é possível desde que

o motor tenha torque disponível para realizar esta rotação. A partir da frequência dos pulsos de passo, a velocidade do motor pode ser estimada.

A Figura 8 mostra entradas de passo e direção típicas. O *driver*, que recebe sinais como os da figura, demanda ao motor realizar dois incrementos de rotação em um sentido e três no outro.

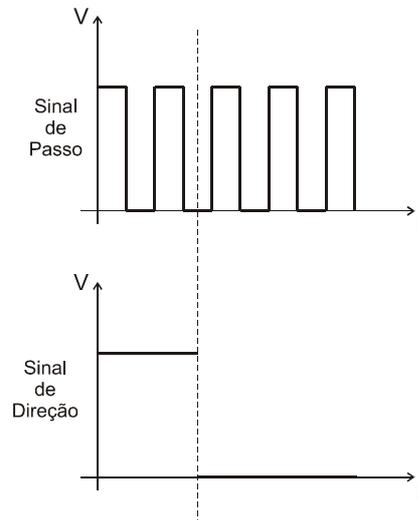


Figura 8 – Sinais de comando

Esses incrementos de rotação são muito precisos. Essa característica de precisão em malha aberta é uma grande vantagem para os motores de passo. Porém, se o torque aplicado ao eixo exceder o limite do motor, haverá um erro permanente no posicionamento do rotor. Então motores de passo em malha aberta devem ser super-dimensionados. Como o torque disponível é significativamente reduzido em altas rotações, a velocidade máxima do motor deve ser limitada a um nível de segurança. Ou seja, para assegurar que o motor execute as rotações esperadas em função da excitação, o seu desempenho deve ser sacrificado. As limitações do controle em malha aberta estimularam o desenvolvimento do controle em malha fechada, apresentado na seção seguinte.

2.3. Motores de passo em malha fechada

A forma mais comum de controle de motor de passo em malha fechada utiliza a realimentação da posição do eixo do rotor [11]. Cada pulso no sinal de passo só é realizado se o motor respondeu adequadamente ao ultimo comando [10]. A Figura 9 mostra a malha de controle deste sistema.

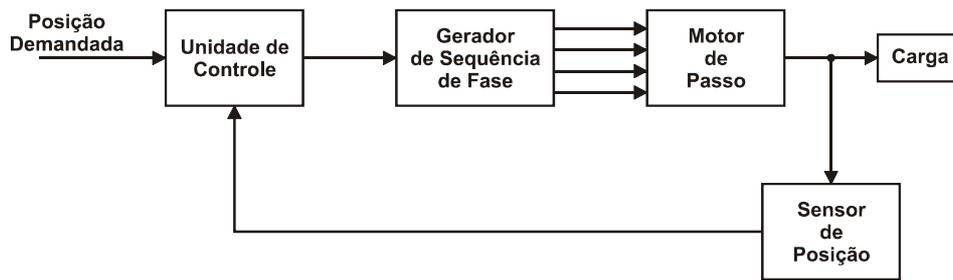


Figura 9 – Malha fechada típica

Esta técnica se baseia em descobrir quando energizar cada fase, em função da posição do rotor, para maximizar o torque no eixo. Em baixas velocidades, o ponto ótimo para comutar entre as fases pode ser deduzido de uma análise estática do torque gerado por cada fase. A Figura 10 apresenta um gráfico do torque gerado por cada fase em função da posição do rotor, para um motor de três fases.

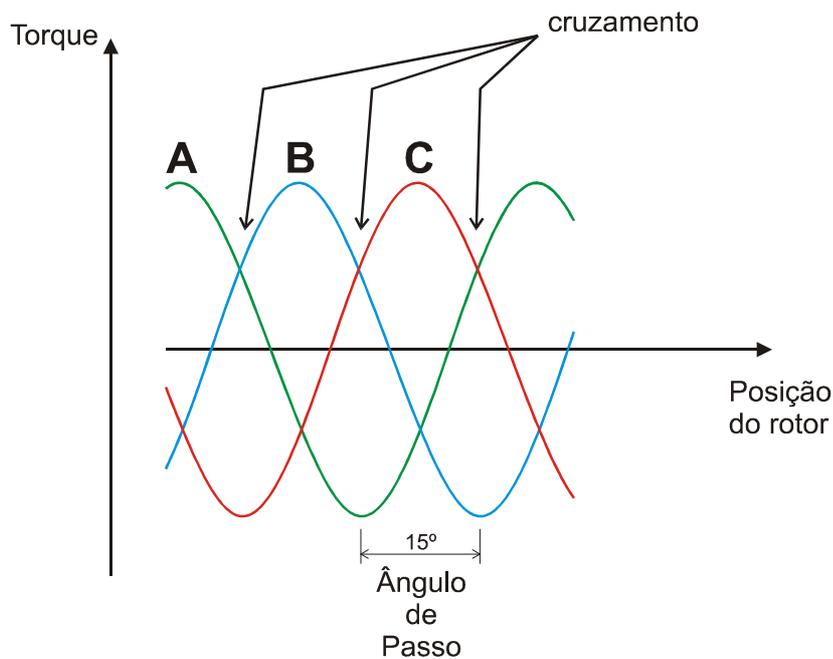


Figura 10 – Torque vs. posição por fase

Em baixa velocidade, o torque pode ser maximizado comutando entre as fases no ponto de cruzamento das curvas de torque. Mas, em alta velocidade, os efeitos indutivos das bobinas do motor geram distorções na forma de onda da corrente. Nessas condições, a comutação deve ocorrer antes para dar tempo da corrente que circula a fase se estabilizar. O ângulo ótimo de comutação pode ser extraído de parâmetros construtivos do motor. A Figura 11 apresenta a relação típica entre torque e velocidade, para vários ângulos de comutação.

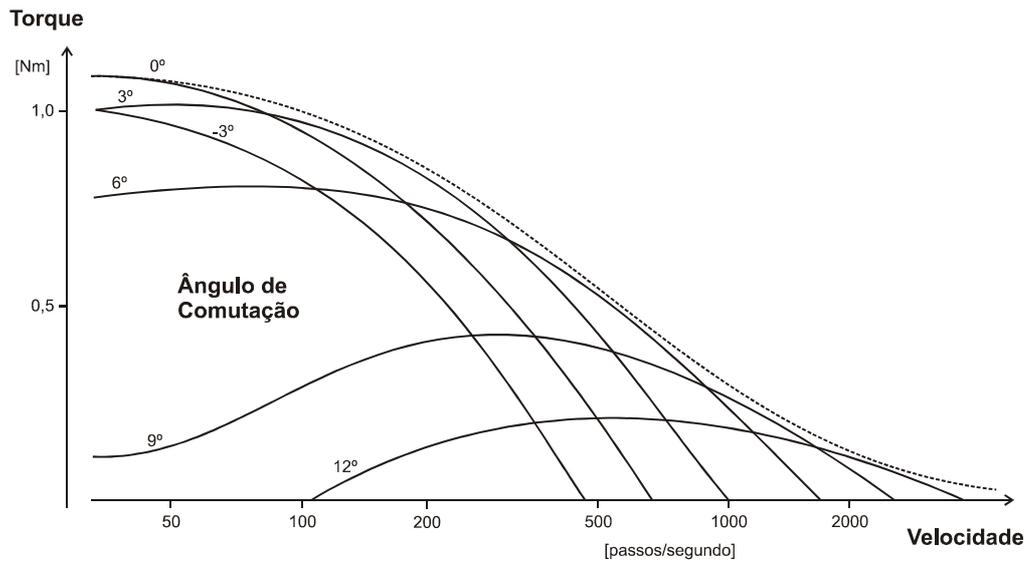


Figura 11 – Torque vs. velocidade para vários ângulos de comutação

Como os parâmetros do motor são constantes, cada velocidade de operação possui um ângulo de comutação ótimo. Logo, para se obter o máximo torque, o controlador deve ser capaz de variar continuamente o ângulo de comutação, e isso depende de uma leitura contínua da posição do rotor. Na prática, são suficientes alguns valores discretos. Por exemplo, um motor com resolução de 200 passos por volta necessita de um sensor com 1600 pontos por volta, resultando em 8 possíveis ângulos de comutação.

Esta técnica exige que o sensor seja montado diretamente no eixo do motor. Normalmente isso é feito fixando um *encoder* em uma extensão traseira do eixo do rotor. Entretanto, os fabricantes de motores de passo disponibilizam poucos modelos de motores com essa opção. A Figura 12 mostra um motor de passo com *encoder* acoplado.

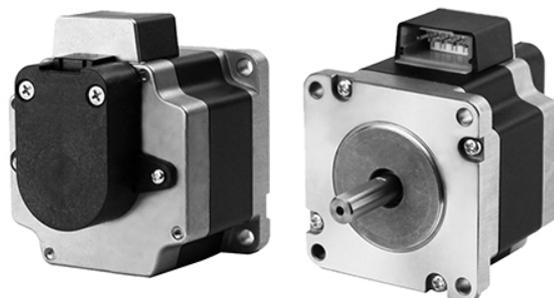


Figura 12 – Foto de um motor com *encoder*

Além dos modelos onde *encoders* podem ser facilmente adaptados serem poucos, o volume do conjunto também é maior. Logo, em aplicações onde o

compartimento do motor é pequeno, pode ser difícil acondicionar motor e *encoder* juntos. Outra limitação para esta técnica pode ser observada em aplicações onde a posição de interesse para o controle não é a do rotor. Por exemplo, em robótica é comum o eixo do motor ser acoplado a uma caixa redutora de velocidade. No eixo de saída desta caixa redutora, um elemento como a junta de um manipulador serial pode ser acoplada. Se a caixa do redutor possuir folga (*backlash*), a posição da junta do manipulador não pode ser conhecida apenas a partir da posição do eixo do motor. Em uma aplicação como esta, um *encoder* montado na saída da caixa de redução permite compensar o erro devido à folga do redutor. A técnica de controle, usando o ângulo de comutação, não poderia ser usada. Este fenômeno da folga é apresentado na seção seguinte.

2.4. Redutores com folga (*backlash*)

Backlash é a não linearidade mais importante em acionamentos industriais e grande causa da deterioração do controle de posição [16]. Em muitas aplicações, uma caixa redutora de velocidade é acoplada ao motor de passo para aumentar o torque de saída. A caixa de redução é composta por um conjunto de engrenagens. Devido a limitações no processo de fabricação, cada par de engrenagens possui uma pequena folga, ou *backlash* [17]. A Figura 13 mostra, esquematicamente, a folga entre um par de engrenagens.

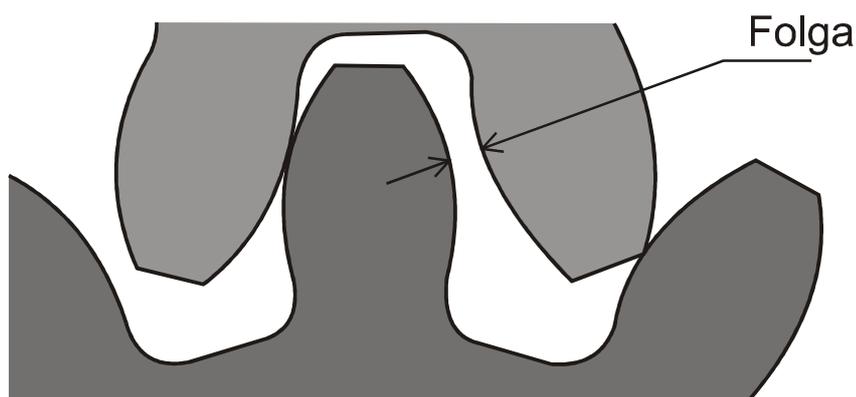


Figura 13 – Folga entre dentes

O erro devido ao *backlash* é difícil de estimar e compensar porque não pode ser descrito como uma relação linear [18]. A Figura 14 mostra a variação do ângulo de saída devido ao *backlash*.

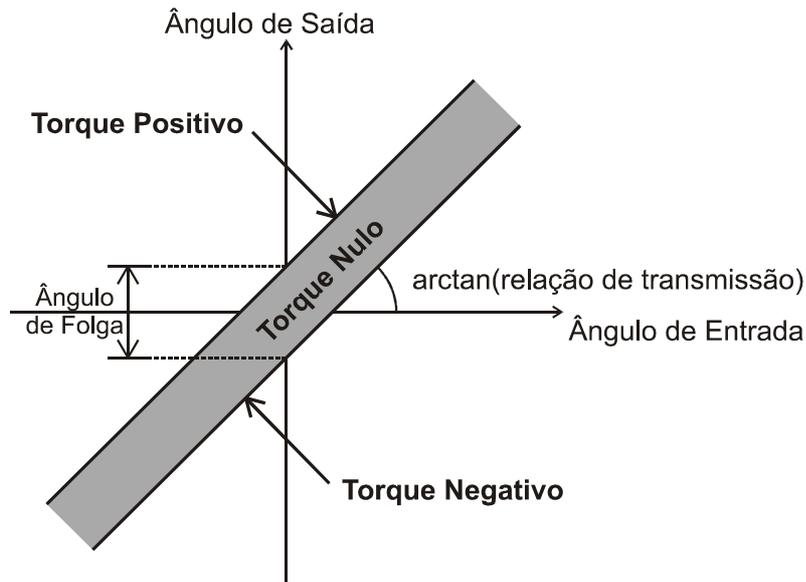


Figura 14 – Ângulo do eixo de entrada vs. saída com folga

A posição do eixo de saída pode ser conhecida se houver torque no eixo de saída, e se seu sentido for conhecido. Se o torque for nulo, para cada posição do eixo de entrada existe uma faixa de valores possíveis para a posição do eixo de saída. A inclinação do gráfico depende da relação de transmissão, no caso de um redutor de engrenagens, do número de dentes de cada engrenagem.

Backlash normalmente é modelado como uma zona morta. Nesta modelagem, o torque é dado em função da diferença entre os ângulos de saída e entrada [16]. Entretanto, essa modelagem exige que o atrito interno seja desprezível. Outro modelo de *backlash* propõe a modelagem através de uma histerese, onde a posição dentro da região de folga é dada em função do histórico no tempo da posição do eixo.

No próximo capítulo, a modelagem de motores de passo híbridos é apresentada.