

Notas Técnicas do Laboratório Nacional de Astrofísica

**Breve estudo sobre as características fundamentais
dos motores de passo**

Orlindo Wagner Soares Pereira

LNA/NT/2024-26

Jun/2024

Breve estudo sobre as características fundamentais dos motores de passo

Orlindo Wagner Soares Pereira¹

¹*Laboratório Nacional de Astrofísica, osoares@lna.br*

Resumo: Esta nota técnica apresenta um breve estudo sobre os tipos, arranjos e parâmetros operacionais básicos dos motores de passo, servindo como ferramenta para pré-seleção de componentes para projetos que envolvem automação, controle e movimentação precisa de mecanismos, amplamente utilizados nos projetos optomecânicos do Laboratório Nacional de Astrofísica.

Abstract: *This technical note presents a brief study on the types, arrangements and basic operational parameters of stepper motors, provided as a tool for pre-selection of components for projects involving automation, control and precise movement of mechanisms, widely used in optomechanical projects of the Laboratório Nacional de Astrofísica.*

Palavras-chave/Keywords: Motores de passo; controle preciso de mecanismos; parâmetros operacionais / Stepper motor; precise movement of mechanisms; operational parameters.

Submetido em: Jun/2024

Revisado por:

Cledson Pereira dos Santos

Orlando Verducci Junior

Saulo Roberly Gargaglioni

Sumário

Lista de Figuras	4
1 Introdução	5
2 O motor de passo	6
2.1 Principais características dos motores de passo	6
2.2 Tipos de motores de passo	7
2.3 Configurações físicas dos motores de passo	10
2.3.1 Motores de passo híbridos: configurações	10
2.3.2 Número de fios	11
2.3.3 Ligação do tipo bipolar	12
2.3.4 <i>Driver</i> de acionamento	13
2.3.5 Ligação do <i>driver</i>	14
2.4 Tamanho padronizado e torque	15
2.5 Curvas características de torque e rotação	16
3 Estudo de caso	19
3.1 Métodos aplicáveis para o dimensionamento	20
3.1.1 Análise dos parâmetros elétricos	20
3.1.2 Caracterização do movimento	21
3.1.3 Perfil de Velocidade	21
3.1.4 Cálculo do número de pulsos necessários para o movimento	22
3.1.5 Calculando o torque resistivo da carga	22
3.1.6 Compatibilização: torque requerido vs torque disponível	22
3.1.7 Experimentos para readequação de parâmetros	23
3.2 Dimensionamento	24
3.2.1 Parâmetros elétricos do motor	24
3.2.2 Análise cinemática: cálculo do perfil de velocidade	25
3.2.3 Análise dinâmica: análise de torque no sistema	26
4 Conclusões	27
Agradecimentos	28
Referências	29
Apêndice	30

Lista de Figuras

1	Sistema para acionamento de um motor de passo.	6
2	Seção transversal de um motor de passo do tipo Relutância Variável de três fases e circuito básico de acionamento.	7
3	Seção transversal de um motor de passo do tipo Ímã Permanente de quatro fases e circuito básico de acionamento.	8
4	Linhas de campo magnético permeando o eixo e o estator: motor de passo RV (a), e motor de passo IP (b).	8
5	Rotor de um motor de passo híbrido: núcleo de ímã permanente e presença de dentes na região periférica.	9
6	Linhas de campo magnético permeando o eixo (a) e o estator (b) de um motor de passo Híbrido.	9
7	Disposição das bobinas de um motor de passo Híbrido com duas fases.	10
8	Circuitos básicos para os métodos de acionamento Unipolar e Bipolar.	11
9	Tipos de motores de passo híbridos e números de fios.	12
10	Ligação do tipo bipolar de 4 fios.	12
11	Composição básica de um <i>driver</i> para motor de passo.	13
12	Diagrama típico para ligação de um <i>driver</i> e motor de passo bipolar.	14
13	Principais dimensões de um motor de passo (em milímetros).	15
14	Faixas de Torque nominal para motores de passo híbridos de diferentes tamanhos.	16
15	Curva característica de Torque vs Rotação.	17
16	Cálculo da frequência máxima de <i>pull – in</i> considerando a carga.	18
17	Guia linear porta prismas da unidade de calibração do ECHARPE	19
18	Motor de passo QuickSilver M17-1-0B-0BB.	19
19	Cálculo inicial dos parâmetros elétricos.	20
20	Perfis de velocidade: (a) <i>start-stop</i> , (b) trapezoidal e (c) curva em S	21
21	Compatibilização: torque requerido vs torque disponível	23
22	Parâmetros do motor QuickSilver <i>M-Grade 17 Frame Motors</i>	24
23	Resultado do cálculo inicial dos parâmetros elétricos.	25
24	Resultado do cálculo inicial do perfil de velocidade.	25
25	Resultado do cálculo e análise do torque.	26
26	Formulário para sistema fuso-castanha.	30
27	Resultados dos cálculos para análise cinemática.	31
28	Resultados dos cálculos para análise dinâmica.	32
29	Resultados dos cálculos das inercias do sistema.	33

1 Introdução

Um motor de passo pode ser classificado como um motor elétrico com características especiais. São motores, como o nome sugere, que podem gerar movimentos discretos denominados passos. São amplamente utilizados em sistemas que necessitam o posicionamento preciso de uma carga.

Às vezes, motores de passo são usados com a associação de dispositivos de feedback, como encoders formando um circuito em malha fechada. Mas, as vezes eles são usados em circuito em malha aberta. Em ambos os casos, é importante que o projetista esteja atento aos requisitos de movimentação da carga: torque disponível, torque requerido e regimes de velocidades desejados. Tornando-se necessário o uso de métodos para dimensionamento e seleção dos motores de passo apropriados para o sistema.

Neste sentido, o presente trabalho é uma revisão bibliográfica para a introdução teórica aos motores de passo, com um roteiro de aplicação prática no Observatório do Pico dos Dias (OPD), que tem por objetivo apresentar o estudo de características, análise de requisitos, dimensionamento e seleção de motores de passo, bem como o servir como guia para projetos que utilizam essa tecnologia no Laboratório Nacional de Astrofísica.

2 O motor de passo

O motor de passo é um dispositivo eletromecânico que converte pulsos elétricos em movimentos mecânicos discretos denominados passos. Os pulsos aplicados aos motores de passo têm relação direta com a: direção, velocidade e deslocamento. Os motores de passo são comumente usados em projetos que necessitam sincronismo, controle de velocidade e posicionamento preciso de uma carga.

Existe uma imensa variedade de motores de passo no mercado. Sua classificação depende do número de fases do estator (quantidade de enrolamentos) e do tipo de rotor (se é de relutância variável, de ímã permanente ou híbrido). Depende, também, se a alimentação é unipolar ou bipolar e se é capaz de operar nos modos: passo inteiro, meio passo e micropasso.

Para operar corretamente, o motor de passo depende de um dispositivo denominado *driver*. Este dispositivo recebe comandos de um controlador e alimentação de uma fonte de energia e, em seguida, realiza o chaveamento eletrônico para funcionamento adequado do motor. Um diagrama básico de funcionamento é apresentado na Figura 1.

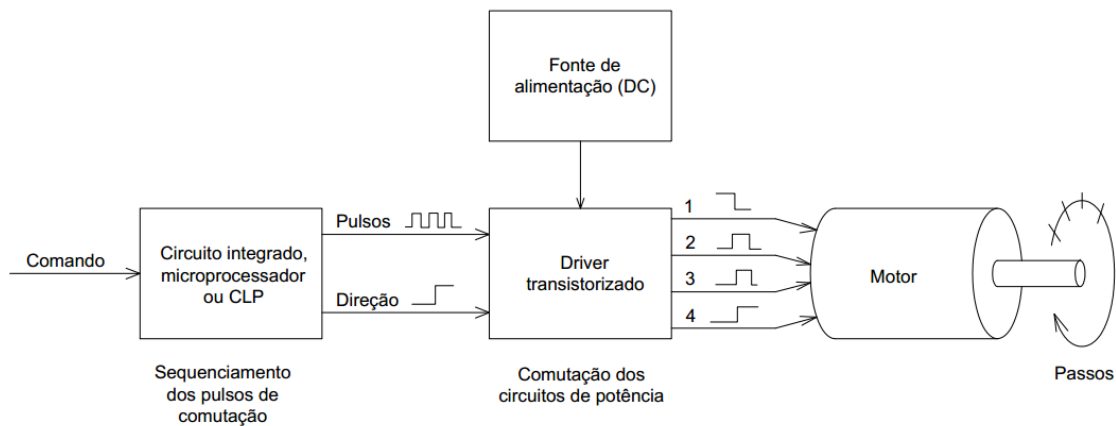


Figura 1: Sistema para acionamento de um motor de passo.

2.1 Principais características dos motores de passo

- Podem ser facilmente controlados com circuitos digitais, uma vez que o *driver*, que gera os sinais apropriados para acionar os pólos do motor, requer dois sinais de entrada digital: um sinal de pulso e um sinal de direção;

- Não possuem fios conectados ao rotor, o que elimina a necessidade de escovas e um comutador;
- Geram um grande torque a baixa velocidade, o que elimina, na maioria das vezes, a necessidade de reduções mecânicas;
- Podem ser usados em aplicações para o controle de posição sem a necessidade de um sensor de posição. Enquanto o motor estiver em operação dentro dos limites especificados, a posição nominal do motor de passo pode ser controlado pelo número de passos que foram enviadas ao motor.

2.2 Tipos de motores de passo

Existem três tipos de motores de passo. Estes são: o de relutância variável (RV), ímã permanente (IP) e o híbrido (HSM).

As configurações diferem-se primeiro pelo rotor. Em um motor de relutância variável, Figura 2, o rotor é contituído por lâminas aço silício (ferro doce) não magnetizado e possui dentes. Enquanto que em um motor de ímã permanente, Figura 3, o rotor é um ímã ou magneto permanente e não possui dentes.

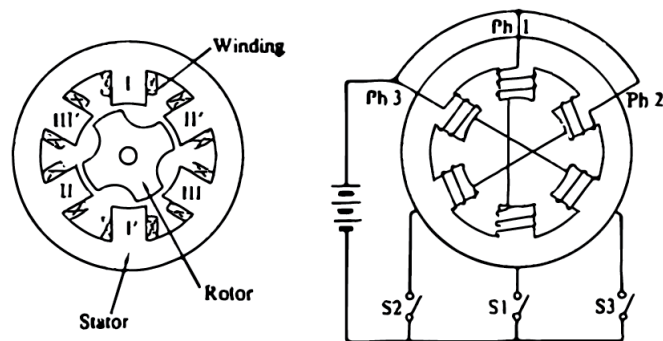


Figura 2: Seção transversal de um motor de passo do tipo Relutância Variável de três fases e circuito básico de acionamento.

Fonte: [1], adaptado pelo autor, 2020.

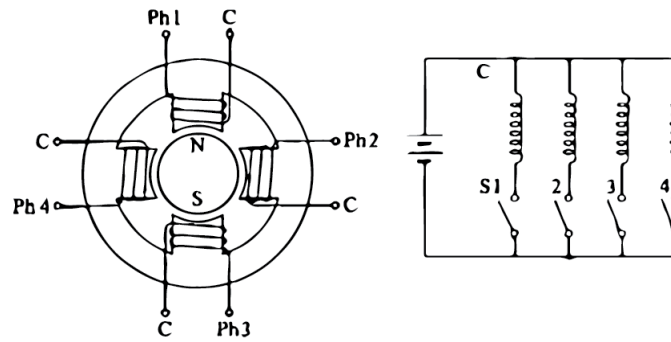


Figura 3: Seção transversal de um motor de passo do tipo Ímã Permanente de quatro fases e circuito básico de acionamento.

Fonte: [1], adaptado pelo autor, 2020.

Para ambos os casos apresentados nas Figuras 2 e 3, a comutação de cada interruptor resulta na excitação da respectiva bobina, de modo que as linhas de campo magnético irão agir forçando a orientação do eixo, como apresentado na Figura 4. Além disso, as linhas de campo ocorrem em lóbulos radiais ao eixo passando pelo o estator. Daí a necessidade do material do estator ter boa permeabilidade magnética.

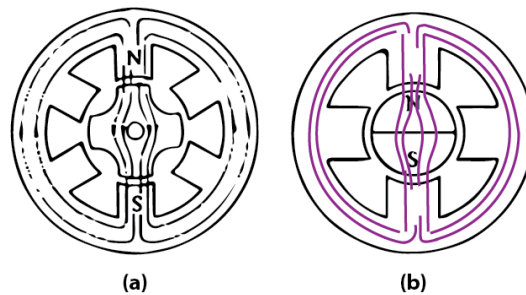


Figura 4: Linhas de campo magnético permeando o eixo e o estator: motor de passo RV (a), e motor de passo IP (b).

Fonte: [1], adaptado pelo autor, 2020.

A vantagem de um motor de relutância variável está na sua rápida resposta dinâmica, enquanto que um motor de ímã permanente a vantagem está na sua capacidade de exercer pequenos torques de travamento, também chamados de torques de retenção, quando o estator não está energizado [2].

Os motores de passo híbridos, tal como o nome sugere, consiste na combinação das características dos motores de relutância variável e de ímã permanente. O motores híbridos possui um rotor que possui dentes em sua região periférica similar a um motor

de relutância variável. O núcleo desse rotor é um ímã permanente, cujo os pólos norte e sul estão posicionados na direção axial como apresentado na Figura 5.

A combinação dessas características resulta em um motor de passo híbrido, cujo as linhas de campo magnético se apresentam em lóbulos radiais e axiais, como apresentado na Figura 6. Isso aumenta as características de torque de retenção, torque estático e torque dinâmico, quando comparado com os motores de passo de relutância variável e de ímã permanente. Os métodos de excitação das bobinas são mais complexos, por isso a necessidade da escolha adequada do *driver* (assunto que será melhor discutido posteriormente).

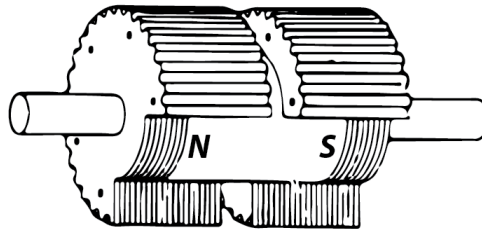


Figura 5: Rotor de um motor de passo híbrido: núcleo de ímã permanente e presença de dentes na região periférica.
Fonte: [1], adaptado pelo autor, 2020.

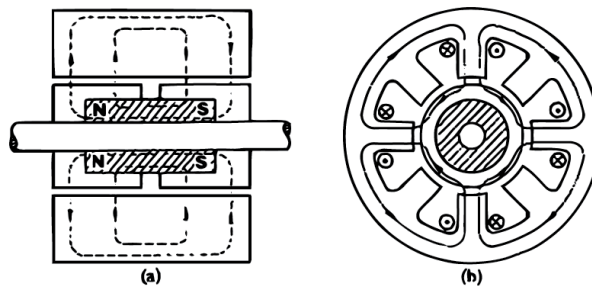


Figura 6: Linhas de campo magnético permeando o eixo (a) e o estator (b) de um motor de passo Híbrido.
Fonte: [1], adaptado pelo autor, 2020.

De maneira geral, o motor de passo híbrido é melhor tipo dos motor de passo em todas as características [3], justificando o fato deste ser o tipo de motor mais utilizado nas aplicações de precisão e controle. Neste sentido, nas seções seguintes serão discutidos os assuntos com ênfase para os motores de passo híbrido, uma vez que este é o tipo de motor mais utilizado nos projetos no LNA.

2.3 Configurações físicas dos motores de passo

Nessa seção serão apresentadas as configurações para motores híbridos do tipo bifásico. Além das quantidades de fios e como ligá-los com apenas 4 fios, para seguir o padrão dos *drivers* mais comumente encontrados no mercado.

2.3.1 Motores de passo híbridos: configurações

Os motores de passo híbridos estão disponíveis em diferentes configurações de enrolamento das bobinas que formam os pólos no estator. Esses enrolamentos podem ser monofilar ou bifilar, com 2 ou 4 fases. Sendo a configuração de duas fases mais versátil representada na Figura 7. Nessa configuração, os pólos 1, 3, 5 e 7 pertencem à fase A, e os pólos 2, 4, 6 e 8 à fase B. Um exemplo de acionamento é energizar as bobinas 1 e 5 para formar o pólo norte magnético enquanto que os as bobinas 3 e 7 são energizadas formando o pólo sul magnético e vice versa. O mesmo procedimento pode ser aplicado às bobinas que formam a fase B.

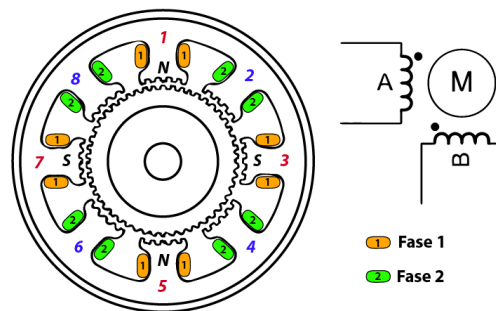


Figura 7: Disposição das bobinas de um motor de passo Híbrido com duas fases.

O movimento do eixo do motor se dará dependendo da forma em que o motor é acionado (conectando somente uma ou ambas as fases A e B) e da sequência com que as bobinas são energizadas. Para isso é necessário a construção de um circuito de acionamento, denominado *driver*. O *driver* pode ser construído por diferentes vias. Em um nível mais básico, um transístor pode ser usado para alterar o estado de ativação de cada fase ou enrolamento das bobinas para o caso de acionamento unipolar ou fazer o uso de um circuito com transístores formando uma ponte H para o acionamento bipolar (Figura 8).

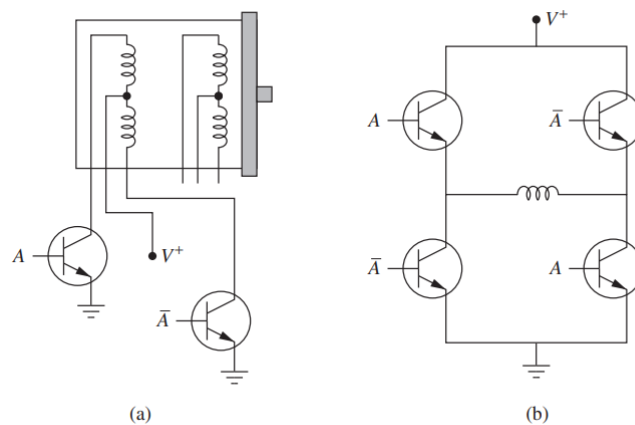


Figura 8: Circuitos básicos para os métodos de acionamento Unipolar e Bipolar.
 Fonte: [2], adaptado pelo autor, 2020.

É importante observar que o método de acionamento (ou modo de excitação) unipolar utiliza metade das fases disponíveis no motor necessitando apenas de dois transistores por fase, tornando esse tipo de *driver* mais simples. O método bipolar faz uso alternadamente de todas as bobinas durante o acionamento, isso acrescenta consideravelmente a potência de saída do motor (potência de eixo) [1].

2.3.2 Número de fios

Os motores de passo híbridos estão disponíveis nas versões de: 4, 5, 6 e 8 fios. A configuração de 4 fios não é bifilar e é usada apenas com excitação bipolar. A configuração com 6 fios pode ser usada como unipolar de 4 fases mas também com a excitação bipolar. Nesta configuração, um fio serve como conexão comum para cada par de bobinas. A configuração de 5 fios não é muito comum. Nesta configuração, o fio de conexão comum está conectado em todas as bobinas e trazido para fora do motor como um único fio. Na configuração de 8 fios, os enrolamentos de cada bobina são bifiliares e são trazidos para fora do motor em terminais separados. Esta configuração dá uma maior flexibilidade na ligação dos fios para o motor: configuração unipolar-série, bipolar-série e bipolar-paralelo. Todas as configurações estão apresentadas na Figura 9.

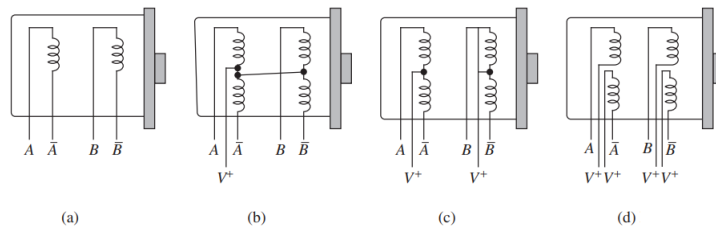


Figura 9: Tipos de motores de passo híbridos e números de fios.
 Fonte: [2], adaptado pelo autor, 2020.

2.3.3 Ligação do tipo bipolar

Para a ligação de motores de passo tem-se observado uma maior predominância na configuração bipolar de quatro fios. Este tipo de ligação facilita a seleção tanto do motor quanto do *driver* de operação, garantindo que esses dispositivos sejam intercambiáveis.

Os motores bipolares de 4, 6 ou 8 fios podem ser conectados ao *driver* com apenas 4 fios. Sendo a ligação bipolar-série comum à todos esses modelos e bipolar-paralelo apenas para o motor de 8 fios. A Figura 10 apresenta todos os esquemas de ligação do tipo bipolar de 4 fios, o termo "NC" significa "Não Conectado".

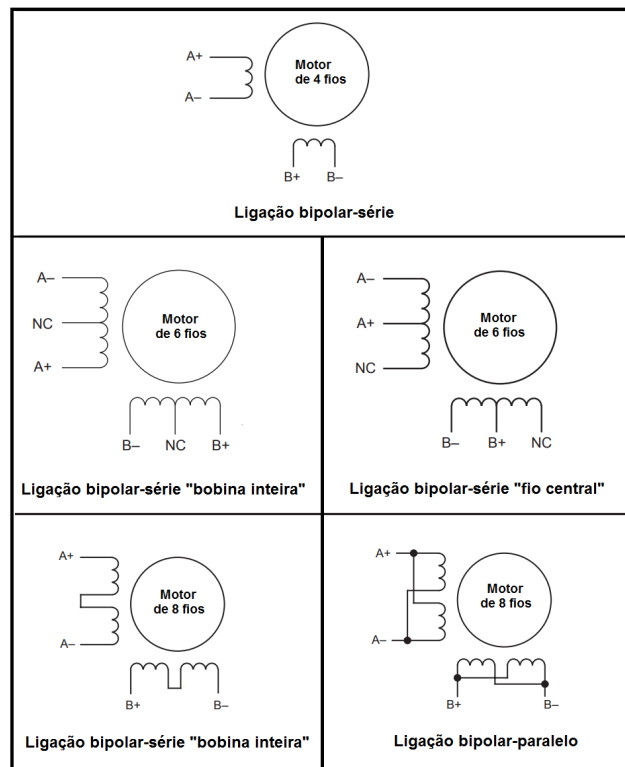


Figura 10: Ligação do tipo bipolar de 4 fios.
 Fonte: [2], adaptado pelo autor, 2020.

Os motores de 6 fios podem ser conectados de duas maneiras: seja utilizando completamente as bobinas ou através da ligação do fio central. Os motores de passo de 8 fios também podem ser conectados de duas maneiras: sendo a primeira utilizando as bobinas completas através de uma ligação em série e a segunda maneira através da ligação em paralelo dos fios intermediários.

Uma característica geral das ligações bipolar-série "bobina completa" é a possibilidade de obter elevados torques em baixa velocidade e queda acentuada de torque a medida em que é elevada a velocidade de operação. A configuração de "fio central" para motor de passo de 6 fios e a configuração bipolar-paralelo do motor de 8 fios possibilitam elevados torques a baixa velocidade com redução mais suave do torque com a elevação da velocidade de operação.

2.3.4 *Driver de acionamento*

Para acionar o motor de passo é necessário um módulo denominado *driver* responsável por receber os sinais lógicos de uma placa de controle geradora de pulsos. Estes pulsos, por sua vez, são convertidos em sinais elétricos amplificados para o motor de passo.

O mercado oferece várias opções de *drivers* com ampla faixa de corrente e configuração do micropasso. Em geral para a configuração bipolar de 4 fios. A Figura 11 apresenta a composição básica de um *driver* para a ligação de motor de passo híbrido bipolar de 4, 6 ou 8 fios.

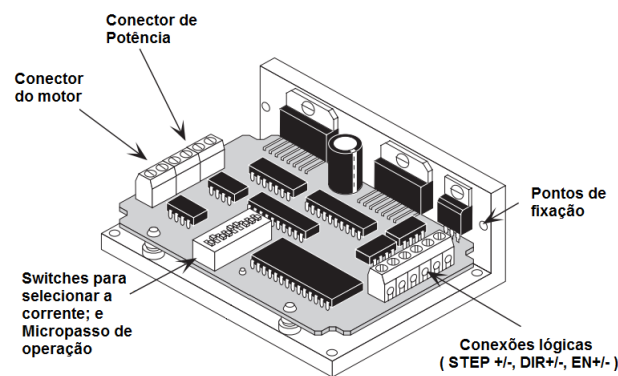


Figura 11: Composição básica de um *driver* para motor de passo.

Fonte: [4], adaptado pelo autor, 2020.

O que vai diferenciar um *driver* do outro são as seguintes características técnicas: tensão e corrente de operação, configuração do micropasso, facilidade de montagem, confiabilidade e boa dissipação de calor. Um módulo *driver* profissional já agrega todas essas características, porém são soluções industriais de custo mais elevado. Sendo assim, o projetista deve ponderar estas características além de verificar a oferta e o custo de aquisição.

2.3.5 Ligação do *driver*

O módulo *driver* reúne todas as entradas de sinais lógicos, alimentação e saídas reguladas para o motor de passo. A Figura 12 apresenta as conexões típicas para a ligação para o funcionamento de um motor de passo.

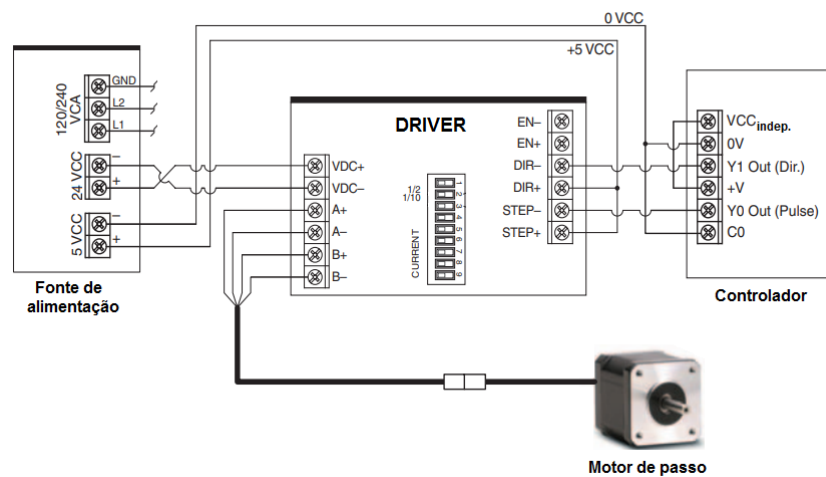


Figura 12: Diagrama típico para ligação de um *driver* e motor de passo bipolar.
Fonte: [5], adaptado pelo autor, 2020

A instalação do sistema deve ser feita cautelosamente, dado a quantidade de fios que são conectados ao módulo do *driver*. A fonte alimentação deve ser estável em níveis de tensão e corrente. A corrente deve estar adequada ao tipo de ligação do motor (unipolar, bipolar série ou bipolar-paralelo) e deve ser configurada previamente no *driver*, bem como a configuração do micropasso através dos "switches" de configuração. Os positivos e negativos dos conectores lógicos "Enable", "Pulse" e "Direction" devem ser conectados de forma compatível com o tipo de placa controladora selecionada para o sistema.

2.4 Tamanho padronizado e torque

Os motores de passo estão disponíveis em tamanhos padronizados pela organização americana *National Electrical Manufacturers Association*, normalmente referenciada apenas por NEMA. Essa padronização de tamanho contribui para minimizar erros de montagem. Além disso, possibilita o uso de motores de passo de diferentes fabricantes, facilitando assim o processo de seleção e reposição desses motores. A Figura 13 apresenta as principais dimensões de motores de passo híbridos de diferentes tamanhos:

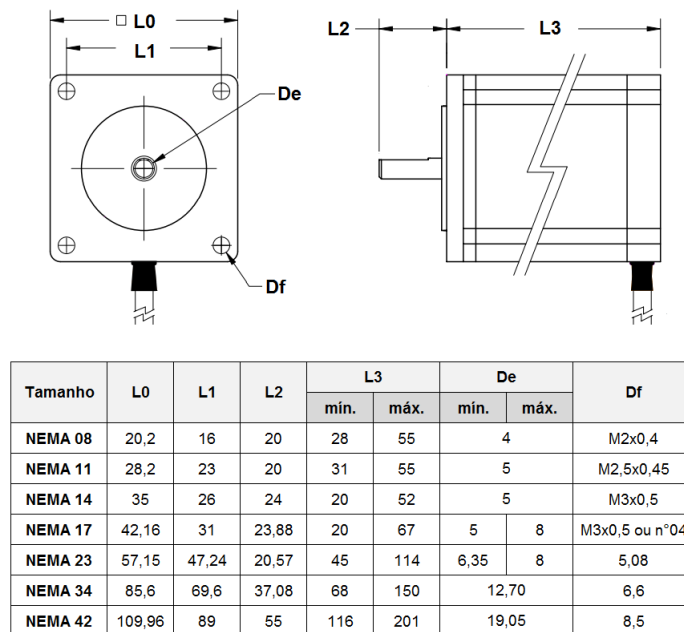


Figura 13: Principais dimensões de um motor de passo (em milímetros).

A padronização de tamanho se baseia no tamanho e furação do flange (dimensões L0 e L1). Além das dimensões do motor, o projetista deve avaliar as características de torque, peso, custo, as características elétricas e dissipação de calor.

Um motor NEMA de dimensões maiores, em geral, fornecerá uma quantidade maior de torque. Esta informação pode ser encontrada nas respectivas folhas de dados disponibilizadas pelos fabricantes. Geralmente estão na unidade: oz-in, kgf.cm, N.m, etc. Para a compatibilização de unidades utilizadas no projeto, é conveniente usar uma tabela de conversão de unidades. A Figura 14 apresenta um diagrama com as faixas nominais de torque para motores de passo híbridos encontrados no mercado.

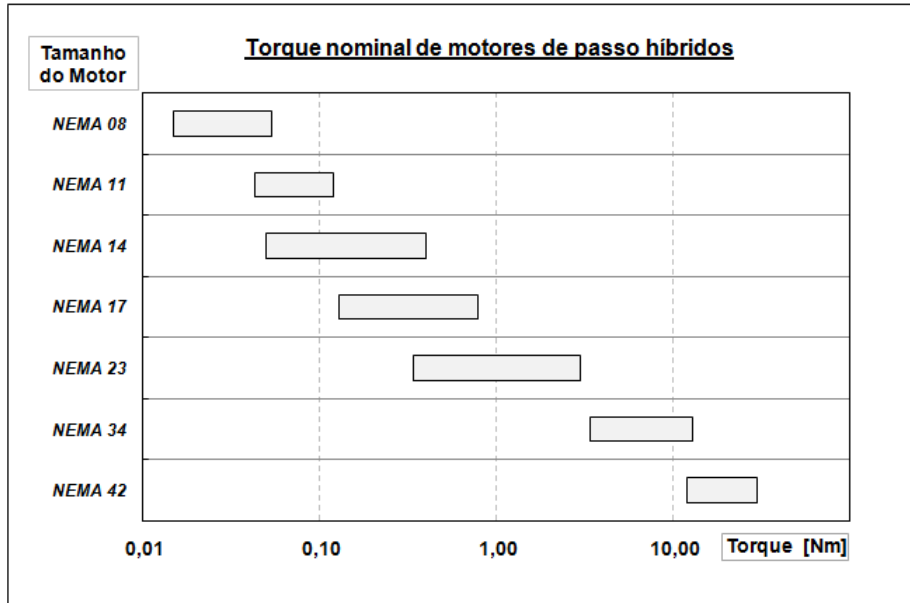


Figura 14: Faixas de Torque nominal para motores de passo híbridos de diferentes tamanhos.

A Figura 14 serve como referência para a seleção do tamanho do(s) motor(es) que seja(m) mais apropriado(s) ao projeto. Daí a importância do conhecimento prévio do torque requerido pelo sistema. Além do regime de funcionamento.

2.5 Curvas características de torque e rotação

A curva de torque e rotação é uma das informações mais importantes à ser encontrada na folha de dados de um motor de passo. Essa curva está associada ao comportamento dinâmico do motor, ou seja, oferece uma boa ideia de como o motor irá se comportar quando colocado em movimento. Respeitando os requisitos de torque e velocidade assumindo também alguma margem de segurança.

A maioria dos fornecedores fornecem curvas características de torque vs. rotação, essas curvas mostram o quanto de torque está disponível em um motor em determinada velocidade quando combinado com um *driver* específico. Isso significa que dependendo das diferentes combinações do motor e *driver*, diferentes desempenhos podem ser esperados.

A Figura 15 apresenta uma curva característica de torque e rotação, bem como os parâmetros que devem ser observados para a seleção do motor de passo com base nas características de desempenho.

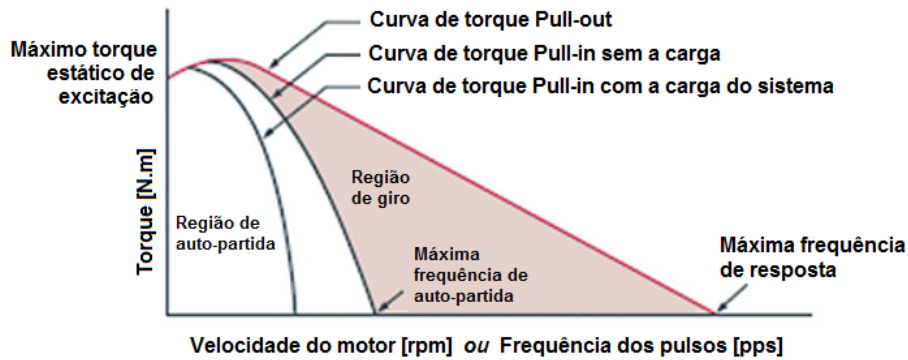


Figura 15: Curva característica de Torque vs Rotação.

Fonte: [6], adaptado pelo autor, 2020.

Na curva de desempenho apresentada pela Figura 15, o eixo vertical corresponde às unidades de torque (N.m, kgf.cm, oz-in, etc) enquanto que o eixo horizontal corresponde às unidades de rotação (rpm, rps, rad/s, etc) e também pode apresentar a frequência de pulsos aplicados ao motor (pps, Hz).

As características dinâmicas que podem ser analisadas e desenvolvidas a partir dessa curva são: as curva de torque *pull – out*, curvas de torque *pull – in*, frequência máxima de partida, frequência máxima de resposta, região de auto partida e região de giro (*slewrage*).

- Curva de torque *pull – out*: trata-se da curva característica de torque vs velocidade propriamente dita. Esta curva representa o torque máximo que o motor pode fornecer a uma carga em qualquer velocidade. Qualquer valor de torque ou velocidade que exceda os limites desta curva, ocorrerá a perda de sincronismo [6]. Sendo conveniente fazer com que o torque requerido pelo sistema seja de 1,4 à 2 vezes menor, para garantir o sincronismo;
- Máxima frequência de resposta: trata-se do último valor de frequência da curva de torque *pull – out* onde o motor pode operar sem nenhuma carga aplicada ao eixo;
- Máxima frequência de auto partida: trata-se da frequência correspondente à velocidade máxima na qual o motor pode iniciar e finalizar o movimento sem perder o sincronismo. O motor só pode iniciar ou parar o movimento operando com frequências abaixo desse valor de frequência. Esta marcação corresponde ao último valor de frequência da curva de torque *pull – in*. Este valor varia de acordo com o controle micropasso aplicado. Além disso é diferente para cada motor e combinações com os

respectivos *drivers*. A frequência de auto-partida marca o fim da curva de torque *pull – in* e início da região de giro (a *slew range*);

- Curva de torque *pull – in*: trata-se da curva de torque e que determina a região parada e partida. O motor só pode ser acelerado ou desacelerado em frequências que estejam compreendidas nessa região, ou seja abaixo da frequência de auto partida. Como a curva de torque *pull – in* varia de acordo com a carga inercial conectada ao motor, elas são raramente mostradas nos catálogos dos fabricantes. Todavia, existe uma maneira de calculá-la, desde que seja conhecida a frequência máxima de auto partida para o motor operando sem carga:

$$f_L = \frac{f_s}{\sqrt{1 + \frac{J_L}{J_M}}}$$

J_M : Rotor inertia
 J_L : Load inertia
 f_s : Maximum self-start frequency when not loaded

Figura 16: Cálculo da frequência máxima de *pull – in* considerando a carga.
 Fonte: [7], adaptado pelo autor, 2020.

A curva de *pull–in* não será encontrada em nenhuma folha de dados, uma vez que ela depende das condições do sistema. Sendo importante que o projetista teste o motor juntamente com o *driver* para determinar a frequência máxima de autopartida do motor sem a aplicação de carga. Com esse valor de referência medido, será possível aplicar a expressão apresentada na Figura 16 e determinar a curva de torque *pull–in*. Atenção ao controle micropasso (full-step, half-step ou microstepping) a frequência máxima de autopartida será diferente para cada caso [7].

- Região de giro (*slewrangle*): trata-se região compreendida entre a curva de torque *pull – out* e uma curva de torque *pull – in*. Corresponde à faixa de frequência onde normalmente os motores de passo são operados. Um motor de passo não pode iniciar nem parar seu movimento nessa faixa de frequências [6]. Normalmente o movimento é iniciado em baixas frequências e aumenta suavemente os valores até chegar à *slewrangle*. No caso de uma parada, o motor deve ser desacelerado gradativamente até regressar aos valores de frequência que estejam na região de auto-partida.
- Torque de retenção: trata-se de um torque residual gerado pelo próprio motor quando as bobinas são energizadas. Corresponde de 3% à 10% do valor do torque nominal [6]. O torque de retenção evita a rotação do eixo do motor quando nenhum comando para o movimento é realizado, o que contribui para o sincronismo do motor de passo .

3 Estudo de caso

O autor esteve como bolsista em 2020 no projeto do sistema de eletrônica da unidade de calibração do *Espectrógrafo eChele de Alta Resolução para o Perkin-Elmer - ECHARPE*. O autor iniciou seu trabalho apresentando as definições de motores de passo e suas aplicações. Em seguida, pesquisou na literatura e manuais técnicos métodos de seleção e dimensionamento desses motores, com a finalidade de encontrar a melhor solução para o sistema de movimentação dos prismas no interior da unidade de calibração.

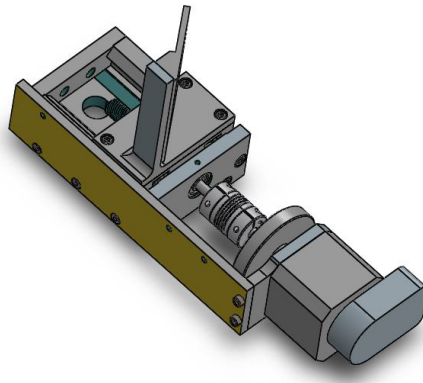


Figura 17: Guia linear porta prismas da unidade de calibração do ECHARPE

Uma vez definido todos os parâmetros para o dimensionamento, a proposta seguinte foi realizar um estudo de caso aplicado ao conjunto translador (guia linear) disponível para movimentar um dos elementos ópticos da unidade de calibração (prismas). Aqui houve diversas dificuldades a serem superadas, pois todos os dados técnicos foram obtidos eletronicamente, por meio de catálogos eletrônicos. No entanto, alguns dados (a Impedância) não foram possíveis por meio eletrônico, mas foi possível obter por medição do motor de passo disponível para este estudo de caso, o modelo M17-1-0B-0BB da QuickSilver.

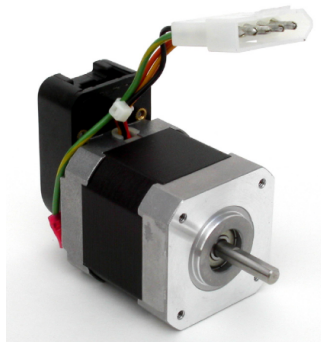


Figura 18: Motor de passo QuickSilver M17-1-0B-0BB.
Fonte: [8].

Todos os dados levantados foram catalogados em uma planilha de cálculo e foram gerados alguns gráficos para comparação dos resultados. (As folhas de cálculo encontram-se no apêndice deste trabalho).

Desta forma, apresenta-se aqui os resultados obtidos do estudo de caso proposto como parte importante da implementação da eletrônica necessária para o funcionamento da unidade de calibração.

3.1 Métodos aplicáveis para o dimensionamento

Existem diversos métodos para dimensionamento de motores de passo. O projetista pode escolher a alternativa que seja mais apropriada ao projeto. Em linhas gerais, os métodos de dimensionamento estão associados à análise dos parâmetros elétricos do conjunto motor-driver, da análise do movimento desejado e do torque requerido pelo sistema.

Nessa parte do trabalho será apresentada uma abordagem para dimensionamento dos motores de passo tomando por base os parâmetros elétricos, a análise cinemática e a análise dinâmica.

3.1.1 Análise dos parâmetros elétricos

Esta análise consiste no cálculo da velocidade máxima de um motor de passo, bem como do tempo mínimo por passo e da potência elétrica. Os parâmetros de entrada são: A corrente máxima, a Indutância dos enrolamentos das bobinas, a tensão de operação e a configuração do micropasso utilizada, ou seja, a configuração de passos por uma revolução do eixo do motor ("*steps per revolution*"). As equações estão representadas na Figura 19:

$$\text{Max Speed} = \frac{V}{2LI_{max} \cdot spr}$$

$$\text{Minimum Time per Step} = \frac{2LI_{max}}{V}$$

$$P_{max} = I_{max}V$$

Figura 19: Cálculo inicial dos parâmetros elétricos.

Fonte: [9], adaptado pelo autor, 2020.

A velocidade máxima e o tempo mínimo por passo estão intimamente ligados às características das bobinas. Além disso, esse equacionamento orienta o projetista à verificar se o controle micropasso e efeitos de dissipação de calor estão em convergência aos requisitos iniciais do projeto.

3.1.2 Caracterização do movimento

Esta etapa consiste em responder a seguinte pergunta: "Como será o movimento da carga?".

Considerando que seja um deslocamento através de uma guia linear. Inicialmente, é importante definir a distância total do movimento, o tempo, a taxa de deslocamento para cada rotação do eixo do motor e a resolução desejada.

Trata-se de uma análise cinemática. É provável que o projetista tenha que revisá-la várias vezes para que o sistema seja compatível com os motores disponíveis no mercado. Com essas informações à disposição, é possível modelar o perfil de velocidade de deslocamento da carga.

3.1.3 Perfil de Velocidade

O perfil de velocidade consiste em um diagrama que apresenta comportamento desejado para o deslocamento da carga. Os perfis de velocidade mais comuns são o perfil "start-stop", o perfil trapezoidal e a curva em "S". A Figura 20 apresenta os formatos das curvas para esses três cenários de movimento. Por definição, a área abaixo da curva de velocidade fornece o deslocamento, a derivada fornece a aceleração.

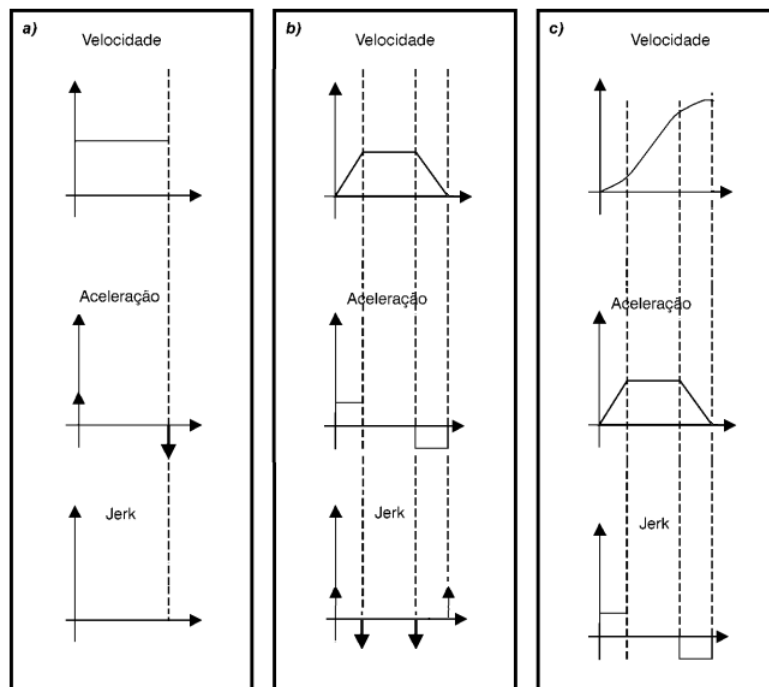


Figura 20: Perfis de velocidade: (a) *start-stop*, (b) trapezoidal e (c) curva em S

Fonte: [10], adaptado pelo autor, 2020.

Os perfis mais simples de serem implementados são o perfil "*start-stop*" e o perfil trapezoidal. O perfil de movimento "*start-stop*" é o mais básico de todos, não havendo nenhum período de aceleração. Este tipo de perfil de movimento é usado somente para aplicações de baixa velocidade. Já o perfil trapezoidal possui períodos de aceleração constante. O perfil trapezoidal permite que o motor opere em uma velocidade superior à do perfil "*start-stop*". Apesar de ser mais complexa a sua implementação, o perfil curva em "*S*" é vantajoso por permitir que o sistema não sofra variações bruscas, evitando choques mecânicos, durante a aceleração e desaceleração [4].

3.1.4 Cálculo do número de pulsos necessários para o movimento

Esta etapa consiste em responder a seguinte pergunta: "Quantos pulsos devem ser gerados para que o movimento alcance a posição desejada?"

A resposta é simples: basta calcular a área abaixo da curva do perfil de velocidade escolhido.

Para o processo de rápida seleção e dimensionamento de um motor de passo, é recomendável que o projetista utilize os perfis mais simples, ou seja, os perfis "*start-stop*" e trapezoidal. O número de pulsos necessários para o movimento são mais fáceis de calcular para esses dois perfis de movimento.

3.1.5 Calculando o torque resistivo da carga

O torque gerado pelo motor deve ser maior que o torque requerido pelo sistema, sendo este último, definido como a soma entre torque da fase de aceleração com o torque resistivo, que ocorre no período de velocidade constante.

A Figura 26, no apêndice deste trabalho, fornece o formulário necessário para calcular o torque dinâmico e estático para um sistema de guia linear. O cálculo das inércias e das forças resistivas também são muito importantes.

3.1.6 Compatibilização: torque requerido vs torque disponível

Após a realização dos cálculos é desejado que o projetista saiba a velocidade de operação e o torque requerido pelo sistema. O objetivo final desta análise é garantir que o torque requerido esteja abaixo da curva de torque vs velocidade do motor com uma margem entre 50% a 100% de diferença [4]. A Figura 21 apresenta o formato de resultado desejado:

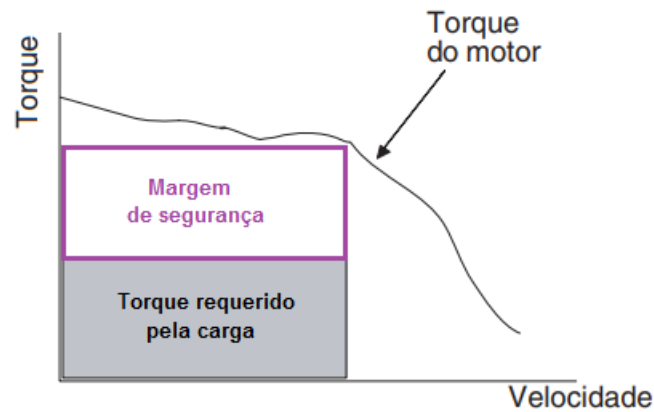


Figura 21: Compatibilização: torque requerido vs torque disponível
 Fonte: [4], adaptado pelo autor, 2020.

3.1.7 Experimentos para readequação de parâmetros

O processo de dimensionamento é iterativo. É provável que nas primeiras tentativas o projetista obtenha resultados teóricos que não correspondem totalmente com a realidade. Sendo assim, é recomendável que sejam consultados vários manuais para obtenção dos parâmetros de entrada e, se possível, a realização de experimentos de medição.

O torque de pré-carregamento, por exemplo, pode ser determinado por um torquímetro, ou caso não tenha, pode-se determinar usando um disco, um fio e um suporte para colocar pequenos pesos. O experimento consiste em medir o torque mínimo necessário para iniciar o movimento.

Quando se trata de parâmetros elétricos, é recomendável que se meça a indutância dos enrolamentos. Uma vez que é um parâmetro importante para determinar a velocidade máxima em que o motor pode operar. As curvas de torque e rotação podem conter informações incompletas, e em geral apresentam valores de torque e velocidade muito superiores aos que ocorrem na realidade. O projetista deve se atentar à esses detalhes técnicos no processo de seleção dos motores de passo que sejam apropriados ao sistema.

3.2 Dimensionamento

Para o dimensionamento do motor para o sistema, escolheu-se inicialmente manter o motor disponível (motor de passo QuickSilver M17-1-0B-0BB) e verificar se o mesmo atende aos seguintes requisitos iniciais: "A guia linear deve ser capaz de mover uma carga de 400g em um comprimento de 30mm no intervalo de 1,5 segundo". Trata-se de requisitos hipotéticos mas que servem de valores iniciais de cálculo e que podem ser ajustados futuramente para valores mais realísticos em próximas iterações.

3.2.1 Parâmetros elétricos do motor

Em um primeiro momento foram realizados cálculos levando em consideração os parâmetros elétricos dos motores. Estes parâmetros podem ser encontrados na folhas de dados ou por meio da medida usando medidores apropriados, tal como o medidor LCR para a medida da indutância.

Table of Operational Specifications

Specification	units	17 - 1	17 - 3	17H - 1	17H - 3
Maximum Speed	rpm	2500	2500	4000	4000
Continuous Stall Torque ¹	oz-in	21	36	23	43
Peak Power Output	watts _(mech)	16	24	34	69
Optimal Speed ²	rpm	1500	1500	2500	2500
Torque at Optimal Speed	oz-in	12	19	16	30
Rotor Inertia	oz-in ²	0.19	0.37	0.19	0.37
Weight	ounces	9.5	14.3	9.5	14.3
Body Length (not incl. shaft)	inches	2.74	3.29	2.74	3.29
IP65 (6T) Body Length ³	inches	2.94	3.49	2.94	3.49
Maximum Drive Current ⁴	amps	1.3	1.5	3.0	4.0
Operating Voltage ⁵	DC volts	+ 12 to + 48 (regulated)			
Safety Standards		UL, C-UL, CE (72/23/EEC)			

Specifications listed in table are at + 48 VDC operation.

Figura 22: Parâmetros do motor QuickSilver *M-Grade 17 Frame Motors*.

Fonte: [8][11], adaptado pelo autor, 2020.

As fórmulas apresentadas na Figura 19 permitem ao projetista prever o limite de velocidade, mínimo tempo por passo e potência máxima do motor pré-selecionado. Os resultados desses cálculos são apresentados na Figura 23.

Propriedade	Símbolo	Input ou Equação	Resultado	Unidade
Corrente máxima	I_{max}	$input: I_{max}/\sqrt{2}$	0,92	A
Indutância	L	input	2,25	mH
Tensão da fonte	V	input	24	V
Passos / Revolução	ppr	input	400	passos/rev

Máxima velocidade	V_{max}	$V / (2 * L / 1000 * I_{max} * ppr)$	14,50	rps
Máx_vel_rpm	V_{max_rpm}	$V_{max} * 60$	870,29	rpm
Mínimo tempo por passo	Min_tpp	$(2 * L * I_{max}) / V$	0,17	ms
Potência Máxima	Max_pwr	$I_{max} * V$	22,06	W

Figura 23: Resultado do cálculo inicial dos parâmetros elétricos.

3.2.2 Análise cinemática: cálculo do perfil de velocidade

Em um segundo momento, o estudo foi conduzido para uma análise cinemática, ou seja é o estudo do movimento sem se preocupar com suas causas. Essa análise é útil para o projetista durante o processo de dimensionamento e também na fase de testes pois esclarece o tipo de movimento desejado para o sistema, facilitado assim ajustes e otimizações. A Figura 24 apresenta os perfis de velocidades obtidos através da análise cinemática:

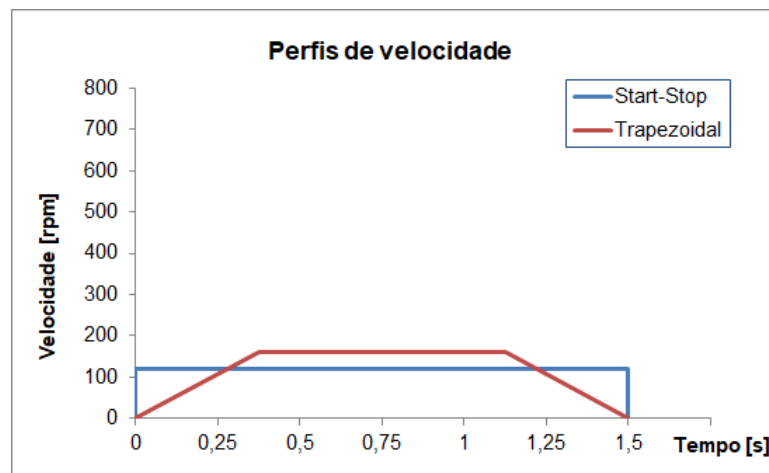


Figura 24: Resultado do cálculo inicial do perfil de velocidade.

Para o perfil *start-stop* o motor inicia o movimento à 120RPM e permanece constantemente nesta velocidade durante 1,5 segundo. Para o perfil trapezoidal, o motor inicia o movimento com aceleração constante durante 0,375 segundo e atinge 160RPM onde permanece constantemente nesta velocidade durante 0,75 segundo e desacelera constantemente durante 0,375 segundo.

3.2.3 Análise dinâmica: análise de torque no sistema

Uma vez realizada a análise cinemática, os estudos foram orientados para a análise dinâmica. Nesta etapa do trabalho foram analisadas as causas do movimento. Sendo o mais importante o cálculo das inércias dos componentes do sistema. Finalizando com um gráfico que indica o torque requerido pelo sistema em comparação com o torque fornecido pelo motor:

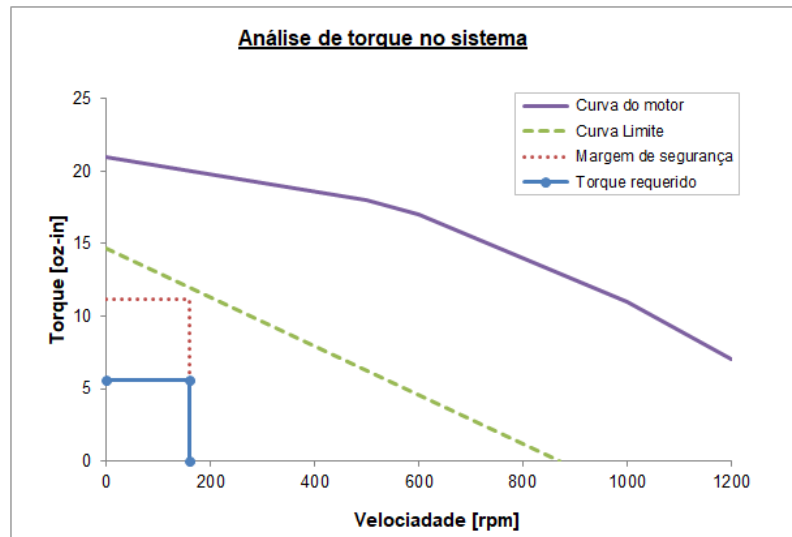


Figura 25: Resultado do cálculo e análise do torque.

A análise de torque tomou como base a curva de torque do motor pré-selecionado. A curva limite foi elaborada admitindo 70% do valor de torque máximo do motor e a velocidade máxima foi obtida a partir dos resultados apresentados na Figura 23 e cálculos apresentados na Figura 27. O torque requerido pelo sistema foi determinado a partir dos cálculos apresentados na Figura 28 levando em consideração a velocidade máxima de operação e perfil de velocidade trapezoidal (Figura 24).

Para as condições apresentadas, o motor em questão atende às necessidades do projeto. Para outros cenários, é importante que o projetista faça novas verificações.

4 Conclusões

Esta nota apresentou um breve estudo sobre os tipos, arranjos e parâmetros operacionais básicos dos motores de passo e destaca a importância da escolha e configuração adequadas de seus drivers, considerando as especificidades de torque, velocidade e características de operação para garantir o desempenho e a eficiência nas aplicações que exigem controle preciso de movimento e posicionamento.

Sobre o estudo de caso, as contribuições do autor no projeto da unidade de calibração do ECHARPE (em 2020) obtiveram maior destaque na proposição de métodos e ferramentas para auxiliar na seleção de componentes e recursos aplicáveis ao projeto naquela ocasião.

O método de dimensionamento de motores de passo é algo aplicável tanto ao projeto da unidade de calibração quanto a outros projetos semelhantes no âmbito do Laboratório Nacional de Astrofísica. Neste sentido, este documento auxilia desenvolvedores e projetistas iniciantes no dimensionamento de motores aplicados tanto ao desenvolvimento dos projetos do Laboratório Nacional de Astrofísica como qualquer pessoa interessada em projetos de automação.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha mais sincera gratidão a todas as pessoas e instituições que tornaram possível a realização deste trabalho.

Aos profissionais do Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), meu profundo agradecimento pelo suporte técnico, acesso às instalações e equipamentos necessários para a realização das pesquisas. Em especial, gostaria de mencionar Márcio Arruda, Saulo Gargaglioni, Bruno Castilho, Luciano Fraga, Ramon Carlos e Clédson Santos cujas contribuições foram cruciais para o avanço deste trabalho.

Agradeço também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por fomentar a bolsa no Programa de Capacitação Institucional do LNA. O apoio financeiro foi essencial para que eu pudesse me dedicar integralmente a este projeto e buscar os melhores resultados possíveis.

Não posso deixar de agradecer também à equipe administrativa do LNA, que sempre esteve disposta a ajudar com questões logísticas e burocráticas, permitindo que eu me concentrasse plenamente nas minhas atividades de pesquisa.

Finalmente, agradeço à minha família e amigos, cujo apoio emocional e incentivo foram fundamentais durante todo este percurso.

Muito obrigado!

Atenciosamente,

Orlindo Wagner

Referências

- [1] Takashi Kenjo. *Stepping Motors and Their Microprocessor Controls*. Monographs in Electrical & Electronic Engineering. Oxford University Press, New York, 1984. p.279–287.
- [2] Musa Jouaneh. *Fundamentals of mechatronics*. Cengage Learning, Stamford, 2012. p.284-286.
- [3] NeoMotion. *Datasheet de produto - Motores de passo*. Neoyama, 2019. <<https://cdn.awsli.com.br/945/945993/arquivos/Catalogo-Datasheet-dos-motores-de-passo-R05.pdf>> Acesso em: 23/04/2020.
- [4] SureStep™. *Sistema de motores paso a paso SureStep™, 2a edición en español*. Automation Direct, 2007. <<https://cdn.automationdirect.com/static/manuals/surestepmanualsp/surestepmanualsp.pdf>> Acesso em: 24/04/2020.
- [5] SureStep™. *Stepping Systems User Manual, 6th Edition*. Automation Direct, 2022. <<https://cdn.automationdirect.com/static/manuals/surestepmanual/surestepmanual.pdf>> Acesso em: 15/09/2023.
- [6] OrientalMotor. *Speed - Torque Curves for Stepper Motors - How They are Created and What They Mean*. Oriental Motor, 2018. <<https://www.orientalmotor.com/stepper-motors/technology/speed-torque-curves-for-stepper-motors.html>> Acesso em: 19/05/2020.
- [7] SanyoDenki. *Stepping System - SANMOTION F2. How to Read the Specifications*. SANYO DENKI, 2018. p.10.<https://www.sanyodenki.com/archive/document/product/servo/catalog_E_pdf/SANMOTION_F2_E.pdf> Acesso em: 11/08/2020.
- [8] QuickSilver. *17 M-Grade Motor Series Datasheet*. QuickSilver, 2018. p.2.<https://www.quicksilvercontrols.com/SP/DS/QCI-DS012_QCI-M17.pdf> Acesso em: 23/04/2020.
- [9] All About Circuits. *Stepper Motor Calculator*. EETech Group LLC, 2017. <<https://www.allaboutcircuits.com/tools/stepper-motor-calculator/>> Acesso em: 26/09/2020.
- [10] STEPHAN R. M.; ROMANO V. F.; Rolim L.G.B.; et al. *Noções fundamentais para dimensionamento de servoacionamento*. Guia de Aplicação de Servoacionamentos. WEG Automação, Jaraguá do Sul, 2005. p.55–78.
- [11] QuickSilver. *SilverMax® Datasheet - NEMA 17 Servomotors*. QuickSilver, 2018. <<https://www.quicksilvercontrols.com/SP/OB/QCI-SilverMax17.pdf>> Acesso em: 26/09/2020.

Apêndice

Descripción:	Fórmulas:		
RPM del motor	$n_{motor} = (v_{carga} * P) * i, n_{motor} \text{ (RPM)}, v_{carga} \text{ (mm/min)}$		
Torque requerido para acelerar y desacelerar la carga	$T_{acel}[\text{N-m}] = J_{total}[\text{Kg-m}^2] * (\Delta_{velocidad}[\text{RPM}] \div \Delta_{tiempo}[^{\circ}]) * 2 * \pi \div 60$		
Inercia total del motor	$J_{total} [\text{Kg-m}^2] = J_{motor} + J_{reductor} + ((J_{acoplamiento} + J_{tornillo} + J_{carga}) \div i^2)$		
Inercia de la carga	$J_{carga} = (\text{Peso}[\text{Kg}] * (2 \pi P)^2) \div e$		
Paso y eficiencia	$P = \text{pitch} = \text{revs/m del movimiento}, e = \text{eficiencia}$		
Torque de fricción	$T_{resist} [\text{Kg-m}^2] = ((F_{total} \div (2 \pi P)) + T_{preload}) \div i$		
Torque debido a tensión en el tornillo sinfin	$T_{preload} [\text{Kg-m}^2] = \text{tensión en el tornillo para minimizar el "backlash"}$		
Fuerza total	$F_{total}[\text{N}] = F_{ext} + F_{fricción} + F_{gravidad}$		
Fuerza de gravedad y Fuerza de fricción	$F_{gravidad} [\text{N}] = \text{Peso}[\text{Kg}] * \sin\theta * 9,81, F_{fricción} = \mu * \text{Peso}[\text{Kg}] * \cos\theta * 9,81$		
Angulo de inclinación y Coeficiente de fricción	$\theta = \text{Angulo de inclinación}, \mu = \text{coeficiente de fricción}$		
Material:	e = eficiencia	Material:	μ = coef. de fricción
Tuerca de la bola	0,90	Acero en acero	0,580
Acme con tuerca plástica	0,65	Acero en acero(lubricado)	0,150
Acme con tuerca metálica	0,40	Teflon en acero	0,040
		Buje de bolas	0,003

Figura 26: Formulário para sistema fuso-castanha.

Fonte: [4], adaptado pelo autor, 2020.

Property	Symbol	Input or Equation	Result	Royal units	Result	Metric units
Lenght	L	input	1,1811024	in	30	mm
Time	t	input	1,5	sec	1,5	s
Screw pitch	sp	input	0,3937008	in / rev	10	mm / rev
Pulse rate of drive	pr_d	input	400	pulses / rev	400	pulses / rev
Number of pulses	n_p	$(l * pr_d) / sp$	1200	pulses	1200	pulses
Pulse rate start-stop	pr_{ss}	n_p / t	800	pulses / sec	800	pps
Resolution	res	sp / ps_{ss}	0,0004921	in / pulse	0,0125	mm / pulse
Number of revolutions start-stop	nr_{ss}	l / sp	3	rev	3	rev
Speed start-stop (average)	s_{ss}	nr_{ss} / t	2	rev / sec	2	rps
Speed start-stop (average) [rpm]	s_{ss_rpm}	$s_{ss} * 60$	120	rpm	120	rpm
Time of acceleration o deacceleration	t_{acc}	input	0,375	sec	0,375	s
Time of constant speed	t_{csp}	$t - 2 * t_{acc}$	0,75	sec	0,75	s
Speed top trapezoid	s_{trap}	$t / (t_{acc} + t_{csp}) * s_{ss}$	2,6666667	rev / sec	2,6666667	rps
Speed trapezoid [rpm]	s_{trap_rpm}	$s_{trap} * 60$	160	rpm	160	rpm
Number of revolutions trapezoid	nr_{trap}	$s_{trap} * (t_{acc} + t_{csp})$	3	rev	3	rev
Pulse rate top trapezoid	pr_{trap}	$pr_d * s_{trap}$	1066,6667	pulses / sec	1066,6667	pps
Linear speed	Ls	$sp * s_{trap}$	1,0498688	in / sec	26,666667	mm / s

Start-Stop	x	y
Start-move	0	0
Start-const	0	120
End-const	1,5	120
End-desaccel	1,5	0

Trapezoidal	x	y
Start-accel	0	0
Start-const	0,375	160
End-const	1,125	160
End-desaccel	1,5	0

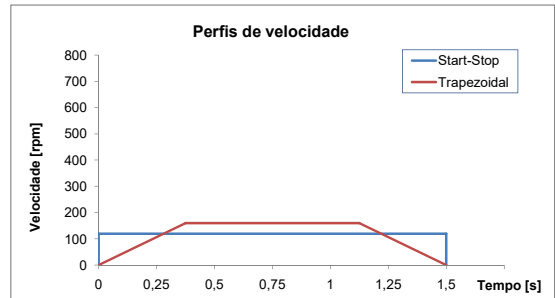
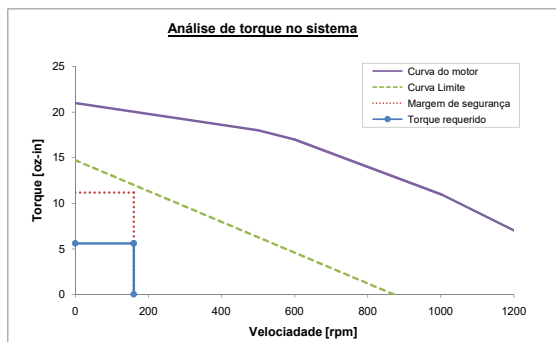


Figura 27: Resultados dos cálculos para análise cinemática.
 Fonte: [4], adaptado pelo autor, 2020.

Análise dinâmica

	Símbolo	Input ou Equação	Resultado	Unidade
Peso da mesa e do objeto	W	input	0,4	kg
Ângulo de inclinação	alpha	input	0	°
Força externa da carga	F_ext	input	9	N
Diâmetro do fuso	d_f	input	8,19	mm
Comprimento do fuso	L_f	input	70	mm
Material do fuso	[-]	input	Aço	[-]
Resolução de posição desejada	L_th	input	0,025	mm / passo
Redutor de engrenagens	[-]	input	1:1	[-]
Movimento desejado	S	input	30	mm
Passo do fuso	p	input	10	mm / rev
Coefficiente de atrito das superfícies deslizantes	mu	input	0,05	[-]
Tempo de realização do movimento	t	input	1,5	s
Tempo de aceleração (25%)	t_acc	0,25 * t	0,375	s
Frequência inicial de partida	f0	input	0	Hz
Eficiência da porca	e	input	0,4	[-]
Distância total do movimento	D_t	input	30	mm
Taxa de deslocamento da carga	d_carga	input	10	mm / rev
Razão de redução	i	rev_entrada / rev_saida	1	[-]
Resolução do passo de acionamento requerida	Theta_passo	d_carga / (i * L_th)	400	pulsos / rev
Resolução do passo de acionamento aplicada	Theta_driver	compativel com Theta_passo	400	pulsos / rev
Pulsos totais	P_tot	(D_t * i * Theta_driver) / d_carga	1200,00	pulsos
Resolução de posição calculada	L_th	d_carga / (i * Theta_driver)	0,025	mm / pulso
Velocidade dos pulsos, start-stop	f_ss	P_tot / t	800,00	pulsos / rev
Velocidade dos pulsos, trapezoidal	f_trap	(P_tot - f0 * t_acc) / (t - t_acc)	1066,67	pulsos / rev
Velocidade dos pulsos, start-stop	f_ss_rpm	f_ss * 60 / Theta_driver	120,00	rpm
Velocidade dos pulsos, trapezoidal	f_trap_rpm	f_trap * 60 / Theta_driver	160,00	rpm
Revoluções por metro deslocado	Rev_L	1 / (d_carga / 1000)	100,00	rev / m
Inércia da carga	J_w	(Peso / e) * (1 / (2 * pi * Rev_L)) ^ 2	0,00	kg-m2
Massa específica do material do fuso	Rho_f	Rho do aço	7700	kg / m3
Inércia do fuso	J_f	(Pi * Rho_f * L * D^4) / 32	2,38081E-07	kg-m2
Inércia do acoplamento	J_ac	(Pi * Rho * L_ac * D_ac^4) / 32	1,42581E-05	kg-m2
Inércia refletida ao motor	J_r	(J_w + J_f + Jac) / i^2	1,70292E-05	kg-m2
Inércia do rotor do motor	J_rot	input	0,0000068	kg-m2
Inércia do redutor	J_red	input	0	kg-m2
Inércia total	J_tot	J_rot + J_red + Jr	2,38292E-05	kg-m2
Delta de velocidade	dv	f_trap_rpm * 2 pi / 60	16,76	rad / s
Delta de tempo	dt	t_acc	0,375	s
Torque de aceleração	T_ acel	J_tot * (dv / dt)	0,001064699	N-m
Força de atrito	F_fric	mu * Peso * cos(theta) * 9,81	0,1962	N
Força devido à gravidade	F_grav	Peso * sen(theta) * 9,81	0	N
Forças externas aplicadas ao sistema	F_ext	input	9	N
Somatários das forças	F_tot	F_fric + F_grav + F_ext	9,1962	N
Torque da pré-carga	T_pc	input	0,02378925	N-m
Torque resistivo	T_res	(F_tot / 2 * pi * Rev_L + T_pc) / i	0,038425457	N-m
Torque requerido: N-m	Treq_Nm	T_ acel + T_res	0,039490156	N-m
Torque requerido: kgf-cm	Treq_kgf-cm	T_Nm * 10,2	0,40	kgf-cm
Torque requerido: oz-in	Treq_oz-in	T_Nm * 141,6	5,59	oz-in



Torque requerido	
x	y
0	5,59
160,00	5,59
160,00	0

Margem de segurança	
x	y
0	11,18
160,00	11,18
160,00	0

Curva Limite	
x	y
0	14,72
870,29	0,00

Curva do motor	
x	y
0	21
500	18
600	17
1000	11
1200	7

Figura 28: Resultados dos cálculos para análise dinâmica.

Fonte: [4], adaptado pelo autor, 2020.

Extras

Inércia do acoplamento			
Propriedade	Símbolo	mm	m
Diâmetro externo do acoplamento	D	18,85	0,01885
Diâmetro eixo 1	$d1$	5,21	0,00521
Diâmetro eixo 2	$d2$	8,05	0,00805
Comp. Acop. Eixo 1	$L1$	17,45	0,01745
Comp. Acop. Eixo 2	$L2$	7,05	0,00705
Comprimento do acoplamento	$L = L1 + L2$	24,5	0,0245
Densidade do material	ρ	2,7	2700

			kg-m2
Inércia disco 1	$J1 = (\pi * \rho * L * (D^4 - d1^4)) / 32$		5,80581E-07
Inércia disco 2	$J2 = (\pi * \rho * L * (D^4 - d2^4)) / 32$		2,28091E-07
Inércia do acoplamento	$J_{acop} = J1 + J2$		8,08671E-07

Inércia do disco de posicionamento			
Propriedade	Símbolo	mm	m
Diâmetro do cilindro interno	$d3$	15	0,015
Comprimento do cilindro interno	$L3$	22	0,022
Diâmetro do disco externo	$d4$	50	0,05
Largura do disco externo	$L4$	7,94	0,00794
Densidade do material	ρ	2,7	2700

			kg-m2
Inércia disco 3	$J3 = (\pi * \rho * L3 * d3^4) / 32$		2,95224E-07
Inércia disco 4	$J4 = (\pi * \rho * L4 * d4^4) / 32$		1,31542E-05
Inércia do disco	$J_{disc} = J3 + J4$		1,34494E-05

Somatória das inércias do conjunto		
Inércia acoplamento + disco	$J_{tot} = J_{acop} + J_{disc}$	1,42581E-05

Figura 29: Resultados dos cálculos das inercias do sistema.

Fonte: [4], adaptado pelo autor, 2020.