

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DIOGO HITOSHI YOKOYAMA

ESTUDO E CONCEPÇÃO DE MOTOR DE PASSO
IMPULSIONADO POR ÍMÃS AUXILIARES

JOÃO PESSOA
2021

DIOGO HITOSHI YOKOYAMA

**ESTUDO E CONCEPÇÃO DE MOTOR DE PASSO
IMPULSIONADO POR ÍMÃS AUXILIARES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: D. Sc. Prof. Cícero da Rocha Souto

JOÃO PESSOA
2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

Y54e Yokoyama, Diogo Hitoshi.

Estudo e concepção de motor de passo impulsionado por ímãs auxiliares / Diogo Hitoshi Yokoyama. - João Pessoa, 2021.

101 f. : il.

Orientação: Cícero da Rocha Souto.

Coorientação: Alexsandro José Virgínio dos Santos.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Engenharia elétrica. 2. Motores de passo. 3. Ímãs permanentes. 4. Campo magnético. I. Souto, Cícero da Rocha. II. Santos, Alexsandro José Virgínio dos. III. Título.

UFPB/BC

CDU 621.3(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**ESTUDO E CONCEPÇÃO DE MOTOR DE PASSO IMPULSIONADO POR ÍMÃS
AUXILIARES**

Elaborada por

DIOGO HITOSHI YOKOYAMA

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA



PROF. DR. CÍCERO DA ROCHA SOUTO
Orientador – UFPB



PROF. DR. ALEXSANDRO JOSÉ VIRGÍNIO DOS SANTOS
Coorientador – UFPB



PROF. DR. JUAN MOISES MAURICIO VILLANUEVA
Examinador Interno – UFPB



PROF. DR. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO
Examinador Externo - UFPB

*Dedico este trabalho aos meus pais Marcos e Lucia,
com todo meu amor e gratidão por tudo que
fizeram por mim ao longo dessa jornada.*

Agradecimentos

Agradeço a minha família pelo amor e suporte que me deram ao longo de minha vida.

Aos meus orientadores Cícero da Rocha Souto e Alexsandro Virgínio dos Santos, por quem tenho grande estima e admiração, por todos os ensinamentos durante no decorrer do meu mestrado.

Aos meus colegas de laboratório que tornaram esse longo período de dedicação em algo divertido.

Aos meus amigos Fernando Colafranceschi e Emanuel Saraiva, pelas boas risadas e momentos vividos.

“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo.”
Winston Churchill

Resumo

Os motores de passo são dispositivos amplamente utilizados em diversas indústrias, geralmente utilizados em aplicações envolvendo medições e controle, como impressoras jato de tinta ou até sistemas mais complexos como sistemas aeroespaciais. Um dos motivos que tornam esses motores tão versáteis é sua forma de acionamento, em que pulsos são convertidos em deslocamentos angulares discretos permitindo que uma carga seja posicionada operando em malha aberta. Neste trabalho, uma nova topologia de motor de passo é proposta, no qual são posicionados ímãs permanentes tanto no rotor quanto no estator de forma a aumentar o torque produzido pelo motor, com ênfase nas características estáticas. A operação desse motor é feita através da manipulação (reforço/enfraquecimento) do campo magnético gerado pelos ímãs do estator através de enrolamentos. Para validação desse sistema foi utilizado o arranjo mais simples que apresenta três polos no estator e dois no rotor, facilitando o processo de construção e reduzindo o custo computacional. Simulações foram feitas utilizando o *software* Ansys Maxwell, no qual foi possível estudar a dinâmica do sistema e analisar a influência de alguns parâmetros construtivos no comportamento do motor.

Palavras-chave: Motores de Passo, Ímãs Permanentes, Ímãs Permanentes do Estator, Manipulação de Campo Magnético.

Abstract

Stepper motors are devices widely used in several industries, these motors are commonly used in measurement and control applications, such as inkjet printers or even more complex systems such as aerospace systems. One of the reasons that make these motors so versatile is their way of driving, in which pulses are converted into discrete angular displacements allowing a load to be positioned in open-loop operation. In this work, a new stepper motor topology is proposed, in which permanent magnets are positioned both on the rotor and on the stator in order to increase the overall torque, with emphasis on static characteristics. The operation of this motor is done through the manipulation (reinforcement/weakening) of the magnetic field generated by the magnets of the stator using coils. In order to validate this system, the simplest arrangement was used, which has three poles in the stator and two in the rotor, facilitating the construction process and reducing the computational cost. Simulations were done using software Ansys Maxwell, in which it was possible to study the dynamics of the system and analyze the influence of some constructive parameters on the motor behavior.

Keywords: Stepper Motor, Permanent Magnets, Stator-Permanent Magnets, Magnetic Field Manipulation.

Lista de Figuras

1	Curva de indução B e de magnetização J de um ímã genérico.	18
2	Evolução dos materiais magnéticos duros.	22
3	Curva de torque/velocidade de um motor de passo.	24
4	Resposta ao degrau de um motor de passo.	24
5	Curva de torque estático/posição do rotor de um motor de passo.	25
6	Motor de relutância variável.	26
7	Motor de relutância variável com castelação.	27
8	Exemplo motor de passo de ímã permanente.	27
9	Motor de passo híbrido.	28
10	Motores com ímãs permanentes no rotor.	30
11	Motores com ímãs permanentes no estator.	32
12	Motor com excitação híbrida baseado no <i>SPM</i>	33
13	Motor com ímãs no rotor e enrolamentos de campo no estator.	34
14	Motor com excitação híbrida no estator.	34
15	Motor de fluxo variável com memória.	35
16	Motor de fluxo variável com memória híbrido.	36
17	Exemplo de mudança de polo com memória.	36
18	Motor de passo patenteado por Haydon et. al	37
19	Motor de passo patenteado por Hoffmann.	38
20	Motor de relutância variável com ímãs permanentes.	39
21	Motor de passos híbrido com ímãs intercalados nos dentes do estator. . . .	40
22	Motor de passos híbrido com ímãs em disco.	41
23	Motor de relutância variável com ímãs permanentes.	41
24	Esquemático do motor proposto.	43
25	Esquemático de operação do motor.	44
26	Seção transversal do estator.	46
27	Vista superior do motor.	47
28	Vista isométrica do motor.	47
29	Ilustração das malhas construídas no estator.	49
30	Ilustração das malhas construídas no rotor.	50
31	Comparativo entre as malhas.	50
32	Vista isométrica da malha utilizada.	51
33	Esquemático do teste de chaveamento.	53
34	Sinal de acionamento para chaveamento.	54
35	Campo magnético resultante do chaveamento.	54
36	Ilustração do campo magnético durante o chaveamento.	55
37	Ilustração da distância a ser avaliada no estator.	56

38	Variação da distância entre 0 mm e 2 mm com campo magnético sendo intensificado.	57
39	Variação da distância entre 3 mm e 5 mm com campo magnético sendo intensificado.	57
40	Variação da distância entre 0 mm e 2 mm com campo magnético sendo enfraquecido.	58
41	Variação da distância entre 3 mm e 5 mm com campo magnético sendo enfraquecido.	58
42	Esquemático utilizado para estimar o tempo de assentamento.	59
43	Deslocamento do rotor ao longo do tempo.	60
44	Característica estática do motor.	60
45	Deslocamento do rotor.	61
46	Torque do motor.	62
47	Ilustração das variáveis construtivas.	63
48	Variação do torque estacionário em função da corrente.	64
49	Variação do torque estacionário em função da distância D_1	65
50	Variação do torque estacionário em função da distância D_2	66
51	Comparativo entre diferentes formas de acionamento no torque estacionário.	67
52	Comparação do torque estacionário em função dos ímãs no estator.	68
53	Variação do torque residual em função da distância D_1	68
54	Variação do torque residual em função da distância D_2	69
55	Comparativo do torque residual com relação ao ímã permanente.	70
56	Exemplo de curva de amortecimento do passo do motor.	71
57	Dinâmica do motor em função de D_1	71
58	Curva de amortecimento do passo do motor em função de D_1	72
59	Dinâmica do motor para $D_1 = 27$ mm e D_2 sendo variado.	73
60	Curvas de amortecimento para $D_1 = 27$ mm e D_2 sendo variado.	73
61	Dinâmica do motor para $D_1 = 26$ mm e D_2 sendo variado.	74
62	Curvas de amortecimento para $D_1 = 26$ mm e D_2 sendo variado.	75
63	Dinâmica do motor para $D_1 = 25$ mm e D_2 sendo variado.	76
64	Curvas de amortecimento para $D_1 = 25$ mm e D_2 sendo variado.	76
65	Dinâmica do motor para $D_1 = 24$ mm e D_2 sendo variado.	77
66	Curvas de amortecimento para $D_1 = 24$ mm e D_2 sendo variado.	78
67	Dinâmica do motor para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado.	79
68	Curvas de amortecimento para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado.	79
69	Dinâmica do motor para $D_1 = 22$ mm e D_2 sendo variado.	80
70	Curvas de amortecimento para $D_1 = 22$ mm e D_2 sendo variado.	81
71	Dinâmica do motor para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado entre 0,5 mm e 1,5 mm.	82

72	Curvas de amortecimento para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado entre 0,5 mm e 1,5 mm.	82
73	Dinâmica do motor para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado entre 1,5 mm e 2,5 mm.	83
74	Curvas de amortecimento para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado entre 1,5 mm e 2,5 mm.	84
75	Modelos de estator utilizados para comparar as correntes de excitação. . .	85
76	Dinâmica do motor para $D_2 = 0$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 5 A.	85
77	Curvas de amortecimento para $D_2 = 0$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 5 A.	86
78	Dinâmica do motor para $D_2 = 0$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 4 A.	87
79	Curvas de amortecimento para $D_2 = 0$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 4 A.	87
80	Dinâmica do motor para $D_2 = 2$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 5 A.	88
81	Curvas de amortecimento para $D_2 = 2$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 5 A.	89
82	Dinâmica do motor para $D_2 = 2$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 4 A.	90
83	Curvas de amortecimento para $D_2 = 2$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 4 A.	90
84	Tempo de assentamento de todas as combinações	93
85	Compilação do tempo de assentamento para $D_1 = 23$ mm e D_2 variando entre 0,5 mm e 2,5 mm	93
86	Tempo de assentamento dos estatores tipo A e B com a corrente sendo variada entre 3 A e 5 A.	94
87	Tempo de assentamento dos estatores tipo A e B com a corrente sendo variada entre 3 A e 4 A.	95

Lista de Tabelas

1	Número de elementos das malhas.	49
2	Resumo comparativo das malhas.	51
3	Valores utilizados na varredura paramétrica.	63
4	Valor máximo do torque estacionário em função da corrente.	64
5	Valor máximo do torque estacionário em função da distância D_1	65
6	Valor máximo do torque estacionário em função da distância D_2	66
7	Formas de acionamento investigadas.	66
8	Valores utilizados na varredura paramétrica.	67
9	Valor máximo do torque residual em função da distância D_1	69
10	Valor máximo do torque residual em função da distância D_2	69
11	Características dinâmicas em função da distância D_1	72
12	Características dinâmicas para $D_1 = 27$ mm e D_2 sendo variado.	74
13	Características dinâmicas para $D_1 = 26$ mm e D_2 sendo variado.. . . .	75
14	Características dinâmicas para $D_1 = 25$ mm e D_2 sendo variado.	77
15	Características dinâmicas para $D_1 = 24$ mm e D_2 sendo variado.	78
16	Características dinâmicas para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado.	80
17	Características dinâmicas para $D_1 = 22$ mm e D_2 sendo variado.	81
18	Características dinâmicas para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado entre 0,5 mm e 1,5 mm.	83
19	Características dinâmicas para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado entre 1,5 mm e 2,5 mm.	84
20	Características dinâmicas para $D_2 = 0$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 5 A.	86
21	Características dinâmicas para $D_2 = 0$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 4 A.	88
22	Características dinâmicas para $D_2 = 2$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 5 A.	89
23	Características dinâmicas para $D_2 = 2$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 4 A.	91

Lista de Abreviaturas

DSPM *Doubly Salient Permanent Magnet*

FRPM *Flux Reversal Permanent Magnet*

FSPM *Flux Switching Permanent Magnet*

IPM *Interior Permanent Magnet*

PM *Permanent Magnet*

RMSE *Root Mean Square Error*

SPM *Surface-Mounted Permanent Magnet*

VFMM *Variable Flux Memory Machine*

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Objetivo	17
1.2	Objetivos Específicos	17
2	Fundamentação Teórica	18
2.1	Ímãs Permanentes	18
2.1.1	Desmagnetização	18
2.1.2	Tipos de Ímãs Permanentes	20
2.2	Motores de Passo	23
2.2.1	Características de Funcionamento do Motor de Passo	23
2.2.2	Tipos de Motores de Passo	26
3	Revisão Bibliográfica	30
3.1	Motores Síncronos com Ímãs Permanentes	30
3.1.1	Motores com Ímãs no Rotor	30
3.1.2	Motores com Ímãs no Estator	31
3.1.3	Motores com Excitação Híbrida	32
3.1.4	Motores com Memória	34
3.2	Motores de Passo com Ímãs Auxiliares	37
4	Materiais e Métodos	43
4.1	Proposta de Motor de Passo com Ímãs Auxiliares	43
4.2	Introdução ao Maxwell	44
4.3	Modelo 3D	45
4.4	Determinação da Malha de Elementos Finitos	48
5	Desenvolvimento Metodológico	53
5.1	Estudo do Estator	53
5.2	Testes Paramétricos	59
6	Resultados e Discussões	64
6.1	Características Estáticas	64
6.1.1	Torque Estacionário	64
6.1.2	Torque Residual	68
6.2	Características Dinâmicas	70
6.2.1	Comparativo Distancias	71
6.2.2	Comparativo Corrente	84
7	Conclusões	92

7.1	Trabalhos Futuros	95
	Referências Bibliográficas	97

1 Introdução

Na sociedade moderna as máquinas elétricas estão inseridas no nosso cotidiano nas mais diversas formas, como por exemplo: eletrodomésticos (geladeiras, ventiladores, liquidificadores, etc), computadores, disco-rígidos, relógios, entre outros.

Além do uso cotidiano as máquinas elétricas também são fundamentais nos processos industriais, uma vez que em fábricas mais modernas, esses dispositivos são principais responsáveis pela automação do sistema de produção, otimizando o fluxo de uma linha de produção como um todo.

Os avanços tecnológicos ao longo das últimas décadas têm resultado em importantes desenvolvimentos na construção das máquinas elétricas. Somado a isso a gigantesca diversificação das implementas e busca por melhorias têm impulsionado as pesquisas referentes à máquinas elétricas no desenvolvimento de novas topologias capazes de suprir as demandas cada vez mais específicas da indústria moderna.

Um dos critérios que pode ser destacado é o controle de posição do motor, equipamentos como impressoras, CNCs, braços robóticos, microscópios ópticos são aplicações que requerem altos níveis de exatidão e precisão durante sua operação, para que produto seja entregue com qualidade e de forma segura (GIERAS, 2002).

As soluções mais comuns nestes casos são os servo motores e motores de passo, em aplicações industriais o uso de servo motores tende a ser custoso em virtude da caixa de redução que além de ocupar mais espaço, carece de manutenções rotineiras e necessita de sensores para controlar seu posicionamento (ZHOU, 2018). Por outro lado, os motores de passo são mais simples e compactos tornando-os uma alternativa ideal para certas aplicações.

O motor de passo é uma classe especial dos motores de corrente contínua, projetados para controlar a posição de uma carga (STEPIEN; BERNAT, 2011). Tem como principal característica a sua forma de acionamento, que é feita através de pulsos elétricos que são convertidos em deslocamentos angulares discretos. Essa forma de operação permite que o posicionamento de uma carga seja feita em malha aberta, sem que haja erros acumulativos no posicionamento (UMANS, 2014).

De forma geral, muitas pesquisas foram feitas para modelar, projetar e controlar buscando otimizar o funcionamento dos motores de passo para atender às demandas cada vez mais sofisticadas da indústria, contudo poucos estudos destacam descobertas na estrutura e topologias de motores de passo. Em contrapartida, nos motores síncronos estudos referentes ao uso de ímãs permanentes no estator tem ganhado cada vez mais atenção, pois essas configurações tem facilitado a dissipação de calor nos ímãs, melhorado a densidade de torque, entre outras (LU et al., 2017).

Assim, neste trabalho, uma nova topologia de motor de passo é proposta, no qual são posicionados ímãs permanentes tanto no rotor quanto no estator buscando aumentar o torque estático do motor. A operação desse motor é feita utilizando eletroímãs posicionados concentricamente nos ímãs do estator que ao serem energizadas permitem manipular o campo magnético gerado pelo ímã.

Durante as simulações foi escolhido o arranjo mais simples que apresenta três polos no estator e dois no rotor, facilitando o processo de construção e reduzindo o custo computacional. As simulações foram feitas utilizando o *software* Ansys Maxwell, no qual foi possível estudar a dinâmica do sistema e analisar a influência de alguns parâmetros construtivos no comportamento do motor.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo realizar o estudo e a concepção de uma nova topologia de motor de passo, nessa configuração ímãs são posicionados no rotor e no estator buscando aumentar o torque estático produzido, principalmente o torque residual permitindo que esse sistema possa manter fixa a posição de cargas mesmo desenergizado. Partindo da configuração mais simples, simulações foram realizadas de forma que a dinâmica do sistema fosse estudada buscando constatar as melhorias no torque do motor.

1.2 Objetivos Específicos

- ❖ Estudar os tipos de motores de passo e as diferentes famílias de ímãs utilizadas em sua construção;
- ❖ Estudar o comportamento do ímã permanente durante a manipulação do campo magnético;
- ❖ Desenvolver simulações utilizando o método dos elementos finitos para estudar o comportamento transiente e estático do motor;
- ❖ Estudar a influência dos parâmetros construtivos na dinâmica do sistema;

2 Fundamentação Teórica

Para uma melhor compreensão do funcionamento dos motores de passo, neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais dos ímãs permanentes, como a desmagnetização e os principais tipos, as características de funcionamento e os modelos clássicos de motores de passo.

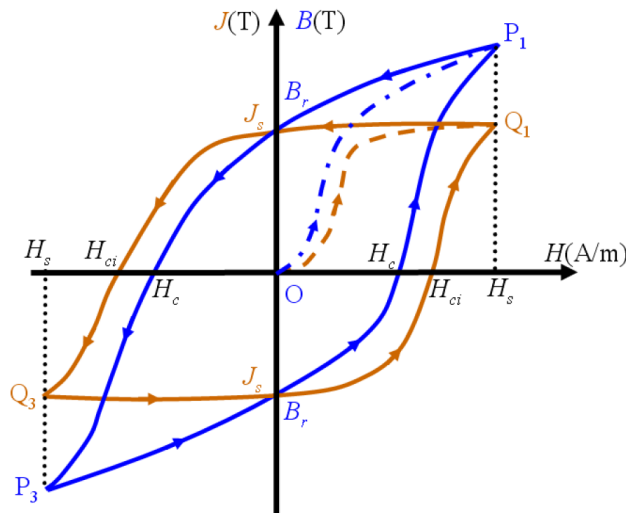
2.1 Ímãs Permanentes

Ímãs permanentes, também conhecidos como materiais magneticamente duros, são materiais que apresentam campo magnético residual após serem magnetizados, devido a essa propriedade esses materiais podem ser encontrados em diversas áreas como motores, gravadores, sensores, entre outras (COEY, 2002; BIRMINGHAM, 2020).

2.1.1 Desmagnetização

O laço de histerese é uma forma de caracterizar os materiais magnéticos, do qual diversos parâmetros podem ser determinados. Em aplicações como motores, o estudo desses gráficos é de vital importância para o dimensionamento correto do ímã permanente utilizado, uma vez que, por exemplo, é possível determinar o campo que o material magnético suporta antes de ser desmagnetizado, diminuindo o risco de ocorra falhas na operação da máquina (XIONG et al., 2016).

Figura 1: Curva de indução B e de magnetização J de um ímã genérico.



Fonte: Retirado de (ANOCIBAR, 2011).

Em geral, ao caracterizar um ímã permanente é comum que apenas o quadrante superior esquerdo seja apresentado (Curva de Desmagnetização) (ANOCIBAR, 2011; BIRMINGHAM, 2020). Na Figura 1 está exemplificado o laço de histerese de um ímã ge-

nérico, esse gráfico é obtido ao se variar o campo magnetizante H aplicada ao material ciclicamente entre $+H_S$ e $-H_S$, em azul está a curva normal B que representa o campo magnético resultante do campo aplicado e do ímã, já em marrom esta a curva intrínseca J que representa o campo magnético do ímã apenas.

Analisando o quadrante superior direito é possível observar a curva de magnetização inicial (linha tracejada), no qual o material inicialmente encontra-se desmagnetizado (ponto O) e tem seu campo magnético B variado de acordo com o aumento de H até o ponto P_1 , é importante notar que para valores suficientemente altos de H o valor de B tende a ficar plana, tal condição é chamada de saturação magnética, isso ocorre, pois neste estado todos os domínios magnéticos estão completamente alinhados com o campo induzido e dessa forma não é mais possível aumentar a polarização (ANOCIBAR, 2011; LALANA, 2017).

Caso o campo seja removido a polarização retorna para o eixo Y seguindo a trajetória descrita pela curva em azul, nota-se que a curva não mais retorna para a origem, esse valor residual é conhecido como magnetismo remanescente B_r ou J_s , aplicando um campo magnetizante com sentido oposto ao aplicado anteriormente a curva azul tende ao ponto P_3 ao aumentar sua intensidade até $-H_S$ o que faz com os domínios magnéticos realinhem-se neste novo sentido produzindo assim um magnetismo remanescente com valor $-B_r$, repetindo-se ciclicamente essas etapas obtém-se o laço de histerese.

O ponto H_c indicado na Figura 1 é conhecido como coercividade induzida e representa a intensidade de campo necessária para reduzir o campo magnético B para zero, enquanto H_{ci} representa a intensidade necessária para que o ímã seja desmagnetizado.

Além desses parâmetros, as curvas de desmagnetização são sensíveis a temperatura, de forma que B_r e H_c diminuem com o aumento da temperatura, isso ocorre pois a energia térmica acrescentada aumenta a mobilidade dos domínios, impedindo-os de se manterem alinhados. Caso a temperatura exceda a temperatura de Curie, o comportamento ferromagnético desaparece (PINHO, 2009). Essa dependência pode ser expressa da seguinte forma (GIERAS, 2002):

$$B_r = B_{r20} \left[1 + \frac{\alpha_B}{100} (\theta_{PM} - 20) \right] \quad (1)$$

$$H_c = H_{c20} \left[1 + \frac{\alpha_H}{100} (\theta_{PM} - 20) \right] \quad (2)$$

Onde, θ_{PM} é a temperatura do ímã permanente, B_{r20} e H_{c20} são o fluxo remanescente e a coercividade induzida à 20 °C e $\alpha_B < 0$ e $\alpha_H < 0$ são os coeficientes de temperatura para B_r e H_c em %/°C, respectivamente.

Um outro fator que pode ser extraído do gráfico de desmagnetização é o máximo produto energético $(BH)_{MAX}$, ou seja, máxima quantidade de energia no campo magnético por unidade de volume do ímã permanente, geralmente utilizado como figura de mérito (GIERAS, 2002; ANOCIBAR, 2011). Esse parâmetro permite estimar o volume de material magnético necessário para gerar determinado campo magnético. Usualmente em catálogos esse valor é indicado como B_a e H_a , mas para o caso de ímãs com desmagnetização linear esse parâmetro é dado por (ANOCIBAR, 2011):

$$(BH)_{MAX} = \frac{B_r H_c}{4} \quad (3)$$

2.1.2 Tipos de Ímãs Permanentes

Existem diversos tipos de ímãs permanentes cada qual com diferentes características e que são utilizados em aplicações específicas, os principais tipos utilizados na construção de máquinas elétricas são os alnicos, ferrites e os ímãs de terras-raras.

Os alnicos foram descobertos em 1930 feito através da junção de alumínio, níquel e ferro (Al-Ni-Fe), essa liga apresentava propriedades magnéticas melhores do que os materiais empregados na época (aproximadamente o dobro da coercividade do melhor ímã fabricado neste período), além de necessitar de menos etapas de processamento. (TOKUSHICHI, 1931; MAHMOOD, 2016). Consequentemente as ligas alnico rapidamente começaram a ser utilizadas em motores e alto-falantes substituindo pequenos eletroímãs, diminuindo o custo de produção e simplificando a fabricação. O que motivou o desenvolvimento de diversas pesquisas com o objetivo melhorar suas propriedades magnéticas, em geral, esses estudos foram concentrados na adição de novos componentes como cobre, cobalto, nióbio e titânio (LALANA, 2017).

A principal vantagem desse material é seu baixo coeficiente de temperatura o que permite ser utilizado em aplicações em temperaturas elevadas, essa liga também é caracterizada por possuir baixa coercividade e curva de desmagnetização não linear, o que permite magnetizar e desmagnetizar essa liga facilmente (ANOCIBAR, 2011).

Assim, os alnicos têm sido empregados em motores que necessitam operar em temperaturas elevadas, além disso é comum esse motores possuírem grandes entreferros fazendo com que fluxo magnético gerado pela reação da armadura seja insignificante protegendo os ímãs da desmagnetização, em alguns casos também são empregados ferros macios para protege-los do fluxo da armadura (GIERAS, 2002; BIRMINGHAM, 2020). Durante as décadas de 40 e 70, os motores de ímãs permanentes com potências variando de alguns watts a 150 kW foram majoritariamente construídos utilizando ligas alnico, no qual após esse período predominou-se o uso de ferrite na construção de motores (GIERAS, 2002).

Na década de 50, como resultado de pesquisas com ferrites macias, descobriu-se que era possível produzir ímãs de ferrite (LALANA, 2017). Esse material possui coercividade maior do que as ligas de alnico, no entanto possuem um fluxo remanescente menor, relativamente maiores coeficientes de temperatura e temperatura máxima de trabalho e de Curie de 350 °C e 500 °C, respectivamente (GIERAS, 2002).

A principal vantagem da ferrite é seu menor custo, devido ao seu fácil processamento e baixo custo da matéria-prima (BIRMINGHAM, 2020). Em aplicações como motores de ímãs permanentes, os ímãs de ferrite apresentam vantagem econômica em relação aos de alnicos, para motores de até 7,5 kW, uma vez que os ímãs de ferrite podem ser expostos campos magnéticos mais intensos, tendo como fator limitante o seu baixo produto energético (GIERAS, 2002; ANOCIBAR, 2011).

Um outro fator que contribuiu para a popularização das ligas de ferrite é a possibilidade de produzir borrachas e plásticos magnéticos ao misturar pó de ferrite durante sua manufatura. Esses materiais possuem diversas aplicações como ímãs de geladeira, alto-falantes e fitas magnéticas para gravações (LALANA, 2017).

Atualmente os ímãs de neodímio e samário-cobalto, também conhecidos como ímãs de terras-raras dominam o mercado de motores, os elementos de terras-raras recebem este nome, pois apesar desses elementos serem encontrados em abundância, seu minério natural apresenta diversos componentes misturados e com isso para se obter um metal em particular, diversos outros materiais precisam ser refinados limitando sua disponibilidade no mercado (GIERAS, 2002).

A primeira geração dos ímãs de terras-raras teve como base as ligas de samário-cobalto (SmCo_5), inventada na década de 60 e produzida comercialmente desde 1970, imediatamente após sua descoberta essa liga ganhou espaço em aplicações militares e espaciais devido ao seu produto energético ser muito maior comparado às ligas magnéticas anteriores (LALANA, 2017).

Além do seu elevado produto energético, a máxima temperatura de trabalho (300 ~ 350 °C) e coeficiente de temperatura (-0,03 ~ -0,045 %/°C) tornam essas ligas ideais para serem empregadas em motores de ímã permanente com baixo volume e alta densidade de potência (GIERAS, 2002). A segunda geração das ligas de samário-cobalto contou com a adição de materiais como nióbio, vanádio e zircônio e uso de ferro no lugar do cobalto permitiu o surgimento das ligas de $\text{Sm}_2(\text{Co,Fe})_{17}$ que melhoram ainda mais os parâmetros magnéticos dessa família (ANOCIBAR, 2011).

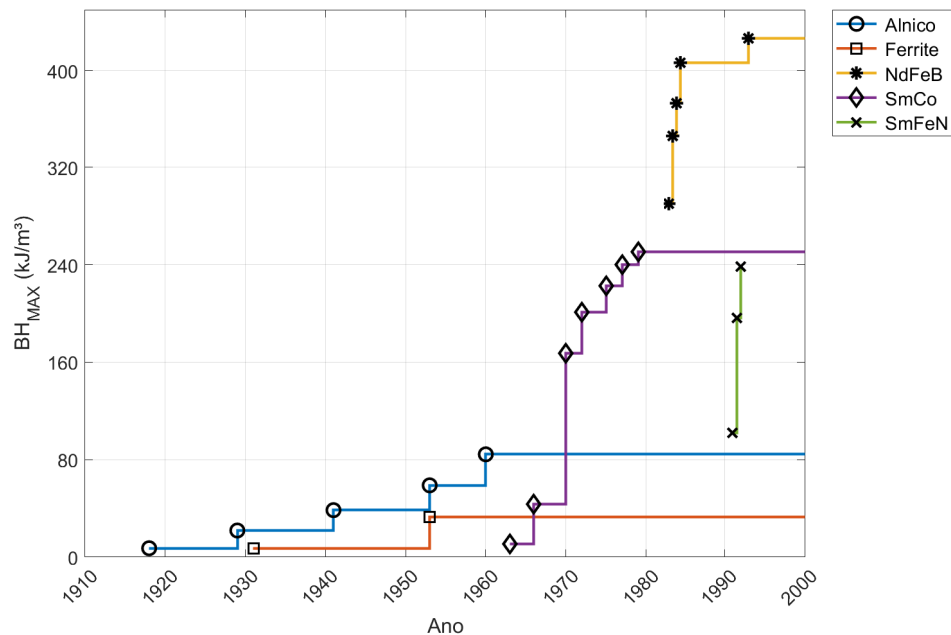
Os ímãs de neodímio constituem a segunda geração dos ímãs de terras raras, descoberta no início da década de 80 simultaneamente por duas empresas (GIERAS, 2002; LALANA, 2017). Essa liga é formada pela junção de neodímio, ferro e boro e são gradu-

adas de acordo com sua força, podendo variar de N24 até o mais forte N55 (BOLONKIN; KRINKER, 2010), elas apresentam vantagens quando comparadas as ligas de samário cobalto, uma vez que seus valores de coercividade e produto energético máximo são mais elevadas. Além disso o neodímio é um elemento de terras-raras mais abundante que o samário, permitindo que esse ímã seja comercializado a preços mais baixos (GIERAS, 2002; LALANA, 2017).

Sua principal desvantagem a forte dependência da temperatura (α_B entre -0.09 e -0,15 %/°C, α_H entre -0.40 e -0,80 %/°C e temperatura máxima de trabalho de 150 ~ 250 °C), além disso esse ímãs são frágeis e suscetíveis a oxidação, necessitando de revestimento adequado (GIERAS, 2002).

Na Figura 2 está apresentada a evolução dos materiais magnéticos durante o século 20. Como foi apresentado anteriormente, o desenvolvimento dos materiais magneticamente duros é feito através de etapas, no qual cada material é desenvolvido e sucessivamente melhorado antes de ser substituído por uma nova tecnologia (BIRMINGHAM, 2020). Através desse gráfico é possível também notar o aumento no produto energético introduzido com o desenvolvimento dos ímãs baseados nos elementos de terras-raras, o que associado a outros parâmetros tornam eles ideais para o emprego em motores.

Figura 2: Evolução dos materiais magnéticos duros.



Fonte: Adaptado de (BIRMINGHAM, 2020).

2.2 Motores de Passo

Os motores de passo são motores elétricos projetados para serem acionados por pulsos digitais que são convertidos em rotações discretas do rotor. É um dos principais dispositivos empregados em soluções que necessitam controlar a posição de uma carga.

As principais vantagens do motor de passo são: ausência de comutadores, possibilidade de operar em malha aberta reduzindo os custos com sensores e seu funcionamento independe da carga, ou seja, se operado de acordo com as especificações de torque, os motores de passo são capazes de rotacionar qualquer carga na velocidade especificada (CONDIT; JONES, 2004).

Em meados de 1920 a principal solução para o controle de posição eram o servo motores, apesar de já existirem motores de passo problemas como a desmagnetização dos ímãs permanentes e o acionamento feito através de componentes eletromecânicos tornavam essa solução custosa, uma vez que era necessário realizar manutenções com bastante frequência (KIEBURTZ, 1964), impedindo que houvesse a popularização dessa solução.

Na década de 60 os motores de passo começaram a ganhar destaque, impulsionado pela evolução da eletrônica digital e a descoberta de novos materiais magnéticos permitiram que houvesse redução nas suas dimensões e diminuição no custo de fabricação e operação (ANDERSON, 2001; GAUTHIER, 1979).

Além disso, a possibilidade de operar esses motores em malha aberta tornava essa solução mais atraente, visto que os servo motores necessitavam de sensores para realimentação e sintonização dos controladores para funcionamento, requisitos que tornavam esses sistemas cada vez mais complexos (KIEBURTZ, 1964).

Desde então os motores de passo têm evoluído continuamente, no qual diferentes configurações e tamanhos são projetados, provendo soluções para as mais diversas indústrias, podendo ser implementado desde projetos mais simples como impressoras, até sistemas mais sofisticados como a indústria aeroespacial (UMANS, 2014).

2.2.1 Características de Funcionamento do Motor de Passo

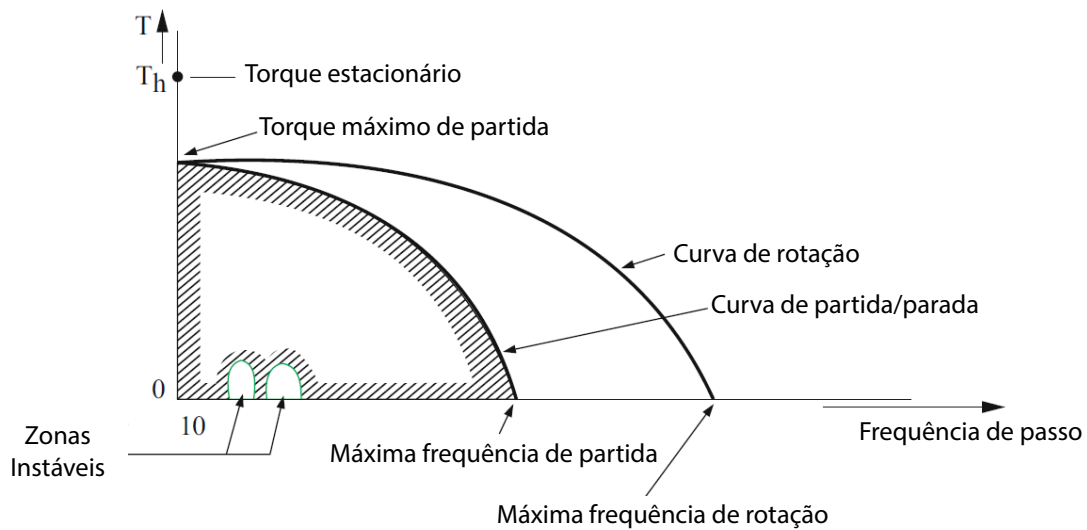
Uma das principais formas de dimensionar o motor de passo é através da sua curva de torque/velocidade. Para um motor de passo essa característica apresenta duas curvas distintas de acordo com seu estado de operação, dessa forma uma curva apresenta os limites de torque e velocidade para que seja feita a partida/parada e a outra curva representa os limites de operação do motor em funcionamento.

Na Figura 3 está apresentado o comportamento destas características, é importante destacar que essas propriedades são fortemente dependentes da inércia da carga, da

velocidade de passo e alimentação elétrica.

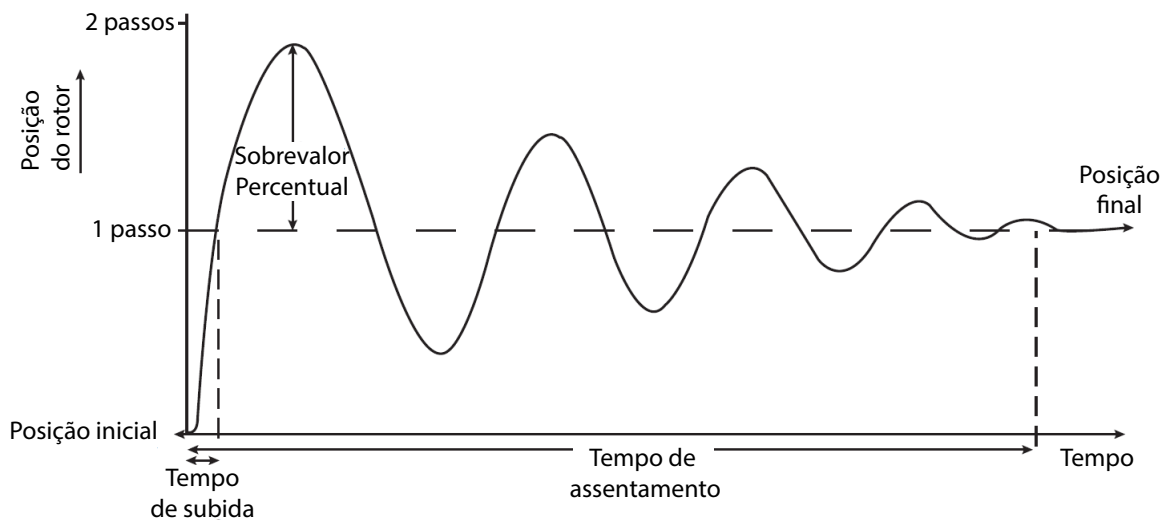
A curva de partida/parada (*pull-in torque*) relaciona máximo de torque que o motor consegue fornecer durante a partida e sua frequência de partida. Já a curva de rotação (*pull-out torque*) representa o máximo de torque que o motor consegue fornecer sem que haja perda de passo, em ambos os casos o motor apresenta maior torque em rotações mais baixas decaindo conforme a velocidade aumenta.

Figura 3: Curva de torque/velocidade de um motor de passo.



Fonte: Adaptado de (MELKEBEEK, 2018).

Figura 4: Resposta ao degrau de um motor de passo.



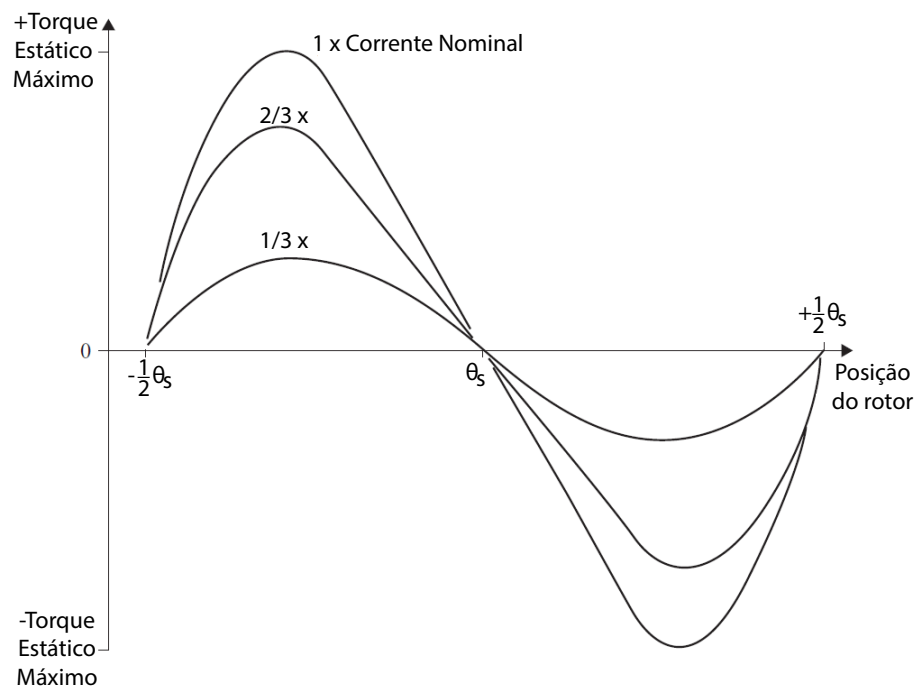
Fonte: Adaptado de (ACARNLEY, 2002).

No gráfico da Figura 3, a área compreendida entre a curva de rotação e a curva de partida/parada é chamada de faixa de operação, dessa forma para que o motor alcance velocidades mais altas é necessário que o motor parta de uma velocidade dentro dos limites da curva de partida/parada, para só então ser acelerado. De forma análoga é necessário reduzir a rotação do motor até que o ponto de operação esteja na curva de parada, para só então desativar o motor.

Ao ser operado em velocidade mais baixas, esses motores tendem a apresentar comportamento oscilatório a cada mudança de passo, um exemplo dessa resposta pode ser observada na Figura 4 (ACARNLEY, 2002). Como consequência, problemas como ressonância e perda de sincronismo podem ocorrer ao operar esses motores em frequências múltiplas da frequência natural, esses pontos de operação são representados na curva de torque/velocidade como zonas instáveis e cavidades.

Outra característica importante dos motores de passo é sua curva de torque estático/posição do rotor, essa curva é traçada mantendo o motor energizado enquanto o deslocamento do rotor é forçado. Uma representação dessa curva pode ser observada na Figura 5, nesse gráfico θ_s representa o ângulo no qual as saliências do rotor e do estator estão alinhadas, assim ao deslocar o rotor em uma fração do passo o torque tende a aumentar forçando o rotor a retornar para a posição de equilíbrio, o valor máximo de torque é conhecido como torque estacionário (*holding torque*).

Figura 5: Curva de torque estático/posição do rotor de um motor de passo.



Fonte: Adaptado de (ACARNLEY, 2002).

Os motores de passo com ímãs permanentes em sua construção ainda apresentam outro tipo de torque estático conhecido como torque residual/retentor (*detent torque*), esse torque é resultado da interação do campo magnético dos ímãs com as partes feitas de material ferromagnético no motor quando o motor não está energizado.

Apesar do torque residual ser menor do que o torque com o motor em operação, está pode ser uma característica interessante em aplicações críticas, no qual o rotor deve sustentar uma carga mesmo que ocorra problemas com a alimentação.

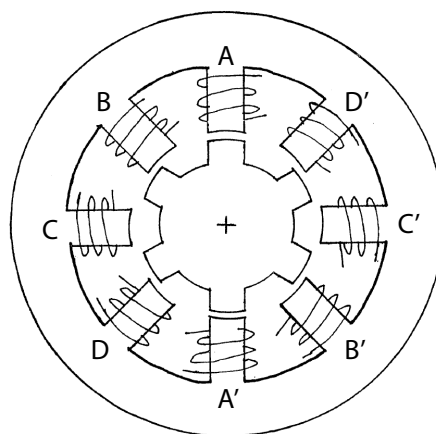
2.2.2 Tipos de Motores de Passo

Atualmente os motores de passo podem ser encontrados em variados modelos e tamanhos, mas são tipicamente classificados em três categorias: motores de passo de relutância variável, ímã permanente e híbridos.

Os motores de passo de relutância variável apresentam construção simples, constituído de rotor e estator salientes feitos com material ferro magnético, essa topologia diferente das outras duas não apresenta ímã permanentes. Um exemplo desse tipo de motor pode ser observado na Figura 6.

Neste tipo de configuração o rotor e o estator são construídos com um número diferente de polos, dessa forma apenas um par de polos estará alinhado. Assim ao energizar uma fase desse motor fará com que o fluxo magnético gerado que force os polos do rotor e do estator a se alinhar de forma a minimizar a relutância percorrida por esse fluxo.

Figura 6: Motor de relutância variável.

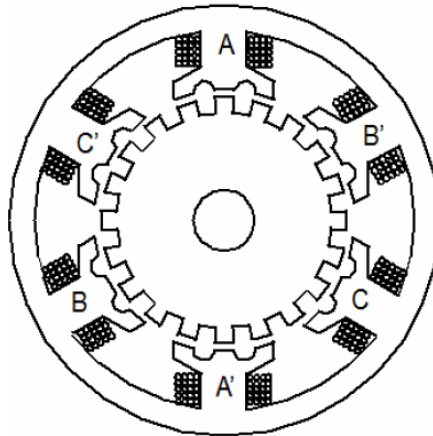


Fonte: Adaptado de (GAUTHIER, 1979).

No modelo apresentado na Figura 6 aumentar o número de passos resultaria em um número maior de fases tornando essa abordagem impraticável em aplicações que requerem um maior número de passos por rotação. Uma forma de solucionar esse problema pode ser observada na Figura 7, nele é feito o processo de castelação no qual os polos do estator

são modificados para apresentarem múltiplas saliências por fase permitindo um aumento no número de polos do rotor, o que resulta em um número maior de passos por rotação (JOLLIFFE, 1999; LE-HUY et al., 2008).

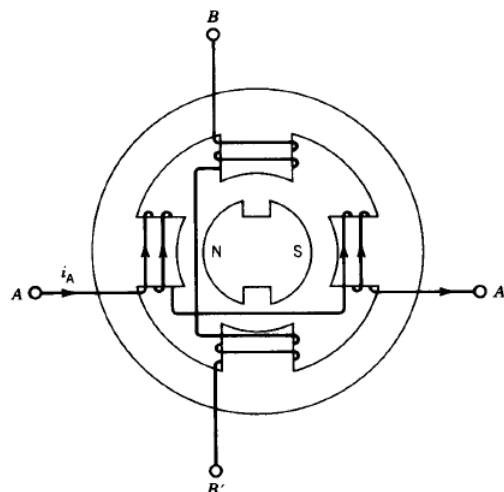
Figura 7: Motor de relutância variável com castelação.



Fonte: Retirado de (LE-HUY et al., 2008).

Os motores de passo de ímã permanente são caracterizados por possuir ímãs acoplados ao seu rotor, os quais são posicionados alternando-se os polos. Diferentemente dos motores de relutância variável no qual o sentido da corrente nos enrolamentos não altera seu funcionamento, os motores de ímã permanente utilizam a direção da corrente para alinhar os polos do estator com os ímãs acoplados no rotor. A principal vantagem desta topologia é seu baixo custo, devido a dificuldade de se magnetizar rotores com mais de 50 polos são construídos geralmente com passos de 30 graus a 3,6 graus (CONDIT; JONES, 2004).

Figura 8: Exemplo motor de passo de ímã permanente.



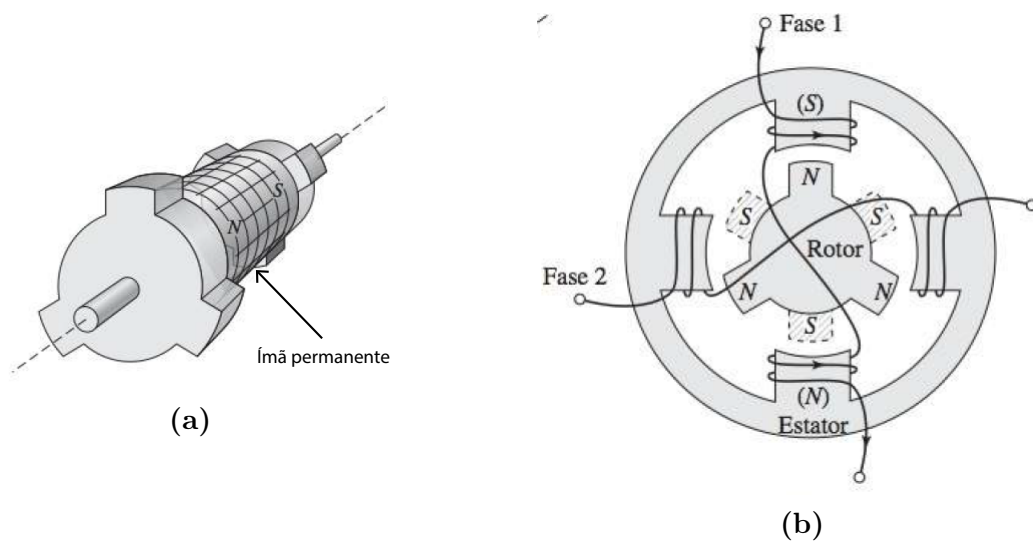
Fonte: Retirado de (SEN, 2013).

Na Figura 8 está ilustrado um modelo clássico do motor de passos de ímã permanente com duas fases (A e B) e um rotor magnetizado com os polos norte e sul indicados. Considerando o posicionamento do rotor apresentado na Figura 8 ao excitarmos a fase B é possível definir o sentido de rotação de acordo com o sentido da corrente, dessa forma uma corrente no sentido B-B' fará com que o rotor gire 90° no sentido horário, analogamente ao inverter o sentido da corrente o rotor irá rotacionar 90° no sentido anti-horário.

Os motores de passo híbridos utilizam os princípios de construção dos motores de passo de ímã permanente e de relutância variável (CONDIT; JONES, 2004). O estator nessa topologia é construído de forma semelhante ao motor de relutância variável podendo apresentar multi-saliências por fase reduzindo o ângulo deslocado por passo.

O rotor do motor de passo híbrido combina características dos outros dois tipos de motores de passo, nele o rotor é constituído de duas seções feitas com material ferromagnético e um ímã permanente, que é posicionado entre elas e concentricamente ao eixo do motor, como ilustrado na Figura 9a.

Figura 9: Motor de passo híbrido.



Fonte: Adaptado de (UMANS, 2014).

O ímã permanente utilizado nessa topologia é magnetizado na direção axial polarizando as extremidades do rotor como polo norte e a outra como polo sul, além disso as saliências das duas seções são posicionadas de forma complementar como apresentado na Figura 9b, permitindo que ao acionar uma fase os polos magnéticos venham a se alinhar.

A operação do motor de passo híbrido é semelhante ao do motor de ímã permanente, nele o sentido da corrente é utilizado para alinhar os polos do rotor com os polos do estator. Dessa forma, para o motor apresentado na Figura 9b ao excitar os enrolamentos da fase 2 o sentido da corrente determinará se o rotor irá girar no sentido horário ou anti-horário.

De modo geral cada uma das topologias de motores de passo preenche um nicho específico de aplicações de tal modo que não é possível determinar o melhor motor. Por exemplo, em situações em que se é necessário deslocar pequenas distâncias com elevado torque os motores com ímãs apresentam vantagens. Já em casos que é necessário realizar múltiplas voltas o motor de relutância se torna mais adequado, além disso devido a ausência de ímãs nessa topologia esse motor apresenta uma inércia menor o que permite acelerar mais rapidamente.

Quando é feito o comparativo entre os motores híbridos e de ímãs permanentes, um dos principais fatores que recai durante a escolha entre eles é o custo. Os motores híbridos apesar de todas as vantagens como menor resolução de passo e maior torque apresenta construção complexa o que eleva seu custo de fabricação, por outro lado com a melhoria nos materiais magnéticos a construção dos motores de ímãs permanentes tem se tornado cada vez mais versátil.

Existem outros motores de passo ainda que preenchem nichos ainda mais específicos, o qual fazem uso de outro princípios físicos como os motores de passo eletro-hidráulicos no qual utiliza-se um sistema fechado de controle hidráulico para movimentar as partes multiplicando o torque em centenas de vezes (ACARNLEY, 2002), ou ainda os motores baseados em materiais piezoelétricos que permitem deslocamento da ordem de micrômetros (CHEN et al., 2016; SPANNER; KOC, 2016; LI et al., 2019).

É possível também encontrar modelos que utilizam o mesmo princípio de funcionamento, mas com estruturas completamente diferentes como os motores de passo lineares (TAMAKI et al., 2016; WATANO et al., 2017; WEISS; PETERSEIM, 2017) e os motores de passo esféricos (LEE et al., 2005; ÖNER, 2007; TAO et al., 2018).

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Motores Síncronos com Ímãs Permanentes

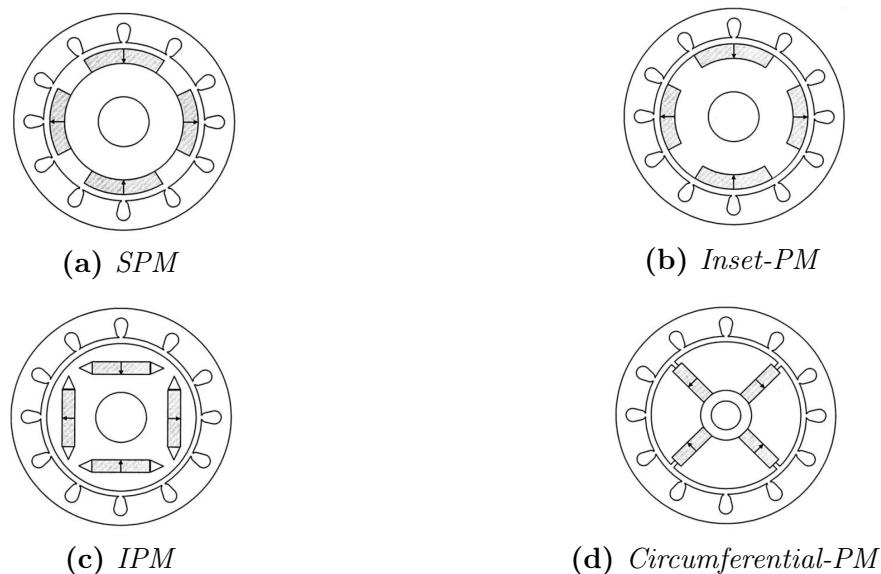
Um dos principais fatores que tem contribuído para acelerar o desenvolvimento dos motores síncronos é a indústria automobilística. No qual os veículos elétricos e híbridos tem ganhado destaque, pois além de se alinharem com as novas políticas relacionadas ao meio ambiente, permitem simplificar a construção do carro. Os principais tipos de motores empregados nos veículos elétricos têm sido os motores de indução, relutância variável/chaveada e de ímã permanente sem escovas *brushless* (CHAU et al., 2008).

Desses motores, os modelos do tipo *brushless* tem ganhado uma maior atenção, uma vez que a evolução dos ímãs permanentes permitiu a criação de novas topologias baseadas nesses novos materiais. Isso ocorre, pois os ímãs mais modernos apresentam elevados valores de coercividade e produto energético, o que flexibiliza sua utilização e permite que novas configurações sejam desenvolvidas buscando tirar maior proveito dessas melhorias.

3.1.1 Motores com Ímãs no Rotor

É possível classificar esses motores em função do local no qual os ímãs são posicionados, para as topologias com ímãs no rotor os principais exemplos são os motores com ímãs superficiais (*SPM - Surface-Mounted Permanent Magnet*), com ímãs inseridos (*Inset-PM - Inset Permanent Magnet*), com ímãs internos (*IPM - Interior Permanent Magnet*) e com ímãs internos circunferenciais (*Circumferential-IPM - Circumferential Interior Permanent Magnet*), os quais podem ser observados na Figura 10.

Figura 10: Motores com ímãs permanentes no rotor.



Fonte: Retirado de (CHAU et al., 2008).

Na Figura 10a está apresentado o motor *SPM* que possui ímãs dispostos radialmente é uma das topologias mais simples e consequentemente com menor custo. Apresenta problemas para ser operado em altas velocidades, pois devido à força centrífuga existe o risco dos ímãs descolarem. Para reduzir esse risco são empregadas proteções mecânicas que também servem para proteger os ímãs da desmagnetização causada pela reação da armadura.

Assim como no *SPM*, o motor *Inset-PM* também possui ímãs montados nas extremidades do rotor no sentido radial, entretanto o espaço entre os ímãs é preenchido com material ferromagnético que cria saliências, como ilustrado na Figura 10b. Devido ao fluxo magnético que é disperso no rotor a força contraeletromotriz é menor do que nos motores *SPM*, o que é compensando pela capacidade de operar em velocidades mais altas.

Nos motores do tipo *IPM* os ímãs são posicionados no interior da estrutura possibilitando concentrar o fluxo magnético gerado pelos ímãs no rotor e com isso alcançar uma maior densidade de fluxo no entreferro, além de proteger os ímãs da desmagnetização e de estresse mecânico, um exemplo desse motor pode ser observado na Figura 10c. Caracterizado por possui uma construção complexa do rotor o qual pode apresentar inúmeras saliências buscando otimizando o uso de ímãs, mas que compromete a robustez mecânica da estrutura e dificulta o aumento no número de polos. Devido as pontes existentes no núcleo do rotor parte do fluxo magnético cruza essas conexões ao invés de cruzar o entreferro, o que reduz o torque produzido.

Como ilustrado na Figura 10d, os motores do tipo *Circumferential-PM* apresentam ímãs inseridos circunferencialmente no núcleo do rotor o que diferente do modelo *IPM* não possui nenhuma ponte entre os polos melhorando a taxa de utilização do fluxo magnético gerado pelos ímãs. A principal desvantagem é o custo dos ímãs devido ao tamanho dos ímãs e assim como no outro caso, devido ao posicionamento dos ímãs o aumento do numero de polos se torna um desafio (LIU, 2005) (LIBERT, 2004).

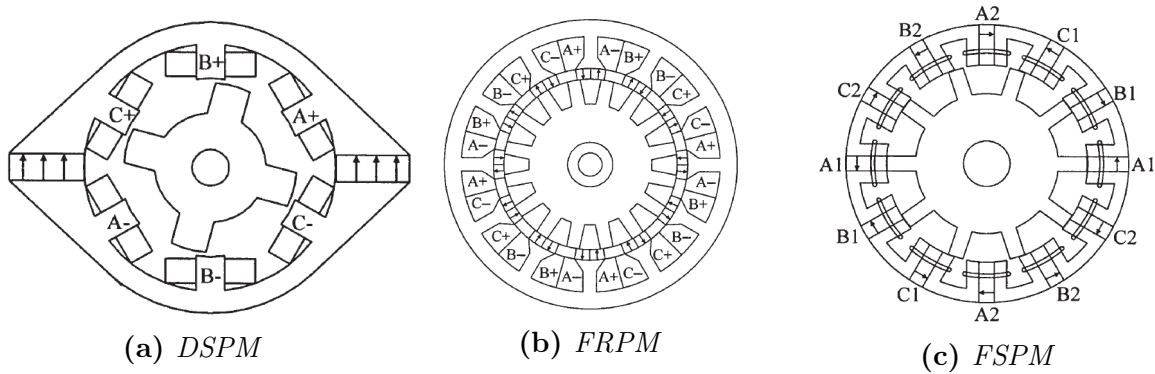
3.1.2 Motores com Ímãs no Estator

Uma outra forma de construir esses motores é posicionando os ímãs no estator, nessa configuração o torque é proveniente do chaveamento do fluxo magnético produzido pelos ímãs nas saliências do rotor permitindo que naturalmente o motor seja capaz de operar em altas velocidades e fique menos exposto a estresse mecânico (ZHU; HOWE, 2007; CHENG et al., 2011).

O motor do tipo *DSPM* (*Doubly Salient Permanent Magnet*) está ilustrado na Figura 11a que possui ímãs permanentes posicionados dentro do estator. Com um funcionamento similar ao motor de relutância, no qual as bobinas são excitadas o que atrai os polos do rotor buscando minimizar a relutância, entretanto apesar de haver saliências no

rotor e estator, a maior contribuição no torque produzido é dos ímãs permanentes. Uma das principais desvantagens desse motor é a baixa densidade de torque quando comparada com as outras duas topologias como resultado do fluxo magnético ser unipolar.

Figura 11: Motores com ímãs permanentes no estator.



Fonte: Retirado de (CHAU et al., 2008).

Na Figura 11b, um exemplo do motor *FRPM* (*Flux Reversal Permanent Magnet*) pode ser observado. Nessa topologia cada polo do estator consiste de dois ímãs com magnetizações opostas, a bobina que está presente em cada polo serve para reforçar o fluxo magnético de uma das polaridades enquanto enfraquece a outra fazendo com que o rotor seja deslocado. Devido a forma como os ímãs são posicionados torna eles vulneráveis a problemas como desmagnetização e perdas por corrente de foucault, além disso os ímãs também ficam expostos a forças magnéticas radiais.

Comparado com as outras topologias a estrutura dos motores do tipo *FSPM* (*Flux Switching Permanent Magnet*) apresenta uma construção relativamente mais complexas. Como apresentado na Figura 11c, cada polo dessa configuração consiste de segmentos laminados em formato de "U" no qual os ímãs com magnetização circumferencial são inseridos de forma alternada. Das três topologias o *FSPM* oferece a maior capacidade de torque e densidade de torque, além disso pelo fato de essa topologia trabalhar com o reforço do fluxo magnético, ímãs mais baratos como a ferrite podem ser utilizados (ZHU; HOWE, 2007; CHAU et al., 2008; CHENG et al., 2011)

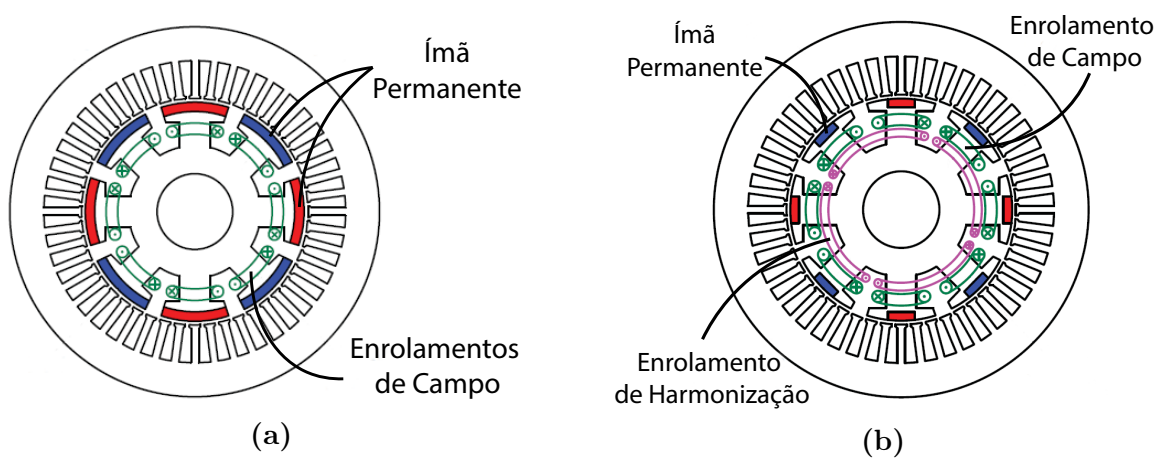
3.1.3 Motores com Excitação Híbrida

Uma das principais limitações que existem nos motores com ímãs permanentes é durante sua operação em velocidade mais altas, no qual o fluxo magnético constante produzido por eles acaba por induzir tensões cada vez maiores no enrolamentos a medida que a velocidade aumenta o que reduz a eficiência desses motores. Os motores com excitação híbrida empregam o uso de enrolamentos de campo para controlar o fluxo proveniente dos ímãs permanentes. Isso possibilita que o fluxo magnético seja ajustado em função

do estado de operação o que resultando em uma maior faixa de velocidade, aumento do torque em velocidades mais baixas e um melhor aproveitamento na região de operação.

De um modo geral grande parte dos estudos relacionados a motores com excitação híbrida consiste em modificações feitas nos motores com ímãs mencionados anteriormente, em alguns casos as estruturas adicionadas interagem com o sistema no sentido axial o que torna necessário desenvolver modelos 3D para estudar o seu comportamento. A forma mais comum de classificar esse motores é através do local no qual se encontram os ímãs permanentes e os enrolamentos de campo (WANG; NIU, 2017; ZHU; CAI, 2019).

Figura 12: Motor com excitação híbrida baseado no *SPM*.

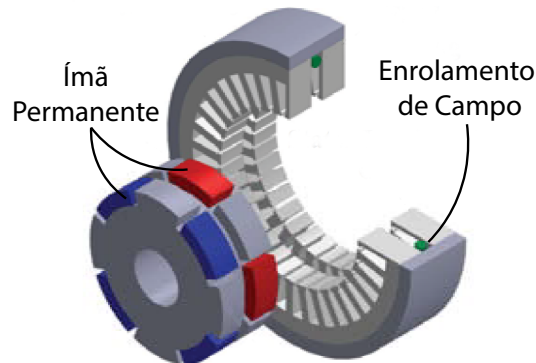


Fonte: Adaptado de (ZHU; CAI, 2019).

Na Figura 12a está exemplificado o arranjo dos motores com enrolamentos de campo e ímãs no rotor. Como pode ser observado a estrutura é baseada no motor com ímãs no rotor do tipo *SPM*, essa configuração de excitação híbrida não é muito utilizada, pois devido ao posicionamento dos enrolamentos de campo é necessário utilizar escovas o que reduz a confiabilidade e aumenta os custos com manutenção. Em alguns motores é empregado o uso de enrolamentos de harmonização que utilizam a indução para energizar os enrolamentos de campo, como mostrado na Figura 12b, o que elimina o contato mecânico.

O motor ilustrado na Figura 13 apresenta ímãs e enrolamentos de campo em peças separadas, nessa configuração o enrolamento de campo é posicionado de forma circunferencial entre os dentes do estator. A partir da regulação do fluxo magnético no entreferro é possível obter uma larga faixa de operação sem que haja risco de desmagnetizar os ímãs. A principal desvantagem desse motor é que em virtude do espaço que essa bobina ocupa na parte interna do estator ele apresenta redução na densidade de potência, além disso o entreferro que surge entre os polos do estator não participa do processo de conversão de energia.

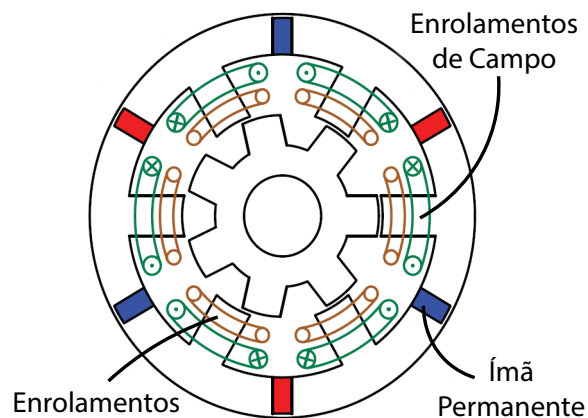
Figura 13: Motor com ímãs no rotor e enrolamentos de campo no estator.



Fonte: Adaptado de (ZHU; CAI, 2019).

Uma outra forma de construir esse motores é deslocando os componentes responsáveis pela excitação para a estrutura estacionária de modo semelhante ao que ocorre nos motores com ímãs no estator, um exemplo disso pode ser observado na Figura 14. É uma das topologias mais populares, pois permite a construção de um rotor mais robusto do que as outras duas e facilita o gerenciamento da temperatura no motor. Os problemas mais recorrentes nessa configuração ocorrem devido a necessidade de utilizar correntes maiores no enrolamentos de campo para regular o fluxo, o que aumenta o risco de desmagnetização dos ímãs e de saturação do núcleo do estator (WANG; NIU, 2017; ZHU; CAI, 2019)

Figura 14: Motor com excitação híbrida no estator.



Fonte: Adaptado de (ZHU; CAI, 2019).

3.1.4 Motores com Memória

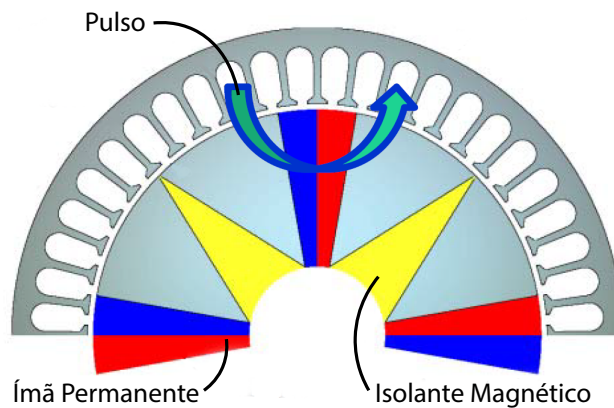
Em estudos mais recentes outras formas de utilizar os ímãs permanentes tem sido discutidas, nos motores mostrados anteriormente a desmagnetização dos ímãs é considerado um fator de degradação na eficiência do motor, uma vez que não é possível remagnetizar eles após a montagem. Por outro lado as máquinas de fluxo variável com memória

(*VFMM - Variable Flux Memory Machine*) utilizam os ciclos de desmagnetização e re-magnetização como parte do seu princípio de funcionamento.

Isso é feito através de pulsos de corrente que determinam a magnetização dos ímãs e com isso, de forma semelhante ao que ocorre com os motores com excitação híbrida é possível ajustar o fluxo magnético constante a depender do estado de operação do motor, mas sem seja necessário manter uma corrente constante, uma vez que o ímã irá "memorizar" a intensidade magnética produzida pelas bobinas (OSTOVIC, 2003; YANG et al., 2018).

Para que esse processo ocorra são empregados ímãs como os alnicos que possuem baixa coercividade, o que torna ele fácil de ser magnetizado. Além disso os alnicos em geral apresentam uma baixa dependência à temperatura, sendo praticamente imunes na faixa de temperatura em que os motores normalmente trabalham. O principal problema desses ímãs é sua curva de desmagnetização não-linear que pode dificultar o ajuste da intensidade magnética desejada. Em alguns trabalhos esses ímãs foram substituídos por ímãs de ferrite ou samário-cobalto que possuem curva de desmagnetização linear (YANG et al., 2018). Na Figura 15 está ilustrado o motor proposto por Ostovic (2003), nele isolantes são empregados para direcionar o fluxo de magnetização forçando eles a atravessarem os ímãs.

Figura 15: Motor de fluxo variável com memória.



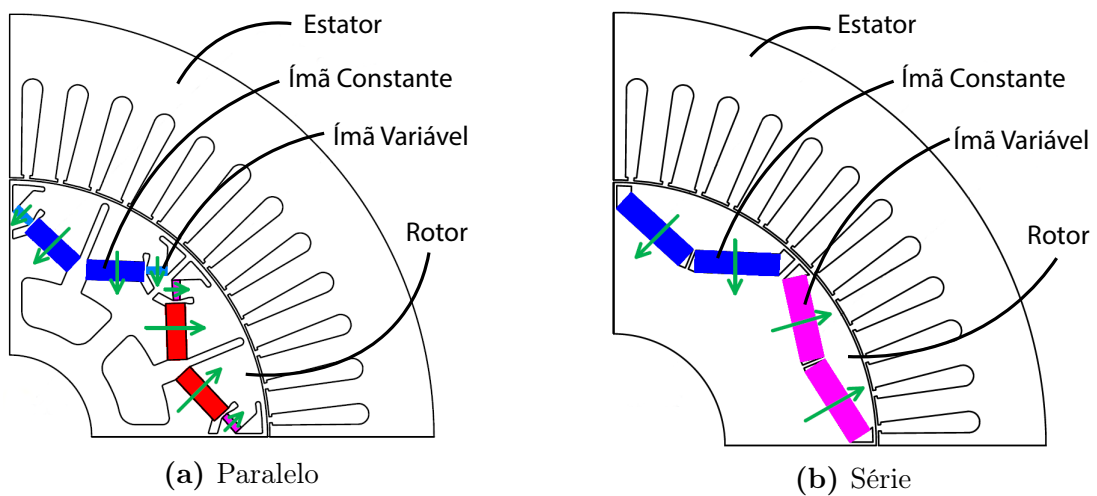
Fonte: Adaptado de (OSTOVIC, 2003).

Assim como acontece com os motores com excitação híbrida, diversos estudos buscam utilizar esse princípio de funcionamento para melhorar a operação das configurações mais consolidadas. Na Figura 16 está apresentado uma adaptação feita no motor do tipo *IPM*, nele ímãs com baixa coercividade (ímã variável) são adicionados na estrutura junto ao ímãs de alta coercividade (ímã constante) fazendo com que o fluxo magnético resultante seja dado pela contribuição de ambos os ímãs.

Essa combinação pode ser feita de duas formas, na Figura 16a os ímãs são posi-

cionado em paralelo. Devido a interação entre o fluxo dos ímãs e a baixa coercividade de um deles é possível que ocorra uma desmagnetização espontânea. Diversas barreiras de fluxo são posicionadas na estrutura do rotor para conter esse acoplamento cruzado entre os ímãs, de forma que a magnetização ajustada seja preservada. Na configuração em série (Figura 16b) os ímãs variáveis são posicionados de forma que o fluxo magnético do ímã constante passe por ele o que auxilia na estabilização, mas dificulta o processo de desmagnetização. Como não há necessidade de isolar o fluxo de ambos os ímãs, o rotor pode ser projetado de forma mais simples (HUA et al., 2017).

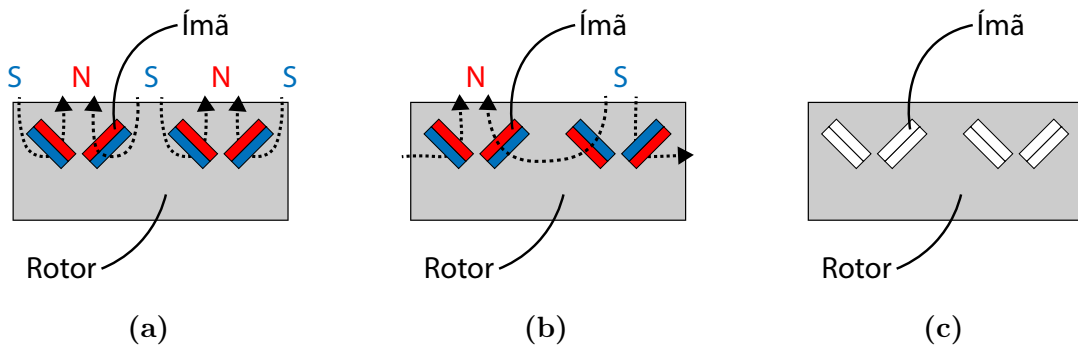
Figura 16: Motor de fluxo variável com memória híbrido.



Fonte: Adaptado de (HUA et al., 2017).

Além do motor de fluxo variável, os motores com memória também podem operar através da mudança no número de polos (*pole-changing*), esse princípio de operação utiliza ímãs variáveis para alterar a quantidade de polos presentes no rotor permitindo que uma mesma estrutura apresente mais de um modo de torque.

Figura 17: Exemplo de mudança de polo com memória.



Fonte: Adaptado de (SAKAI et al., 2013).

Por exemplo na Figura 17 está apresentado um motor que possui 3 modos de torque

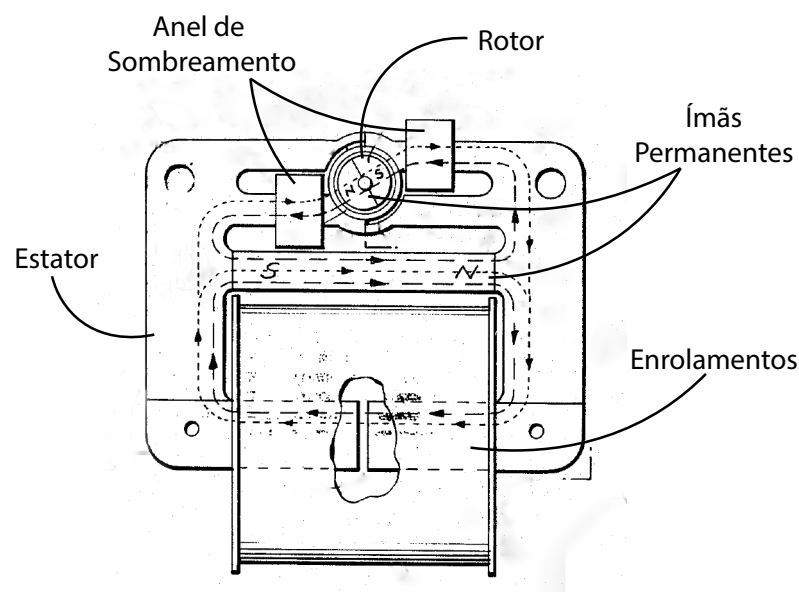
que são variados de acordo com a faixa de velocidade que o motor se encontra, com a combinação mostrada na Figura 17a é utilizada para baixas velocidades no qual o motor opera como um motor de ímã permanente de 8 polos, para altas velocidades os ímãs presentes no rotor são desmagnetizados, fazendo com que ele opere como um motor de relutância variável e por fim em velocidades intermediárias a configuração da Figura 17b é utilizada em que são formados 4 polos como em um motor do tipo *IPM* (SAKAI et al., 2013).

Um dos principais desafios desses motores são desmagnetizações indesejadas que podem ocorrer durante seu funcionamento, principalmente nos casos em que a carga exige que o motor opere próximo do torque máximo. Além disso por utilizarem um princípio de funcionamento que ainda foi pouco explorado carecem de ímãs com curva de histerese que tenham sido desenvolvidos para esse propósito (YANG et al., 2018).

3.2 Motores de Passo com Ímãs Auxiliares

As primeiras topologias de motores de passo que apresentaram uso de ímãs adicionais surgiram nas décadas de 60 e 70. Nessa época ainda haviam certas limitações para estabelecer fluxos magnéticos bidirecionais a partir dos enrolamentos, visto que os sistemas de acionamento utilizando componentes eletrônicos ainda apresentava custo elevado e os sistemas baseados em componentes eletromecânicos necessitavam de um enrolamento adicional (bobinado no sentido oposto) para que fosse possível controlar o campo magnético (HAYDON et al., 1968; ANDERSON, 2001).

Figura 18: Motor de passo patenteado por Haydon et. al



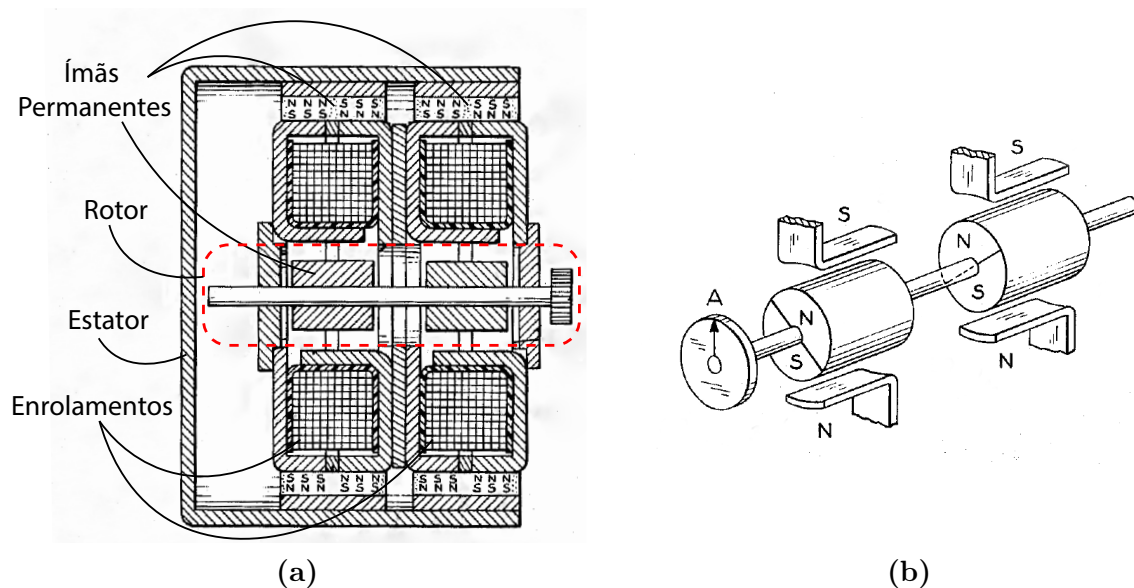
Fonte: Adaptado de (HAYDON et al., 1968).

Uma das formas de abordar esse problema foi apresentada por Haydon et al. (1968) que consiste em posicionar um ímã permanente no estator eliminando a necessidade de uma segunda bobina. Sendo o funcionamento desse motor de passos baseado na ação conjunta do fluxo estabelecido pelo ímã permanente e pelos enrolamentos.

Isso ocorre pois o ímã estabelece um fluxo magnético constante que força o rotor a se alinhar na direção do fluxo gerado, como pode ser observado na Figura 18. Ao energizar a bobina um novo fluxo magnético é estabelecido na direção oposta e com maior intensidade sobrepondo o fluxo gerado pelo ímã e fazendo com que o rotor desloque em 180° . Assim, para cada pulso aplicado o rotor irá realizar uma rotação completa.

De forma semelhante Hoffmann (1972) utiliza ímãs no estator para gerar fluxo magnético no sentido oposto ao das bobinas. Apresentado na Figura 19a, o motor proposto por ele apresenta duas bobinas e dois ímãs posicionados no rotor de forma que o fluxo magnético gerado por eles estejam ortogonais entre si, como ilustrado na Figura 19b. Isso permite que ao combinar o fluxo magnético dos ímãs com o dos enrolamentos o rotor se desloque para uma das quatro posições possíveis.

Figura 19: Motor de passo patenteado por Hoffmann.



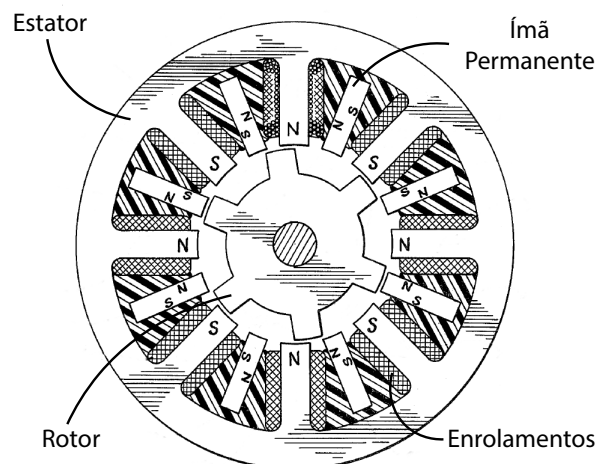
Fonte: Adaptado de (HOFFMANN, 1972).

Um dos principais problemas dessas topologias era a desmagnetização parcial que os ímãs permanentes presentes no estator poderiam sofrer quando expostos aos campos magnéticos das bobinas, fazendo com que fosse necessário proteger estes ímãs com outras estruturas o que aumentava o custo. Além disso com o progresso da eletrônica de potência nos anos seguintes tornaram essa forma de construção obsoleta, uma vez que os circuitos baseados em transistores já permitiam controlar a direção da corrente (ANDERSON, 2001).

Em contrapartida, esses avanços na eletrônica de potência somados às melhorias obtidas no desenvolvimento de materiais magnéticos resultou na redução do custo de fabricação, além de simplificar sua construção o que por consequência levou a popularização dos motores de passo. Fato que motivou pesquisadores a buscar formas de otimizar o funcionamento das principais topologias.

Por exemplo Kordik (1976) propôs melhorias no motor de relutância variável através da inserção de ímãs nos espaços entre os polos. Como ilustrado na Figura 20, a adição dos ímãs circunferencialmente no estator permite que esse motor apresente torque residual, característica ausente na estrutura original. Dos resultados obtidos, destaca-se o aumento do torque de operação em 25%, além de melhorias na geração de fluxo devido a contribuição dos ímãs no estator e redução do sobrevalor percentual quando acionado em baixa velocidade.

Figura 20: Motor de relutância variável com ímãs permanentes.



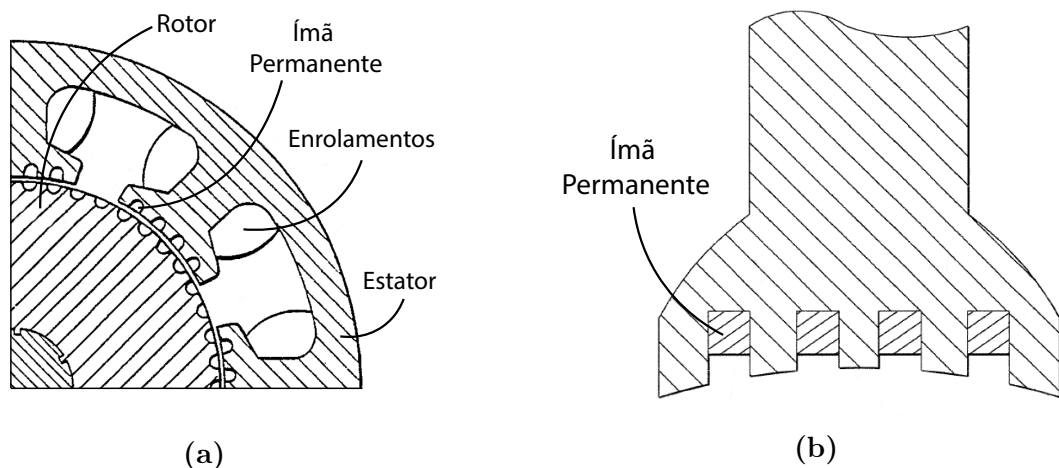
Fonte: Adaptado de (KORDIK, 1976).

Analogamente Horber (1989) patenteou modificações que podem ser feitas no motor de passos híbrido utilizando ímãs permanentes adicionais no estator, o que melhora as características de torque. Como ilustrado na Figura 21a, os ímãs são posicionados entre os dentes do estator de forma que sua polarização esteja na direção radial, ou seja, um dos polos deverá estabelecer um campo magnético na direção da armadura e o outro polo na direção do rotor. Como no motor híbrido a polarização é feita no sentido axial os ímãs são inseridos com uma certa angulação de forma que haja a diferença de um dente de uma face para a outra.

O aumento no torque nesse arranjo ocorre pois durante seu funcionamento ao mesmo tempo que em um lado do eixo os ímãs do estator tendem a repelir os dentes do rotor, forçando eles a se posicionar entre dois ímãs, do outro lado os ímãs tendem a atrair os dentes do rotor. Esse efeito natural provocado pela inserção dos ímãs em conjunto do

campo magnético formado durante o acionamento resulta em um aumento substancial no torque apresentado pelo motor, o que de acordo com o autor pode chegar a um acréscimo de 50% no torque para uma mesma alimentação.

Figura 21: Motor de passos híbrido com ímãs intercalados nos dentes do estator.



Fonte: (a) Adaptado de (HORBER, 1989), (b) Adaptado de (TRAGO et al., 2008).

Nessa configuração os ímãs são usinados após serem montados no estator para que sua face fique nivelado com os dentes dos polos, apesar desse processo resultar em um melhor desempenho, os ímãs utilizados nesses motores são quebradiços em decorrência do material utilizado na sua fabricação o que dificulta o processo de manufatura. Além disso, o processo de usinagem impede que seja feito o revestimento dos ímãs deixando eles expostos a outros problemas como a corrosão.

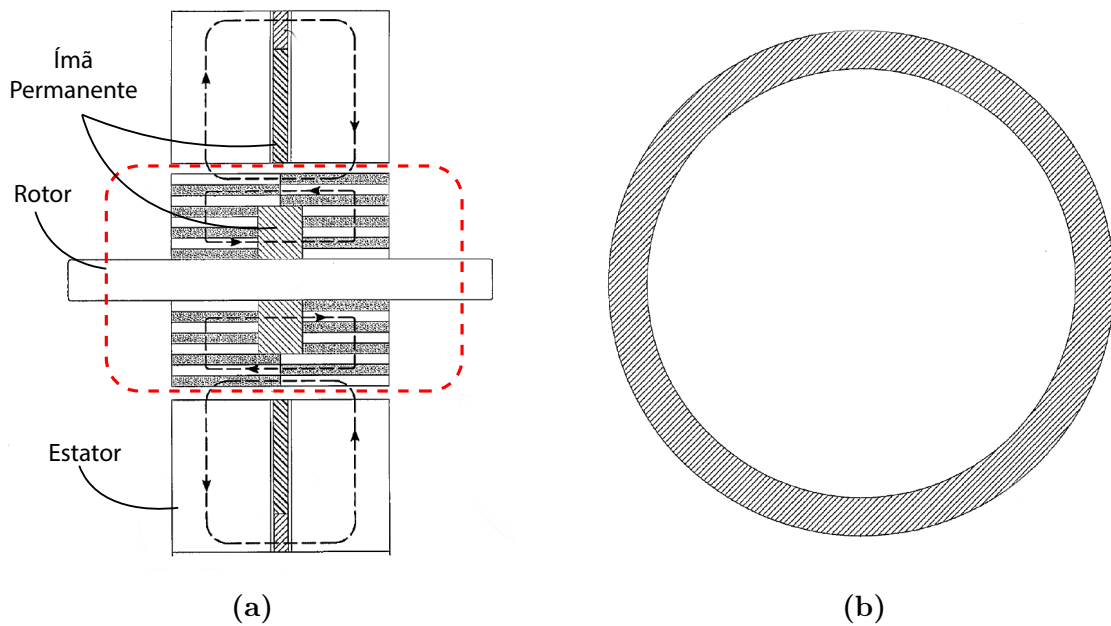
Para simplificar a construção Trago et al. (2008) adaptaram a estrutura dos polos recuando os ímãs do estator como ilustrado na Figura 21b. Apesar de haver redução no desempenho do motor quando comparado a configuração com ímãs nivelados, esse arranjo elimina a necessidade do processo de usinagem fazendo com que seja preciso apenas fixar os ímãs entre os dentes, além de permitir que esses ímãs sejam adequadamente revestidos.

Lin (2015) introduz o uso de ímãs em formato de anel (Figura 22b) no estator de um motor híbrido, apesar dessa configuração não aumentar o torque na mesma proporção que ocorre ao inserir os ímãs entre os dentes do estator, tem como vantagem a redução do ruído acústico provocado pelas oscilações durante a operação em baixas velocidades. Isso ocorre, pois a adição do ímã em anel dentro da armadura estabelece um fluxo magnético na direção axial que irá interagir com o rotor através dos polos desenergizados do estator, o que durante seu funcionamento auxilia na redução da amplitude da oscilação.

Nessa topologia para que ambos os ímãs contribuam para o aumento do torque, o ímã presente no rotor deve possuir magnetização na direção oposta ao do estator, como

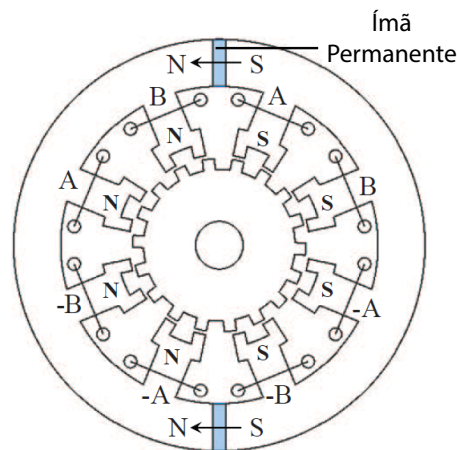
ilustrado na Figura 22a. Também é possível utilizar um rotor sem ímãs com o intuito de reduzir ainda mais as oscilações, visto que a retirada do ímã permite reduzir as dimensões do rotor e como consequência reduzir a inércia, em contrapartida o torque produzido por esse motor também é reduzido. Uma outra característica que pode ser interessante em aplicações no qual o motor precisar atuar em temperaturas altas é a possibilidade de resfriar os ímãs permanentes reduzindo o risco de ocorrer a desmagnetização parcial dos ímãs.

Figura 22: Motor de passos híbrido com ímãs em disco.



Fonte: Adaptado de (LIN, 2015).

Figura 23: Motor de relutância variável com ímãs permanentes.



Fonte: Adaptado de (LU et al., 2017).

A configuração proposta por Lu e Xu (2015) em seu artigo, consiste em rearranjar os enrolamentos de um motor de passo híbrido e como deslocar o ímã do rotor para o estator, fazendo com que sua estrutura seja semelhante ao de um motor *DSPM* como pode ser observado na Figura 23. Devido ao rearranjo feito nas bobinas, o acionamento se mantém o mesmo apesar da mudança na direção do fluxo magnético gerado pelos ímãs, que agora apresenta sentido circunferencial e não axial. Assim como no motor apresentado por Lin (2015) a remoção do ímã no rotor permite que outras características sejam exploradas.

Nos seus artigos mais recentes (LU et al., 2016, 2017) modelos analíticos e simulações utilizando o método dos elementos finitos são feitos para dimensionar e estudar o funcionamento desse motor. Os resultados obtidos apresentam melhorias na densidade de potência e nas características de torque quando comparado a um motor híbrido. Entretanto devido ao posicionamento do ímãs no estator em determinadas situações o núcleo do estator apresentou saturações magnéticas, o que pode implicar em perda de desempenho, além disso também houve aumento na amplitude das oscilações e no erro de posicionamento.

Em se tratando de motores de passo grande parte dos trabalhos publicados têm buscado melhorar as características dinâmicas através de técnicas de acionamento e materiais mais sofisticados. Além disso, também é possível encontrar muitos trabalhos investigando o uso de atuadores piezoelétricos e hidráulicos. Por outro lado, diferente do que ocorre nos motores síncronos poucos trabalhos foram encontrados na literatura abordando novas topologias, sendo a pesquisa desenvolvida por Lu et al. entre 2015 e 2017 os únicos artigos encontrados.

Dessa forma, o motor desenvolvido neste trabalho busca explorar a utilização de ímãs no estator e no roto. Diferente dos outros trabalhos publicados, o arranjo dos ímãs permite que o rotor em repouso seja atraído pelo polo que está alinhado ao mesmo tempo que é repelido na extremidade oposta pelos polos adjacentes. Isso resulta em um aumento significativo do torque residual permitindo que uma maior carga seja posicionada mesmo com o motor desenergizado. Em contrapartida, durante sua operação esta topologia utiliza enrolamentos para manipular diretamente o campo magnético em cada polo o que eleva significativamente a energia necessária para que um passo seja realizado.

4 Materiais e Métodos

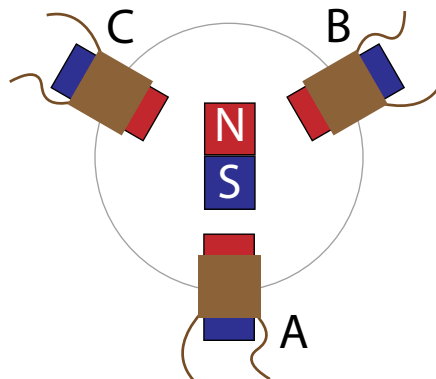
Neste capítulo será apresentado a metodologia utilizada para estudar o comportamento do motor proposto, para isso foram realizadas simulações eletromagnéticas através do *software* Maxwell que possibilita analisar o seu funcionamento assim, como avaliar a influência de certos parâmetros necessários em seu projeto. Os testes realizados foram feitos em baixa frequência, uma vez que para frequências mais altas é necessário o emprego de sistemas de amortecimento e acionamentos mais sofisticados para reduzir as oscilações e permitir que os passos sejam executados sem que o sistema se torne instável.

Além disso, nesse sistema foi considerado que o motor opera em temperatura ambiente, uma vez que há a necessidade de licenças adicionais para incluir essa variável nas simulações. Isso tende a impactar principalmente no modelo dos ímãs, visto que parâmetros como o campo magnético residual e sua coercividade tendem a diminuir com o aumento da temperatura causada pelos enrolamentos energizados.

4.1 Proposta de Motor de Passo com Ímãs Auxiliares

Nos motores de passo, ao contrário do que tem ocorrido nos motores síncronos poucos são os trabalhos que têm buscado investigar novas estruturas e topologias. Como foi apresentado na seção 3.1 o uso de ímãs permite que outras características sejam exploradas trazendo vantagens em alguns aspectos que podem ser expandidas para os motores de passo.

Figura 24: Esquemático do motor proposto.



Fonte: Produzido pelo autor.

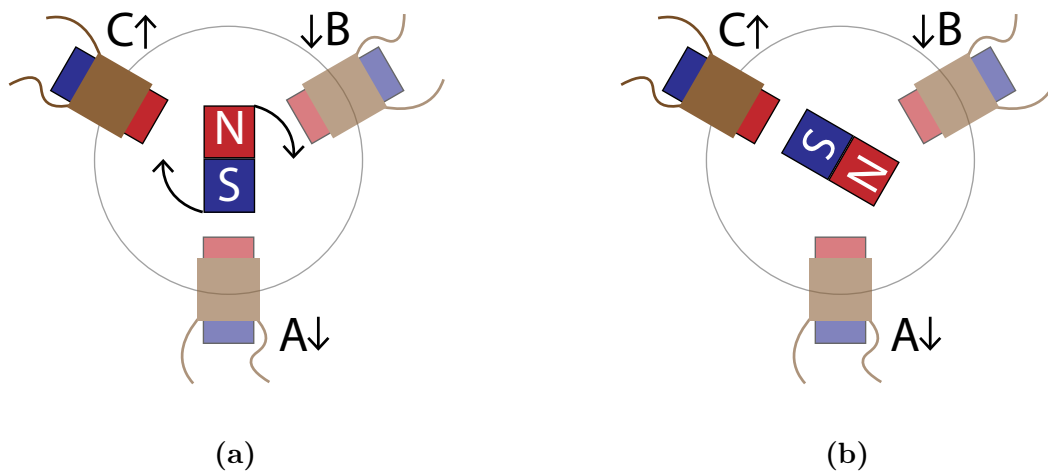
Na Figura 24 pode ser observado o esquemático do motor proposto, optou-se por utilizar uma configuração com três polos no estator por ser a forma de construção mais simples facilitando o estudo desse motor. Nesta topologia ímãs permanentes são posici-

onados no estator com sua polaridade disposta no sentido radial. Os enrolamentos de fase são posicionados no entorno desses ímãs permitindo que através do sentido da corrente que passa por eles seja feita a manipulação do campo magnético, o que possibilita intensificar ou enfraquecer o campo magnético estabelecido.

O ímã presente no rotor faz com que na posição de equilíbrio o rotor fique travado devido a atração desse ímã por um dos polos, ao mesmo tempo que é repelido pelos outros dois. Para que o rotor desloque em um passo é necessário enfraquecer o campo magnético de dois polos e reforçar o do terceiro.

Considerando a Figura 24 como a posição inicial do motor, para que o rotor gire na direção indicada na Figura 25a é necessário enfraquecer o campo magnético das fases A e B diminuindo a força de atração e repulsão que estavam agindo sobre o rotor, respectivamente. Além disso o campo da fase C é reforçado atraindo o polo sul do rotor fazendo com que ele rotacione para sua próxima posição como pode ser observado na Figura 25b.

Figura 25: Esquemático de operação do motor.



Fonte: Produzido pelo autor.

A principal vantagem desse motor é o aumento no torque estático, que por sua vez pode ser uma característica interessante principalmente em sistemas no qual o motor de passos é empregado como atuador, uma vez que em caso de falha na alimentação do sistema o motor é capaz de sustentar a carga reduzindo o risco de acidentes ou em casos que é necessário manter a carga estática por longos períodos de tempo.

4.2 Introdução ao Maxwell

O Maxwell faz parte de um conjunto de *softwares* desenvolvidos pela empresa Ansys para realizar simulações de efeitos eletromagnéticos, sendo o Maxwell em específico

responsável pelos fenômenos em baixa frequência. O que faz com que ele seja amplamente utilizado pela indústria para estudar o comportamentos de dispositivos eletromecânicos como: sensores, reguladores, transformadores, entre outros (ANSYS, 2012).

Essa ferramenta utiliza o método dos elementos finitos (MEF) para solucionar numericamente problemas envolvendo fenômenos eletromagnéticos. Isso é feito ao dividir a estrutura do sistema em partes menores e mais simples (elementos finitos) e em seguida as *Equações de Maxwell* são solucionadas nesse espaço finito. Uma das principais vantagens é a inerente capacidade de calcular de forma precisa diversas características de um motor, como a reação de armadura, a indutância das fases e o torque, mesmo que materiais utilizados apresentem comportamento não linear (GIERAS, 2002). Neste *software* existem três formas de realizar simulações eletromagnéticas:

- ❖ **Magnetostática:** nessa simulação os elementos que compõem o sistema são estacionários assim como os campos magnéticos e fontes de excitação (corrente contínua no condutores e ímã permanente);
- ❖ **Eddy-Current:** essa simulação é realizada no domínio da frequência no qual o comportamento do sistema em estado estacionário é calculado em uma determinada frequência, assim como na simulação do tipo magnetostática os elementos são estacionários;
- ❖ **Transiente:** consiste em uma simulação feita no domínio do tempo, o que permite excitar o sistema com sinal arbitrário que pode ser definido em função do tempo. Além disso é possível configurar a dinâmica da partes móveis como um sistema mecânico de segunda ordem ou fazer com que algumas partes do modelo se desloque a uma velocidade constante (rotação/translação).

Assim, para cada fenômeno que se deseja estudar existe um tipo de simulação que melhor se adéqua. Devido ao princípio de funcionamento do motor que está sendo desenvolvido, grande parte dos estudos foram feitos utilizando simulações do tipo magnetostática e transiente.

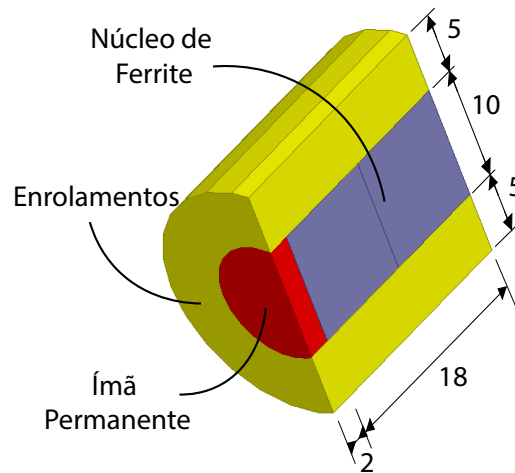
4.3 Modelo 3D

Para realização de simulações no Maxwell é necessário que a estrutura seja desenhada em ambiente computacional, para isso pode-se utilizar as próprias ferramentas ou importar o modelo de um outro *software* sendo necessário adequar o modelo ao Maxwell a depender da complexidade do objeto importado. É possível também utilizar o *RMxprt* do próprio Maxwell que consiste em *scripts*, os quais possibilitam modelar topologias mais consolidadas de forma automática e utilizando configurações personalizadas nas dimensões de projeto.

Em decorrência da simplicidade do motor de passos a ser estudado optou-se por utilizar o próprio Maxwell para projetar a estrutura. Além disso, a definição dos materiais a serem utilizados na simulação e algumas decisões de projeto foram definidas a partir dos materiais disponíveis em laboratório, tendo em vista a possibilidade de em um trabalho futuro construir um protótipo desse motor.

Na Figura 26 está apresentado o estator que foi projetado, grande parte das dimensões escolhidas teve como base as dimensões do ímã permanente utilizado. Neste projeto foram utilizadas ligas de neodímio com grau N35 ($\mu_r = 1,099$ e $H_c = 890\,000$ A/m) que já estão modeladas na biblioteca padrão do Maxwell, para que seja possível controlar seu campo magnético sem que seja necessário aplicar altas correntes ou um elevado número de espiras no enrolamento optou-se por um ímã em formato de disco com 10 mm de diâmetro e 2 mm de espessura. Além disso, uma camada virtual envolvendo os enrolamentos foi adicionada para isolar eletricamente o núcleo impendido que as correntes de acionamento passem por ele.

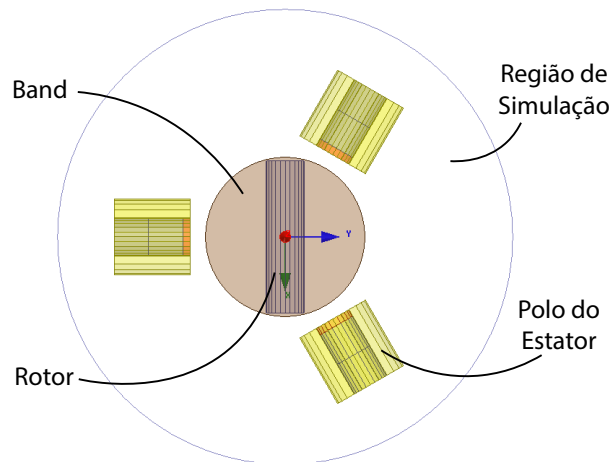
Figura 26: Seção transversal do estator.



Fonte: Produzido pelo autor.

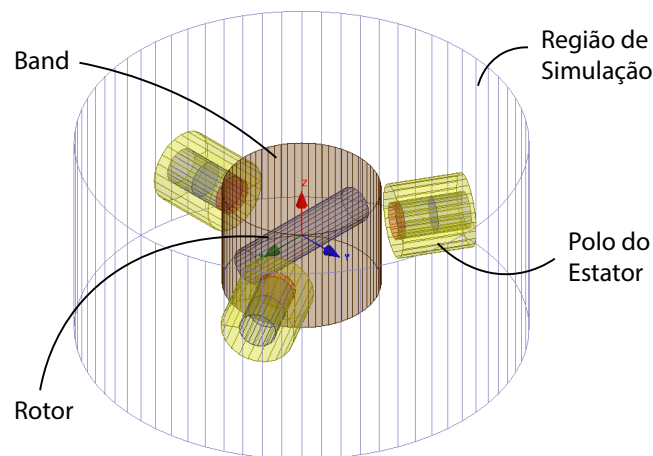
No projeto dos enrolamentos, tendo como base o ímã escolhido tem-se que o H_c desse ímã é igual ao H_c da liga dividido pela sua espessura o que resulta em 1780 A·espiras. Dessa forma utilizando 500 espiras no enrolamento resulta em uma corrente de 3,56A, permitindo que haja uma certa flexibilidade nas correntes que podem ser aplicadas a esse motor. Um núcleo de ferrite foi adicionado ao estator para reduzir a dispersão do fluxo magnético gerado pelos enrolamentos.

Figura 27: Vista superior do motor.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 28: Vista isométrica do motor.



Fonte: Produzido pelo autor.

O modelo completo do motor pode ser observado nas Figuras 27 e 28, foi utilizada uma opacidade de 80% para que fosse possível ver todos os componentes. Por possuir três polos no estator sendo cada um deles foi distanciados em 120° , nele o rotor foi projetado como um único ímã de 10 mm x 40 mm. Os polos estator foram posicionados a uma distância de 25 mm do centro. A geometria que envolve o rotor indicada por *Band* é necessária apenas nas simulações transientes, pois ela é utilizada para separar as partes estacionárias das partes móveis sendo necessário cobrir toda a área no qual os objetos irão se deslocar. É também através dela que será definido se os elementos em seu interior irão rotacionar a uma velocidade constante ou serão modelados como um sistema dinâmico.

A região de simulação consiste no espaço em que os campos serão calculados, todas as geometrias presentes na simulação foram construídas utilizando cilindros facetados, facilitando o processo de construção da malha de elementos finitos além de reduzir o tempo

necessário para realizar as simulações. Tanto a *Band* quanto essa região foram construídas utilizando cilindros com 72 faces, já os ímãs, enrolamentos e núcleos de ferrite foram projetados com cilindros de 24 faces, uma vez que esses elementos possuem dimensões menores.

4.4 Determinação da Malha de Elementos Finitos

A construção da malha de elementos finitos é uma etapa importante na construção da simulação, uma vez que fatores como a acurácia dos resultados e o tempo de simulação dependem diretamente dele. De forma geral um maior número de elementos implica em uma melhor exatidão dos resultados, entretanto resolver numericamente as equações diferenciais envolve inverter uma matriz com aproximadamente o mesmo número de elementos o que torna o processo lento e aumento a quantidade de recursos computacionais consumidos.

No Maxwell a malhas de elementos finitos é construída utilizando triângulos (2D) e tetraedros (3D). A malha inicial é construída utilizando apenas geometrias presentes no modelo como base, o que inevitavelmente faz com que algumas regiões de interesse (regiões expostas a vários campos, com alta taxa de variação, etc) apresentem poucos elementos reduzindo a acurácia da simulação. Além disso, em modelos que apresentam muitos detalhes a malha pode acabar sendo sobredefinida em regiões que não impactam na simulação.

Durante o processo de configuração da malha é necessário adicionar ao menos um dos requisitos como o tamanho e o número máximo de elementos que serão utilizados para limitar a malha inicial. Por padrão o *software* define inicialmente o tamanho máximo do elemento como 20% do tamanho do maior lado da estrutura, o critério por número apesar de permitir um controle maior no número de elementos pode resultar em malhas com elementos de tamanho grande o que pode impactar negativamente na simulação.

Para melhorar a qualidade da malha o *software* utiliza um processo de refino que é feito de forma adaptativa. Diversos fatores são utilizados para definir os locais em que a malha será refinada como pontos expostos a campos fortes, locais com erros ou gradientes de campo grandes, ou áreas que tenham um grande impacto no processo de solução, isso permite que um número maior de nós sejam interpolados o que melhora a confiabilidade nos resultados.

Entretanto, em decorrência da forma como a simulação transiente é feita, no qual todo o sistema é calculado em função de passos discretos no tempo, acaba sendo inviável que a malha seja refinada dessa forma. Assim na simulação transiente é por padrão utilizada a malha inicial sem que haja refinamento, sendo necessário aumentar o número de elementos manualmente para melhorar a acurácia dos resultados. O que pode se

tornar um problema durante a simulação, uma vez que algumas podem acabar ficando sobredefinidas aumentando o tempo de simulação, mas influenciando minimamente nos resultados.

O Maxwell possibilita também vincular à essa simulação uma malha refinada de forma adaptativa de uma outra simulação (magnetostática ou *eddy-current*) o que pode resultar em uma malha melhor. Entretanto como existem diferenças nos problemas abordados por cada tipo de simulação, é possível que o refino não esteja otimizado para simulação transiente, de forma que se faz necessário investigar qual das alternativas melhor se adéqua ao problema (ANSYS, 2012; ŠKOFIC et al., 2014).

Assim, para definir a malha utilizada nos testes foram construídas cinco malhas com diferentes números de elementos, o que permite avaliar a relação entre o número de elementos e o custo computacional. Dessa malhas três foram criadas especificando o tamanho máximo do elemento como 20%, 15% e 10% e as outras duas malhas restantes foram construídas a partir de uma simulação magnetostática com 1% e 0.5% de erro residual, o número de elementos por malha pode ser observado na Tabela 1.

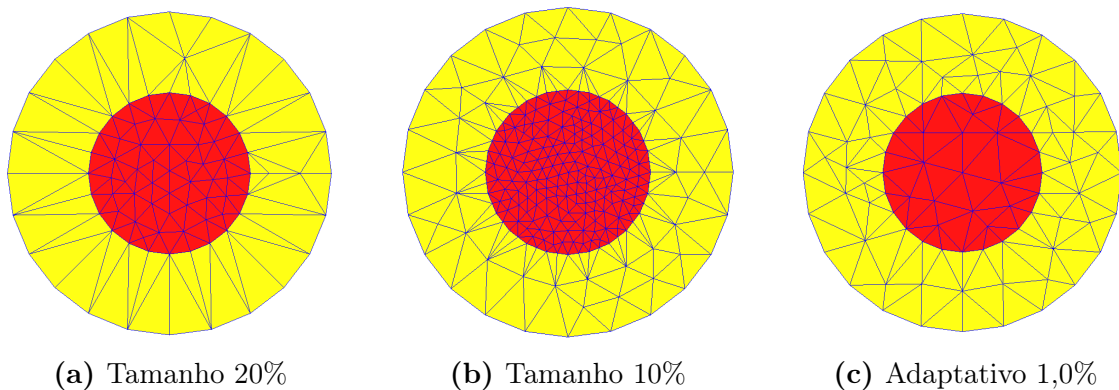
Tabela 1: Número de elementos das malhas.

Malha	Tamanho			Adaptivo	
	20%	15%	10%	1,0%	0,5%
Número de Elementos	23520	34215	110825	30785	52045

Fonte: Produzido pelo autor.

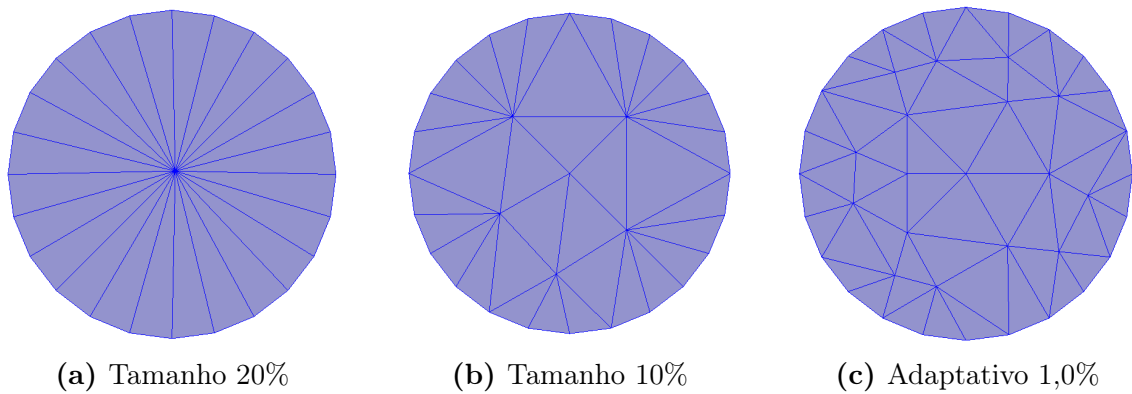
Como era esperado a redução no tamanho dos elementos resultou em um aumento significativo no número de elementos nas malhas, esse resultado pode ser observado nas Figura 29 e 30, no qual estão ilustradas as malhas criadas a partir das configurações descritas anteriormente.

Figura 29: Ilustração das malhas construídas no estator.



Fonte: Produzido pelo autor.

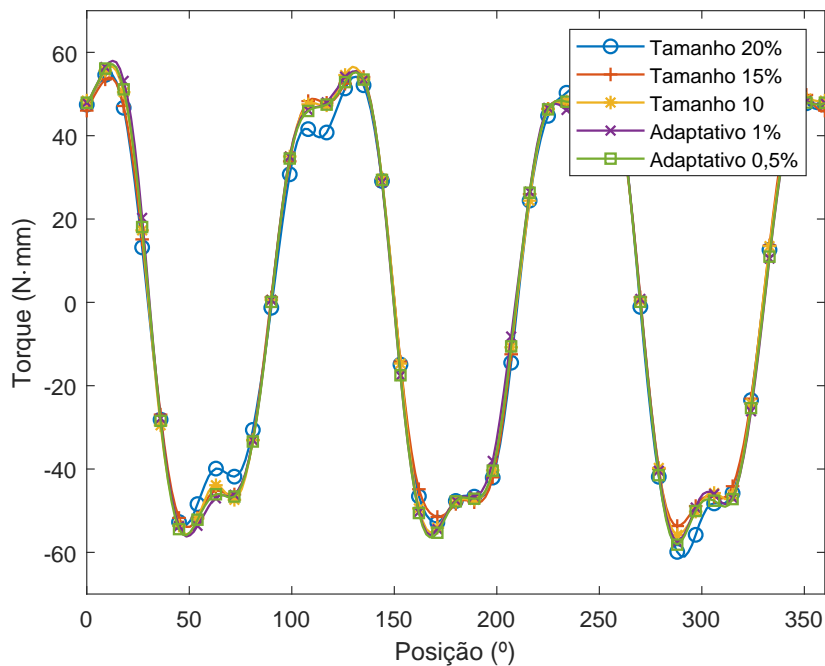
Figura 30: Ilustração das malhas construídas no rotor.



Fonte: Produzido pelo autor.

Quando comparadas as Figuras 29a e 29c é possível observar claramente a diferença na distribuição dos nós entre a malha refinada e uma malha apenas com o tamanho especificado, principalmente na região dos enrolamentos que no caso adaptativo possui nós mais próximos e distribuídos ao longo da superfície, o que se repete nas Figuras 30a e 30c. Já para o caso em que há a redução no tamanho dos elementos (Figura 29b) é possível observar um número bem maior de nós, principalmente na região do ímã o que não ocorre da mesma forma na Figura 30b.

Figura 31: Comparativo entre as malhas.



Fonte: Produzido pelo autor.

Para avaliar o desempenho das malhas foi configurada uma simulação do tipo transiente, no qual foi calculado o torque apresentado pelo rotor quando submetido a uma

volta completa em um período de 1 s. O resultando dessas simulações pode ser observado na Figura 31, É possível notar que com exceção da malha definida com tamanho máximo igual a 20% as curvas apresentam comportamento semelhante, dessa forma para comparar numericamente as curvas utilizou-se o raiz do erro quadrático médio (*RMSE* - *Root Mean Square Error*) que é dada pela seguinte equação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(\hat{y} - y)^2}{n}} \quad (4)$$

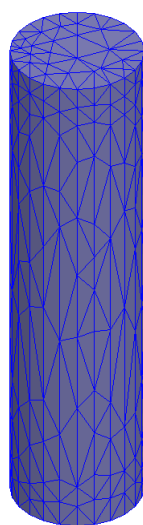
Essa equação consiste em comparar ponto a ponto as duas curvas o que permite avaliar a semelhança entre os resultados. Como curva base utilizou-se a malha com tamanho máximo do elemento igual a 10%, visto que ela possui o maior número de tetraedros, o que implica uma melhor acurácia no resultado. Na Tabela 2 está apresentado o resumo dos resultados obtidos nas simulações.

Tabela 2: Resumo comparativo das malhas.

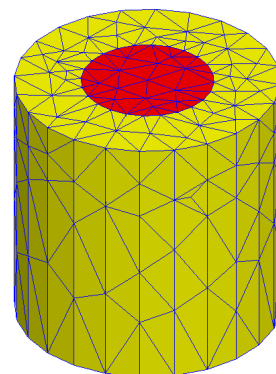
Malha	Número de Tetraedros	Tempo de Simulação	RMSE
Tamanho 20%	23520	00:15:30	3.0729
Tamanho 15%	34215	00:22:36	1.8949
Tamanho 10%	110825	01:56:14	0
Adaptativo 1,0%	30785	00:20:30	1.7737
Adaptativo 0,5%	52045	00:44:04	1.3887

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 32: Vista isométrica da malha utilizada.



(a) Rotor



(b) Estator

Fonte: Produzido pelo autor.

Através do cálculo do *RMSE* nota-se que apesar da semelhança nas respostas as

malhas adaptativas apresentaram resultados mais próximos da malha de 10%, mas com um tempo de simulação significativamente menor. Com isso após avaliar o desempenho das malhas e o tempo de simulação, optou-se por utilizar a malha adaptativa com 1% de erro residual. Apesar da malha adaptativa com 0,5% de erro residual ter apresentando uma maior semelhança com a curva base, o seu tempo de simulação também foi bem maior.

Na Figura 32 está apresentado o modelo em 3D da malha utilizada, no modelo do rotor é possível observar que há quase o espelhamento da malha na direção de magnetização, uma vez que o modelo em si compreende apenas o ímã. Já no modelo do estator a região do núcleo apresenta elementos maiores, pois há uma menor interação entre campos magnéticos nessa área.

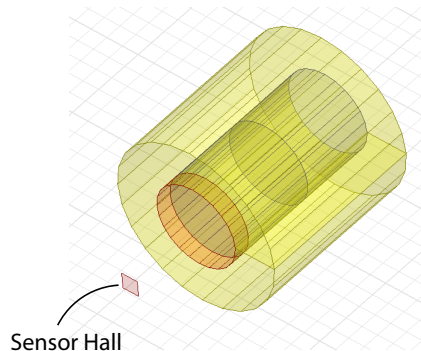
5 Desenvolvimento Metodológico

O estudo desse motor com o intuito de conhecer melhor o seu funcionamento e limitações foi baseado em simulações feitas no Maxwell. Como não há registro prévio na literatura de um motor de passos que se assemelhe ao que está sendo investigado, torna-se necessário analisar a influência de certos parâmetros construtivos no desempenho do motor.

5.1 Estudo do Estator

Primeiramente para visualizar o efeito de chaveamento do campo magnético foi realizado um teste isolado em que apenas um polo do estator foi utilizado, nele os enrolamentos foram acionados de forma alternada. O arranjo dessa simulação está apresentado na Figura 33, como pode ser observado foi utilizado um quadrado com 2,5 mm de lado, posicionado a 10 mm para medir a intensidade do campo magnético resultante, funcionando de forma semelhante a um sensor *hall*.

Figura 33: Esquemático do teste de chaveamento.



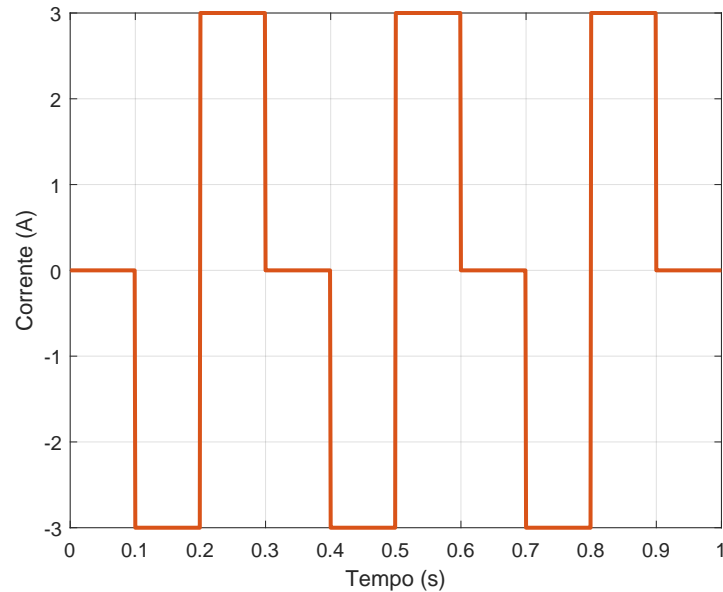
Fonte: Produzido pelo autor.

O acionamento do sistema foi feito utilizando uma corrente de 3 A cuja forma de onda pode ser observada na Figura 34, essa corrente foi definida com base no valor que foi calculado durante o projeto dos enrolamentos. A forma de onda da corrente apresenta 3 estágios, em um primeiro momento os enrolamentos estão desenergizados permitindo que o campo magnético estabelecido apenas pelo ímã seja medido. Em seguida os enrolamentos são excitados com uma corrente que ao se propagar pela bobina irá produzir um campo magnético que se opõe ao campo magnético da bobina e conseqüentemente enfraquecendo o campo resultante, por fim o sentido da corrente é invertido reforçando o campo magnético.

Na Figura 35 está apresentado o campo magnético resultante do chaveamento, esses valores foram obtidos através da média do campo magnético que atravessa o sensor

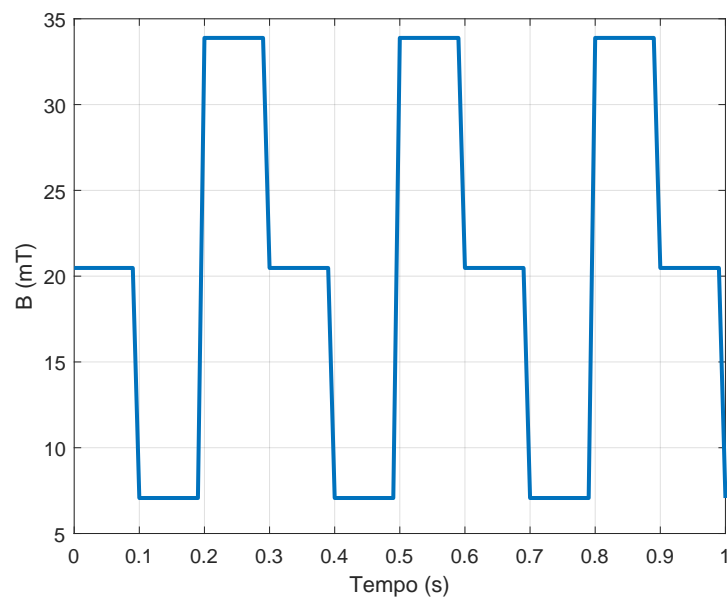
hall. Do gráfico o campo magnético estabelecido pela ímã permanente possui intensidade magnética igual a 20,48 mT, ao excitar os enrolamentos esse campo magnético irá variar entre 7,07 mT e 33,89 mT, ou seja, uma variação de 13,41 mT do valor obtido apenas com o ímã. Em decorrência da característica indutiva das bobinas há uma leve inclinação ao variar o sentido da corrente.

Figura 34: Sinal de acionamento para chaveamento.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 35: Campo magnético resultante do chaveamento.

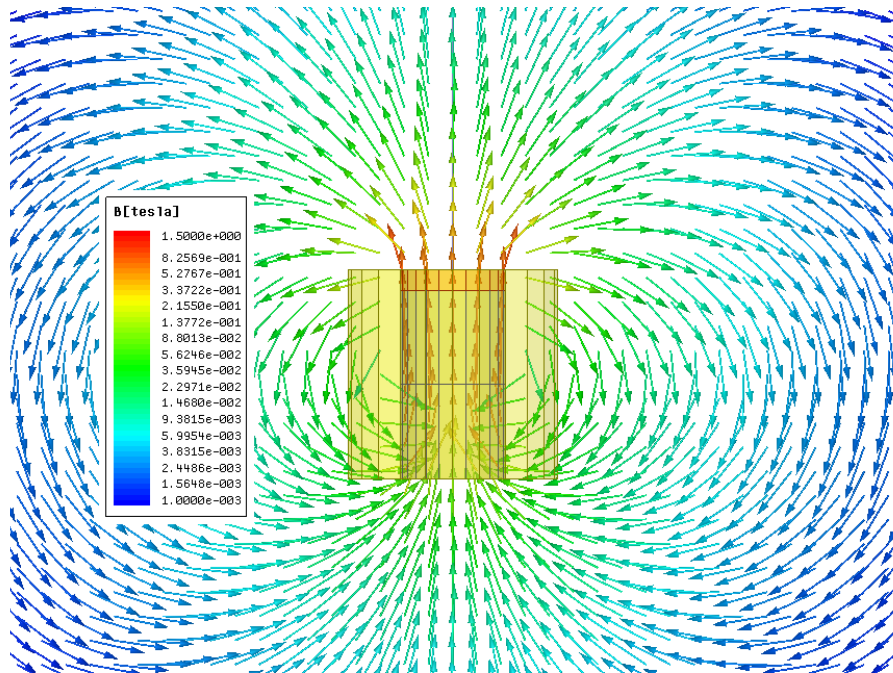


Fonte: Produzido pelo autor.

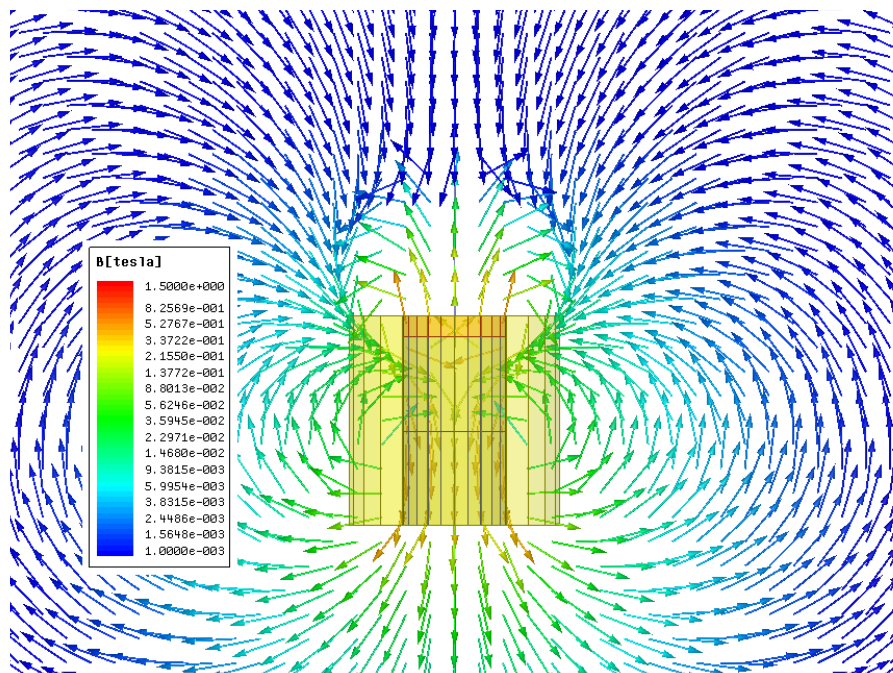
O campo magnético durante as etapas de chaveamento apresentou o comporta-

mento ilustrado na Figura 36, ao ser intensificado é possível observar através das linhas de campo que não houve distorção. Já durante a etapa de enfraquecimento as linhas de campo ao redor do ímã permanente apresentam uma área distorcida, isso ocorre devido a sobreposição das regiões de franjeamento que agora se opõem.

Figura 36: Ilustração do campo magnético durante o chaveamento.



(a) Campo magnético intensificado

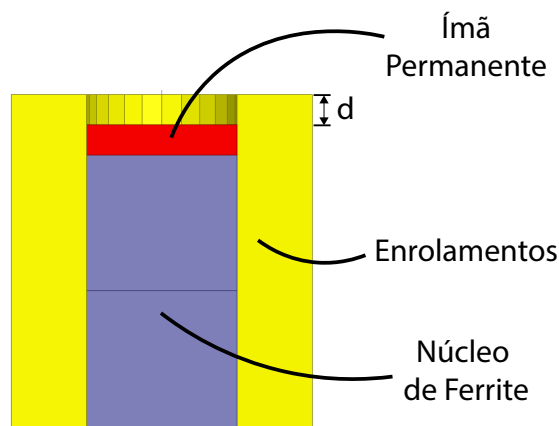


(b) Campo magnético enfraquecido

Fonte: Produzido pelo autor.

O estator nesta topologia concentra grande parte da complexidade de projeto, uma vez que a maioria dos componentes está presente nele. Um dos parâmetros que será analisado é o espaçamento interno entre uma face do estator e o núcleo d indicado na Figura 37. Como descrito por Trago et al. (2008) a adição desse espaço permite o controlar melhor do fluxo e reduzir as oscilações, mas com redução do torque. Isso ocorre, pois esse aumento no entreferro permite que mais linhas de campo do ímã sejam desviadas pelo campo magnético estabelecido pelos enrolamentos, facilitando a manipulação desse campo.

Figura 37: Ilustração da distância a ser avaliada no estator.

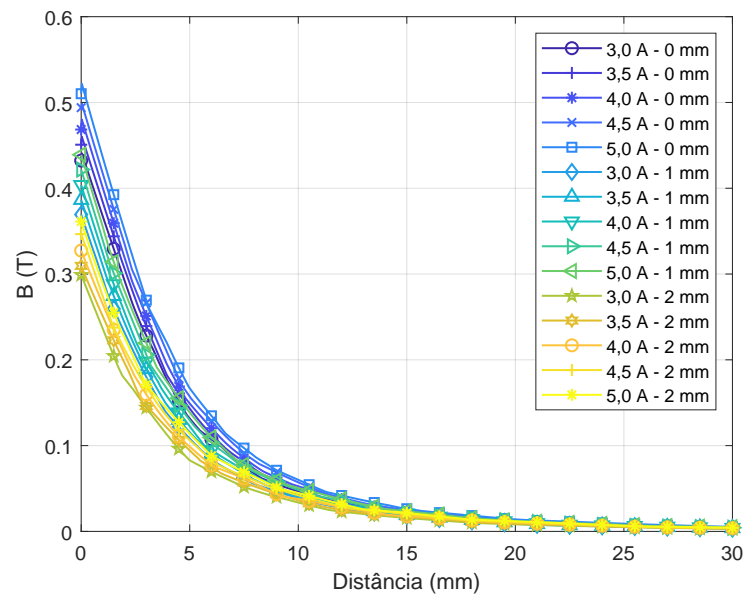


Fonte: Produzido pelo autor.

Para avaliar essa característica foram realizadas simulações magnetostáticas, no qual a intensidade do campo magnético foi medida até uma distância de 30 mm perpendicular a face superior do estator. Nesse teste a distância d e a corrente de excitação I foram variadas entre 0 mm a 5 mm e 3 A a 5 A, respectivamente. O sentido da corrente também foi variado de forma que tanto o processo de intensificação quanto enfraquecimento possam ser observados, além disso durante a etapa de enfraquecimento ocorreram distorções nas linhas de campo como apresentado na Figura 36b.

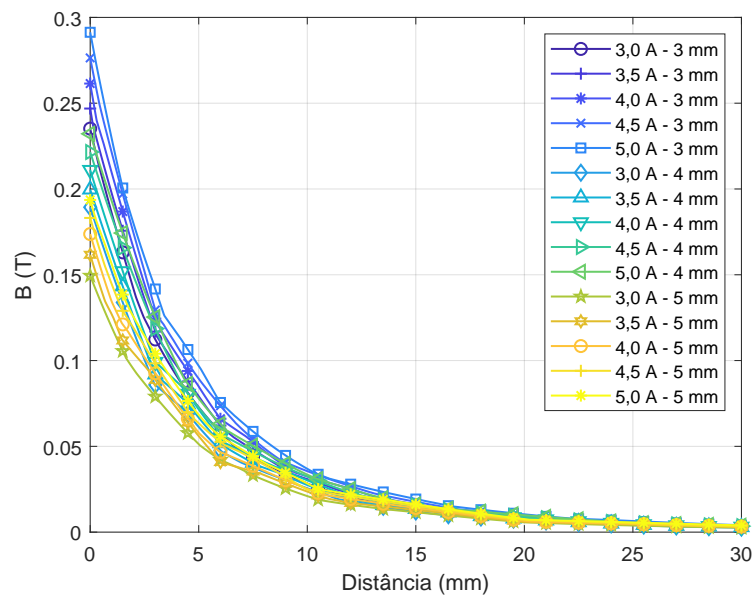
Os resultados desse teste podem ser observados nas Figuras 38, 39, 40 e 41. As curvas foram divididas em função da faixa de variação de d e do sentido da corrente para facilitar a visualização das curvas. Durante a etapa de intensificação (Figuras 38 e 39) o campo magnético decai exponencialmente em função da distância, sendo a variação de d responsável pelo decréscimo de um valor constante no valor inicial do campo magnético.

Figura 38: Variação da distância entre 0 mm e 2 mm com campo magnético sendo intensificado.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 39: Variação da distância entre 3 mm e 5 mm com campo magnético sendo intensificado.

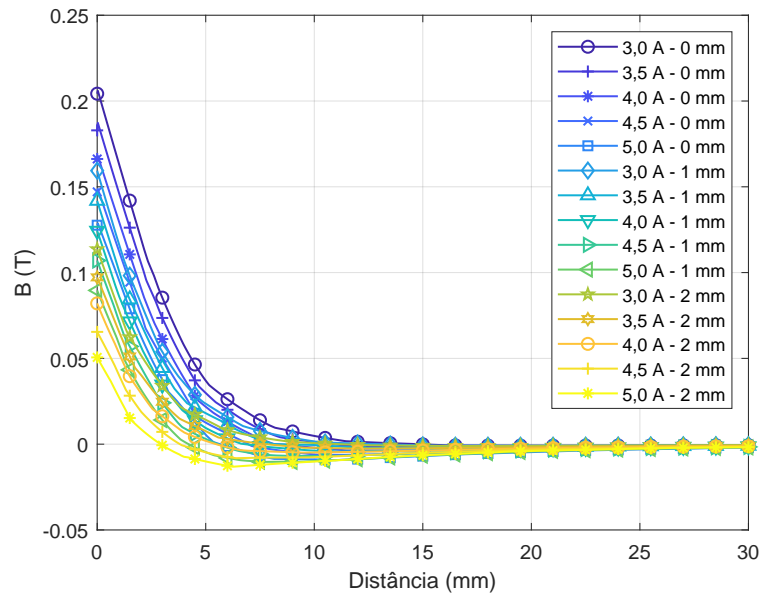


Fonte: Produzido pelo autor.

Nos testes em que o campo foi enfraquecido (Figuras 40 e 41) é possível notar uma mudança no comportamento do campo magnético resultante, no qual há a predominância do campo magnético gerado pelos enrolamentos a medida que a distância ou a corrente aumentam. Como pode ser observado a variação do espaçamento interno entre o núcleo

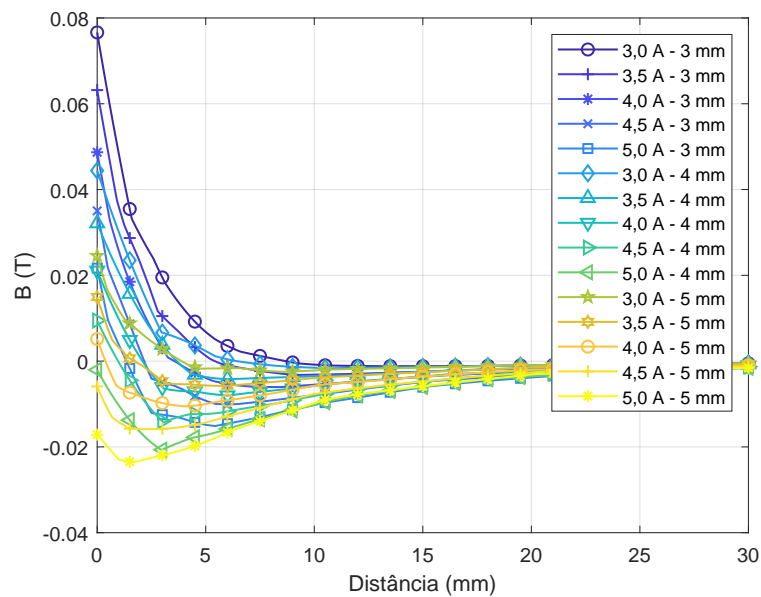
e os enrolamentos apresenta um maior impacto durante o enfraquecimento do campo magnético (Figura 41) o qual pode impactar na forma como o motor realiza os passos.

Figura 40: Variação da distância entre 0 mm e 2 mm com campo magnético sendo enfraquecido.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 41: Variação da distância entre 3 mm e 5 mm com campo magnético sendo enfraquecido.

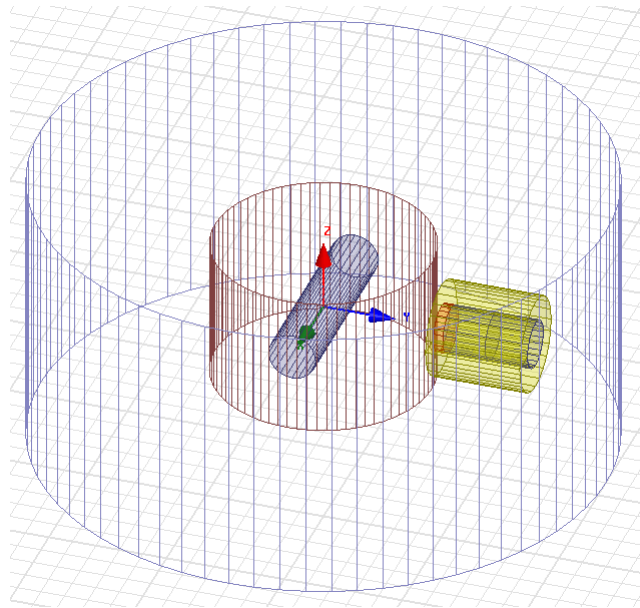


Fonte: Produzido pelo autor.

5.2 Testes Paramétricos

Primeiramente para verificar o comportamento do sistema ao simular um sistema dinâmico foi realizado um teste simplificado no qual o rotor é posicionado inicialmente deslocado de 90° de um polo do estator, como pode ser observado na Figura 42. Com isso é possível estimar o tempo de assentamento do rotor que será utilizado para definir a frequência de acionamento nas simulações transiente, de forma que seja possível observar o deslocamento do rotor até sua estabilização.

Figura 42: Esquemático utilizado para estimar o tempo de assentamento.

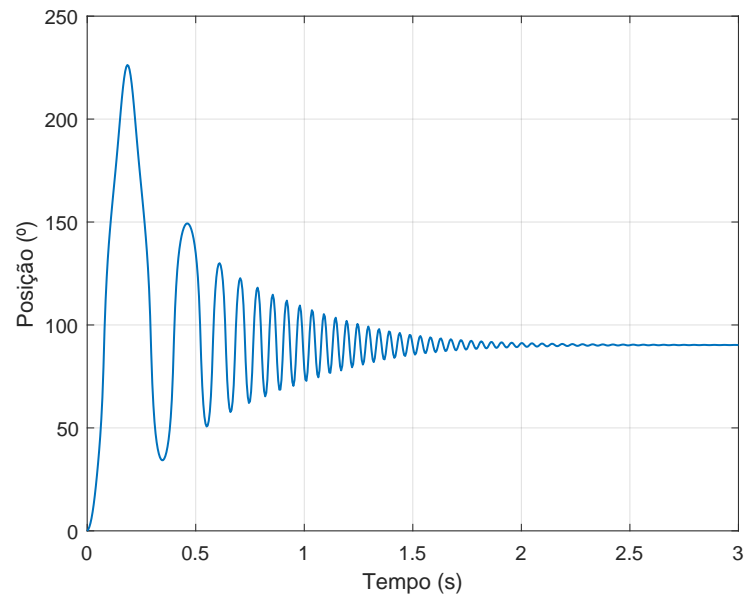


Fonte: Produzido pelo autor.

Nesse teste o elemento *Band* foi configurado para simular um sistema dinâmico em torno do eixo Z, assim ao iniciar a simulação um dos polos do rotor será atraído e devido a sua inércia irá oscilar até que entre em estado estacionário. Para garantir que o rotor seja atraído, os enrolamentos foram energizados de forma que o campo magnético estabelecido seja intensificado.

Na Figura 43 está apresentado o resultado dessa simulação, graficamente é possível observar que a partir dos 2 segundos a amplitude da oscilação já está em estado estacionário. Ao modificar os parâmetros construtivos é possível que esse valor sofra variações, assim o tempo necessário para realizar cada passo completamente foi definido como sendo 3 segundos. O que garante uma margem nessas variações, reduzindo o risco de que o rotor entre em estado estacionário fora dessa janela de tempo.

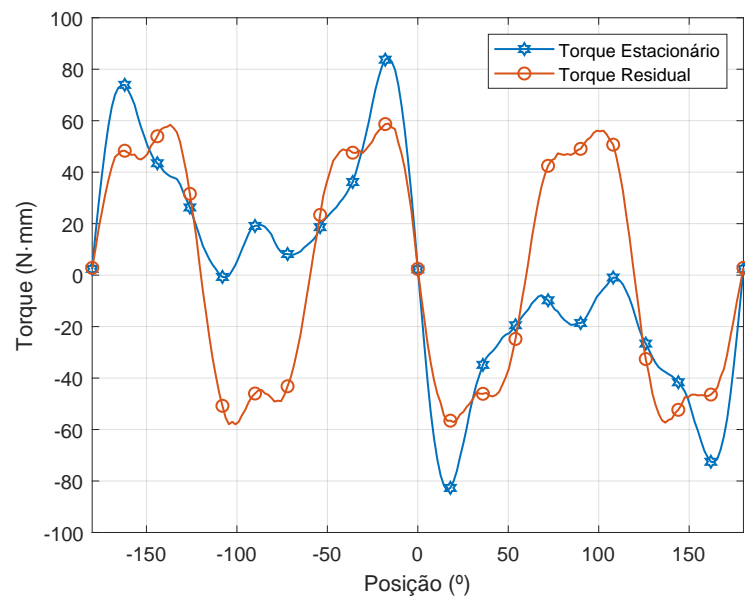
Figura 43: Deslocamento do rotor ao longo do tempo.



Fonte: Produzido pelo autor.

Em seguida foi feita a verificação do funcionamento do motor completo, duas configurações distintas de simulações do tipo transiente foram construídas, uma para estudar o torque estático do motor e outra para a resposta dinâmica do sistema. Isso é necessário, pois o elemento *Band* em cada uma dessas simulações precisa ser configurado de forma distinta. Para analisar as características estáticas a *Band* foi configurada para realizar uma rotação completa, o resultado dessa simulação pode ser observado na Figura 44.

Figura 44: Característica estática do motor.



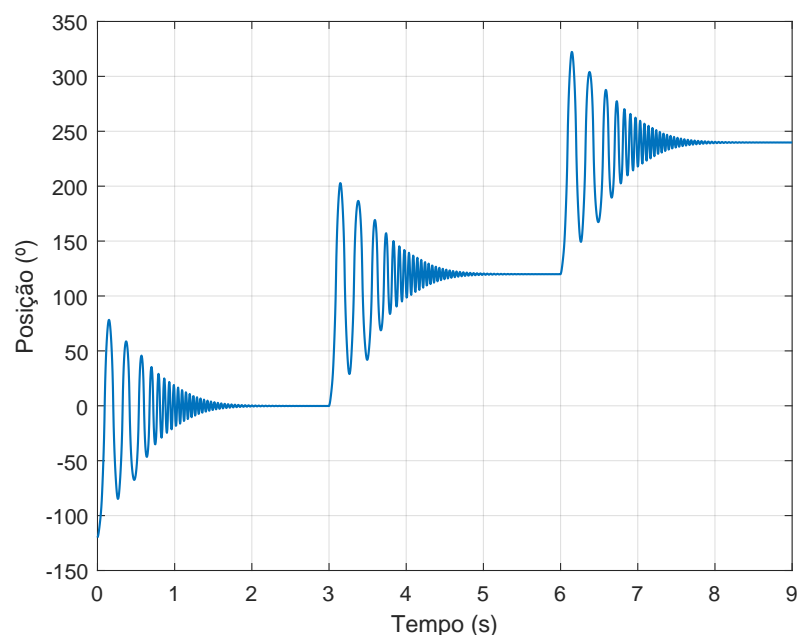
Fonte: Produzido pelo autor.

Nessa simulação o acionamento é mantido fixo durante toda a rotação, a posição 0° indica o ângulo no qual o rotor está alinhado com o polo do estator cujo campo está sendo reforçado. O torque estacionário é máximo em ângulos próximos e decai à medida que o rotor se aproxima do próximo polo, uma vez que ambos os outros polos estão com o campo magnético enfraquecido. Há um vale em -120° e 120° indicando que o rotor passou pelos polos enfraquecidos e com isso há a inversão no sentido do torque.

A curva do torque residual já apresenta um comportamento diferente ao cruzar os polos adjacentes, uma vez que nesse estado o motor está desenergizado e com isso há a ação apenas do campo magnético estabelecido pelo ímã permanente. Como todos os ímãs foram magnetização com o mesmo sentido o que ocorria no torque estático não ocorre mais, pois todos os polos estão atraindo o rotor com a mesma intensidade. Assim nos ângulos em que o rotor se desloca em meio passo (60°) ocorre a inversão do torque. Ao comparar ambas as curvas nota-se que o torque residual possui um valor máximo próximo do valor máximo do torque estacionário o que difere dos modelos convencionais, no qual esse valor é em média 20 % (GIERAS, 2002).

Para analisar a comportamento do motor durante seu funcionamento o elemento *Band* foi configurado para representar um sistema dinâmico. Nessa simulação o acionamento foi feito com um período de 9 segundos, no qual o campo magnético de uma fase é reforçado enquanto as outras duas são enfraquecidas por 3 segundos. Na Figura 45 está representado graficamente o deslocamento do rotor durante esse teste, para facilitar a interpretação desse resultado os polos do estator foram posicionado em -120° , 0° e 120° .

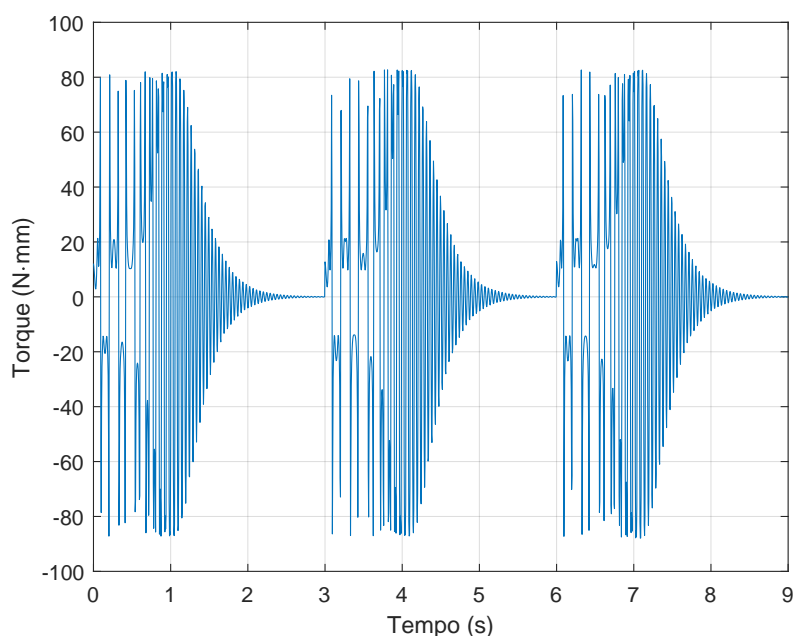
Figura 45: Deslocamento do rotor.



Fonte: Produzido pelo autor.

O ângulo inicial utilizado para o rotor foi de -120° fazendo com que a simulação inicie com ele alinhado a um dos polos do estator. É possível observar que ao ser acionado o rotor se desloca para o próximo polo, mas em decorrência da inércia do rotor ultrapassa o ponto de equilíbrio dando início a uma resposta oscilatória em torno do polo no qual o campo magnético está sendo intensificado. Na Figura 46 está apresentado o torque obtido através desse teste.

Figura 46: Torque do motor.



Fonte: Produzido pelo autor.

Como pode ser observado durante os primeiros ciclos o torque apresenta um comportamento diferente do que ocorre nos últimos ciclos. Isso ocorre devido ao deslocamento do rotor, uma vez que nos ciclos iniciais o rotor ao se afastar do ponto de equilíbrio cruza na extremidade oposta o polo do estator que apresenta o mesmo sentido de magnetização, fazendo com que ele seja repellido. Isso faz com que o torque apresente transições mais súbitas, as quais desaparecem a medida que a oscilação diminui e consequentemente o rotor não mais cruza esse polo que o repele.

Dessa forma foi possível constatar que utilizando os parâmetros construtivos escolhidos inicialmente é possível fazer com que esse motor de passos se realize os passos. Entretanto a corrente de excitação e a distância entre o rotor e o estator foram determinadas de forma arbitrária e dessa forma também necessitam ser estudadas e dimensionadas corretamente. Além disso observou-se que a distância interna entre as faces do núcleo e dos enrolamentos apresenta uma maior influencia durante o enfraquecimento do campo magnético e dessa forma faz-se necessário analisar seu impacto no desempenho do motor.

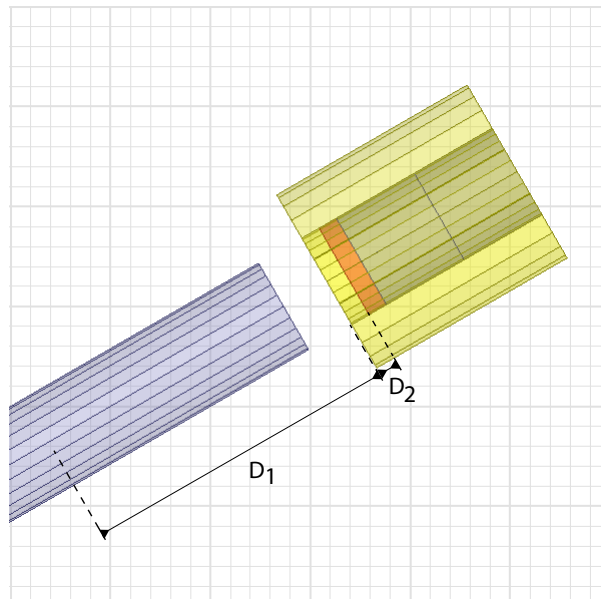
Assim, com o objetivo de compreender melhor a influência dessas variáveis no desempenho do motor foram organizadas simulações do tipo transiente nas quais o torque e o deslocamento do rotor foram avaliados, nela as variáveis construtivas foram variadas de acordo com os valores apresentados na Tabela 3, sendo D_1 a distância interna entre o núcleo e os enrolamentos e D_2 a distância entre o polo do estator e o centro do motor, como indicado na Figura 47.

Tabela 3: Valores utilizados na varredura paramétrica.

	Corrente de excitação (A)	D_1 (mm)	D_2 (mm)
Mínimo	3	0	22
Máximo	5	3	27
Passo	0,5	1	1

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 47: Ilustração das variáveis construtivas.



Fonte: Produzido pelo autor.

6 Resultados e Discussões

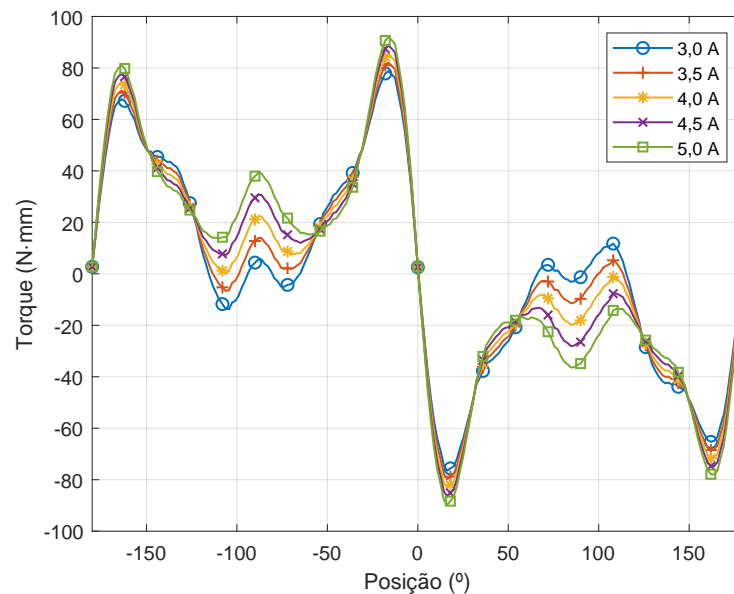
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através dos testes paramétricos, como descrito anteriormente as variáveis foram: corrente de excitação (3 A a 5 A), distância interna D_1 (0 mm a 3 mm) e a distância entre os polos do rotor e estator D_2 (22 mm a 27 mm). Essas análises foram divididas de acordo com o tipo de simulação e parâmetro avaliado.

6.1 Características Estáticas

6.1.1 Torque Estacionário

A primeira característica a ser avaliada é o torque estacionário, para isso utilizou-se a configuração, no qual o elemento *Band* força o deslocamento do rotor a uma velocidade constante. Na Figura 48 está apresentando o torque estacionário do motor ao variar a corrente de alimentação, nele o polo do estator cujo campo está sendo reforçado foi posicionado em 0° .

Figura 48: Variação do torque estacionário em função da corrente.



Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 4: Valor máximo do torque estacionário em função da corrente.

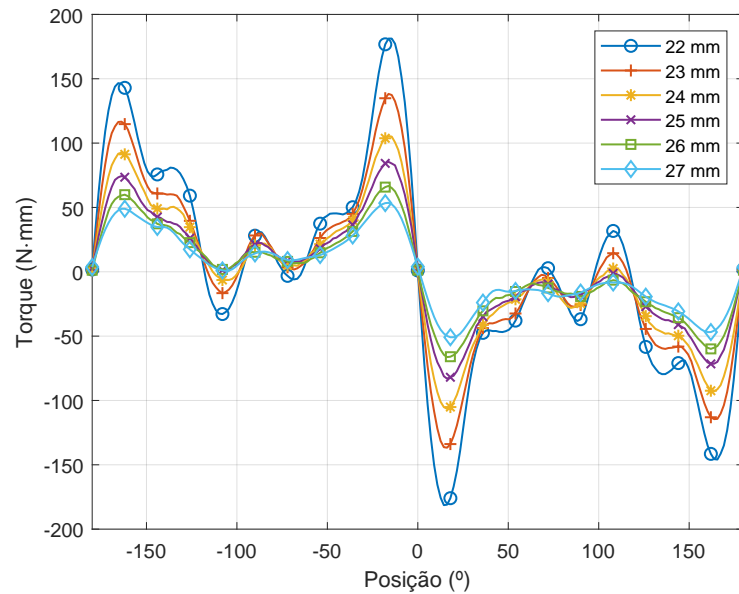
Corrente (A)	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Torque Máximo (N·mm)	78,77	82,10	85,42	88,75	92,07

Fonte: Produzido pelo autor.

Na Tabela 4 está apresentado os valores máximos de torque. Como pode ser obser-

vado há uma maior influência da corrente nos trechos em que o rotor cruza os polos que estão sendo enfraquecidos ($\pm 60^\circ$ e $\pm 120^\circ$), sendo a média de variação igual a $6,5 \text{ N}\cdot\text{mm}$ nesse trecho e de $3,33 \text{ N}\cdot\text{mm}$ nos valores máximos de torque. Já a variação da distância do polo do estator apresenta um maior impacto no torque produzido pelo motor, como ilustrado na Figura 49.

Figura 49: Variação do torque estacionário em função da distância D_1 .



Fonte: Produzido pelo autor.

Isso ocorre devido ao decaimento exponencial apresentado pelo campo magnético ao se variar a distância. Assim, para 22 mm os polos do estator se encontram mais próximos do rotor e como resultado disso o torque alcança seu maior valor ($181,2 \text{ N}\cdot\text{mm}$), uma vez que o rotor é atraído e repelido com maior intensidade. Na Tabela 5 estão apresentados os valores máximos de torque atingidos pelo motor.

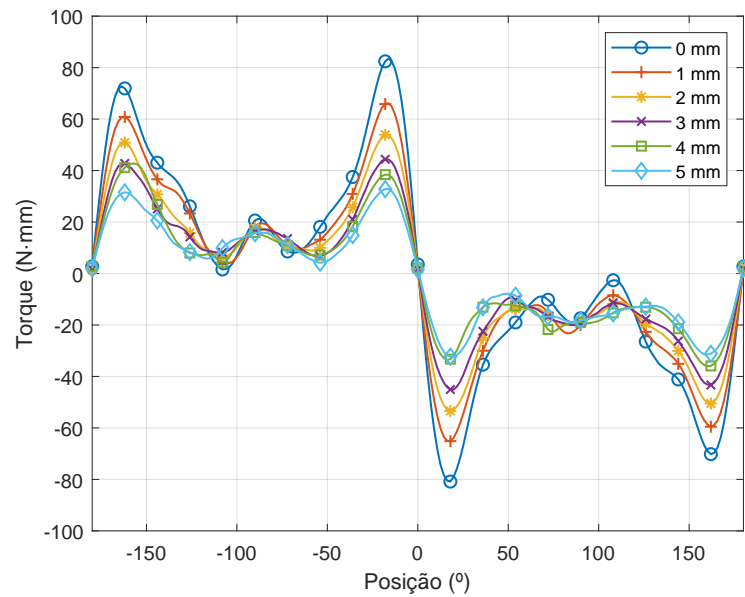
Tabela 5: Valor máximo do torque estacionário em função da distância D_1 .

D_1 (mm)	22	23	24	25	26	27
Torque Máximo ($\text{N}\cdot\text{mm}$)	181,20	138,20	105,00	85,42	66,71	53,57

Fonte: Produzido pelo autor.

Como pode ser observado na Figura 50 ao variar a distância interna D_2 o torque apresenta um comportamento semelhante ao que foi constatado ao variar D_1 , mas com uma menor intensidade. Para os trechos nos entornos dos polos adjacentes há uma menor variação isso se dá pois ao afastarmos o ímã estamos reduzido a influência do campo magnético produzido diretamente por ele. Os valores máximos de torque estão apresentados na Tabela 6.

Figura 50: Variação do torque estacionário em função da distância D_2 .



Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 6: Valor máximo do torque estacionário em função da distância D_2 .

D_2 (mm)	0	1	2	3	4	5
Torque Máximo (N·mm)	83,53	66,19	53,90	44,38	38,42	32,84

Fonte: Produzido pelo autor.

No caso do torque estacionário é possível obter novas variações ao alterar os sinais de excitação, o que pode ser interessante nos casos em que se deseja manter uma carga fixa. Na Tabela 7 está apresentado as diferentes formas de acionamento, na tabela o simbolo de “ + ” indica que o polo está sendo reforçado, o “ - ” que o polo está sendo enfraquecido e o “ 0 ” que o enrolamento estão desenergizado.

Tabela 7: Formas de acionamento investigadas.

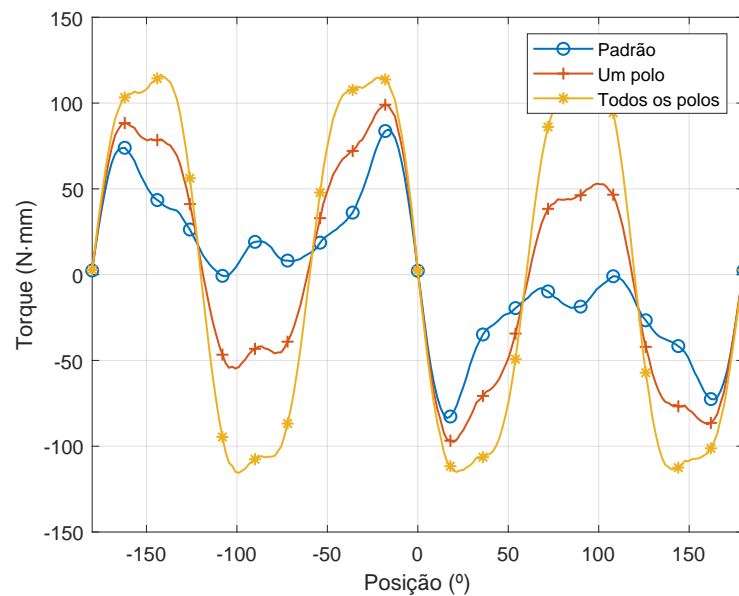
Acionamento	Fase A	Fase B	Face C
Padrão	+	-	-
Um polo	+	0	0
Todos os polos	+	+	+

Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 51 pode ser observado o torque estacionário resultante de cada uma dessas formas de acionamento e na Tabela 8 os valores máximos de torque para cada curva. Como apresentado na Tabela 7 foram variadas as formas como os polos adjacentes são alimentados, uma vez que para elevar o torque estacionário nessa configuração é feito

uso do fato de que devido à forma como os ímãs são posicionados um dos polos do rotor será naturalmente repellido por dois polo ao mesmo tempo que é atraído na extremidade oposta.

Figura 51: Comparativo entre diferentes formas de acionamento no torque estacionário.



Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 8: Valores utilizados na varredura paramétrica.

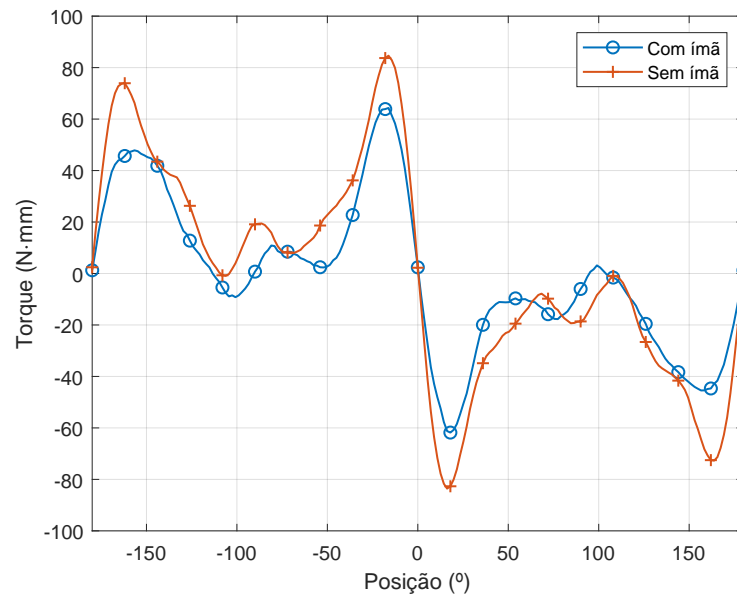
Acionamento	Padrão	Um polo	Todos os polos
Torque Máximo (N·mm)	84,63	98,34	114,40

Fonte: Produzido pelo autor.

Assim, do gráfico é possível observar o aumento do torque a medida que o campo magnético dos polos que repelem é aumentado, no qual o maior valor o caso em que todos os polos do estator têm seu campo reforçado. No acionamento em que apenas um polo é energizado é possível observar um aumento no torque quando comparado à forma padrão de acionamento, mas com um menor gasto de energia.

O último teste feito consistiu em analisar o torque estacionário com relação aos ímãs no estator. O resultado desse teste pode ser observado na Figura 52, como esperado a adição do ímã implica no aumento do torque, no qual o valor máximo com o ímã foi 84,63 N·mm e sem o ímã 64,37 N·mm.

Figura 52: Comparação do torque estacionário em função dos ímãs no estator.

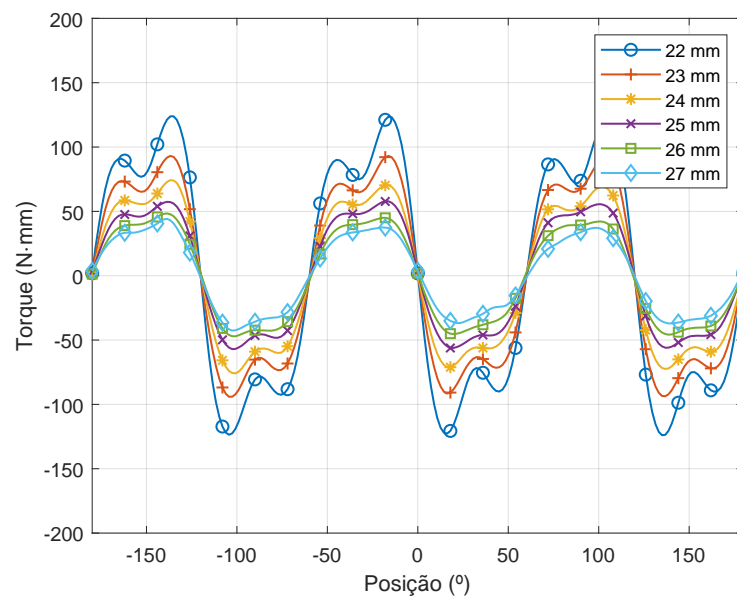


Fonte: Produzido pelo autor.

6.1.2 Torque Residual

De forma semelhante à análise que foi feita no torque estacionário, o torque residual também foi avaliado em função das distâncias D_1 e D_2 . Para esse teste os enrolamentos foram desenergizados restando apenas o campo magnético estabelecido pelos ímãs. Na Figura 53 pode ser visualizado a variação desse torque em função da distância entre os polos e na Tabela 9 estão registrados os valores máximos de torque.

Figura 53: Variação do torque residual em função da distância D_1 .



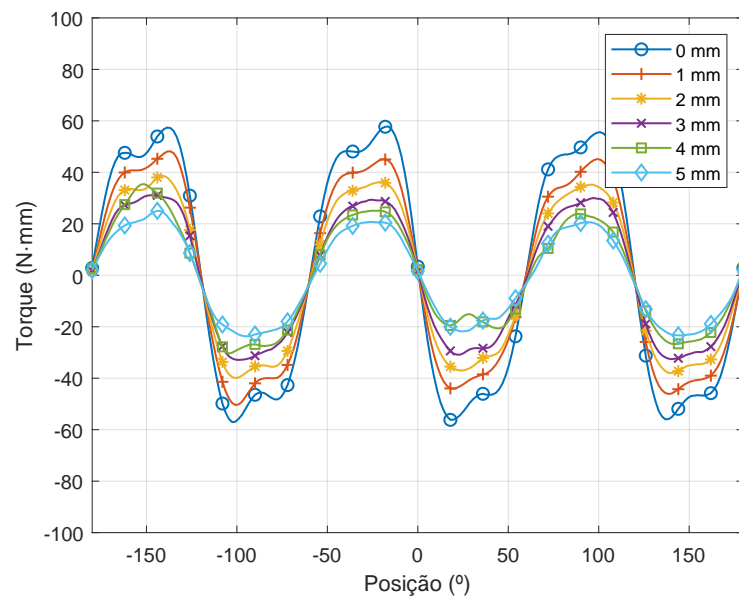
Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 9: Valor máximo do torque residual em função da distância D_1 .

D_1 (mm)	22	23	24	25	26	27
Torque Máximo (N·mm)	123,60	93,11	70,34	57,82	45,00	37,51

Fonte: Produzido pelo autor.

Assim como ocorreu com o torque estacionário ao aproximar os polos do estator ocorre um aumento na intensidade magnética que cruza o entreferro aumentando o torque. De um modo geral devido a simetria que existe a cada 120° a curva se repete três vezes ao longo de uma volta sendo os pontos em que o torque possui magnitude igual 0 N·mm os locais nos quais estão posicionados os polos. Os vales que ocorrem em $\pm 30^\circ$, $\pm 90^\circ$ e $\pm 150^\circ$ são resultado da força de repulsão por um dos polos que aumenta de acordo com a redução de D_1 . Na Figura 54 está apresentado o resultado da varredura paramétrica feita em D_2 , da mesma forma como ocorreu com o torque estacionário o aumento de D_2 resulta uma resposta similar a D_1 , mas com magnitudes menores, como pode ser observado ao comparar a Tabelas 9 e 10.

Figura 54: Variação do torque residual em função da distância D_2 .

Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 10: Valor máximo do torque residual em função da distância D_2 .

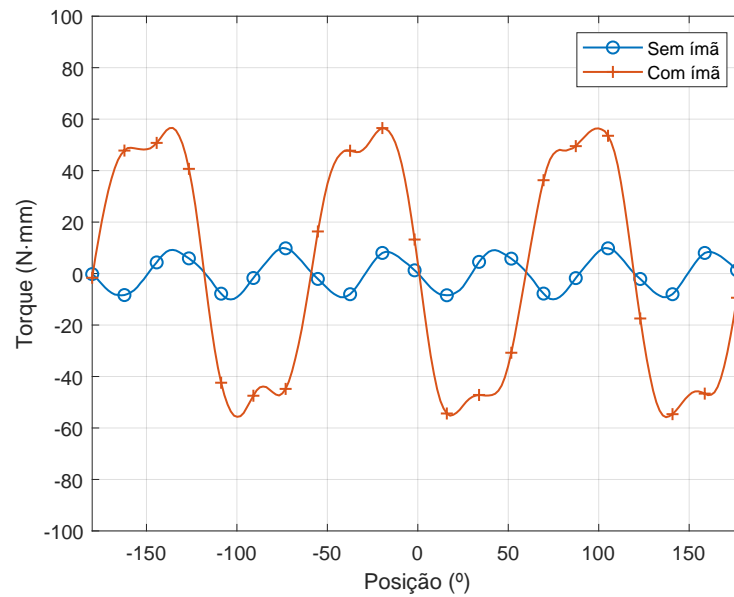
D_2 (mm)	0	1	2	3	4	5
Torque Máximo (N·mm)	57,82	45,06	36,37	29,17	25,07	20,66

Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 55 está ilustrado as curvas de torque residual para os casos em que há ou não ímãs permanentes posicionados no estator. Uma vez que os ímãs permanentes

para esse tipo de torque atuam diretamente como fontes e como resultado o caso sem ímã no estator apresenta um torque máximo de 8,44 N·mm, enquanto o modelo com ímãs chega a atingir 57,85 N·mm. O grande número de ciclos no teste sem ímã ocorre devido a atração do rotor pelos polos do estator que agora possuem apenas o núcleo de ferrite e dessa forma atraem ambas as extremidades do rotor.

Figura 55: Comparativo do torque residual com relação ao ímã permanente.



Fonte: Produzido pelo autor.

6.2 Características Dinâmicas

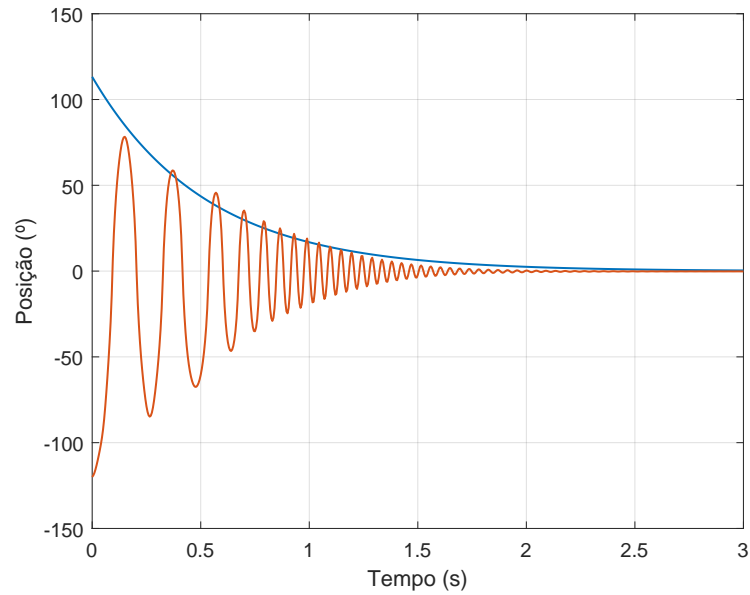
Nesta seção parâmetros como tempo de pico e tempo de assentamento serão observados ao realizar as varreduras paramétricas, para isso o elemento *Band* foi configurado para simular um sistema dinâmico. Diferente do que foi feito ao analisar as características estáticas no qual as distâncias D_1 e D_2 foram estudadas separadas, sentiu-se a necessidade de analisar as combinações entre essas duas distâncias, visto que as variações no comportamento do motor foram menos previsíveis.

Em decorrência do elevado número de simulações que precisam ser realizadas foi necessário modificar algumas configurações nas simulações. Primeiramente reduziu-se o tempo simulado para 1 segundo ao invés de 3 segundos e as etapas para cada passo do motor foram separadas em 3 simulações, em cada uma delas o rotor encontra-se inicialmente alinhado a um dos polos do estator.

Para obter a curva final que será analisada, foi feita a média ponto a ponto entre as 3 curvas e utilizando o método dos mínimos quadrados, modelou-se o decaimento a partir dos picos presentes na oscilação permitindo que o tempo de assentamento seja

estimado e facilitando a visualização do amortecimento dessa oscilação. Na Figura 56 está apresentado um exemplo dessa curva de amortecimento estimada.

Figura 56: Exemplo de curva de amortecimento do passo do motor.

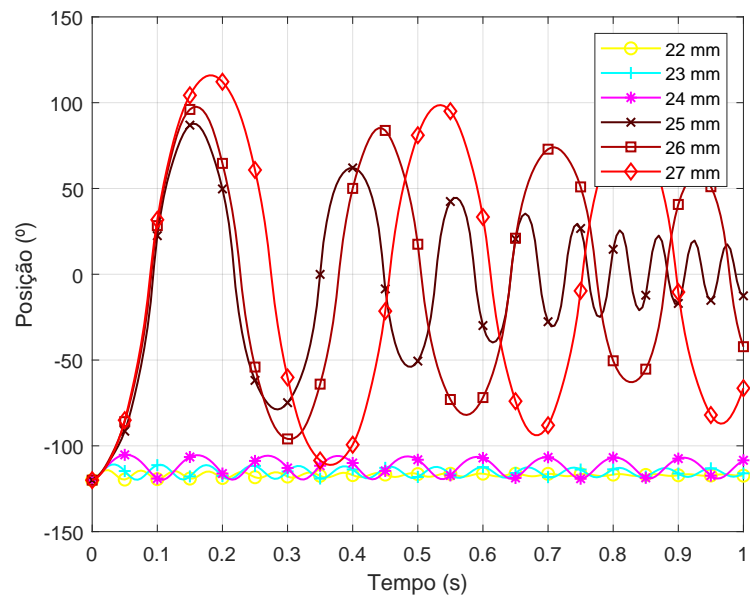


Fonte: Produzido pelo autor.

6.2.1 Comparativo Distancias

Primeiramente foi feita a análise do sistema considerando a variação apenas de D_1 , o resultado desse teste pode ser observado na Figura 57. Graficamente é possível constatar que há uma grande diferença na oscilação para cada valor de D_1 .

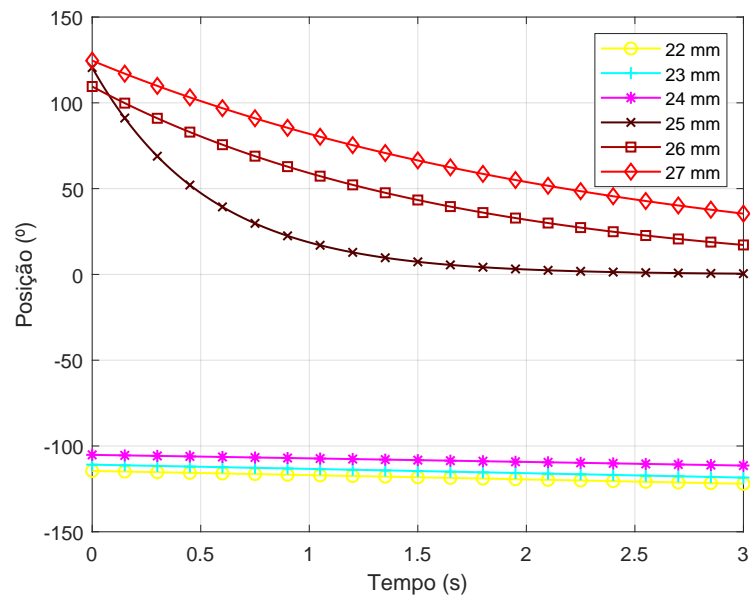
Figura 57: Dinâmica do motor em função de D_1 .



Fonte: Produzido pelo autor.

Na Figura 58 estão apresentadas as curvas de amortecimento para esse teste, nele observou-se que para valores entre 22 mm e 24 mm não foi possível executar o deslocamento do rotor. Já com 25 mm tem-se a configuração com o menor tempo de assentamento (2,1968 segundos), enquanto que para os dois valores de D_1 , apesar de conseguir deslocar o rotor para o próximo polos apresentam uma curva menos acentuada e com isso um tempo de assentamento maior. Os valores de pico, tempo de pico e tempo de assentamento foram organizados na Tabela 11.

Figura 58: Curva de amortecimento do passo do motor em função de D_1 .



Fonte: Produzido pelo autor.

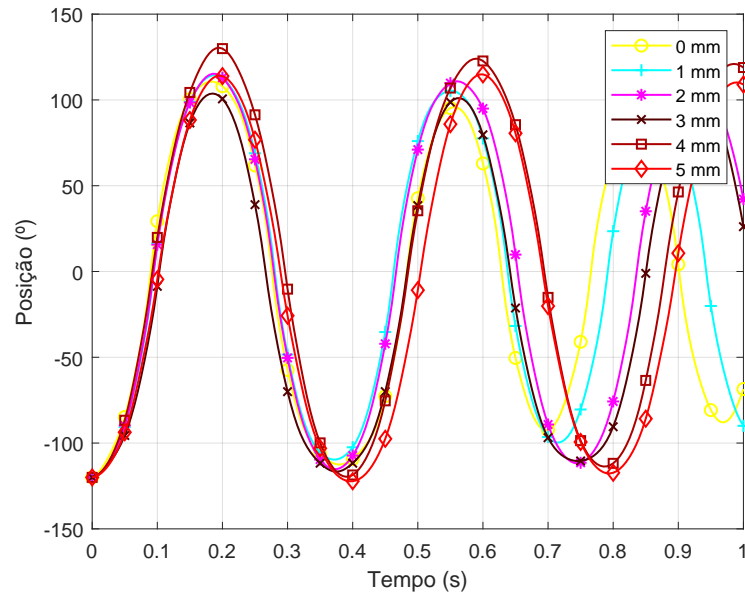
Tabela 11: Características dinâmicas em função da distância D_1 .

D_1 (mm)	Pico (°)	Tempo de Pico (ms)	Tempo de Assentamento (s)
22	-	-	-
23	-	-	-
24	-	-	-
25	87,759	155	2,1968
26	97,623	160	6,4821
27	115,925	180	9,8560

Fonte: Produzido pelo autor.

O primeiro teste, no qual foi feita a variação de D_1 e D_2 está apresentada na Figura 59, nele manteve-se fixo o valor de $D_1 = 27$ mm enquanto variou-se a distância interna D_2 entre 0 mm e 5 mm.

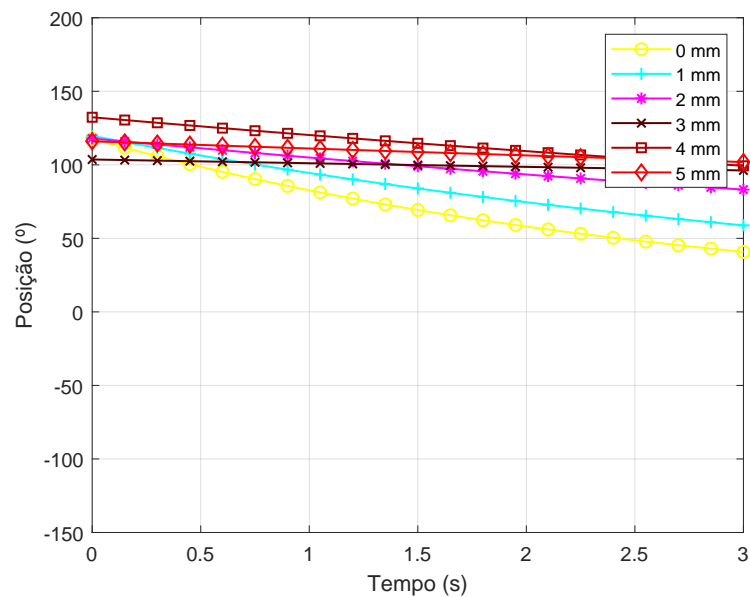
Figura 59: Dinâmica do motor para $D_1 = 27$ mm e D_2 sendo variado.



Fonte: Produzido pelo autor.

Diferente do que ocorreu na análise anterior, todas variantes conseguiram deslocar o rotor da posição original. Como pode ser observado na Figura 60 o decaimento dessas oscilações é quase linear, no qual é possível destacar os resultados obtidos com $D_2 = 0$ mm e $D_2 = 1$ mm por possuírem as maiores inclinações. Apesar disso, como apresentado na Tabela 12 os valores calculados para o tempo de assentamento apresentam valores bem maiores do que obtidos apenas ao variar D_1 .

Figura 60: Curvas de amortecimento para $D_1 = 27$ mm e D_2 sendo variado.



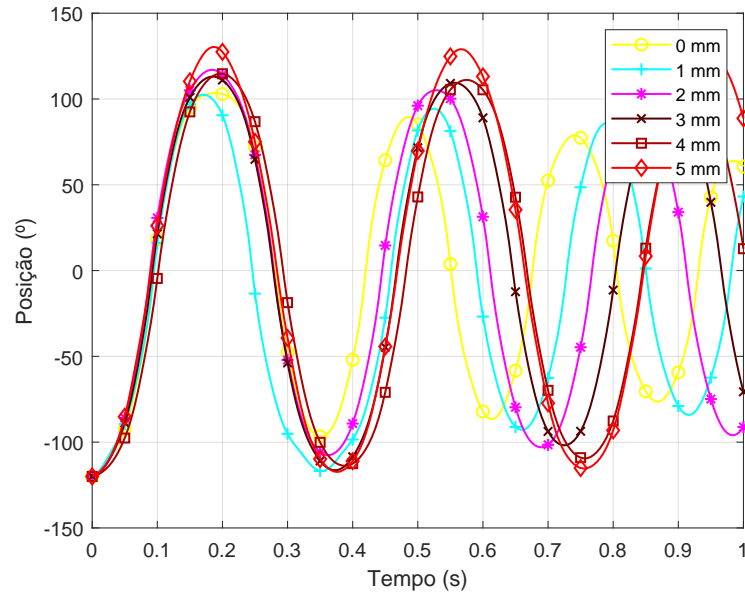
Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 12: Características dinâmicas para $D_1 = 27$ mm e D_2 sendo variado.

D_2 (mm)	Pico ($^\circ$)	Tempo de Pico (ms)	Tempo de Assentamento (s)
0	110,637	185	11,5366
1	114,376	190	17,2809
2	115,240	185	35,0052
3	103,715	185	159,0796
4	130,397	195	43,8351
5	114,149	195	93,8877

Fonte: Produzido pelo autor.

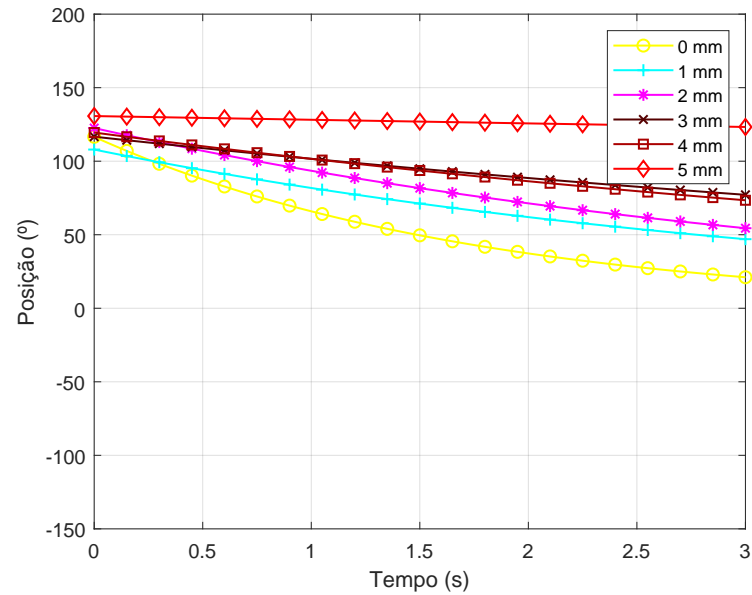
De modo semelhante ao que ocorreu para $D_1 = 27$ mm, todas as variações para $D_1 = 26$ mm deslocaram o rotor para a posição desejada, como ilustrado na Figura 61.

Figura 61: Dinâmica do motor para $D_1 = 26$ mm e D_2 sendo variado.

Fonte: Produzido pelo autor.

Entretanto nesta simulação observa-se que algumas curvas apresentam um decaimento maior, essa diferença no amortecimento pode ser melhor observada na Figura 62. Com exceção de $D_2 = 5$ mm que apresentou um tempo de assentamento de aproximadamente 215 segundos, todos outros valores apresentaram uma redução no tempo de assentamento, além disso a resposta dinâmica para $D_2 = 0$ mm começa apresentar um comportamento exponencial. Uma possível justificativa para isso é o fato de nesse ensaio o estator está mais próximo do rotor do que no teste anterior.

Figura 62: Curvas de amortecimento para $D_1 = 26$ mm e D_2 sendo variado.



Fonte: Produzido pelo autor.

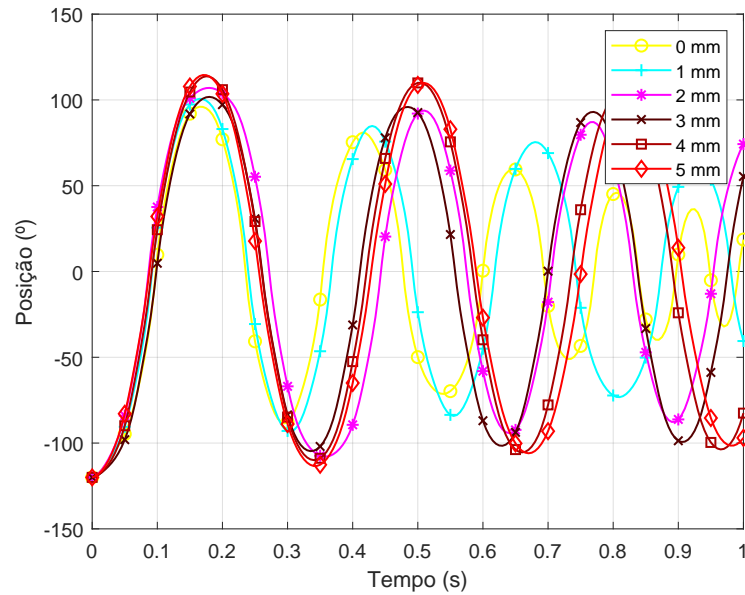
Tabela 13: Características dinâmicas para $D_1 = 26$ mm e D_2 sendo variado..

D_2 (mm)	Pico ($^{\circ}$)	Tempo de Pico (ms)	Tempo de Assentamento (s)
0	103,427	190	7,1345
1	102,519	170	14,3852
2	117,023	185	15,2150
3	113,082	185	29,4987
4	114,720	195	25,2075
5	130,334	185	214,7664

Fonte: Produzido pelo autor.

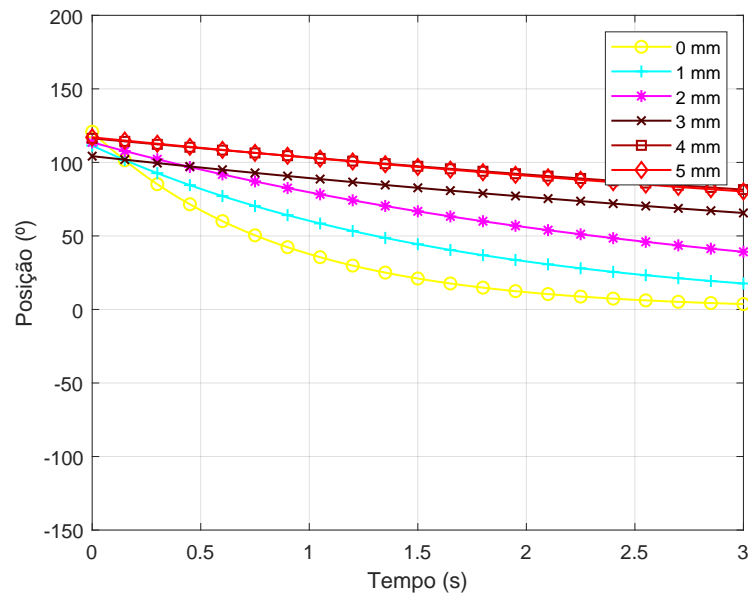
Na Figura 63 está ilustrado os resultados para $D_1 = 25$ mm, de forma semelhante ao que tem ocorrido anteriormente distâncias menores entre os ímãs permanentes têm apresentado menores tempos de assentamento.

Figura 63: Dinâmica do motor para $D_1 = 25$ mm e D_2 sendo variado.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 64: Curvas de amortecimento para $D_1 = 25$ mm e D_2 sendo variado.



Fonte: Produzido pelo autor.

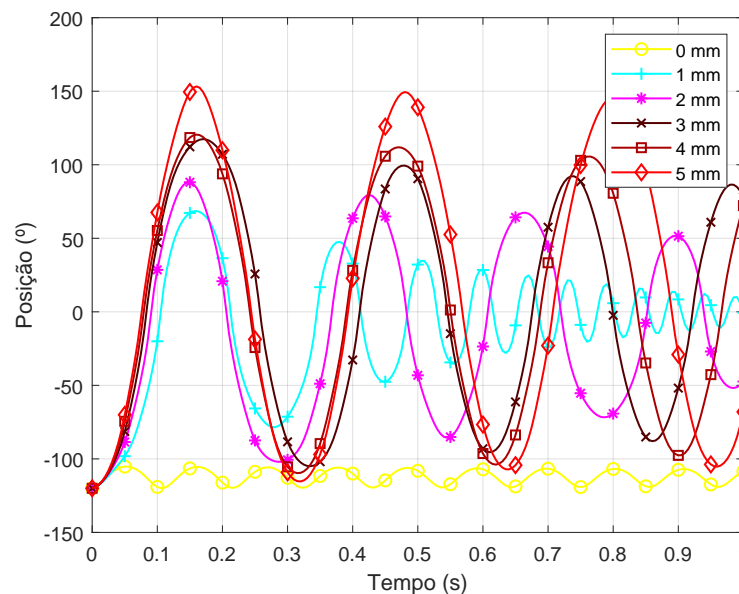
As curvas de amortecimento ilustradas na Figura 64 de um modo geral apresentam um aumento na inclinação, sendo esse o primeiro conjunto de combinações que não possui um valor D_2 com tempo de assentamento maior do que 60 segundos. Da Tabela 14 também é possível observar uma redução no tempo de assentamento quando comparado aos dados anteriores, no qual apenas o ocorre um aumento para $D_2 = 4$ mm.

Tabela 14: Características dinâmicas para $D_1 = 25$ mm e D_2 sendo variado.

D_2 (mm)	Pico ($^\circ$)	Tempo de Pico (ms)	Tempo de Assentamento (s)
0	96,023	165	3,5198
1	100,648	165	6,5505
2	107,008	180	11,3851
3	101,766	180	25,6220
4	113,769	175	34,2527
5	114,513	170	32,3239

Fonte: Produzido pelo autor.

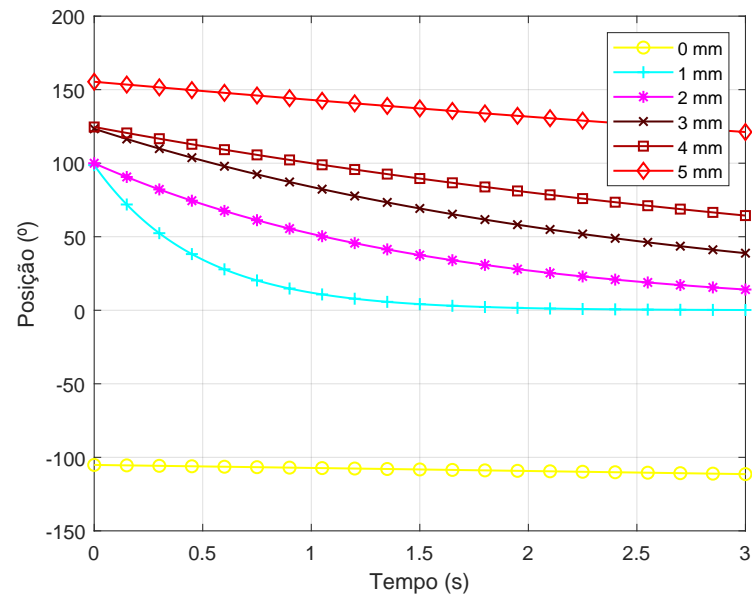
Os resultados das combinações com $D_1 = 24$ mm podem ser observadas na Figura 65, nele apenas a configuração com $D_2 = 0$ mm não conseguiu deslocar o rotor. Além disso diferente do que ocorreu anteriormente os valores de pico apresentaram uma grande variação, no qual para $D_2 = 1$ mm o motor possui um pico de $68,5^\circ$ e para $D_2 = 5$ mm um pico de 153° .

Figura 65: Dinâmica do motor para $D_1 = 24$ mm e D_2 sendo variado.

Fonte: Produzido pelo autor.

Ao observar o gráfico da Figura 66 é possível notar um maior distanciamento entre as curvas, mas mantendo a tendência no qual os menores tempos de assentamento são obtidos nas configurações com D_2 menor. Vale destacar que durante o teste em que apenas D_1 foi variado, os valores de D_1 entre 24 mm e 22 mm não deslocaram o rotor para a próxima posição, mas que ao variar D_2 isso já foi possível.

Figura 66: Curvas de amortecimento para $D_1 = 24$ mm e D_2 sendo variado.



Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 15: Características dinâmicas para $D_1 = 24$ mm e D_2 sendo variado.

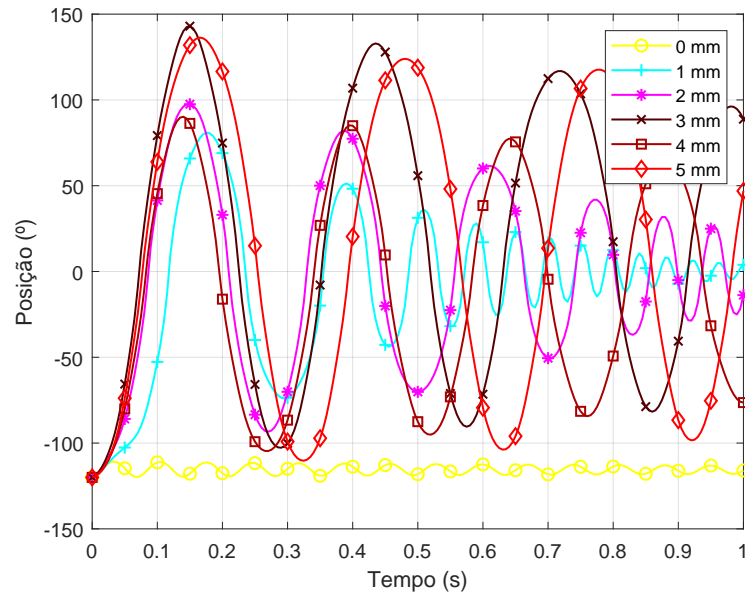
D_2 (mm)	Pico ($^{\circ}$)	Tempo de Pico (ms)	Tempo de Assentamento (s)
0	-	-	-
1	68,530	160	1,8482
2	88,101	150	5,9897
3	117,435	170	10,6939
4	120,531	160	18,7714
5	153,286	160	52,5533

Fonte: Produzido pelo autor.

Os resultados para $D_1 = 23$ mm (Figura 67) apresentam semelhanças com os resultados para $D_1 = 24$ mm, no qual há uma grande variação no valores de pico. Além disso para $D_2 = 0$ mm o motor não foi capaz de movimentar o rotor e a partir $D_1 = 1$ mm o tempo de assentamento tende a aumentar.

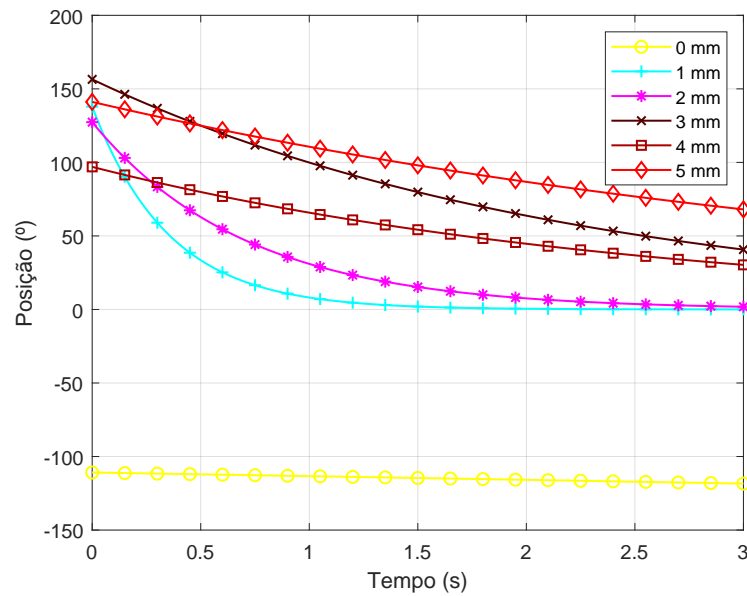
As curvas decaimento para $D_1 = 23$ mm estão apresentadas na Figura 68, nota-se que nesse conjunto mesmo $D_2 = 5$ mm que em simulações anteriores apresentava uma taxa de amortecimento baixa começa a apresentar um decaimento exponencial.

Figura 67: Dinâmica do motor para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 68: Curvas de amortecimento para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado.



Fonte: Produzido pelo autor.

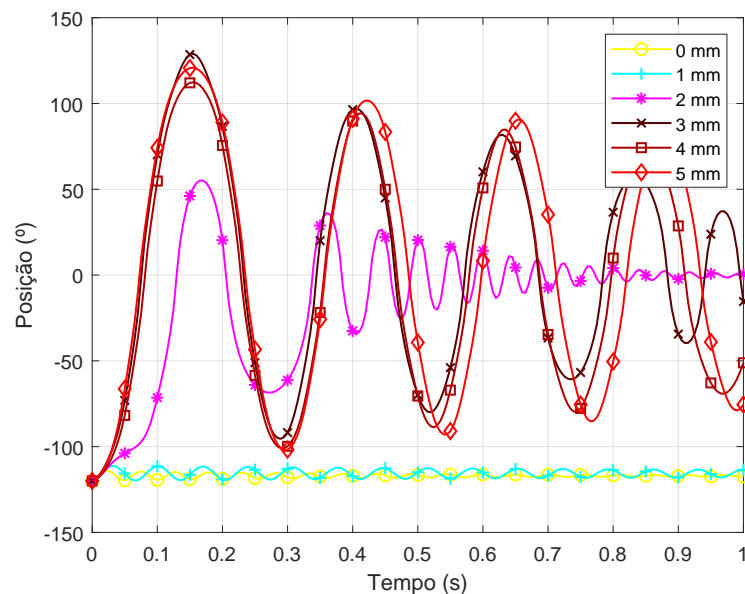
Na Tabela 16 está apresentado de forma resumida os dados referentes a simulação com $D_1 = 23$ mm, nesse teste houve uma redução no tempo de assentamento de todas as combinações quando comparado aos valores obtidos nos testes anteriores.

Tabela 16: Características dinâmicas para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado.

D_2 (mm)	Pico ($^\circ$)	Tempo de Pico (ms)	Tempo de Assentamento (s)
0	-	-	-
1	80,879	175	1,4954
2	97,496	150	2,9396
3	142,994	150	9,7160
4	90,202	140	10,0182
5	136,318	165	17,4994

Fonte: Produzido pelo autor.

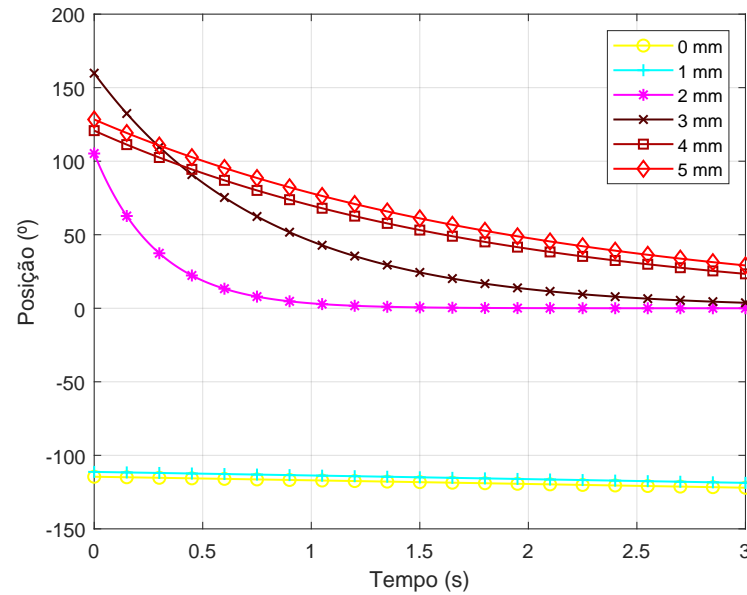
$D_1 = 22$ mm consiste no último conjunto de combinações que foi estudado, como pode ser observado na Figura 69 as configurações com D_1 igual a 0 mm e 1 mm não apresentam o deslocamento do rotor para o próximo passo, por outro lado foram obtidos os menores tempo de assentamento desse conjunto de testes, sendo $D_2 = 2$ mm a configuração com o menor tempo de assentamento.

Figura 69: Dinâmica do motor para $D_1 = 22$ mm e D_2 sendo variado.

Fonte: Produzido pelo autor.

Ao comparar as curvas de amortecimento de $D_1 = 22$ mm com os resultados obtidos nas simulações anteriores é possível observar um aumento na taxa de amortecimento em todas as combinações, no qual pode-se destacar a curva com $D_2 = 2$ mm que apresenta a uma taxa bem maior do que as outras curvas o que implica em um menor tempo de assentamento.

Figura 70: Curvas de amortecimento para $D_1 = 22$ mm e D_2 sendo variado.



Fonte: Produzido pelo autor.

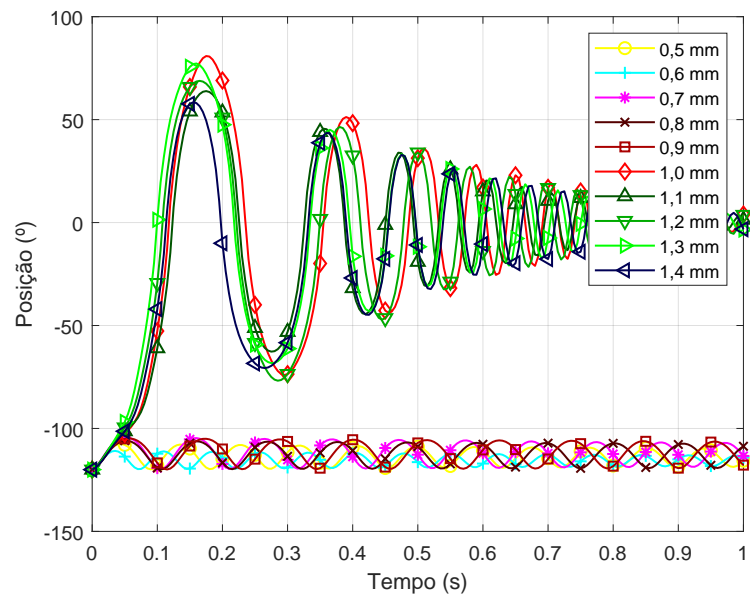
Tabela 17: Características dinâmicas para $D_1 = 22$ mm e D_2 sendo variado.

D_2 (mm)	Pico (°)	Tempo de Pico (ms)	Tempo de Assentamento (s)
0	-	-	-
1	-	-	-
2	55,100	170	1,1494
3	128,969	155	3,4941
4	112,392	155	7,4962
5	120,838	155	8,4155

Fonte: Produzido pelo autor.

Como pode ser observado as curvas com D_1 entre 22 mm e 24 mm apresentaram configurações no qual mudanças súbitas ocorrem entre uma combinação e outra. Dessa forma para investigar melhor esse trecho foram realizadas simulações mantendo $D_1 = 23$ mm e variando a distância D_2 entre 0,5 mm e 2,5 mm, mas com passos de 0,1 mm permitindo observar com maior detalhes a transição no desempenho do motor.

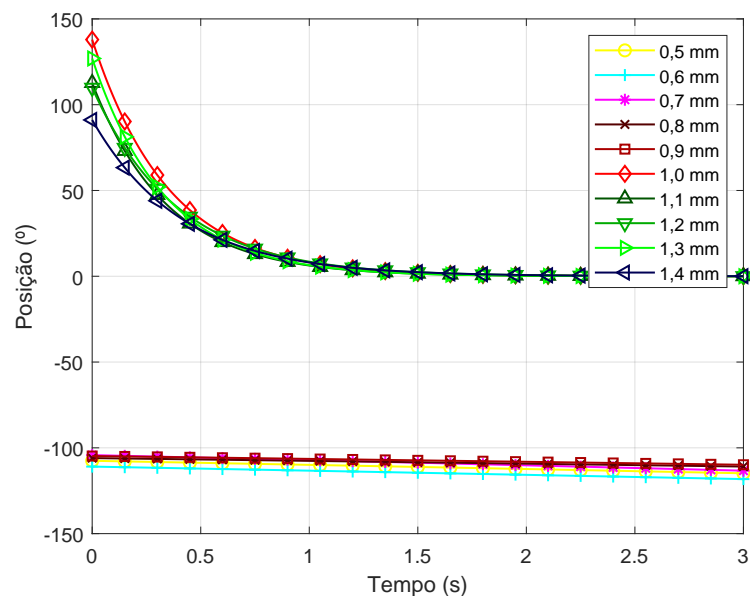
Figura 71: Dinâmica do motor para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado entre 0,5 mm e 1,5 mm.



Fonte: Produzido pelo autor.

Optou-se por utilizar $D_1 = 23$ mm pelo fato de haver duas combinações sequenciais em que houve uma menor variação. Para facilitar a visualização dessa varredura paramétrica os resultados foram divididos nas Figuras 71 e 73. Assim como foi feito anteriormente, para cada uma das respostas dinâmicas foi calculado as curvas de amortecimento as quais estão apresentadas nas Figuras 72 e 74.

Figura 72: Curvas de amortecimento para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado entre 0,5 mm e 1,5 mm.



Fonte: Produzido pelo autor.

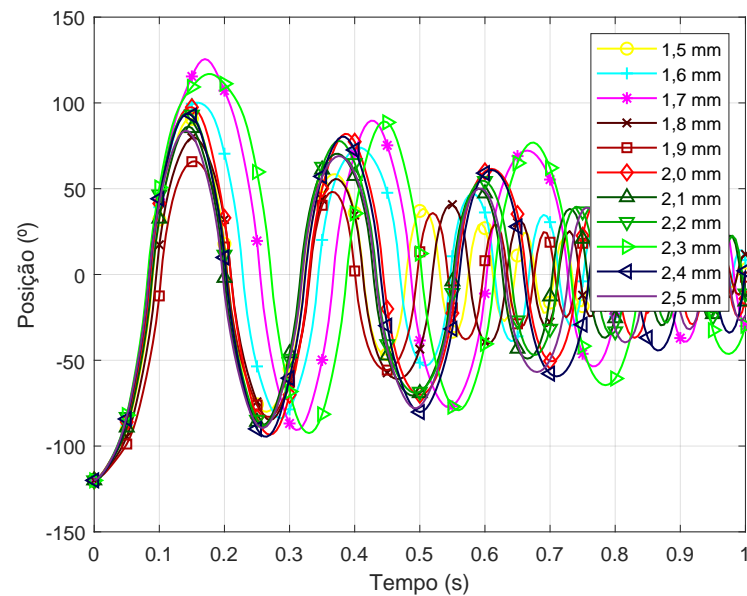
Tabela 18: Características dinâmicas para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado entre 0,5 mm e 1,5 mm.

D_2 (mm)	Pico ($^\circ$)	Tempo de Pico (ms)	Tempo de Assentamento (s)
0,5	—	—	—
0,6	—	—	—
0,7	—	—	—
0,8	—	—	—
0,9	—	—	—
1,0	80,879	175	1,7402
1,1	63,854	175	1,6354
1,2	68,820	165	1,8355
1,3	77,259	160	1,6312
1,4	58,424	155	1,8595
1,5	90,699	145	1,8905

Fonte: Produzido pelo autor.

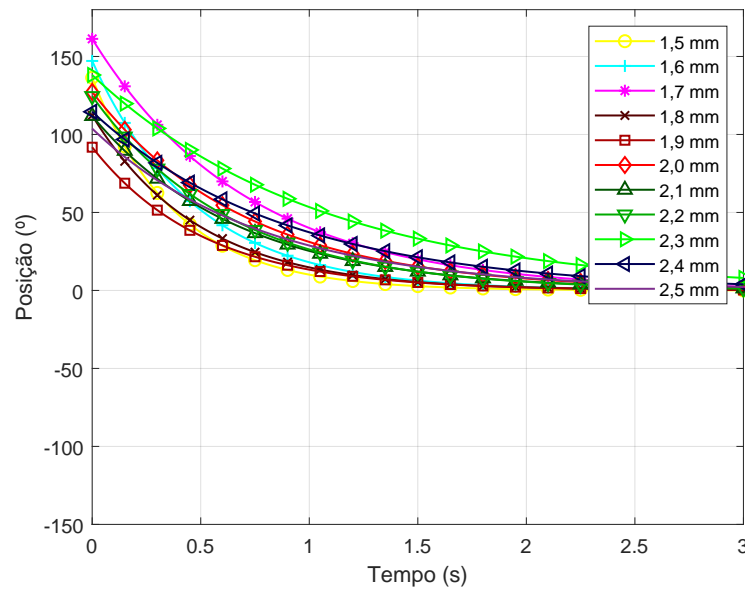
Nesse trecho da simulação é possível observar que as curvas se dividem em dois grupos, no qual apenas pequenas variações foram registradas entre 1,0 mm e 1,5 mm. Já entre 0,5 mm e 0,9 mm não houve o deslocamento do rotor.

Figura 73: Dinâmica do motor para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado entre 1,5 mm e 2,5 mm.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 74: Curvas de amortecimento para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado entre 1,5 mm e 2,5 mm.



Fonte: Produzido pelo autor.

Neste segundo trecho há uma maior variação nos valores de pico, além disso ao observar os valores apresentados na Tabela 19 nota-se que há um aumento gradual do tempo de assentamento.

Tabela 19: Características dinâmicas para $D_1 = 23$ mm e D_2 sendo variado entre 1,5 mm e 2,5 mm.

D_2 (mm)	Pico ($^\circ$)	Tempo de Pico (ms)	Tempo de Assentamento (s)
1,5	90,699	145	1,8905
1,6	100,124	160	2,3790
1,7	125,556	170	3,6473
1,8	79,811	155	2,3284
1,9	65,982	155	2,3428
2,0	97,496	150	3,4393
2,1	86,242	145	3,1771
2,2	94,176	145	3,1001
2,3	116,850	175	5,1901
2,4	93,672	145	4,2233
2,5	83,824	140	3,6205

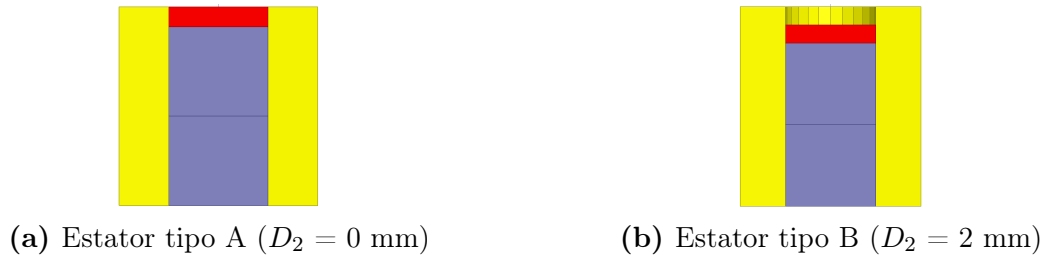
Fonte: Produzido pelo autor.

6.2.2 Comparativo Corrente

A corrente de excitação foi analisada separadamente, pois é inviável adicionar a corrente junto às variações D_1 e D_2 devido ao elevado número de combinações que teriam

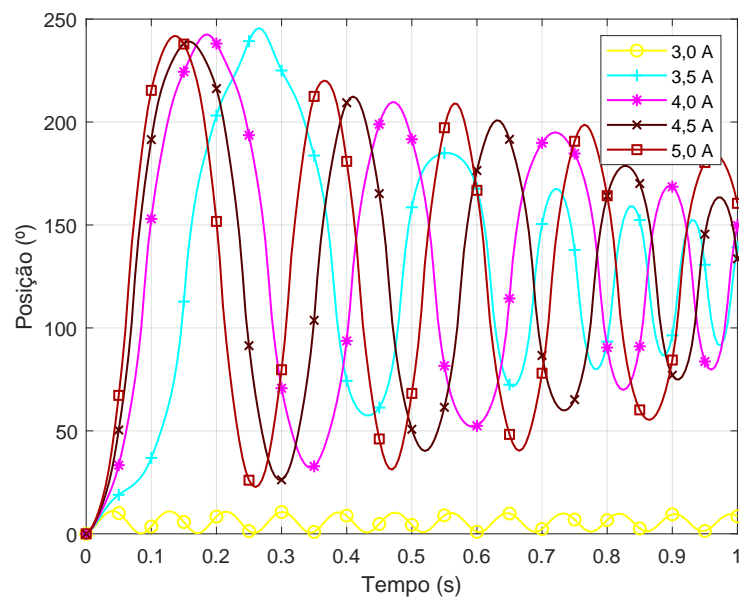
que ser estudados. Assim, duas configurações de estator foram definidas uma com $D_2 = 0$ mm, ou seja, sem espaçamento interno e outra configuração com $D_2 = 2$ mm, esse valor foi escolhido, pois para $D_2 = 2$ mm todas as combinações de D_1 eram capazes de deslocar o rotor corretamente para a próxima posição. Em ambos os casos D_1 foi mantido com o valor inicial (25 mm). Esses modelos de estator estão ilustrados na Figura 75.

Figura 75: Modelos de estator utilizados para comparar as correntes de excitação.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 76: Dinâmica do motor para $D_2 = 0$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 5 A.



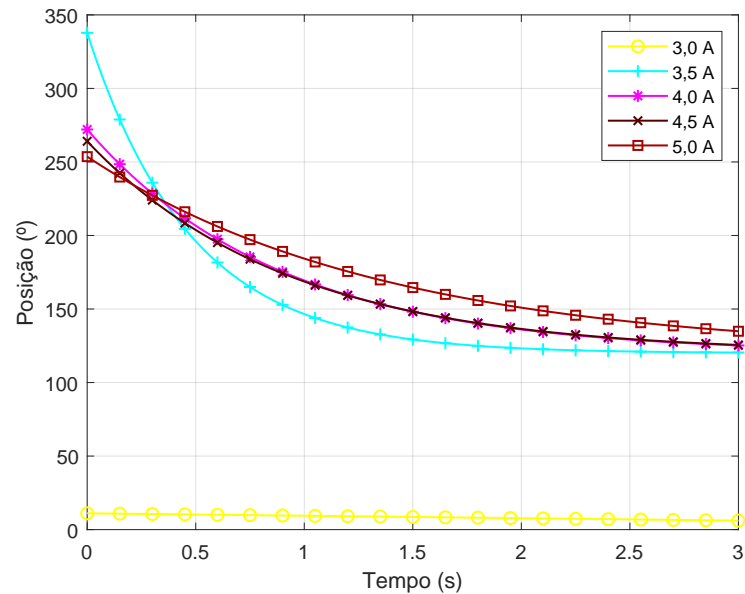
Fonte: Produzido pelo autor.

O resultado da simulação com o estator tipo A com a corrente variando entre 3 A e 5 A pode ser observado na Figura 76, nessa simulação a corrente de 3 A não foi suficiente para fazer com que o rotor se deslocasse. Para uma corrente de 3,5 A o motor já é capaz de realizar o movimento desejado, ao analisar a resposta produzida é possível notar uma leve distorção no primeiro ciclo da oscilação.

As curvas de amortecimento foram estimadas assim como foi feito ao analisar o

comportamento do motor com relação às distâncias D_1 e D_2 . Essas curvas estão ilustradas na Figura 77, do gráfico as respostas do sistema para correntes entre 4 A e 5 A apresentam comportamento similares, sendo a curva de 5 A a que apresenta o transitório mais lento (5,7435 segundos).

Figura 77: Curvas de amortecimento para $D_2 = 0$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 5 A.



Fonte: Produzido pelo autor.

Tabela 20: Características dinâmicas para $D_2 = 0$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 5 A.

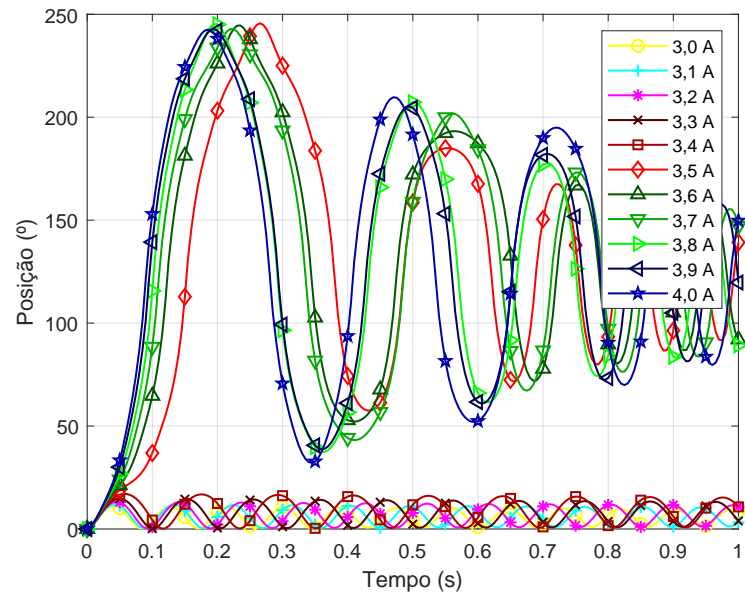
Corrente (A)	Pico (°)	Tempo de Pico (ms)	Tempo de Assentamento (s)
3,0	-	-	-
3,5	245,586	265	2,2301
4,0	242,542	185	3,8533
4,5	239,045	160	3,9430
5,0	241,792	135	5,7435

Fonte: Produzido pelo autor.

Ao analisarmos a corrente de excitação desejamos determinar o menor valor que pode ser utilizado para que o motor funcione. Assim, foi realizada uma segunda simulação para o estator tipo A, no qual a corrente foi variada entre 3 A e 4 A com um passo de 0,1 A. O resultado dessa simulação está apresentado na Figura 78, como pode ser observado a menor corrente para que o motor com o estator tipo A funciona manteve-se em 3,5 A. Além disso ao analisar as curvas de amortecimento ilustradas na Figura 79 é possível

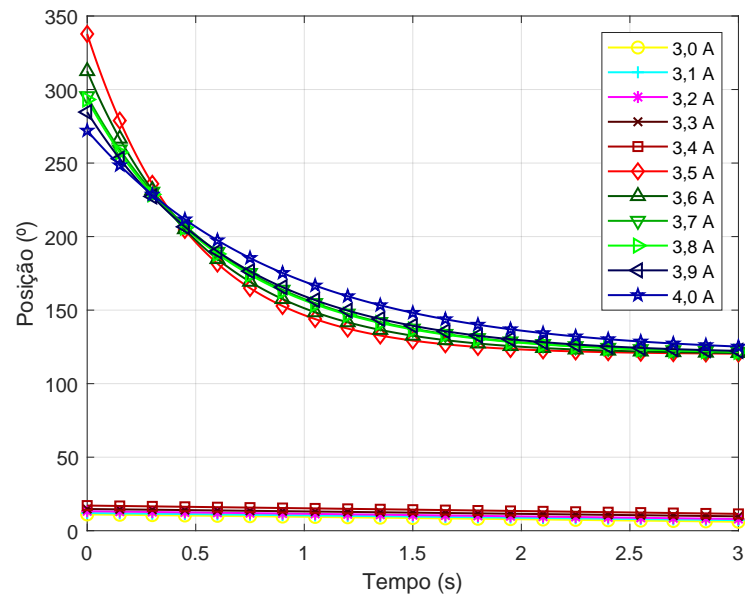
constatar que houveram apenas pequenas mudanças ao variar a corrente entre 3,5 e 4,0 A.

Figura 78: Dinâmica do motor para $D_2 = 0$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 4 A.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 79: Curvas de amortecimento para $D_2 = 0$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 4 A.



Fonte: Produzido pelo autor.

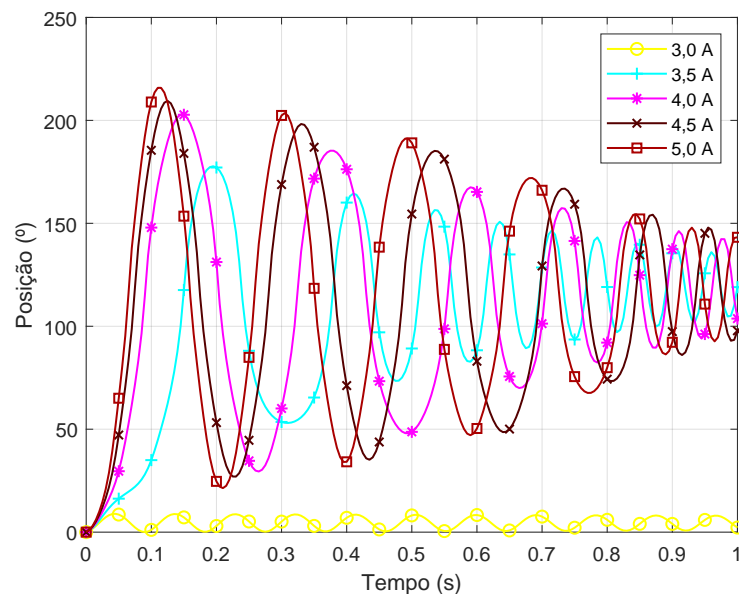
Tabela 21: Características dinâmicas para $D_2 = 0$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 4 A.

Corrente (A)	Pico ($^\circ$)	Tempo de Pico (ms)	Tempo de Assentamento (s)
3,0	-	-	-
3,1	-	-	-
3,2	-	-	-
3,3	-	-	-
3,4	-	-	-
3,5	245,586	265	2,2301
3,6	244,568	235	2,5137
3,7	242,835	220	2,9042
3,8	245,288	195	2,8728
3,9	242,834	195	3,0919
4,0	242,542	185	3,8533

Fonte: Produzido pelo autor.

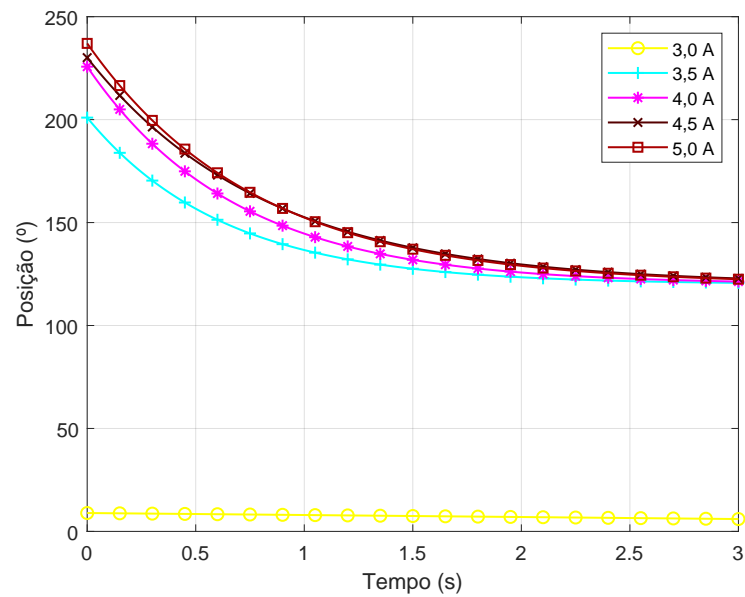
O mesmo procedimento foi utilizado para analisar o comportamento dinâmico para um motor com o estator tipo B ($D_2 = 2$ mm). O resultado da simulação variando a corrente entre 3 A e 5 A para esse motor está apresentada na Figura 80. Da mesma forma como ocorreu na simulação com o estator tipo A, uma corrente de 3 A não é suficiente para fazer com que o motor funcione, entretanto para a corrente de 3,5 A a forma de onda não apresenta as mesmas distorções. As curvas de amortecimento ilustradas na Figura 81 apresentam comportamento similar.

Figura 80: Dinâmica do motor para $D_2 = 2$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 5 A.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 81: Curvas de amortecimento para $D_2 = 2$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 5 A.



Fonte: Produzido pelo autor.

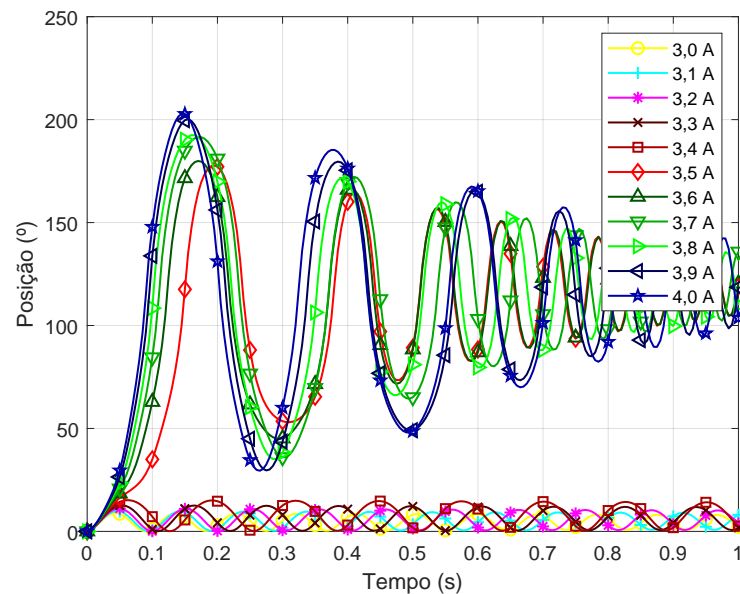
Tabela 22: Características dinâmicas para $D_2 = 2$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 5 A.

Corrente (A)	Pico (°)	Tempo de Pico (ms)	Tempo de Assentamento (s)
3,0	-	-	-
3,5	177,705	195	2,3407
4,0	202,835	145	2,7239
4,5	209,460	125	3,2949
5,0	215,811	110	3,1708

Fonte: Produzido pelo autor.

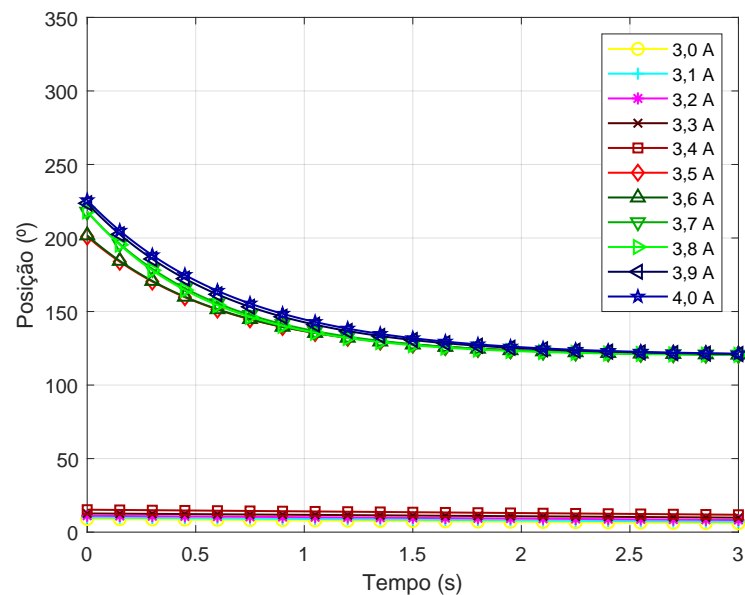
Como na simulação com o estator B obteve-se o mesmo valor de corrente mínima, repetiu-se o procedimento feito para o estator A, no qual foi feita uma segunda simulação com a corrente variando entre 3 A e 4 A, mas com um passo de 0,1 A. A resposta desse sistema pode ser observada na Figura 82, de forma semelhante ao que foi obtido para o estator A a corrente mínima necessária para que esse motor funcione manteve-se como sendo 3,5 A. As respostas obtidas nessa simulação também apresentam valores de pico menores quando comparada a mesma simulação feita anteriormente.

Figura 82: Dinâmica do motor para $D_2 = 2$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 4 A.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 83: Curvas de amortecimento para $D_2 = 2$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 4 A.



Fonte: Produzido pelo autor.

Ao analisar as curvas de amortecimento (Figura 83) foi observado uma diferença quando comparado à resposta obtida para o estator A, no teste anterior o aumento da corrente resultava no aumento do tempo de assentamento, entretanto ao aumentar a corrente no estator B houve redução do tempo de assentamento para as correntes de 3,7

A e 3,8 A. Além disso para uma mesma corrente os resultados com o estator B apresentam menores tempos de assentamento.

Tabela 23: Características dinâmicas para $D_2 = 2$ mm e a corrente sendo variada entre 3 A e 4 A.

Corrente (A)	Pico ($^\circ$)	Tempo de Pico (ms)	Tempo de Assentamento (s)
3,0	-	-	-
3,1	-	-	-
3,2	-	-	-
3,3	-	-	-
3,4	-	-	-
3,5	177,705	195	2,3407
3,6	179,909	170	2,3414
3,7	191,541	170	2,3092
3,8	192,457	160	2,2227
3,9	200,152	155	2,6017
4,0	202,835	145	2,7239

Fonte: Produzido pelo autor.

7 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma nova proposta de configuração para um motor de passo, no qual ímãs são posicionados nos polos do estator e do rotor com o intuito de aumentar o torque estacionário para esse modelo. Como não há registro prévio desse tipo de motor na literatura foi necessário conduzir um trabalho investigativo, nele certos parâmetros construtivos foram selecionadas para serem analisados e com isso compreender melhor o funcionamento e as limitações dessa topologia.

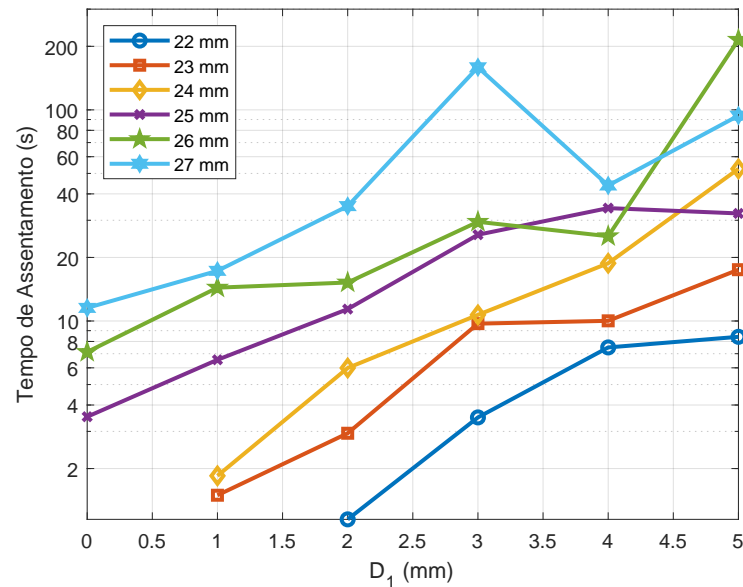
Esse estudo consistiu em analisar as características estáticas (torque estacionário e torque residual) e as características dinâmicas (tempo de pico e tempo de assentamento), para isso foram construídas simulações utilizando o *software* Maxwell nas quais esses três parâmetros foram variados dentro de uma certa faixa de valores: a corrente de excitação (3 A a 5 A), a distância entre o centro da estrutura e o polo do estator (22 mm a 27 mm) e a distância interna entre o núcleo e os enrolamentos (0 mm a 5 mm). Como era esperado para os torques estáticos o principal fator que contribui para seu aumento é o campo magnético, dessa forma correntes maiores e ímãs mais próximos resultam nos maiores valores nessa característica.

Para analisar as características dinâmicas foi necessário dividir as comparações em duas categorias, uma vez que as variações observados ao variar isoladamente cada uma desses parâmetros resultava em um comportamento pouco previsível. Assim, para analisar a influência das distâncias no desempenho do motor foram feitas combinações entre ambas as faixas de distância. Isso fez com que o número de simulações a serem realizadas fosse muito elevado, dessa forma para reduzir o consumo de recursos computacionais e viabilizar essa análise foi feita a diminuição do tempo simulado em dois terços do valor original e o tempo de assentamento foi estimado aproximando o amortecimento da resposta dinâmica por uma exponencial decrescente.

Na Figura 84 está apresentado o tempo de assentamento de todas as combinações feitas, devido a grande faixa de valores que esse parâmetro apresenta utilizou-se no gráfico uma escala logarítmica no eixo das ordenadas. Como pode ser observado no gráfico a distância D_1 possui uma maior influência no tempo de assentamento, de forma que nos testes obteve-se os menores tempos de assentamento na configurações em que os polos do estavam mais próximos do rotor.

Dessa forma foi possível observar que os menores tempos de assentamento eram obtidos para distâncias menores entre o rotor e o estator. Entretanto para que o motor consiga realizar os passo com D_1 entre 22 mm e 24 mm é necessário que seja adicionado o espaçamento D_2 , com exceção das com curvas com D_1 igual a 27 mm o aumento desse espaçamento tende a aumentar o tempo de assentamento.

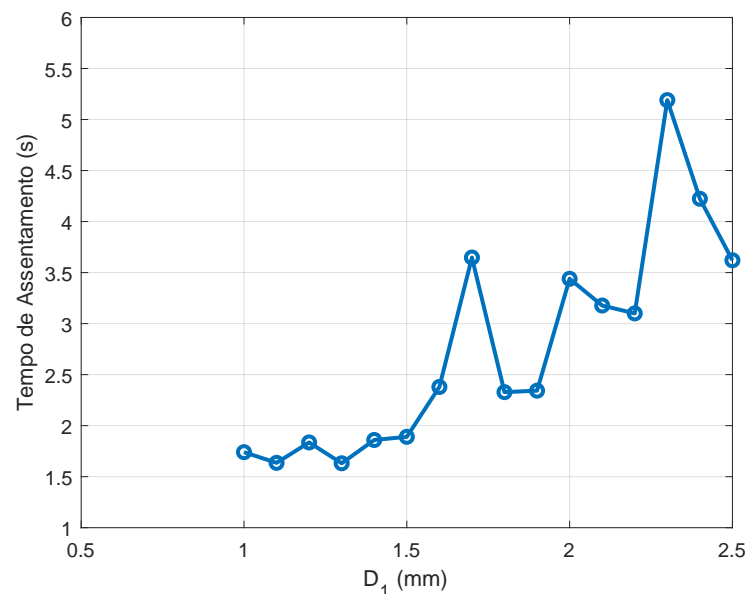
Figura 84: Tempo de assentamento de todas as combinações



Fonte: Produzido pelo autor.

De forma semelhante foi construído um gráfico (Figura 85), o qual compila os dados obtidos através da varredura paramétrica de D_2 com passos de 0,1 mm. Como pode ser observado entre 1,0 mm e 1,5 mm houveram apenas pequenas variações no tempo de assentamento, já no trecho seguinte observou-se um aumento nas variações, mas é possível notar que após 1,5 mm o tempo de assentamento tende a aumentar.

Figura 85: Compilação do tempo de assentamento para $D_1 = 23$ mm e D_2 variando entre 0,5 mm e 2,5 mm

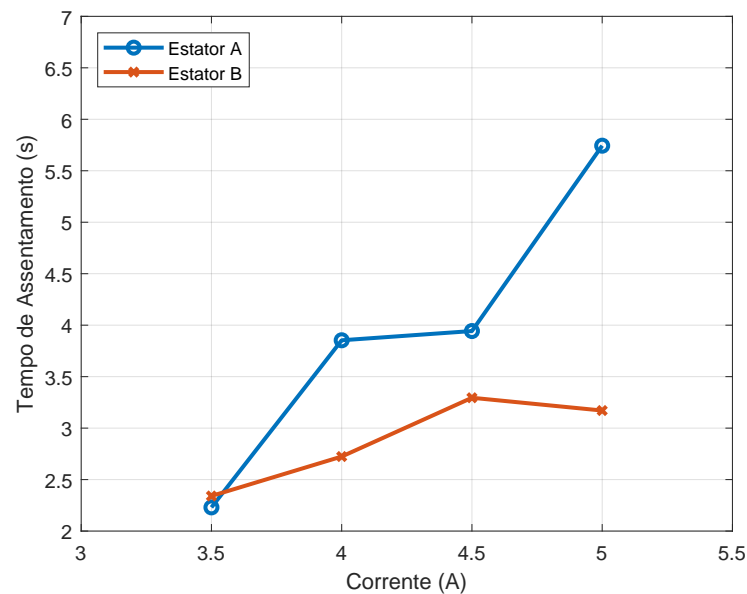


Fonte: Produzido pelo autor.

A influência da corrente nas características dinâmicas foi analisado separadamente visto que caso essa variável fosse adicionada nas combinações resultaria em uma quantidade inviável de simulações. Assim, dois tipos de estatores foram construído no qual a diferença entre eles foi a adição de um espaçamento de 2 mm entre o núcleo e os enrolamentos.

Para comparar os resultados obtidos entre os dois tipos de estatores, foi construído um gráfico utilizando os tempos de assentamento obtidos nas simulações. Na Figura 86 está apresentado os resultados das simulações com a corrente variando entre 3 A e 5 A. Como já havia sido constatado anteriormente os resultados com o estator do tipo B apresentaram menores tempos de assentamento.

Figura 86: Tempo de assentamento dos estatores tipo A e B com a corrente sendo variada entre 3 A e 5 A.

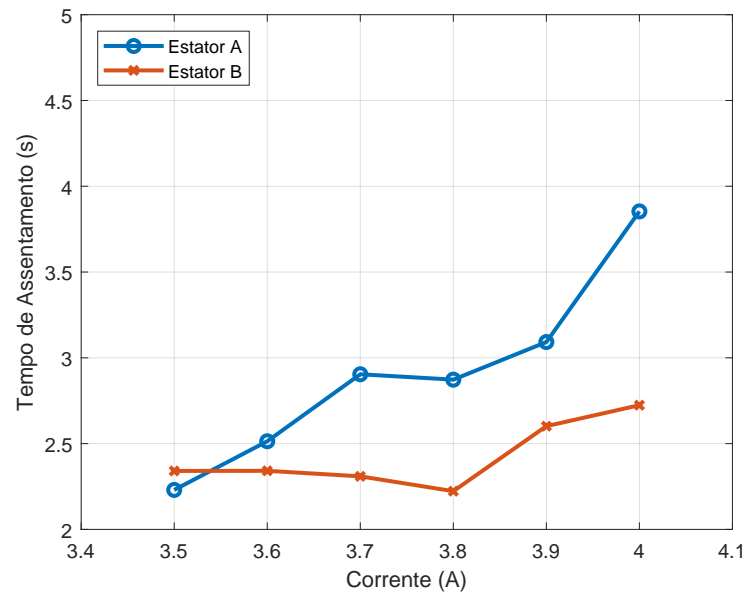


Fonte: Produzido pelo autor.

O mesmo foi feito para a simulação com a corrente variando entre 3 A e 4 A (Figura 87), para o estator tipo A ambas as curvas apresentam comportamento semelhante, no qual o aumento da corrente tende a aumentar o tempo de assentamento. Já no estator tipo B, a curva ao variar a corrente entre 3 A e 4 A apresentou um mínimo local, no qual o menor tempo de assentamento foi obtido.

Portanto através desse estudo foi possível compreender melhor o comportamento estático e dinâmico da topologia proposta, permitindo que o dimensionamento da estrutura seja feito com base nos dados coletados.

Figura 87: Tempo de assentamento dos estatores tipo A e B com a corrente sendo variada entre 3 A e 4 A.



Fonte: Produzido pelo autor.

7.1 Trabalhos Futuros

A partir dos resultados obtidos, constatou-se que é possível da prosseguimento a este trabalho com o intuito de aprofundar a compreensão dos fenômenos físicos que compõem essa topologia além de melhorar o desempenho como um todo, como sugestão tem-se:

- ❖ **Desenvolver um protótipo experimental:** apesar da simulação ter permitido observar o funcionamento desse motor de passos, é necessário construir um protótipo experimental, visto que diversas variáveis podem impactar no desempenho desse motor, mas que nem sempre é possível prever seu impacto. Além disso a partir desse protótipo experimental será possível comparar com outros modelos comerciais e construir um modelo empírico;
- ❖ **Realizar simulações multi-físicas:** como foi discutido, os ímãs apresentam uma grande dependência da temperatura para determinar suas curvas desmagnetização, além disso a modelagem mecânica feita no Maxwell é limitada a um modelo dinâmico de segunda ordem o que limita a fidelidade da resposta dinâmica que o sistema apresenta;
- ❖ **Investigar técnicas de controle e acionamento:** efetivamente as oscilações que esse motor apresentou são indesejáveis em certas aplicações que necessitam trabalhar em baixa frequência (Impressoras, *scanners*, entre outros) e com isso são empregados amortecedores para aproximar a resposta dinâmica desse sistema para um sistema

de primeira ordem, além disso para a operação em frequências menores do que o tempo de assentamento é necessário utilizar forma de acionamento mais sofisticadas;

Referências

- ACARNLEY, P. **Stepping Motors: A Guide to Theory and Practice**. [S.l.]: Institution of Engineering e Technology, 2002. (Control, Robotics and Sensors). ISBN 9780852964170. Disponível em:
<<https://books.google.com.br/books?id=mwDCORmy6u0C>>.
- ANDERSON, Antony F. **Electronic Control of Switched Reluctance Machines: Development history**. [S.l.]: Elsevier, 2001. p. 6–33. DOI: 10.1016/b978-075065073-1/50004-3.
- ANOCIBAR, Hector Rolando. **Alternativa para caracterização de ímãs permanentes com destacada anisotropia magnetocristalina sem desmagnetização irreversível**. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ANSYS. **ANSYS Maxwell 3D - User's Guide**. Edição: ANSYS Inc. [S.l.], 2012.
- BIRMINGHAM, Universidade de. **Magnetic Materials Background**. Edição: Magnetic Material Group. Universidade de Birmingham. 2020. Disponível em:
<<https://www.birmingham.ac.uk/research/activity/metallurgy-materials/magnets/Magnetic-Materials-Background-Information.aspx>>.
- BOLONKIN, Alexander; KRINKER, Mark. **Railgun Space Launcher**. [S.l.]: American Society of Civil Engineers (ASCE), out. 2010. v. 23, p. 293–299. DOI: 10.1061/(asce)as.1943-5525.0000041.
- CHAU, K. T.; CHAN, C. C.; LIU, C. **Overview of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 55, n. 6, p. 2246–2257, 2008. DOI: 10.1109/TIE.2008.918403.
- CHEN, Chao et al. **Novel linear piezoelectric motor for precision position stage**. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3901/CJME.2015.1216.149>.
- CHENG, M. et al. **Overview of Stator-Permanent Magnet Brushless Machines**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 58, n. 11, p. 5087–5101, 2011. DOI: 10.1109/TIE.2011.2123853.
- COEY, John M. D. **Permanent magnet applications**. [S.l.]: Elsevier BV, ago. 2002. v. 248, p. 441–456. DOI: 10.1016/s0304-8853(02)00335-9.

CONDIT, Reston; JONES, Douglas W. **AN907 - Stepping Motors Fundamentals**. Edição: Microchip Technology Inc. [S.l.], 2004.

GAUTHIER, Raymond Gerard. **Analysis and simulation of stepping motor systems using a phase plane approach**. 1979. Tese (Doutorado) – University of New Hampshire.

GIERAS, Jacek F. **Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications, Second Edition, (Electrical and Computer Engineering)**. [S.l.]: CRC Press, 2002. ISBN 978-0824707392.

HAYDON, Arthur W.; HERBERT, Edward; RIGGS, William D. **Stepper Motor Having a Stator Biasing Magnet**. 1968. US3370189.

HOFFMANN, Gotfred O. **Stepper Motor With Stator Biasing Magnet**. 1972. US3671841.

HORBER, Ralph W. **Magnetically Assisted Stepping Motor**. 1989. US4827164.

HUA, H. et al. **Comparative study of variable flux memory machines with parallel and series hybrid magnets**. In: 2017 IEEE ENERGY CONVERSION CONGRESS AND EXPOSITION (ECCE). [S.l.: s.n.], 2017. p. 3942–3949. DOI: 10.1109/ECCE.2017.8096691.

LE-HUY, Hoang; BRUNELLE, Patrice; SYBILLE, Gilbert. **Design and implementation of a versatile stepper motor model for simulink's SimPowerSystems**. [S.l.]: IEEE, jun. 2008. DOI: 10.1109/isie.2008.4677271.

JOLLIFFE, Clifford Mark. **The design of hybrid stepping motors aided by three dimensional finite element analysis**. 1999. Tese (Doutorado) – University of Warwick.

KIEBURTZ, R. **The step motor—The next advance in control systems**. [S.l.]: Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), jan. 1964. v. 9, p. 98–104. DOI: 10.1109/tac.1964.1105628.

KORDIK, Kenneth S. **Variable Reluctance Step Motor With Permanent Magnets**. 1976. US3984711.

LALANA, Enrique Herraiz. **Production of sintered NdFeB magnets from scrap alloy powders**. 2017. Tese (Doutorado) – University of Birmingham.

LEE, Kok-Meng; SON, Hungsun; JONI, J. **Concept Development and Design of a Spherical Wheel Motor (SWM)**. In: PROCEEDINGS of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. [S.l.: s.n.], 2005. p. 3652–3657. DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570676.

LI, Jianping; HUANG, Hu; MORITA, Takeshi. **Stepping piezoelectric actuators with large working stroke for nano-positioning systems: A review**. Sensors and Actuators A: Physical, v. 292, p. 39–51, 2019. ISSN 0924-4247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.04.006>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424719300184>.

LIBERT, Florence. **Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-Speed Direct-Driven Mixer**. 2004. Tese (Doutorado) – Royal Institute of Technology.

LIN, Ted T. **Hybrid Stepper Motor Having Magnetic Enhancement and Heat Dissipating Housing**. 2015. US9214849.

LIU, Qinghua. **Analysis, Design and Control of Permanent Magnet Synchronous Motors For Wide-Speed Operation**. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade Nacional de Singapura.

LU, Binglin; XU, Yanliang. **Presentation and analysis of a novel hybrid stepping motor with stator-permanent-magnet structure**. IEEE, out. 2015. DOI: 10.1109/icems.2015.7385157.

LU, Binglin; XU, Yanliang; MA, Xin. **Design and Analysis of a Novel Stator-Permanent-Magnet Hybrid Stepping Motor**. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 26, n. 7, p. 1–5, out. 2016. DOI: 10.1109/tasc.2016.2594868.

_____. **Presentation and Performance Evaluation of a Novel Stator-Permanent-Magnet Hybrid Stepping Motor**. Energies, MDPI, v. 10, 2017. DOI: 10.3390/en10050693.

MAHMOOD, Sami H. **Hexaferrite Permanent Magnetic Materials**. [S.l.]: Materials Research Forum LLC, 10 out. 2016. 197 p.

MELKEBEEK, Jan A. **Electrical Machines and Drives**. [S.l.]: Springer-Verlag GmbH, 27 fev. 2018. ISBN 331972729X.

ÖNER, Yusuf. **A permanent magnet spherical rotor design and three dimensional static magnetic analysis**. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 137, n. 2, p. 200–208, 2007. ISSN 0924-4247. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.02.018>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424707001161>>.

OSTOVIC, V. **Memory motors**. *Industry Applications Magazine, IEEE*, v. 9, p. 52–61, fev. 2003. DOI: 10.1109/MIA.2003.1176459.

PINHO, Luís Carlos Almeida Bastos de. **Materiais Magnéticos e suas Aplicações**. 2009. Diss. (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

SAKAI, Kazuto; YUZAWA, Nariaki; HASHIMOTO, Hisanori. **Permanent Magnet Motors Capable of Pole Changing and Three-Torque-Production Mode using Magnetization**. *IEEJ Journal of Industry Applications*, v. 2, p. 269–275, jan. 2013. DOI: 10.1541/ieejia.2.269.

SEN, P. C. **Principles of Electric Machines and Power Electronics**. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc, 19 set. 2013. 640 p. ISBN 111807887X.

ŠKOFIC, Jan; KOBLAR, David; BOLTEŽAR, Miha. **Parametric Study of a Permanent-Magnet Stepper Motor's Stepping Accuracy Potential**. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, v. 60, n. 4, p. 255–264, 2014. ISSN 0039-2480. DOI: 10.5545/sv-jme.2013.1526. Disponível em: <<https://www.sv-jme.eu/article/parametric-study-of-a-permanent-magnet-stepper-motors-stepping-accuracy-potential/>>.

SPANNER, Karl; KOC, Burhanettin. **Piezoelectric motors, an overview**. *MPDI Actuators*, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/act5010006>.

STEPIEN, Slawomir; BERNAT, Jakub. **Modeling and optimal control of variable reluctance stepper motor**. [S.l.]: Emerald, mar. 2011. v. 30, p. 726–740. DOI: 10.1108/03321641111101177.

TAMAKI, R.; FUKUDA, M.; OHASHI, S. **Levitation characteristics of the primary coil configuration in the magnetically levitated conveyance system using the linear stepper motor**. In: 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). [S.l.: s.n.], 2016. p. 3101–3104. DOI: 10.1109/TENCON.2016.7848619.

TAO, Wenqiang et al. **Design and Analysis of a Novel Spherical Motor Based on the Principle of Reluctance**. In: p. 1–6. DOI: 10.1109/PEAC.2018.8590483.

TOKUSHICHI, Mishima. **Permanent MAGnet Containing Copper**. 1931. US2027997A.

TRAGO, Bradley A. et al. **Hybrid Stepper Motor Having Magnetic Enhancement and Heat Dissipating Housing**. 2008. US2008/0030108.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley - 7.ed.** [S.l.]: AMGH Editora, 2014. ISBN 9788580553741.

WANG, Qingsong; NIU, Shuangxia. **Overview of flux-controllable machines: Electrically excited machines, hybrid excited machines and memory machines**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 68, p. 475–491, 2017. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.098>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116305901>>.

WATANO, I.; TAMAKI, R.; OHASHI, S. **Improvement of evitation characteristics by the drive circuit in the magnetically levitated conveyance system using the linear stepper motor**. In: 2017 11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA). [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–4. DOI: 10.23919/LDIA.2017.8097258.

WEISS, H.; PETERSEIM, M. **Model based optimization of commutation for a linear hybrid stepper motor**. In: 2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC). [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–7. DOI: 10.1109/EDPC.2017.8328164.

XIONG, Han et al. **Permanent-Magnet Demagnetization Design and Validation**. [S.l.]: Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), jul. 2016. v. 52, p. 2961–2970. DOI: 10.1109/tia.2016.2544739.

YANG, H.; LIN, H.; ZHU, Z. Q. **Recent advances in variable flux memory machines for traction applications: A review**. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, v. 2, n. 1, p. 34–50, 2018. DOI: 10.23919/TEMS.2018.8326450.

ZHOU, Chuyao. **High Precision and Low-cost Stepper Motor Control for Industrial Implementation**. 2018. Diss. (Mestrado) – KTH, Escola de Engenharia Elétrica e Ciência da Computação (EECS).

ZHU, Z. Q.; CAI, S. **Overview of Hybrid Excited Machines for Electric Vehicles**. In: 2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–14. DOI: 10.1109/EVER.2019.8813587.

ZHU, Z. Q.; HOWE, D. **Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles**. Proceedings of the IEEE, v. 95, n. 4, p. 746–765, 2007. DOI: 10.1109/JPROC.2006.892482.