

Rafael Corsi Ferrão

# Desenvolvimento de Mancal Magnético para Rodas de Reação

**Texto apresentado a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para o Exame de Qualificação de Mestrado em Engenharia de Sistemas**

Orientador: Prof. Dr. José Jaime da Cruz

**São Paulo  
2014**

## *Resumo*

A suspensão do rotor com relação ao estator representa uma parte crítica em rodas de reação devido as consequências de qualquer fricção no movimento relativo entre estes dois componentes. Com efeito, a fricção se traduz não apenas em um maior consumo de potência elétrica, como também na introdução de uma zona morta de atuação em torque, bem como na limitação da vida útil da roda de reação devido ao gradual desgaste do mancal.

Mancais magnéticos são mancais utilizados como alternativa sem contato mecânico entre o rotor e o estator, buscando superar os desafios mecânicos do mancal por rolamento. O ganho em confiabilidade e vida útil da roda de reação é considerável porém observa-se um aumento na complexidade do sistema.

Este projeto de pesquisa vem ao encontro de projetar um mancal magnético para rodas de reação com aplicação na malha de controle de atitude de satélites. Propomos uma topologia diferente da encontrada na literatura, com um oito polos e dois graus de liberdade ativo.

**Palavras-chave:** Mancal Magnético, Rodas de Reação, Modelagem Eletromagnética

# Lista de Figuras

1.1	Corte da topologia proposta por Bernus et al. (1998) a: estator externo; b: rotor; c: estator interno; d: ímãs permanentes . . . . .	6
1.2	Corte da topologia proposta por Scharfe et al. (2001) a: estator externo; b: rotor; c: estator interno; d: ímãs permanentes . . . . .	6
1.3	Corte da topologia proposta por Bangcheng et al. (2012) . . . . .	7
1.4	Fluxo de desenvolvimento . . . . .	9
2.1	Corte ilustrativo do mancal magnético . . . . .	13
2.2	Corte ilustrativo do mancal magnético . . . . .	13
2.3	Circuito magnético do estator externo . . . . .	14
2.4	Fluxo magnético no estator externo e rotor . . . . .	16
2.5	Vista de meio estator interno . . . . .	17
2.6	Fluxo magnético . . . . .	18
2.7	Circuito eletromagnético estator interno e rotor . . . . .	18
2.8	Ilustração do batente proposto . . . . .	19
2.9	Partes do mancal . . . . .	21
3.1	Dimensões do mancal . . . . .	24
3.2	Circuito magnético passivo suposto . . . . .	24
3.3	Forças atuantes no rotor . . . . .	25
3.4	Curva de saturação de um material ferro magnético . . . . .	27
3.5	Deslocamento em X e Y . . . . .	28
3.6	Decomposição de força passiva para uma determinada secção . . . . .	29
3.7	Cálculo do fator de espraçamento . . . . .	30
3.8	Força atuante no rotor dado uma translação radial . . . . .	31
3.9	. . . . .	32
3.10	Modulo do campo magnético do modelo no Comsol do circuito passivo . . . . .	33
3.11	Força calculado por elementos finitos com deslocamento em apenas um eixo . . . . .	33
3.12	Linhas de campo magnético para deslocamentos na vertical . . . . .	34

3.13	Força de atração para um deslocamento axial . . . . .	35
3.14	Linhas de campo do circuito ativo . . . . .	36
3.15	Forças resultante no rotor no eixo y . . . . .	37
3.16	Força atuante no rotor dado variação na corrente . . . . .	39
3.17	Campo magnético no ferro principal . . . . .	40
3.18	Comparativo FEM vs fenomenológica . . . . .	41
3.19	Campo magnético com rotor deslocado de 3mm do ponto de ope- ração com 1A aplicado na bobina principal e 0.5 nas secundárias .	42
4.1	Forças resultantes no rotor . . . . .	44
4.2	. . . . .	46
4.3	Distribuição das tensões nas bobinas . . . . .	47
4.4	Diagrama de blocos do modelo linearizado para descolamentos em x e y . . . . .	48
4.5	Característica do sistema para um dos eixos em malha aberta . .	48
4.6	Dinâmica instável do rotor e choque no batente . . . . .	49
4.7	Dinâmica do rotor dado a aplicação de tensão na bobina X+ . . .	50

# Lista de Tabelas

2.1	Especificações de requisito do sistema . . . . .	12
2.2	Nomenclatura partes mancal . . . . .	20

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivo	2
1.2	Justificativa	2
1.3	Revisão bibliográfica	3
1.3.1	Graus de liberdade	4
1.3.2	Topologias com aplicação em rodas de reação	5
1.3.3	Sensoriamento	7
1.3.4	Mancais auxiliares	7
1.3.5	Técnicas de controle	8
1.4	Metodologia	8
<b>2</b>	<b>Mancal magnético</b>	<b>11</b>
2.1	Visão Geral	12
2.2	Estator externo	14
2.3	Rotor	16
2.4	Estator interno	16
2.5	Batente	18
2.6	Base	19
2.7	Eletrônica	20
2.8	Prototipagem	20
<b>3</b>	<b>Modelagem Eletromagnética do Mancal</b>	<b>23</b>
3.1	Circuito passivo	24
3.1.1	Campo magnético no entreferro	26
3.1.2	Decomposição do campo magnético B em X e Z	27
3.1.3	Força	28
3.1.4	Escolha dos parâmetros	30
3.1.5	Simulações	31
3.1.6	Elementos Finitos	32
3.2	Circuito Ativo	35
3.2.1	Modelo sem saturação	35

3.2.2	Força . . . . .	37
3.2.3	Indutância . . . . .	38
3.3	Escolha dos parâmetros . . . . .	38
3.3.1	Simulações . . . . .	39
3.3.2	Elementos Finitos . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Modelagem Dinâmica</b>	<b>43</b>
4.1	Rotor . . . . .	43
4.2	Estator externo . . . . .	45
4.3	Estator interno . . . . .	45
4.3.1	Linearização da força . . . . .	46
4.4	Batente . . . . .	47
4.5	Característica do sistema e diagrama de blocos . . . . .	47
4.6	Simulações . . . . .	49
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>51</b>





# Capítulo 1

## Introdução

O sistema de controle de atitude e órbita é uma das tecnologias mais críticas de qualquer sistema espacial. O desenvolvimento de um sistema de controle de atitude em território nacional permanece incompleto ([Veloso e Rollemberg, 2009](#)) e a venda de componentes deste sistema ao nosso país é frequentemente recusada por países detentores dessa tecnologia.

Basicamente, um sistema de controle de atitude é formado por sensores, atuadores e uma central responsável pelo processamento dos sinais dos sensores e comando dos atuadores, segundo uma lei de controle. Os sensores mais comuns são detectores de horizonte, sensores magnéticos, sensores solares, giroscópios e rastreadores estelares.

Os principais atuadores incluem: propulsores, torques magnéticos e rodas de reação. A quase totalidade destes componentes de controle possui atualmente alguma iniciativa de desenvolvimento no país, seja por instituições governamentais ou por grupos de pesquisa independentes ([Republica Brasileira, 2011](#)). A principal exceção são as rodas de reação, que praticamente não têm projetos de desenvolvimento em andamento e, no entanto, representam um componente indispensável na realização de manobras e na estabilização e controle de atitude em três eixos.

Rodas de reação são dificilmente substituíveis pois apresentam larga faixa de operação em torque (ao contrário de atuadores magnéticos) e são alimentadas pela energia renovável fornecida por painéis solares (ao contrário de propulsores baseados em um estoque finito de combustível). Por estes motivos, rodas de reação estão presentes em praticamente qualquer satélite que apresente requerimentos mínimos de desempenho em atitude.

Uma roda de reação pode ser descrita como um atuador inercial com funcionamento baseado no princípio de conservação do momento angular. A atuação da roda de reação sobre o satélite se realiza por intercâmbio de momento angular, limitado ao eixo de rotação da roda. Devido a grande diferença entre a inercia

do satélite e o da roda de reação, um controle de atitude com muita precisão é possível com esse sistema.

Rodas de reação são tipicamente constituídas de um motor elétrico, geralmente um motor sem escovas, um mancal e um elemento de inércia. O elemento de inércia e o motor são montados sobre o mancal que deve garantir a precisa rotação em torno de um eixo. A velocidade de rotação do sistema é controlado por uma eletrônica de acionamento do motor. Rodas de reação podem ser comandada de duas maneiras distinta: por rotação ou por torque. Quando comandada por torque, a roda de reação deve ser capaz de estimar o torque útil gerado por ela (o torque efetivo menos as perdas).

O controle de atitude com rodas de reação demanda que esse tipo de atuador opere em toda sua escala de velocidade, inclusive na inversão de seu sentido de rotação (passagem pelo zero) de uma forma estável e controlada. Essa zona morta é efeito do atrito estático do mancal, minimizar esse efeito é essencial para o bom funcionamento da roda de reação. A zona morta pode ser compensada (no caso de mancal por rolamento) pela implementação de leis de controle com malhas de velocidade e corrente, além de um estimador de atrito.

O projeto de uma roda de reação começa pelo estudo do momento angular necessário para movimentar o satélite, com o momento angular definido especifica-se a inércia e então o mancal, por último projeta-se um motor capaz de rotacionar o conjunto mancal mais inércia.

## 1.1 Objetivo

Essa dissertação vem ao encontro de projetar um mancal magnético para uma roda de reação que está sendo desenvolvido no Núcleo de Sistemas Eletrônicos Embarcados (NSEE) do Instituto Mauá De Tecnologia (IMT) com apoio do Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais (INPE).

O projeto envolve o desenvolvimento de um conjunto eletromecânico capaz de ser utilizado em uma roda de reação para satélites de médio porte mais especificamente para a plataforma multi missão.

## 1.2 Justificativa

A suspensão do rotor com relação ao estator representa uma parte crítica em rodas de reação ([Taniwaki, Shigemune and Ohkami, 2003](#)) devido as consequências de qualquer fricção no movimento relativo entre estes dois componentes. Com efeito, a fricção se traduz não apenas em um maior consumo de potência elétrica, como também na introdução de uma zona morta de atuação em torque, bem como na

limitação da vida útil da roda de reação devido ao gradual desgaste do mancal.

Uma solução mecânica para a interface entre o rotor e o estator é o mancal por rolamento. Apesar de sua aparente simplicidade, apresenta desafios para a obtenção dos valores mínimos de fricção necessários, em vista das exigências de consumo, controlabilidade e vida útil da roda de reação ([Krishnan et al., 2010](#)). No caso de aplicações aeroespaciais, a lubrificação do rolamento representa também considerável dificuldade devido à impossibilidade de utilização de lubrificantes tradicionais em condições de baixa ou nenhuma pressão atmosférica, que leva à perda dos componentes voláteis destes lubrificantes e sua consequente degradação. Outra dificuldade se deve à tendência de migração dos lubrificantes na ausência de gravidade, o que costuma ser abordado com estratégias de recaptura ou relubrificação. Sistemas de relubrificação, em particular, apresentam grande complexidade e seu comportamento orbital é de difícil validação em laboratório.

As dificuldades associadas ao uso de mancal de rolamento reside também em sua modelagem, consequência da variação de viscosidade do lubrificante em função da temperatura do mancal, o que torna o coeficiente de fricção dependente da velocidade de rotação e das condições térmicas em geral. O mancal por rolamento apresenta, por outro lado, grande vantagem construtiva devido a compactação do sistema e não necessidade de eletrônica extra para o seu controle.

Outra solução é a utilização de um mancal magnético ([Bangcheng et al., 2012](#)), que é uma alternativa sem contato mecânico entre o rotor e o estator, na qual o rotor é mantido suspenso magneticamente. O ganho em confiabilidade e vida útil da roda de reação é considerável ([Marble e Tow, 2006](#)), sendo a vida útil basicamente limitada pela durabilidade da eletrônica. A operação sem contato elimina a necessidade de lubrificante e possibilita consequentemente a operação em vácuo, o que se traduz em simplificação nos requisitos da concepção mecânica.

A ausência de fricção elimina a zona morta de aplicação de torque em baixas velocidades, eliminando não-linearidades da lei de controle, além de possibilitar a eliminação de defeitos de balanceamento e vibrações mecânicas, com consequente ganho em simplicidade dos algoritmos e em desempenho do controle de atitude. A contrapartida é a adição de uma malha de controle para a suspensão eletromagnética. O ganho de eficiência trazido pela ausência de fricção também é contrabalanceado, ao menos parcialmente, pelo consumo de potência dos atuadores deste tipo de mancal.

## 1.3 Revisão bibliográfica

Para contornar os problemas de lubrificação em baixa pressão, algumas rodas de reação utilizam um sistema hermeticamente selado pressurizado com um gás inerte ([Krishnan et al., 2010](#)). Esta solução relaxa os requisitos de lubrificação

porém impõe uma força de arrasto extra na roda, restando ainda o problema da migração dos lubrificantes na ausência de gravidade. Uma pesquisa detalhada dos lubrificantes de classe espacial e estratégias de selamento e relubrificação deve ser realizada.

Devido as não linearidades do mancal magnético (por exemplo sua rigidez em função do deslocamento), a modelagem analítica é de difícil obtenção e uma análise por elementos finitos é recomendada ([Pilat, 2007](#)). Com este tipo de análise é possível verificar o acoplamento das forças e momentos envolvidos além das características térmicas do sistema. A modelagem e implementação é um terreno fértil para pesquisas em todo o mundo e esta área ainda é pouco explorada no país. Com a presente pesquisa, pretende-se contribuir com o fechamento da lacuna existente na pesquisa de mancais magnéticos de pequenas dimensões.

### 1.3.1 Graus de liberdade

Mancais magnéticos puramente passivos são impossíveis de existirem dado que a parte móvel se torna instável quando submetida a campos magnéticos puramente passivos (Teorema de Earnshaw's), devido essa situação torna-se necessário um controle ativo do campo magnético atuante na parte móvel e por consequência das forças. Os mancais magnéticos podem ser classificados pelo número de graus de liberdade controlados ativamente ([Schweitzer et al., 2009](#)):

a) Mancal passivo:

Este mancal totalmente passivo é formado por um rotor contendo um conjunto de ímãs permanentes em disposição de Halbach ([Detoni, 2012](#)), o que leva potencialização do campo magnético adjacente ao rotor. Um conjunto de enrolamentos passivos no estator é excitado por este campo magnético girante. Na eventualidade de qualquer deslocamento do rotor, este enrolamento reage com a criação de um campo magnético, com a consequente atração/repulsão do rotor de volta à posição de equilíbrio. O sistema é estável a partir de uma velocidade de rotação mínima do rotor (velocidade crítica). O fato desta topologia não funcionar em baixas velocidades angulares a torna pouco adaptada para aplicação em rodas de reação.

b) Mancal ativo num grau de liberdade

Neste caso o rotor e o estator são formados por ímãs permanentes em configuração repulsiva, tornando o sistema estável axialmente. O eixo radial é instável e necessita controle ativo, normalmente realizado por meio de eletro-ímãs. Trata-se de uma configuração necessitando uma eletrônica de controle relativamente simples e de baixo consumo de potência. No entanto, a ausência de controle ativo radial tende a gerar oscilações mecânicas de difícil amortecimento.

c) Mancal ativo em dois graus de liberdade

Neste caso o rotor e o estator compõem um circuito magnético em configuração atrativa, em geral com ímãs permanentes no rotor acoplado a um circuito magnético de baixa relutância no estator. O sistema é estável axialmente mas necessita controle ativo nos dois eixos radiais. Esta configuração resulta num mancal de boa rigidez radial, com arquitetura simplificada e pequenas dimensões, principalmente na direção axial.

d) Mancal ativo em cinco graus de liberdade

Este mancal totalmente ativo é formado por atuadores eletromagnéticos nas duas direções radiais, na direção axial e nos dois modos de rotação radiais. A sua principal vantagem em aplicações em rodas de reação é a possibilidade de atuação em mais de um eixo de rotação, devido à capacidade de manobra do componente de inércia. Trata-se no entanto de um sistema de controle de grande complexidade, com consequente redução de confiabilidade.

### 1.3.2 Topologias com aplicação em rodas de reação

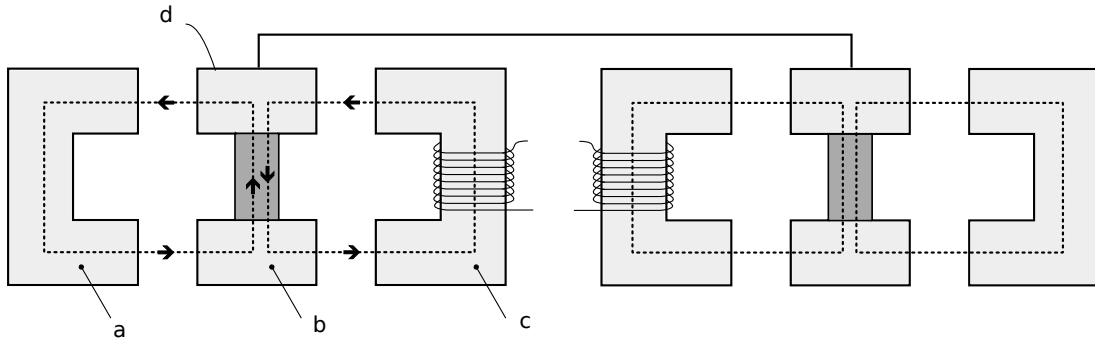
Encontramos na literatura três topologias distintas para utilização de mancais magnéticos em rodas de reação, os mancais propostos para esse tipo de aplicação possuem em sua maioria dois graus de liberdade ativos, e fazem uso de ímãs permanentes para a geração de campos magnéticos para minimizar o consumo elétrico ativo do sistema. Em seguida analisamos os principais pontos desses mancais.

A topologia proposta por [Bernus et al. \(1998\)](#) trabalha com dois graus de liberdades ativos, com ímãs permanentes no rotor e dois estatores: um interno com bobinas para o controlo do fluxo magnético no rotor (por consequência na direção radial) e outro externo para estabilização axial que também contribui com a rigidez axial.

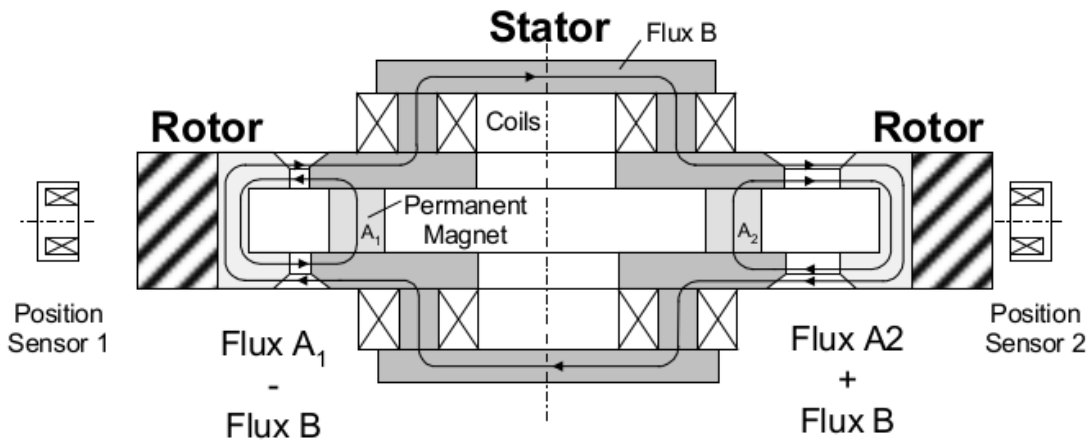
Nessa topologia (Fig. 1.1), um fluxo magnético contínuo é gerado no rotor por ímãs permanentes ali instalados, as bobinas instaladas no estator interno conseguem gerar campos aditivos e subtrativos no rotor (dependente do sentido da corrente). Se o campo for aditivo, pode-se aumentar a rigidez do eixo axial, caso o campo for subtrativo, consegue-se diminuir sua rigidez, tornando assim mais fácil o deslocamento radial do rotor.

A topologia proposta por [Scharfe et al. \(2001\)](#), difere por ter somente um estator e pelos ímãs permanentes estarem localizados no estator e não no rotor. Como ilustrado na Fig. 1.2.

Com essa arquitetura é possível utilizar as bobinas tanto para exercer uma força atrativa no rotor quanto para torna a sua rigidez mas branda, facilitando



**Figura 1.1** – Corte da topologia proposta por [Bernus et al. \(1998\)](#)  
a: estator externo; b: rotor; c: estator interno; d: ímãs permanentes



**Figura 1.2** – Corte da topologia proposta por [Scharfe et al. \(2001\)](#)  
a: estator externo; b: rotor; c: estator interno; d: ímãs permanentes

a atração do rotor. É possível também aumentar a rigidez axial por inserir um fluxo positivo em ambas as bobinas, esse fluxo soma-se com o fluxo do gerado pelos ímãs permanentes.

Mais recentemente uma nova arquitetura foi proposta por [Bangcheng et al. \(2012\)](#) para ser utilizado em uma roda de reação de um satélite ágil. O rotor é composto de duas partes, uma externa utilizada para estabilizar o mancal na direção axial e outra interna para controle de posição na direção radial. Diferente das outras propostas, essa não utiliza um perfil em C para estabilização dos graus de liberdade passivos, mas sim, faz uso de um perfil plano com ímãs permanentes tanto no rotor quanto no estator. Ímãs permanentes também usados nos polos do mancal criando um fluxo (*bias*) constante diminuindo a corrente necessária para controlar o rotor.

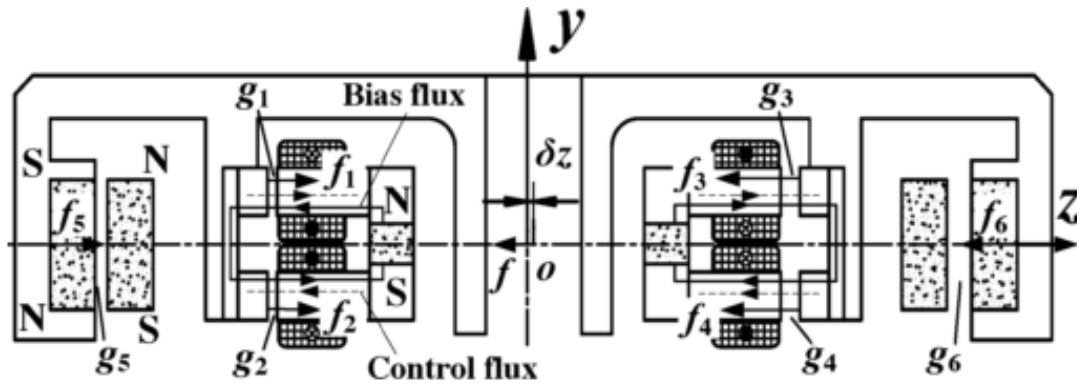


Figura 1.3 – Corte da topologia proposta por [Bangcheng et al. \(2012\)](#)

### 1.3.3 Sensoriamento

Devido ao controle da posição do rotor em mancais magnéticos, o sensoriamento de sua posição é essencial para o funcionamento do sistema. Duas linhas de sensoriamento são encontradas na literatura: Mancais auto sensoreados ([Vischer e Bleuler, 1993](#)) e os que utilizam sensores de posição dedicados para esse fim.

Os mancais magnéticos sem sensores (*sensorless*) utilizam geralmente as bobinas de seus polos para sensorear a posição do rotor, diversas técnicas podem ser empregadas ([Hofer et al., 2009](#); [Mukhopadhyay, 2005](#)) entre elas: medição da indutância dos polos pela injeção de um sinal com uma portadora de frequência mais elevada ou a medição da força contra-eletromotriz induzida nas bobinas.

Já os mancais sensoreados utilizam sensores de deslocamentos exclusivos para a medição da posição do rotor e por consequência o tamanho do entreferro. Os sensores podem ser dos tipos capacitivos ou indutivos, dependendo do material construtivo do sistema. Opera-se geralmente com sensores na distribuição diferencial, visando minimizar os efeitos de suas não linearidades.

### 1.3.4 Mancais auxiliares

Mancais auxiliares são importantes em mancais magnéticos pois são eles que evitam colisões entre as partes fixas e as rotativas em caso de algum tipo de falha, mancais magnéticos projetados para operarem em altas rotações não possuem bom rendimento na inicialização (baixa rotação) e utilizam dos mancais auxiliares nessa zona até atingirem sua velocidade de operação. Os mancais auxiliares podem ser compostos por rolamentos esféricos ([Sun et al., 2004](#)) ou por elementos sólidos auto lubrificante como Teflon.

### 1.3.5 Técnicas de controle

O controle de mancais magnéticos é uma área fértil da engenharia de controle devido as não linearidades do sistema o que torna o projeto do controle não trivial.

Técnicas de controle clássico são utilizados com bastante frequência em mancais magnéticos, controle do tipo PID (Tezuka et al., 2013) possuem boa robustez. O controle do tipo *feedforward* é utilizado em casos em que existe o acoplamento entre os graus de liberdade, podendo ser utilizado para o desacoplamento dos graus de liberdade. Outras técnicas propostas na literatura vão de encontro ao controle multivariável como controle robusto (Jimenez-Lizafraga e Alcorta, 2007), controle ótimo ((Schuhmann et al., 2012)) e controle não linear ((Rundell e Drakunov, 1996)).

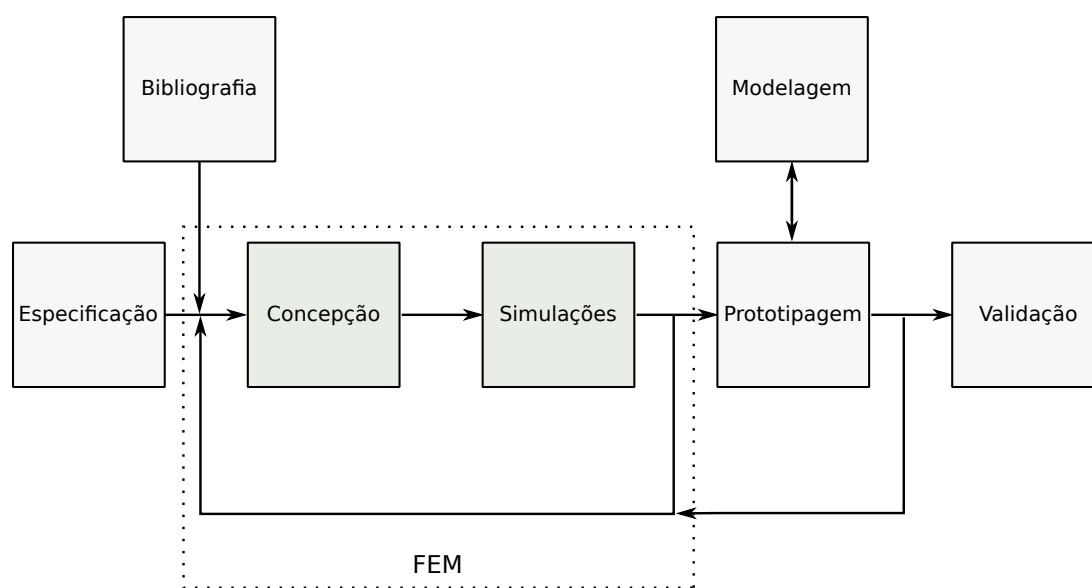
## 1.4 Metodologia

A metodologia utilizada no projeto envolve a utilização de simulações em elementos finitos para o projeto das partes magnéticas do mancal, uma modelagem fenomenológica é realizada para o auxilio nas escolhas dos parâmetros físicos do sistema e para o projeto de um simulador.

O desenvolvimento do projeto foi executado como ilustrado na Fig. 1.4, onde primeiramente as especificações de projeto foram levantadas e uma topologia de mancal proposta com base nos levantamentos bibliográficos. Então foi desenvolvido um modelo em elementos finitos (FEM) e estudos foram realizados em pró de decidir os parâmetros físicos que satisfaçam as restrições imposta para o sistema.

Dividiu-se o projeto em duas partes, na primeiramente considerou-se somente a parte passiva (estator externo e rotor) até atingirmos um conjunto com rigidez suficiente na direção axial e com menor força de atração na direção radial. Com esses valores buscou-se um estator interno capaz de exercer força de atração suficiente no rotor para estabilizar em seu ponto de operação.





**Figura 1.4** – Fluxo de desenvolvimento



## Capítulo 2

# Mancal magnético

Rodas de reação são constituídas basicamente de um motor, mancal, elemento de inércia e eletrônica de controle. O motor e o mancal são considerados os sistemas mais críticos, influenciando diretamente a qualidade da roda de reação e o cumprimento dos requisitos. Nesse projeto de pesquisa, buscou projetar um mancal magnético que possa fazer parte de uma roda de reação para satélites de médio porte. Para tanto é necessário que o mancal satisfaça os requisitos impostos para uma roda de reação, tais como: desbalanceamento, consumo, velocidade e atrito.

O mancal magnético proposto deve satisfazer as especificações da Tabela 2.1, onde deseja-se atingir os requisitos de uma roda de reação para um satélite de classe II, baseado nos dados da plataforma multimissão (PMM) do INPE (Veloso e Rollemberg, 2009), possibilitando que o mesmo possa rejeitar perturbações orbitais e executar manobras de posicionamento.

O acionamento da roda de reação deve ser possível em ambos os sentidos de rotação e com a mesma eficiência. Requer também que o eixo de rotação tenha inclinação menor do que 0,1 grau com relação a superfície de fixação da roda. A precisão de alinhamento é necessária para a adequada atuação da roda de reação no eixo sob controle.

A roda de reação deve ter dimensões limitadas em 250mm de diâmetro por 100mm de altura com massa total que não deve exceder 4kg. Na concepção das partes construtivas da roda de reação será considerada a necessidade de operação contínua por longos períodos de tempo (em torno de quatro anos).

Parâmetro	Valor	
Torque	0,1	[Nm]
Momento angular	10	[Nms]
Rotação	$\pm 4000$	[rpm]
Oscilação do torque	10	[%]
Torque de fricção do mancal	0,01	[Nm]
Desbalanceamento residual	0,2	[g.cm]
	20	[g.cm <sup>2</sup> ]
Consumo de potência	3	[W]
	30	[W]
	100	[W]
Tensão de alimentação	20 à 40	[V]

**Tabela 2.1** – Especificações de requisito do sistema

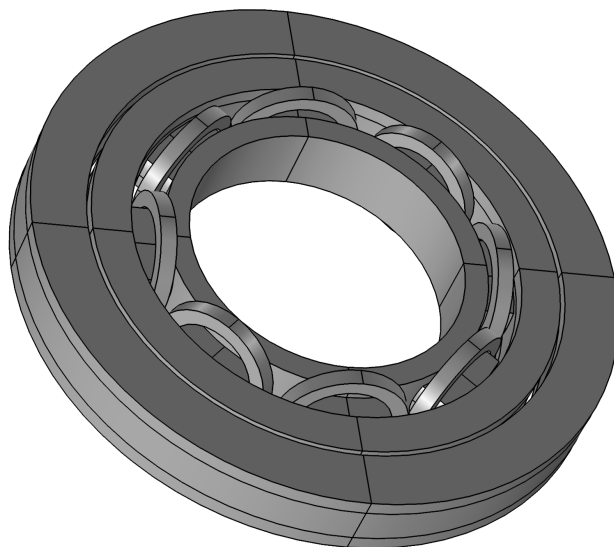
## 2.1 Visão Geral

O mancal magnético proposto nesse trabalho é em partes uma junção das topologias propostas por [Bernus et al. \(1998\)](#) e [Scharfe et al. \(2001\)](#). O mancal possui quatro graus de liberdade passivamente estáveis: *tilt*, *row*, *pitch* e sua direção axial, os outros dois graus de liberdade (as translações radiais) são estabilizados ativamente. O torque imposto para a rotação do rotor não é abordada nesse trabalho mas será desenvolvida por um motor elétrico de corrente contínua sem escovas (BLDC), instalado no interior do mancal.

O circuito magnético do mancal é composto por dois estatores: um interno ao rotor, outro externo e um rotor. O estator externo é responsável pela estabilização dos graus de liberdade passivos já o interno por possibilitar o controle das posições radiais. Optou-se por instalar os ímãs no estator externos visando um maior fluxo magnético nos modos passivamente estáveis do mancal, além de visar o melhor balanceamento do roto (se compararmos com a instalação do ímãs no rotor. A Fig. 2.1 ilustra o mancal proposto. O rotor é a parte móvel do mancal e onde é fixado a parte móvel do motor. Adotou-se uma geometria plana visando uma melhor rigidez nos modos instáveis do mancal, possibilitando também a montagem em modo painel. Optou-se por um mancal externo ao motor para conseguir uma rigidez dentro dos limites de massa e dimensões e que atingisse as especificações da roda de reação.

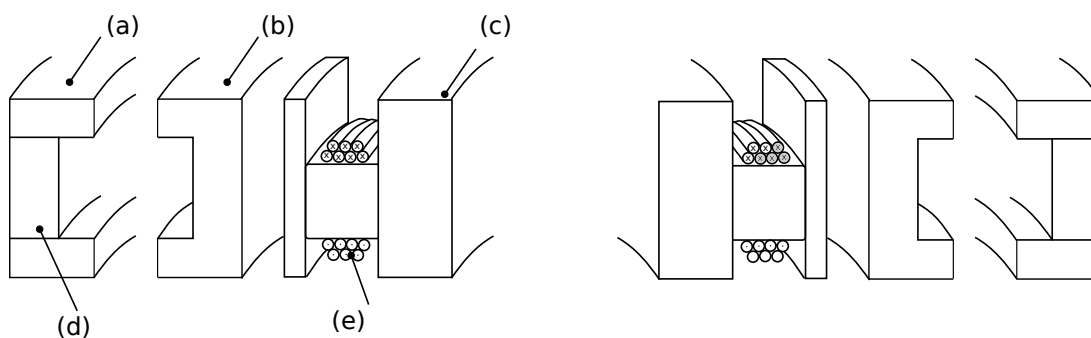
A Fig. 2.2 ilustra um corte no radial no mancal proposto, verificamos que os ímãs permanentes estão localizados no estator externo, criando um fluxo magnético que circula pelo rotor e estabiliza o eixo axial.

Mancais magnéticos podem ser projetados para usar forças magnéticas atra-



**Figura 2.1** – Perspectiva das partes magnéticas do mancal

tivas ou repulsivas. Uma melhor relação massa/ rigidez pode ser alcançada pela utilização de forças magnéticas atrativas, e esse é o papel das bobinas localizadas no estator interno. Oito núcleos são utilizados para exercer força de atração suficiente no rotor para mover da posição de equilíbrio (rotor batido) e estabilizar no ponto de operação.



**Figura 2.2** – Corte ilustrativo do mancal magnético. Onde: a) estator externo, b) rotor, c) estator interno, d) ímã permanente, e) bobinas

Um batente foi projetado para evitar que as partes magnéticas (metálicas) se choquem em caso de falha na malha de controle ou em situações em que o sistema encontra-se desligado. O batente limita a excursão máxima do rotor em seus graus

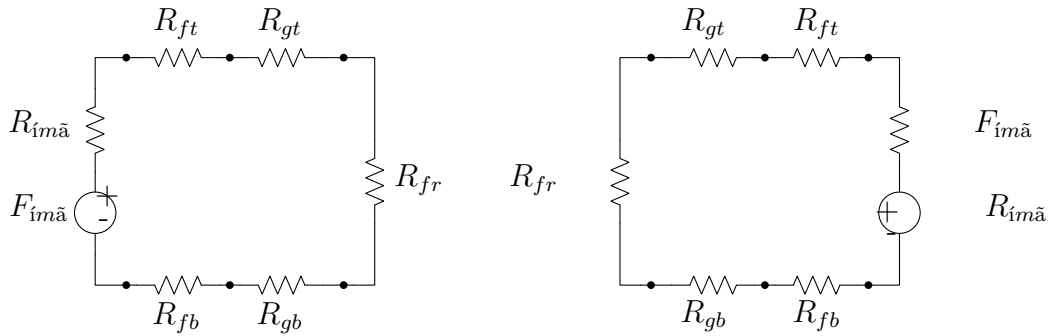
de liberdade: axial, radial e *tilt*. O Batente não interfere no circuito magnético do sistema e é localizado no estator externo. Toda parte fixa do sistema é fixa em uma base também não magnética.

Uma eletrônica de acionamento, sensoriamento e processamento é alocada na parte inferior da base, tornando o sistema compacto. A eletrônica possui *drivers* para controle das correntes nas bobinas e também um sistema de sensoriamento para medir a posição do rotor. Um sistema microprocessado é proposto para realizar o controle e gestão do sistema.

## 2.2 Estator externo

O estator externo, responsável pela estabilização dos graus de liberdade passivamente estáveis e é formado de três partes : ferro topo, ímãs, ferro base. A combinação dessas partes faz com que o estator tenha uma secção em formato de C. Os ferros (topo e base) servem para guiar o campo magnético através do gap e pelo rotor.

O circuito magnético de uma secção do estator externo é ilustrado na Fig. 2.3. Verificamos que o fluxo magnético gerado pelo ímã permanente busca o caminho com menor relutância para fechar o circuito magnético. Esse caminho ocorre pelos ferros do estator externo, passando então pelo entreferro e pelo rotor.



**Figura 2.3** – Circuito magnético do estator externo

Podemos identificar nesse circuito, seis principais relutâncias, sendo elas :

- $R_{imã}$  : Relutância do ímã permanente
- $R_{ft}$  : Relutância devido ao ferro topo
- $R_{gt}$  : Relutância do entreferro superior
- $R_{fb}$  : Relutância devido ao ferro base

- $R_{gb}$  : Relutância do entreferro inferior

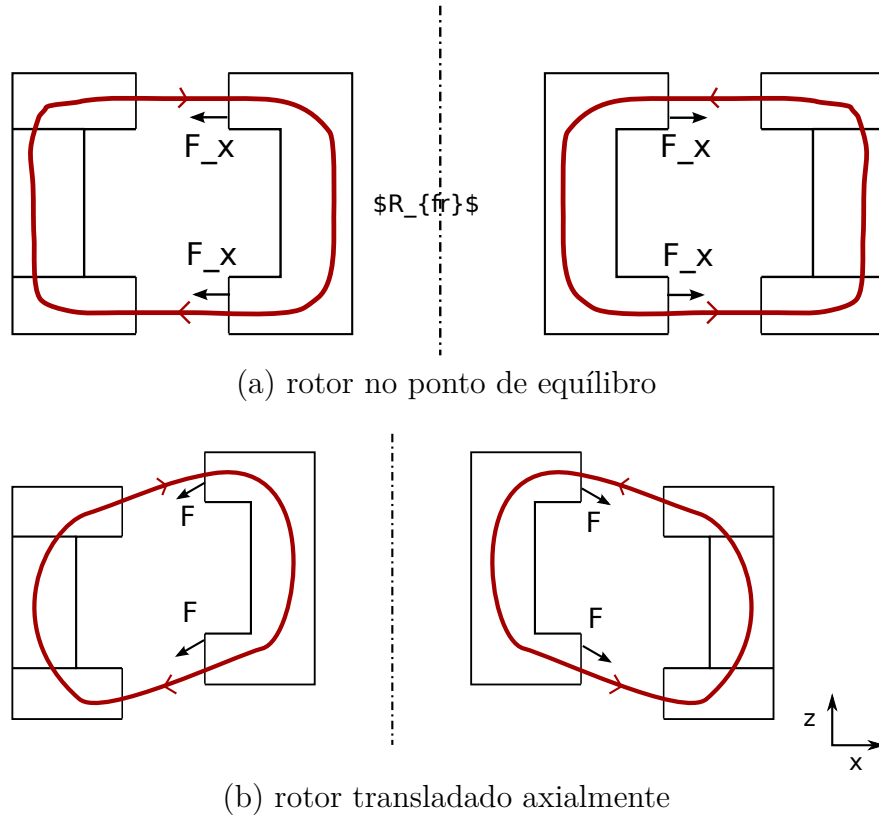
Além das relutâncias, temos como fonte geradora de campo magnético o ímã localizado entre os ferros :  $F_{ima}$ . Devido ao fluxo magnético permanente o rotor sofre atração em ambos os lados, se no ponto de equilíbrio, ou seja, com um entreferro simétrico em ambos os lados, a força resultante tenderia ser nula e o rotor permaneceria em equilíbrio no ponto de operação (criticamente estável).

Esse modo de operação é chamado diferencial e possibilita que a força resultante no rotor devido aos ímãs permanentes torne-se linear. Para tanto projetamos o estator externo do mancal para trabalhar em sempre com o ferro saturado, na saturação a relação densidade fluxo magnético e campo magnético torna-se praticamente constante para pequenas variações de campo magnético. Com isso a componente da força que é proporcional ao quadrado do campo magnético torna-se praticamente constante. Além da linearização obtêm-se um aumento na rigidez axial sem um grande aumento na rigidez radial, o que exigiria uma maior energia da parte ativa para a estabilização.

No caso de um deslocamento axial ocorre um aumento no comprimento do entreferro e por consequência em sua relutância ( $R_g$ ), essa condição foge da zona de menor energia gerando uma força restaurativa no rotor para restabelecer um circuito com menor relutância magnética.

A Fig. 2.4 demonstra as forças atuantes no rotor em dois cenários diferentes, na primeira (a) com o rotor no ponto de equilíbrio (com o mesmo entreferro ao longo de toda circunferência) e em (b) com o rotor deslocado axialmente, verificamos nesse caso que a resultante da força não é nula mas sim possui uma componente em y. Essa componente é a responsável pela estabilização dos graus de liberdade passivos.

O circuito passivo deve possuir rigidez axial suficiente para manter o rotor alinhado em ambientes com gravidade (para validação na terra) e rigidez radial menor para um baixo gasto energético do circuito ativo na estabilização do rotor.



**Figura 2.4** – Fluxo magnético no estator externo e rotor

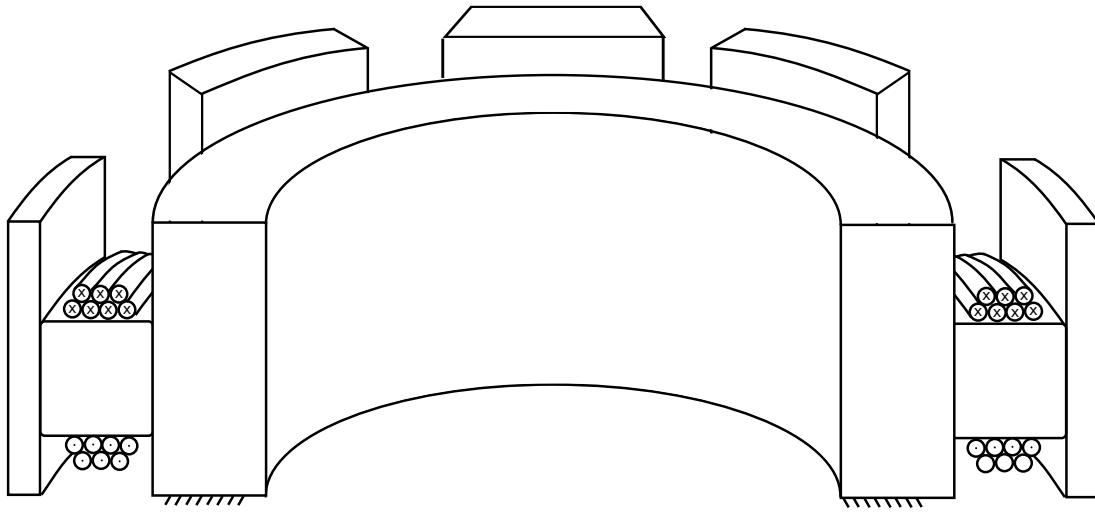
## 2.3 Rotor

O Rotor foi projetado com perfil em C e sofre tanto força de atração do estator externo quanto do estator interno, porém com campos em diferentes orientações. O rotor é projetado para que seu ferro trabalhe na zona de não saturação, a saturação nesse caso é indesejada pois limitaria o fluxo total que flui através dos circuitos magnéticos e também resultaria quando em rotação em uma região de possível aquecimento.

## 2.4 Estator interno

O estator interno é formado de oito polos distribuídos homogeneamente a cada 45 graus e interligados por um anel de circulação interno. Os polos funcionam como atuadores (eletroímãs) para a estabilização do roto no eixo radial ( $x$ ,  $z$ ), cada polo é formado por um núcleo. Uma revolução de meio mancal é ilustrado na Fig. 2.5.





**Figura 2.5** – Vista de meio estator interno

O estator interno foi concebido para atuar sempre com três polos ativos, essa abordagem faz com que o fluxo do campo magnético que percorre o rotor seja maximizado no eixo onde deseja-se realizar a atração. A Fig. 2.6 mostra o estator interno com três de seus polos ativos: (A),(B),(C) e o fluxo que flui pelo rotor. Os polos (A) e (C) nesse exemplo trabalham com polaridade inversa ao (B) para forçar que o fluxo feche por B e não por nenhum outro polo, maximizando assim a força de atração  $F_B$ . Uma parte do fluxo do campo magnético não atravessa por (B) e fecha por outros polos. A corrente induzida em (A) e (C) é a metade da corrente no polo principal (B) isso é feito para evitar que o polo B atinja a saturação, já que o campo que o atravessa é composto pela totalidade do induzido em sua bobina mais a parte dos campos de (A) e (C).

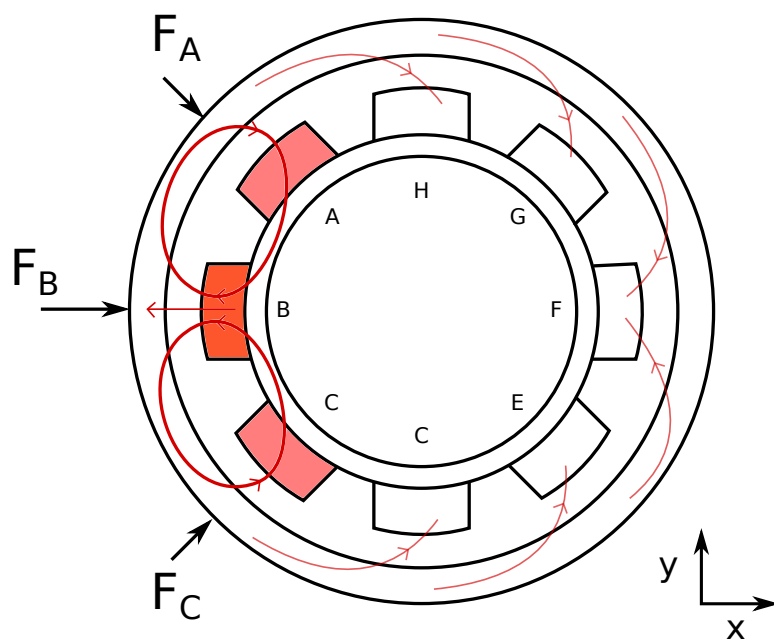
As forças geradas  $F_A$  e  $F_C$  possuem componentes em x e y, as componentes y são de mesma intensidade e se cancelam, restando uma componente aditiva em x. A força resultantes são portanto:

$$F_x = F_B + F_{Ax} + F_{Cx} \quad (2.1)$$

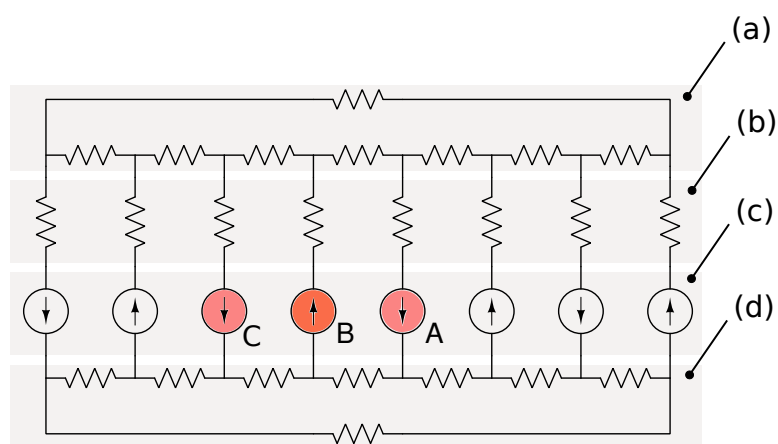
$$F_y = 0 = F_{Cy} - F_{Ay} \quad (2.2)$$

Nesse modo de operação pode-se gerar uma força y e x, para isso basta induzir da mesma maneira um novo campo em (H) e (G).

O circuito magnético entre o estator interno e o rotor pode ser visto na Fig. 2.7, verificamos que o circuito é formado de quatro principais elementos : A bobina, fonte geradora de campo magnético (c), a relutância do entreferro que depende da distância entre os polos e o rotor (b), as relutâncias do ferro do rotor (a) e do ferro do anel de retorno (d).



**Figura 2.6** – Fluxo magnético



**Figura 2.7** – Circuito eletromagnético estator interno e rotor: (a) relutâncias do rotor, (b) relutâncias do entreferro, (c)

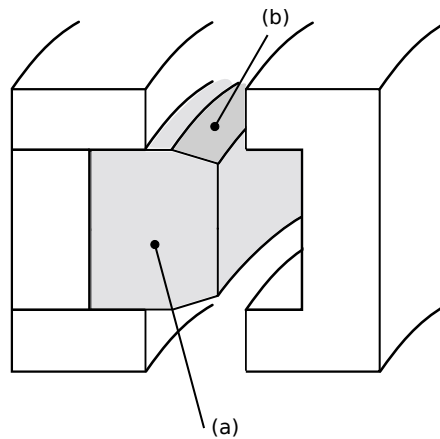
## 2.5 Batente

O batente é necessário por duas razões principais: Evitar que partes metálicas colidam dado uma falha na estabilização do rotor; saturar o tamanho do entreferro, limitando por consequência a força de atração máxima que é exercida sobre o rotor. Essa limitação é necessária para a situação em que o rotor encontra-se mais afastado do ponto de operação, sem o limite do batente o entreferro se tornaria

grande o que necessitaria de uma potência maior por partes das bobinas para estabilizar-lo no ponto de operação. Além de limitar a máxima translação radial, o batente é responsável por limitar também a translação axial e sua inclinação (*tilt*).

A Fig. 2.8 é uma ilustração do batente proposto para o mancal magnético, é composto de duas partes: (a) responsável por limitar o entreferro máximo entre o rotor e o estator externo; (b) frange para limitar a inclinação do rotor. Encontra-se na literatura projetos de macais magnéticos com rolamentos. Essa escolha seria inadequada para o projeto já que a proposta é a aproximação de um projeto espacializável, a incorporação do rolamento demandaria um projeto específico.

Optou-se por instalar o batente no estator externo por duas razões distintas: facilidade na montagem pois é o local onde possui maior entreferro (portanto espaço) e também para servir de fixação para unir os ímãs e os ferros do estator externo.



**Figura 2.8** – Ilustração do batente proposto

O batente deve ser rígido suficiente para aguentar possíveis impactos do rotor, veremos no Cap. 4 que essas forças são da ordem de centenas de Newtons. Propõem a utilização de Nylon ou Teflon na construção do batente devido a suas propriedades de lubrificação a seco.

## 2.6 Base

As partes não móveis do mancal são fixas em uma base de propriedade não magnéticas (alumínio), a base serve para alinhar as partes do mancal e ao mesmo tempo possibilita a oscilação do rotor na direção axial (dentro das especificações de oscilação).

## 2.7 Eletrônica

A eletrônica proposta é composta de sistemas de potência para o acionamento das bobinas (polos), eletrônica de sensoriamento para medição das posições do rotor e uma eletrônica de controle (digital) onde é implementando o controle do sistema.

## 2.8 Prototipagem

Para prototipagem do mancal foi necessário a criação de nove diferentes peças para possibilitar a montagem do sistema. A proposta de montagem visa minimizar a influência no circuito magnético que alteraria o comportamento das forças no rotor mas ao mesmo tempo buscou-se um sistema simétrico e robusto. A Fig. 2.9 é um corte da estrutura proposta, verificamos que o estator interno (RW-M-EI) é formado por uma única peça, enquanto o rotor e o estator externo são fragmentados em mais de uma parte.

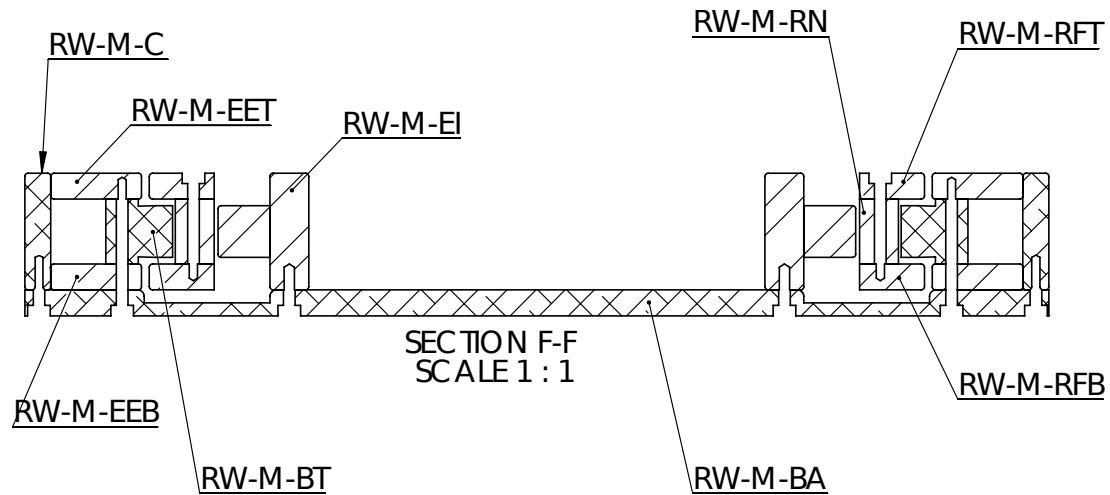
A localização e os tipos de parafuso (magnético, não magnético) foi uma decisão de projeto, optou-se por uma localização que minimiza-se a influência no circuito magnético. A Tab. 2.2 possui a descrição e nomenclatura das partes propostas para a prototipagem do mancal magnético.

A não utilização de materiais laminados propicia a aparição de correntes induzidas no circuito magnético quando exposto a correntes variantes no tempo. Essas correntes induzidas (Eddy) causam uma redução na força eletromagnética e aquecem o material, alterando a relação corrente/força utilizada como parâmetro para o projeto da lei de controle. Minimizar as correntes induzidas tornam o sistema mais eficiente porém a construção de um protótipo laminado é mecanicamente difícil. Outra solução é a utilização de "ferro leve" (*soft iron*), que possui

Nomenclatura	Descrição
RW-M-BA	Base do mancal
RW-M-C	Casca externa
RW-M-EEB	Estator externo base
RW-M-EET	Estator externo topo
RW-M-BT	Batente
RW-M-RFB	Rotor ferro base
RW-M-RFT	Rotor ferro topo
RW-M-RN	Rotor núcleo
RW-M-EI	Estator interno

**Tabela 2.2** – Nomenclatura partes mancal

propriedades que limitam a criação de corrente induzida, em contrapartida esses materiais normalmente apresentam menor permeabilidade magnética e menor valor do campo magnético para atingir a saturação (Han et al., 2013). O material escolhido para os circuitos magnéticos foi o Aço 1020 e para as partes não magnéticas utilizou-se alumínio.



**Figura 2.9** – Partes do mancal



## Capítulo 3

# Modelagem Eletromagnética do Mancal

Abordaremos nesse capítulo a modelagem eletromagnética do mancal magnético proposto, essa etapa é importante para o entendimento das influências dos parâmetros geométricos no circuito eletromagnético além de possibilitar a criação de um modelo realista das forças atuantes no rotor. Com o equacionamento das forças um modelo inicial em elementos finitos foi criado e simulações realizadas para a obtenção de um melhor modelo.

As nomenclaturas das dimensões a serem utilizadas nas seguintes seções para modelagem e parametrização do sistema são ilustradas na Fig. [3.1](#).

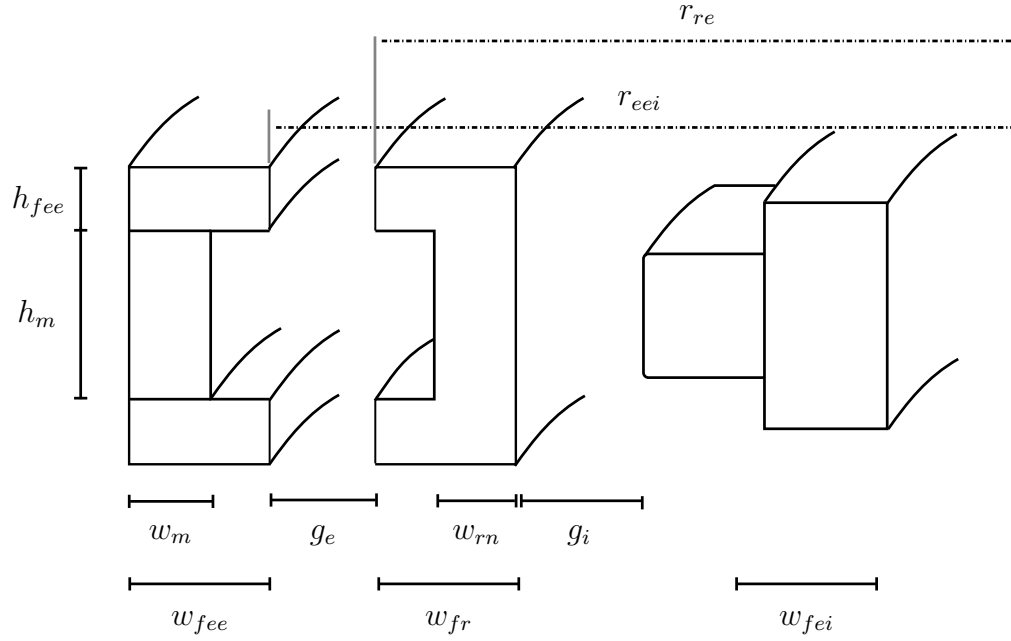


Figura 3.1 – Dimensões do mangel

### 3.1 Circuito passivo

A parte passiva do mangel magnético pode ser descrita como o circuito da Fig. 3.2, onde um ímã permanente gera um fluxo magnético que estabiliza o eixo axial (passivo) e possibilita que o eixo radial seja estabilizado com um menor gasto energético.

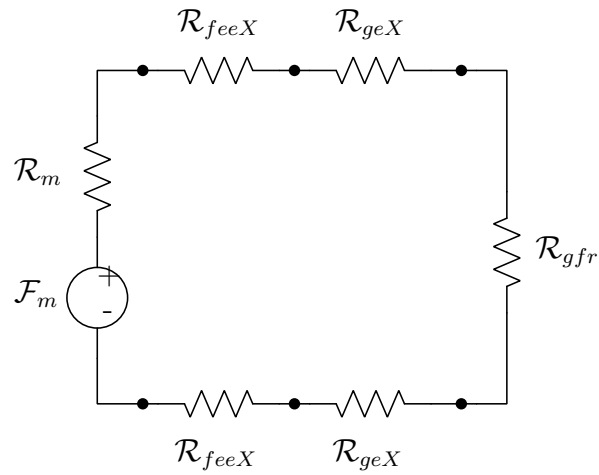


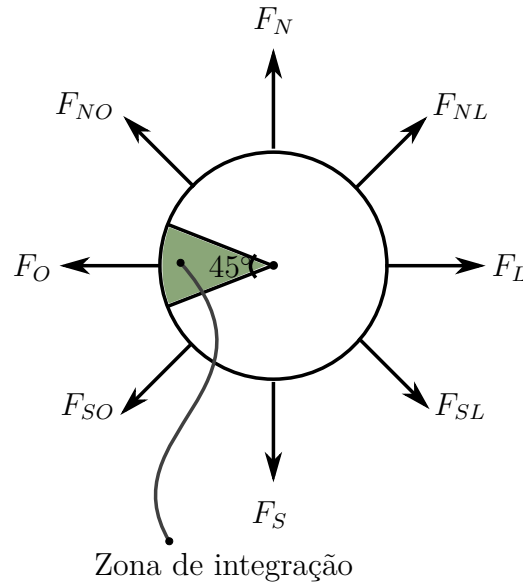
Figura 3.2 – Circuito magnético passivo suposto



Sendo:

- $\mathcal{F}_m$  : Força Eletromotriz gerado pelo imã permanente;
- $\phi_m$  : Fluxo magnético imã permanente;
- $\phi_m$  : Fluxo magnético gap;
- $\mathcal{R}_m$  : Relutância devido ao imã permanente;
- $\mathcal{R}_{feeX}$  : Relutância devido ao ferro do estator externo (T: Topo, B: Baixo);
- $\mathcal{R}_{geX}$  : Relutância devido ao gap externo (T: Topo, B: Baixo);
- $\mathcal{R}_{gfr}$  : Relutância devido ao ferro do rotor.

O mancal foi seccionado em oito partes, sendo que cada parte possui uma força de atração relacionada. Para o cálculo dessas forças, utilizou-se uma zona de integração de  $45^\circ$  com o centro alinhando com a direção da força. A Fig. 3.3 ilustra as forças de atração agindo no rotor e mostra em verde a zona de integração utilizada para o cálculo das forças.



**Figura 3.3** – Forças atuantes no rotor

### 3.1.1 Campo magnético no entreferro

Com a premissa de que todas as linhas de campo passem pelo entreferro, e que os ferros do estator externo estão sempre saturados (Sec. 2.2), obtemos das leis de Marxell para campos quase estáticos um modelo que relaciona a força de atração magnética pela distância do rotor ao estator externo (comprimento do entreferro).

$$\phi_m = \phi_f = \phi_g \quad (3.1)$$

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_t = 0$$

$$H_m l_m + 2H_f l_f + 2H_g l_g = 0 \quad (3.2)$$

Podemos derivar da Eq. 3.1:

$$B_m S_m = B_f S_f \quad (3.3)$$

$$B_f S_f = B_g S_g \quad (3.4)$$

$$B_g S_g = B_m S_m \quad (3.5)$$

A relação  $B_m/H_m$  para imãs de terra rara como Samário-Cobalto ou Neodímio é praticamente linear podendo ser aproximada para:

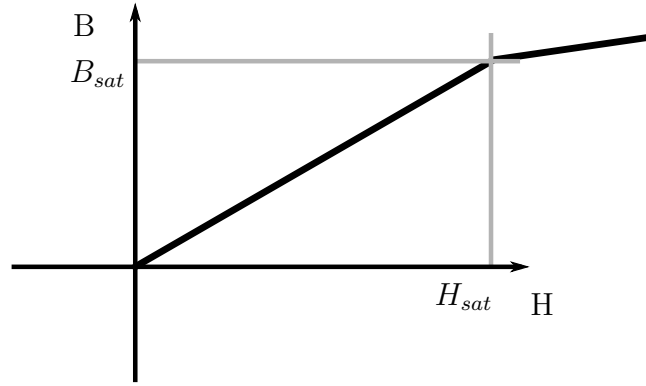
$$B_m = B_r - \frac{B_r}{H_c} H_m \quad (3.6)$$

Como estamos trabalhando na zona de saturação:  $H > H_{sat}$  (Fig. 3.4) adotamos que a zona de operação da curva B-H é linear e possui a seguinte equação :

$$B_f = B_{fs} + \mu_s (H_f - H_{fs}) \quad (3.7)$$

Obtemos o valor do vetor campo magnético  $H_f$  :

$$H_f = \frac{C_3 + C_4 l_g / S_g}{C_1 + C_2 l_g / S_g} \quad (3.8)$$



**Figura 3.4** – Curva de saturação de um material ferro magnético

Com as variáveis :

$$C_1 = -\frac{\mu_s S_f}{S_m} \frac{H_c}{H_m} l_m + 2l_f \quad (3.9)$$

$$C_2 = 2 \frac{\mu_s S_f}{\mu_0} \quad (3.10)$$

$$C_3 = -\left( \mu_s H_{fs} \frac{S_f}{S_m} + B_r - B_{fs} \right) \frac{l_m H_c}{H_m} \quad (3.11)$$

$$C_4 = -2 \left( \frac{B_{fs} S_f - \mu_s S_f H_{fs}}{\mu_0} \right) \quad (3.12)$$

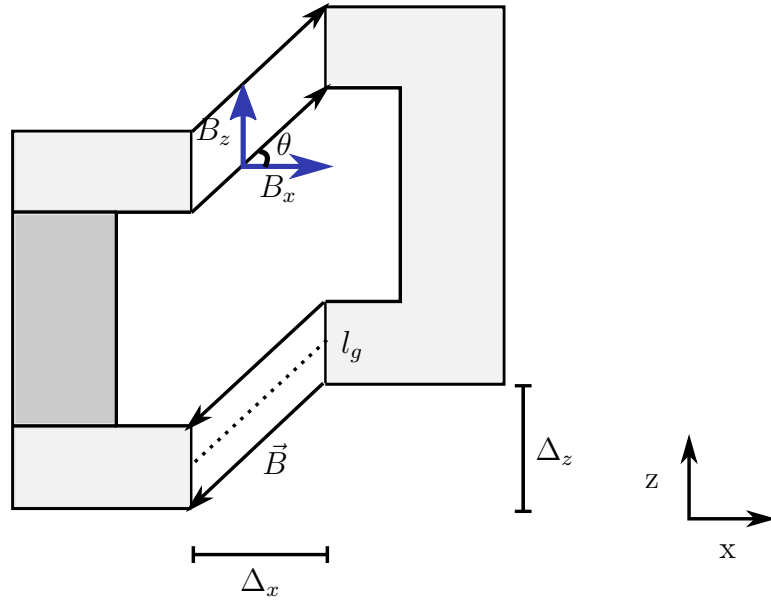
Sendo  $B_f = B_{fs} + u_{fs}(H_f - H_{fs})$  podemos então, calcular o valor do campo magnético no entreferro:

$$B_g = \frac{B_f S_f}{S_g} \quad (3.13)$$

### 3.1.2 Decomposição do campo magnético B em X e Z

O campo magnético acumulado no entreferro pode ser decomposto em componentes  $B_x$  e  $B_z$  que dependem do deslocamento do rotor em  $\Delta_x$  e  $\Delta_z$ , esse deslocamento implica também em um aumento no comprimento do gap:  $l_g$ , A Fig. 3.5 ilustra o deslocamento. Tal modelo não leva em consideração o *tilt* do rotor, que implicaria em relutâncias diferentes para a parte superior e inferior do rotor.

Os campos podem então ser derivados:

**Figura 3.5** – Deslocamento em X e Y

$$\theta_z = \text{tg}^{-1}\left(\frac{\Delta_z}{\Delta_x}\right) \quad (3.14)$$

$$l_g = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_z^2} \quad (3.15)$$

$$B_{gx} = B \cos(\theta_z) \quad (3.16)$$

$$B_{gz} = B \sin(\theta_z) \quad (3.17)$$

### 3.1.3 Força

A força magnética de atração do rotor pelo estator é gerada pela energia eletromagnética acumulada no entreferro, essa força pode então ser calculada através do trabalho virtual ([Chiba e Fukao, 2005](#)) :

$$\vec{F}(l_g) = -\frac{\vec{B}_g^2 S_g}{\mu_0} \quad (3.18)$$

#### Força radial

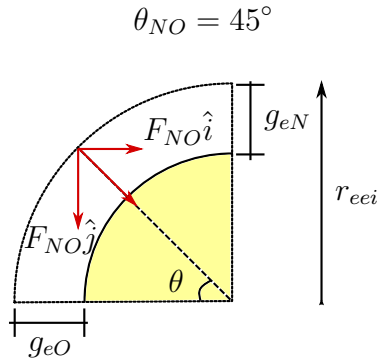
Desejamos obter as resultantes das forças projetadas nos eixos radiais (x e y), para obtermos um modelo mais preciso das forças, o mancal foi dividido em oito

partes distintas sendo que cada parte possui um componente de campo magnético diferente das outras partes. Para então obtermos o valor das forças radiais, precisamos calcular todas as forças e então decompor-las nos eixos (Fig. 3.3). Por inspeção :

$$F_x = F_L + F_{NL} \mathbf{i} + F_{SL} \mathbf{i} - F_O - F_{NO} \mathbf{i} - F_{SO} \mathbf{i} \quad (3.19)$$

$$F_y = F_N + F_{NL} \mathbf{j} + F_{SL} \mathbf{j} - F_S - F_{NO} \mathbf{j} - F_{SO} \mathbf{j} \quad (3.20)$$

Onde  $\mathbf{i}$  é a projeção da força no eixo x e  $\mathbf{j}$  é a projeção da força no eixo y. Para pequenos deslocamentos (Fig. 3.6), a variação no ângulo  $\theta$  pode ser desprezível e sempre ser considerado como 45 graus.



**Figura 3.6** – Decomposição de força passiva para uma determinada secção

portanto:

$$F_{NL} \mathbf{i} = F_{NL}(G_{eNO}) \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3.21)$$

$$F_{NL} \mathbf{j} = F_{NL}(G_{eNO}) \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3.22)$$

E similarmente para as outras forças.

### Força axial

A força perpendicular ao plano de rotação é a composição de todos os oito segmentos, não é levado em conta tilt do rotor. Obtemos:

$$F_z(l_g) = \frac{S_g}{\mu_0} \sum_{i=N}^{NO} B_{gi}^2 \quad (3.23)$$

### 3.1.4 Escolha dos parâmetros

Buscou-se uma combinação de parâmetros que maximizasse a força de atração axial e que minimizasse a força longitudinal. As áreas e comprimentos médios são obtidos da seguinte maneira (com uma zona de integração de  $45^\circ$ ), com referência a Fig. 3.1 e a tabela em Anexo ??

$$S_m = w_m \frac{2\pi(r_{eei} + w_{fee} - w_m)}{8} \quad (3.24)$$

$$S_f = h_{fee} \frac{2\pi r_{eei}}{8} \quad (3.25)$$

$$S_g(l_g) = h_{fee} \frac{2\pi(r_{eei} - l_g/2)}{8} \alpha_g \quad (3.26)$$

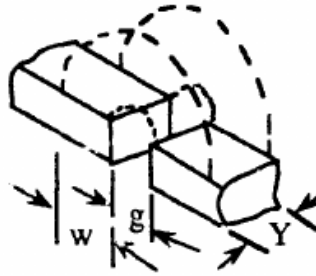
$$l_m = h_m \quad (3.27)$$

$$l_f = w_{fee} \quad (3.28)$$

O termo  $\alpha_g$  é o fator de espraçamento do campo magnético no entreferro do mancal que é devido a dispersão do campo magnético, ou seja a área em que o entreferro acumula campo magnético é sempre maior ( $\alpha_g > 1$ ) do que a área calculada.

Podemos calcular o acréscimo de área devido ao espraçamento (Leupold e Potenziani (1990)) como sendo dependente do tamanho do entreferro e da geometria, podemos assumir como aproximação que o espraçamento é regido pela seguinte equação:

$$P = 0.318 \ln \left( 1 + \frac{2w}{g} \right) \quad (3.29)$$



**Figura 3.7** – Cálculo do fator de espraçamento

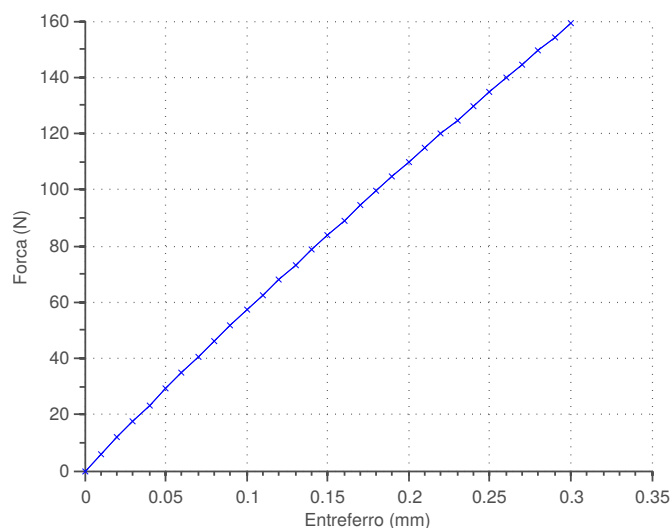
O mancal deve possuir rigidez suficiente para suspender o conjunto inércia, rotor mancal, rotor motor. Estudos realizados estimam um momento de inércia total para o sistema de  $6.9 \cdot 10^{-2} \text{ kg m}^2$  com uma massa de 3.52 kg (para operar em ambiente com gravidade).

### 3.1.5 Simulações

Simulações foram realizadas com o intuito de classificar as forças atuantes no rotor devido ao circuito magnético do estator externo. As simulações foram realizadas utilizando os parâmetros construtivos em da Tabela em Anexo ?.

Verificamos na Fig. 3.8 a simulação da translação do rotor em apenas um dos eixos radiais, podemos verificar a linearidade da força quando o rotor trabalha em modo diferencial. O máximo deslocamento é limitado em 0,35mm pelo efeito do batente.

Força (N) x  $\Delta_x$  (mm) - Deslocamento Radial:  $y = 0, z = 0$



**Figura 3.8** – Força atuante no rotor dado uma translação radial

Um mapa do módulo da força radial no plano x,y é ilustrado na Fig. 3.9, notamos que em torno do ponto de operação a força é praticamente nula. Porém quando o rotor encontra-se em algum de seus extremos, a força de atração é da ordem de centenas de Newton o que vai influenciar na definição do circuito ativo que tem que ser capaz de vencer essa força.

A força devido a translação axial é ilustrado na Fig. fig:forca:passivo:fz:centro, essa força restaurativa torna a parte passiva do mancal estável e é a responsável pela rigidez nesse grau de liberdade. Notamos que a força necessária para deslocar 1mm axialmente quando o mancal está no ponto de operação é de aproximadamente 850N.

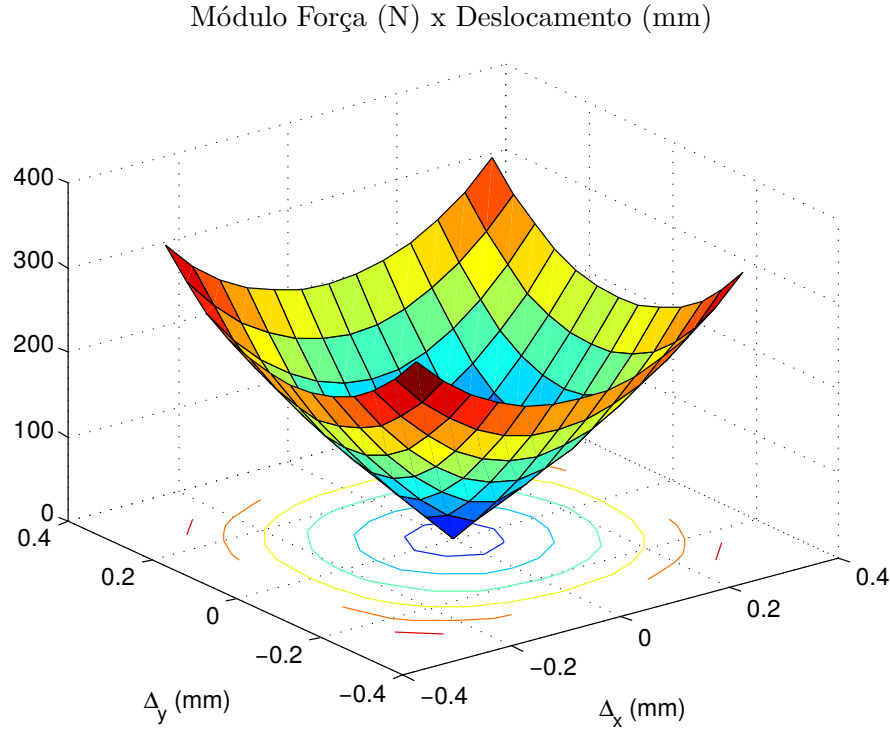


Figura 3.9

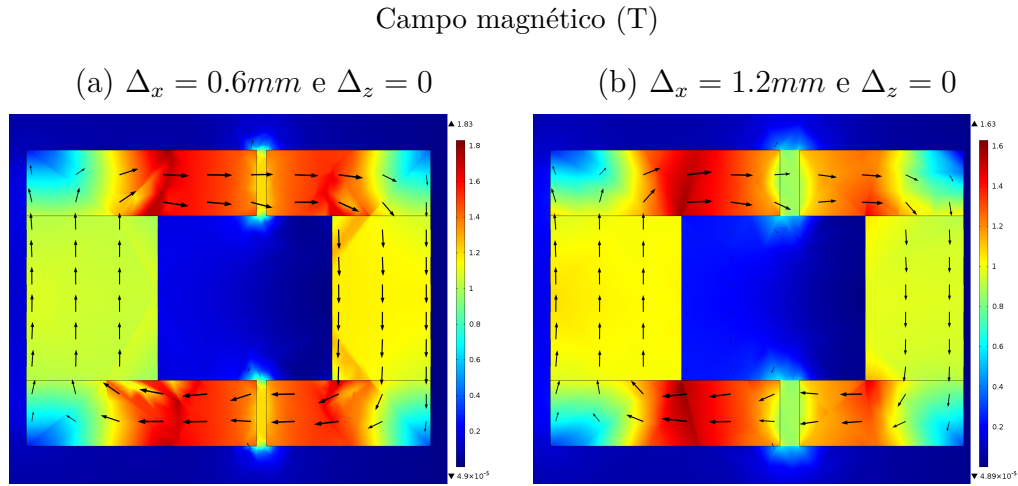
### 3.1.6 Elementos Finitos

O módulo do campo magnético pode ser visualizado para dois casos distintos na Fig. 3.10. Nessa simulação, podemos verificar que o ferro está saturado ( $B=1.6T$ ), que o modelo não possui uma quantidade significativa de linhas de campo magnético que não atravessam o entreferro e que a área do entreferro ( $S_g$ ) possui um pequeno espraio aumentando assim sua área resultando em uma ligeira diminuição no cálculo da força. Verificamos também que o ponto de operação do ímã sofre uma pequena variação passando de 1.05T para 1.06T.

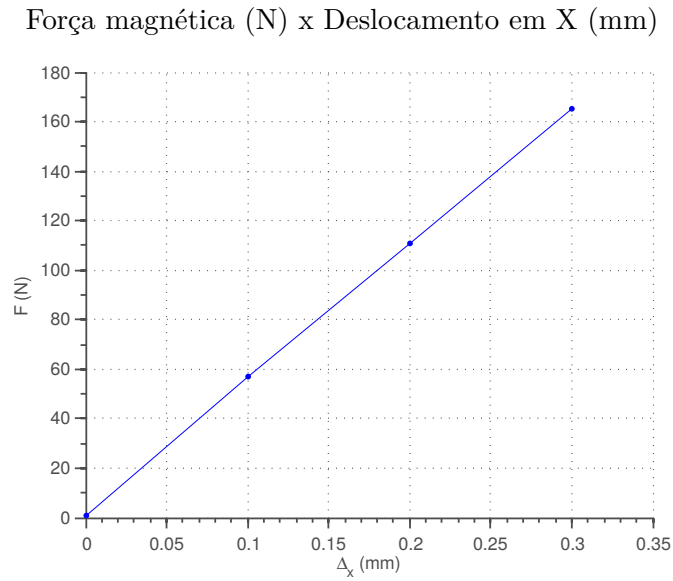
A força magnética de atração do rotor é ilustrado na Fig. 3.11, o rotor foi deslocado em apenas um eixo (x). Foram utilizados os valores nominais do protótipo. Verificamos que o modelo apresenta uma curva linear em termos de força de atração por deslocamento, o que era desejado, já que implica em uma simplicidade no modelo e por consequência na malha de controle.

A Fig. 3.12 ilustra o resultado da simulação através de elementos finitos onde o rotor é transladado verticalmente de 1.2mm. Verificamos que as linhas de campo apresentam uma grande deformação se comparamos as linhas de campo do rotor alinhado com o estator externo ( $\Delta_z = 0$ ), essas deformações apresentam um erro numérico no cálculo da força já que supusemos na Subsec. 3.1.2 que as linhas de





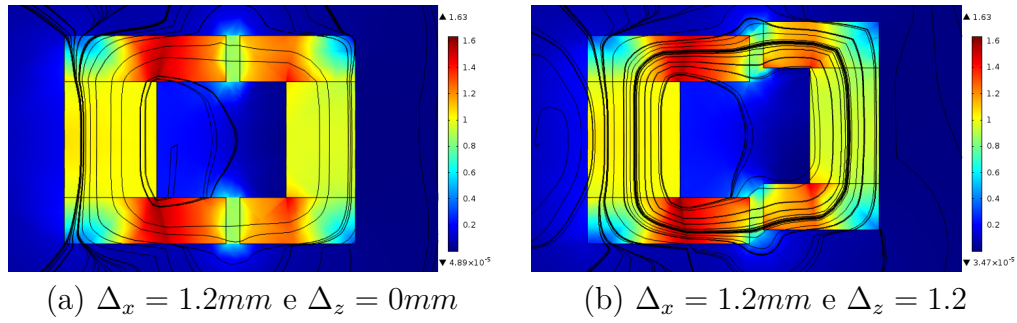
**Figura 3.10** – Modulo do campo magnético do modelo no Comsol do circuito passivo



**Figura 3.11** – Força calculado por elementos finitos com deslocamento em apenas um eixo

campo podem ser decompostas em x e z e que essa decomposição é diretamente relacionada com o deslocamento do rotor ( $\theta$ ).

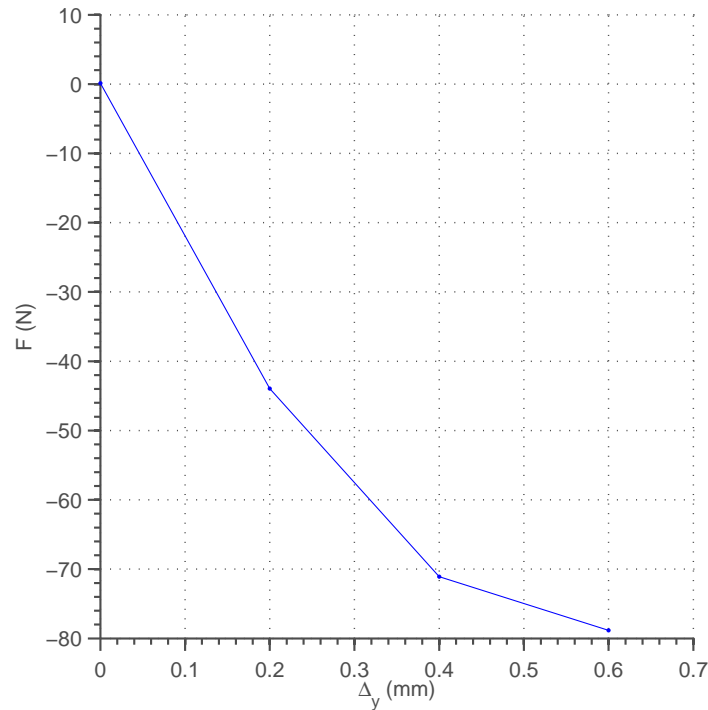
A Fig. 3.13 é o resultado das forças no rotor quando submetido a um deslocamento axial, verificamos que a força possui um componente diferente de zero quando o rotor está alinhado com o estator externo ( $z = 0$ ), verificamos que esse



**Figura 3.12** – Linhas de campo magnético para deslocamentos na vertical

resultado é diferente do encontrado no modelo analítico, explica-se esse fenômeno pelo comportamento do campo magnético quando os ferros do rotor e estator encontram-se afastados, notamos que as linhas de campo magnético não assumem a inclinação proporcional ao deslocamento ( $\theta = tg^{-1}(\frac{\Delta_z}{\Delta_x})$ ), o que causa o erro na força estimado.

Força magnética (N) x Deslocamento em Y (mm): Ponto de equilíbrio



**Figura 3.13** – Força de atração para um deslocamento axial

## 3.2 Circuito Ativo

A modelagem eletromagnética do estator interno é feita considerando que o ferro do estator interno não está saturado. Adota-se também que o fluxo gerado pelas bobinas fecham exclusivamente pelos núcleos com bobinas ativos, essa aproximação torna a modelagem mais simples porém a força resultante nesse calculo vai ser superior da força real, uma análise das diferenças é realizada com a modelagem em elementos finitos.

As linhas de campo desse circuito são ilustradas na Fig. 3.14, essas são formadas pelos entreferros de cada núcleo, pelo retorno do ferro do rotor e pelo retorno do ferro do estator interno.

### 3.2.1 Modelo sem saturação

Podemos interpretar o sistema com dois circuitos distintos o formado pelo núcleo principal (n) mais o núcleo (a) e o formado pelo núcleo principal (n) mais o núcleo

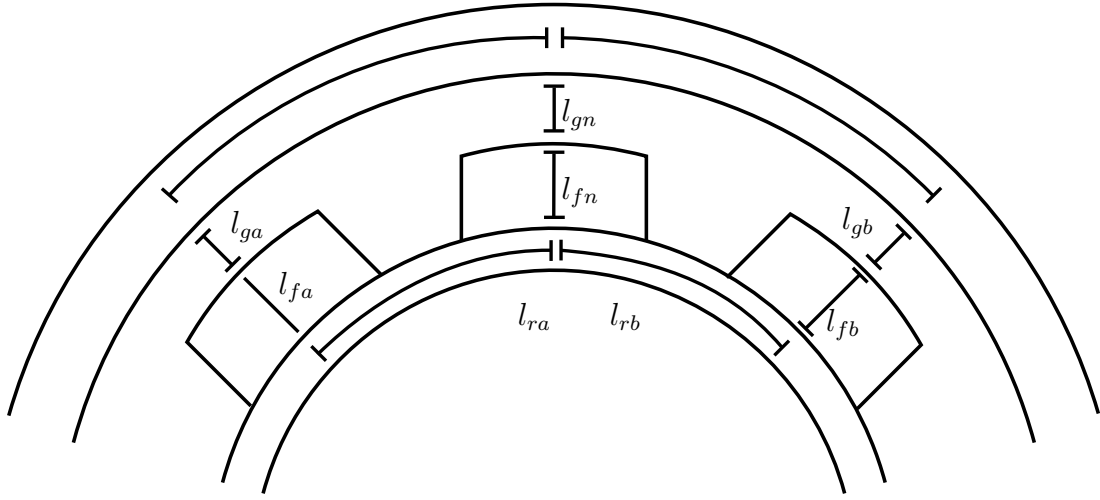


Figura 3.14 – Linhas de campo do circuito ativo

(b), as forças contra eletromotrizes de ambos os circuitos é :

$$\Sigma \mathcal{F}_a = F_n + F_a \quad (3.30)$$

$$\Sigma \mathcal{F}_b = F_n + F_b \quad (3.31)$$

Pela lei de Ampere:

$$H_{fn}l_{fn} + H_{gn}l_{gn} + H_{fa}l_{fa} + H_{ga}l_{ga} + H_{ra}l_{ra} = \Sigma \mathcal{F}_a \quad (3.32)$$

$$H_{fn}l_{fn} + H_{gn}l_{gn} + H_{fb}l_{fb} + H_{gb}l_{gb} + H_{rb}l_{rb} = \Sigma \mathcal{F}_b \quad (3.33)$$

Obtemos:

$$H_{gn} = \frac{\Sigma \mathcal{F}_a(C_s + \frac{S_p}{l_{ga}}) + \Sigma \mathcal{F}_b(C_s + \frac{S_p}{l_{gb}})}{S_{gn} + (C_n + l_{gn})(2C_s + \frac{S_p}{l_{ga}} + \frac{S_p}{l_{gb}})} \quad (3.34)$$

$$H_{ga} = (\Sigma \mathcal{F}_a - H_{gn}(C_n + l_{gn}))(C_s + \frac{S_p}{l_{ga}}) \quad (3.35)$$

$$H_{gb} = (\Sigma \mathcal{F}_b - H_{gn}(C_n + l_{gn}))(C_s + \frac{S_p}{l_{gb}}) \quad (3.36)$$

Onde:

$$C_n = \frac{S_p l_p \mu_0}{S_f \mu} \quad (3.37)$$

$$C_s = \left[ \frac{S_p l_f \mu_0}{S_f \mu} + \frac{S_p l_r \mu_0}{S_r \mu} \right]^{-1} S_p \quad (3.38)$$

$$(3.39)$$

Podemos então deduzir o componente campo magnético dos gaps:

$$B_{gn} = \mu_0 H_{gn} \quad (3.40)$$

$$B_{ga} = \mu_0 H_{ga} \quad (3.41)$$

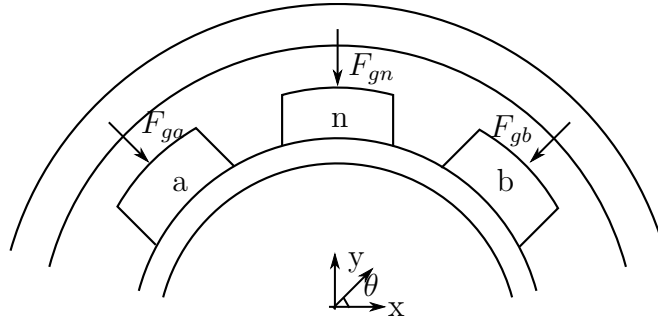
$$B_{gb} = \mu_0 H_{gb} \quad (3.42)$$

### 3.2.2 Força

A força resultante de atração referente a cada bobina é calcula por:

$$\vec{F}_{nx} = \frac{\vec{B}_{nx}^2 S_{nx}}{2\mu_0} \quad (3.43)$$

Podemos então calcular a força resultante projetada puramente no eixo normal ao núcleo principal pela somatória das forças geradas pelos núcleos, como mostrado na Fig. 3.15.



**Figura 3.15** – Forças resultante no rotor no eixo y

Podemos adotar que em pequenos deslocamentos de x e y a variação dos ângulos  $\theta$  possam ser desprezíveis, portanto:

$$\vec{F}_y = \vec{F}_{gn} + \cos(45)(\vec{F}_{ga} + \vec{F}_{gb}) \quad (3.44)$$

$$\vec{F}_x = \cos(45)(\vec{F}_{ga} - \vec{F}_{gb}) \quad (3.45)$$

### 3.2.3 Indutância

O cálculo da indutância é importante pois atrela uma dinâmica ao atuador, a indutância está correlacionada a capacidade de geração de fluxo magnético de uma bobina e de sua corrente:  $L = \frac{d\phi}{di}$ . Das equações de densidade de campo magnético no entreferro de cada bobina: (3.42), (3.41) e (3.40) podemos encontrar o fluxo magnético em cada núcleo ( $\phi = B A$ ).

Definindo o flux linkage da bobina que é o numero de espiras  $N$  pelo fluxo que a atravessa: A indutância própria (o *flux linkage* dividido pela corrente) que somente depende de propriedades geométricas e magnéticas do sistema e não da corrente aplicada, a indutância própria varia com o tamanho do entreferro. A indutância própria só deve depender do fluxo gerado por ela, portando deve-se desconsiderar as demais fontes geradoras de fluxo magnético.

$$L_a = \frac{\Phi_{fa}}{I_a} = NB_{ga} \bigg|_{(I_b=0, I_n=0)} S_{ga}, I_a^{-1} \quad (3.46)$$

$$L_b = \frac{\Phi_{fb}}{I_b} = NB_{gb} \bigg|_{(I_a=0, I_n=0)} S_{gb}, I_b^{-1} \quad (3.47)$$

$$L_n = \frac{\Phi_{fn}}{I_n} = NB_{gn} \bigg|_{(I_a=0, I_b=0)} S_{gn}, I_n^{-1} \quad (3.48)$$

As indutâncias mutuas são calculadas como sendo o fluxo que atravessa a bobina porém induzida por outras fontes :

$$M_{ab} = \frac{\Phi_{b \rightarrow a}}{I_b} = NB_{ga} \bigg|_{(I_a=0, I_n=0)} S_{ga}, I_b^{-1} \quad (3.49)$$

$$M_{an} = \frac{\Phi_{a \rightarrow n}}{I_a} = NB_{ga} \bigg|_{(I_b=0, I_n=0)} S_{ga}, I_a^{-1} \quad (3.50)$$

$$M_{ba} = \frac{\Phi_{a \rightarrow b}}{I_b} = NB_{ga} \bigg|_{(I_b=0, I_n=0)} S_{ga}, I_b^{-1} \quad (3.51)$$

$$M_{bn} = \frac{\Phi_{a \rightarrow b}}{I} = NB_{ga} \bigg|_{(I_b=0, I_n=0)} S_{ga}, I_b^{-1} \quad (3.52)$$

$$(3.53)$$

## 3.3 Escolha dos parâmetros

Os parâmetros geométricos do estator interno foram levantados partindo da restrição de potência imposta pela especificação da Tab. 2.1, com a potência (100W)

e a tensão elétrica de alimentação (24V) obtemos a corrente máxima de trabalho (4A). Essa corrente elétrica deve ser suficiente para gerar uma força de atração que consiga compensar a força gerada pelo circuito passivo no maior entreferro, levantada no modelo em elementos finitos (160N).

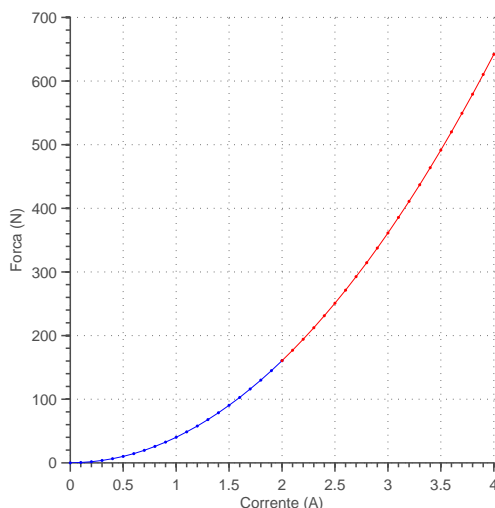
Da equação de força magnética (3.45) é possível tirar uma aproximação da área necessária para atingir um valor de força capaz de mover o rotor, para o valor da densidade de fluxo magnético utilizamos o valor de saturação do aço 1020 (1.5T). Com um valor inicial da área transversal do polo, definiu-se o número de voltas das bobinas necessária para gerar o fluxo magnético no entreferro. Com a área útil e a quantidade de voltas definiu-se a bitola do filamento com resistência elétrica capaz de gerar a corrente de 4A.

### 3.3.1 Simulações

Verificamos a não linearidade da força de atração devido ao campo gerado pelos núcleos do estator interno, essa simulação (Fig. 3.16) foi realizada com o rotor no ponto de equilíbrio .

Podemos aproximar a curva da força pela corrente no ponto de equilíbrio para um polinômio de segunda ordem com  $R^2 = 1$  :  $F_x(i) = 37.25i^2$

Força (N) x  $I$  (A) - Ponto de equilíbrio

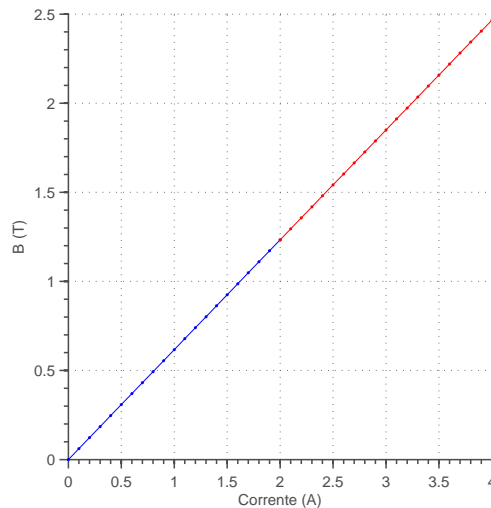


**Figura 3.16** – Força atuante no rotor dado variação na corrente

Se verificarmos o gráfico do campo magnético no ferro do núcleo principal (n) - Fig. 3.17, verificamos que o campo magnético ultrapassa a zona de saturação

para o ferro 1020 (aproximadamente 1.2T), porém esse modelo somente é valido para correntes inferiores a 2.5A.

Campo Magnético (T) x Corrente elétrica (A) - Ponto de equilíbrio



**Figura 3.17** – Campo magnético no ferro principal

### 3.3.2 Elementos Finitos

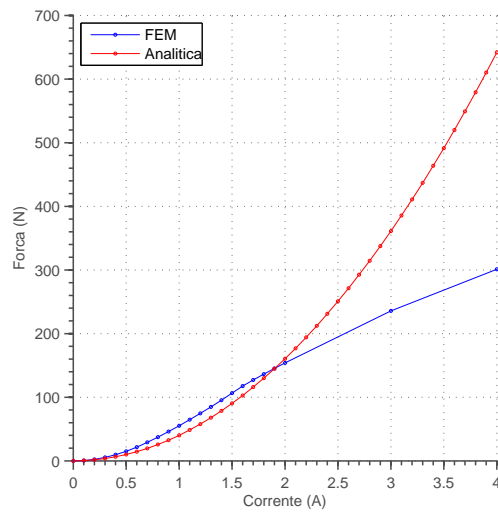
Um modelo em três dimensões do conjunto rotor mais estator interno foi criado e simulado em elementos finitos, a simulação realizada foi de campos magnéticos e do tipo estacionária.

Notamos que o gráfico da força pela corrente (Fig. 3.18) é notavelmente diferente daquele encontrado pela modelagem fenomenológica. Esse fenômeno é explicável por duas razões: a não linearidade relação entre a densidade de fluxo e o campo magnético (histerese magnética) e a propagação das curvas de campo pelos oito núcleos o que não foi considerado na modelagem.

A fig 3.19 mostra o fluxo magnético e o campo magnético no caso em que o rotor está deslocado em 0.3mm para a direção x- e é aplicado uma corrente de 1A na bobina principal e 0.5 A nas bobinas secundárias. Notamos que o principal fluxo magnético acontece entre essas três bobinas. Poucas linhas de campo magnético fecham por outros polos, confirmando o suposto na modelagem analítica. As simulações foram realizadas com correntes contínuas, o que desconsidera as perdas por corrente de efeito de campo. A razão para adotarmos esse tipo de simulação é

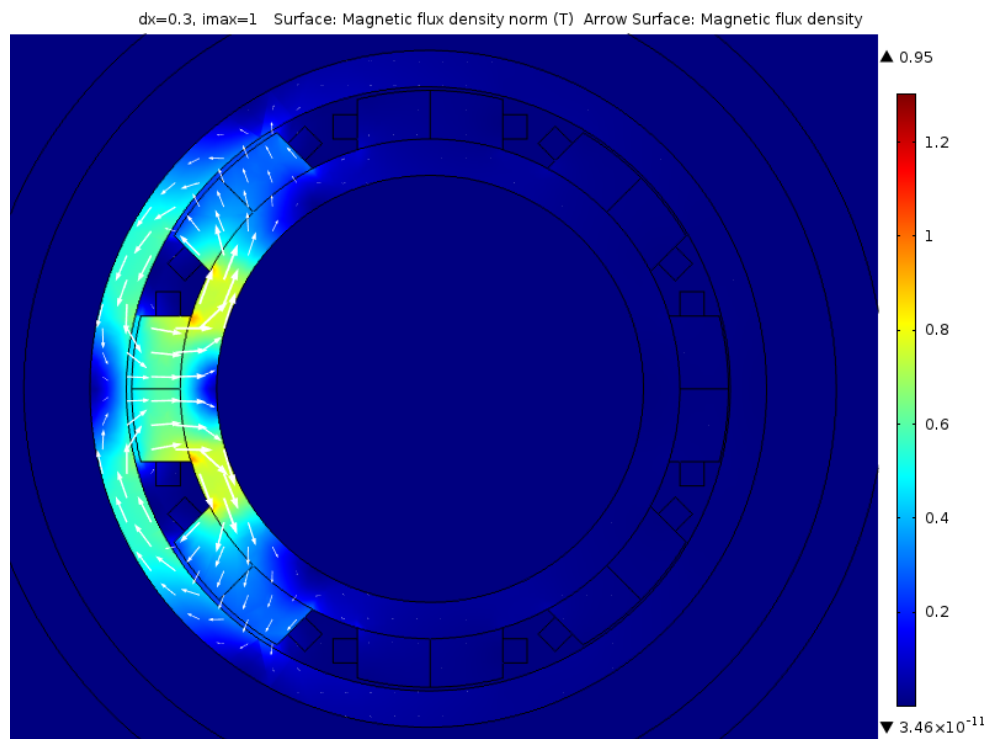


Força (N) x  $I$  (A) - Ponto de equilíbrio



**Figura 3.18** – Comparativo FEM vs fenomenológica

devido ao recurso computacional necessário para executar simulações no domínio da frequência.



**Figura 3.19** – Campo magnético com rotor deslocado de 3mm do ponto de operação com 1A aplicado na bobina principal e 0.5 nas secundárias

# Capítulo 4

## Modelagem Dinâmica

Nesse capítulo abordaremos a modelagem dinâmica do rotor que sofre influências das forças do estator externo e dos polos do estator interno. Um modelo linearizado no ponto de operação é apresentando.

### 4.1 Rotor

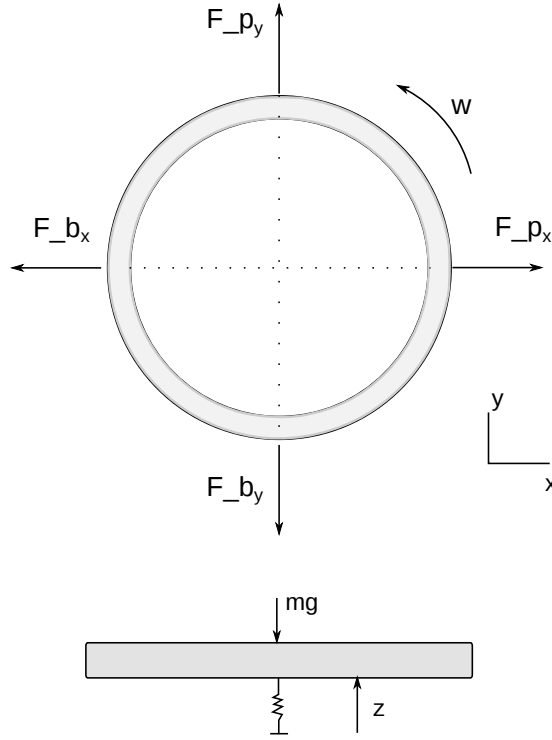
A dinâmica do rotor é levantada a partir das forças resultantes aplicadas no rotor, essas forças são devido tanto aos ímãs permanentes quanto pela força gerada pelas bobinas. A Fig. 4.1 ilustra as forças atuantes no rotor, onde :

- $F_p$  : Força devido ao ímã permanente
- $F_b$  : Força devido a bobina
- $\tau$  : Torque de rotação devido ao motor
- $\theta$  : O ângulo do rotor
- $x, y, z$  : Deslocamento no plano cartesiano

Via formalismo lagrangiano obtemos a parcela da energia cinética que é resultante da rotação, e das translações do rotor:

$$T_{\theta, x, y, z} = \frac{1}{2} I_z \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) \quad (4.1)$$

A energia potencial devido a translação axial do rotor:

**Figura 4.1** – Forças resultantes no rotor

$$V_z = m g z + \frac{1}{2} K z^2 \quad (4.2)$$

As forças não conservativas atuantes no rotor são causadas pela parte ativa do mancal:

$$Q_y^{nc} = F_{by}(x, y, i) \quad (4.3)$$

$$Q_x^{nc} = F_{bx}(x, y, i) \quad (4.4)$$

$$(4.5)$$

As forças conservativas (que dependem somente da posição do rotor) são resultantes dos ímãs permanentes no estator externo :

$$Q_y^c = F_{py}(x) \quad (4.6)$$

$$Q_x^c = F_{px}(y) \quad (4.7)$$

$$Q_z^c = F_{pz}(z) \quad (4.8)$$

Com a resolução da lagrangiana obtemos as equações da dinâmica do sistema:

$$L = T - V$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} \right] - \frac{\partial L}{\partial r} = Q^{nc} + Q^c \quad (4.9)$$

Obtemos as equações diferenciais que regem o modelo:

$$I\ddot{\theta} = 0 \quad (4.10)$$

$$m\ddot{x} = F_{px}(x,y) - F_{by}(x,y,i) \quad (4.11)$$

$$m\ddot{y} = F_{py}(x,y) - F_{bx}(x,y,i) \quad (4.12)$$

$$m\ddot{z} - Kz = mg + F_{pz} \quad (4.13)$$

Exceto pela dependência das posições nas forças, verificamos pelas equações o desacoplamento entre os diferentes graus de liberdade.

## 4.2 Estator externo

A força exercida no rotor devido aos imãs permanentes do estator externo podem ser aproximadas por uma equação linear, como visto em 3.1.3. Assumisse que a força de atração no roto para pequenos deslocamento dependa somente da posição no eixo, podendo ser representada pela decomposição:

$$F_p(x) = K_p x \quad (4.14)$$

$$F_p(y) = K_p y \quad (4.15)$$

Onde  $K_p$  é a constante de proporção entre a força e a posição, x e y são os deslocamento em torno do ponto de equilíbrio do rotor com relação ao estator externo. Obtemos via a simulação em elementos finitos um relação força por deslocamento de:  $F_p(d) = 547.8 d$  (distância em mm) para ambos os eixos (devido a simetria do mancal).

## 4.3 Estator interno

A força de atração do rotor devido ao campo magnético gerado pelas bobinas é não linear com a posição do rotor (comprimento do entreferro) e depende da corrente de excitação aplicada as bobinas. Além desses fatores, uma dinâmica do

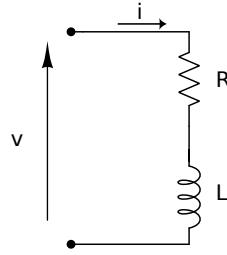


Figura 4.2

atuador atrelada a indutância deve ser considerada. A bobina é modelada como um circuito RL, como demonstrado na Fig. 4.2.

$$I(s) = \frac{V(s)}{R + Ls} \quad (4.16)$$

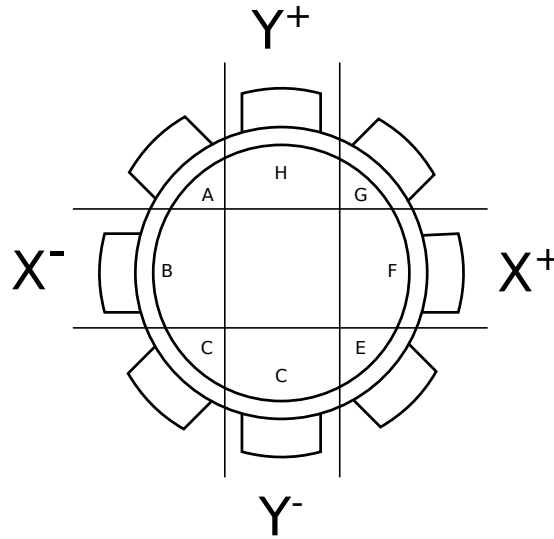
As indutâncias devem ser calculadas como demonstrada na SubSec. 3.2.3. Os valores nominais (ponto de operação) da indutância de cada bobina é de aproximadamente 56mH e a resistência elétrica de 4  $\Omega$  gerando uma frequência de corte de 11 Hz. A força exercida por cada bobina é calculada pela forma analisada em: (3.44).

As tensões nas bobinas são distribuídas conforme Fig. 4.3 (a), onde existe sobreposição de bobinas para atuação em diferentes eixos (X e Y). É aplicado nas bobinas que possuem sobreposição a metade da tensão, limitando assim o valor da tensão total nas bobinas para o valor máximo ( $I/2 + I/2 = I$ ). A Fig. 4.3 ilustra a configuração proposta. Verificamos que a tensão é aplicada em metade para as bobinas com sobreposição (a,g,e,c) e com ganho unitário nas bobinas principais (h,f,c,b). O Valor da indutância L varia em cada bobina pois depende do tamanho do entreferro.

### 4.3.1 Linearização da força

Foi levantando em elementos finitos as forças magnéticas dado uma variação de posição (a partir do ponto de operação) de até 0.3mm e uma variação de corrente de 0A até 1A, um polinômio de primeiro grau foi encontrado com os resultados das forças. Optou-se trabalhar no ponto de corrente perto do zero pois é a região natural de operação dos polos. E com o rotor em torno do ponto de operação. O ganho para o sistema nessas condições é :

$$F_b(i) = i 46.5383 \quad (4.17)$$



**Figura 4.3** – Distribuição das tensões nas bobinas

## 4.4 Batente

O batente atua como uma saturação na posição do rotor (x,y), porém atrelou-se uma dinâmica ao batente para analisar as influências de possíveis choques mecânicos do rotor. Utilizou-se no modelo o módulo de elasticidade (módulo de Young), onde a penetração ( $\Delta l$ ) no material pode ser calculada por :

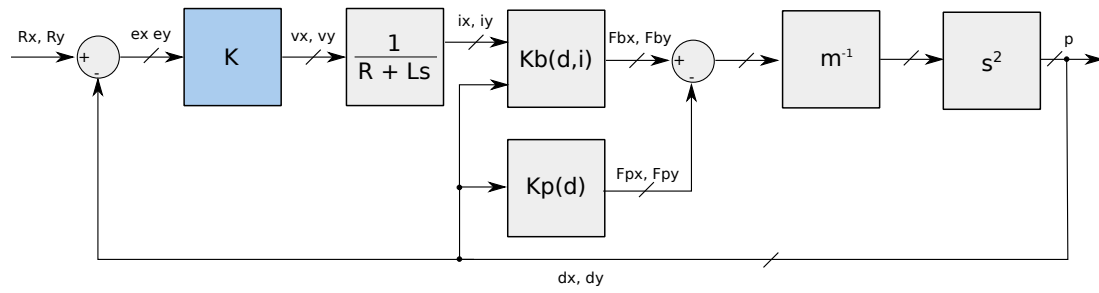
$$\Delta l = \frac{F l_o}{E A} \quad (4.18)$$

Sendo : **E** a constante de Yong para o material; **A** área de contato;  $l_o$  o comprimento inicial do material e **F** a força resultante do impacto.

## 4.5 Característica do sistema e diagrama de blocos

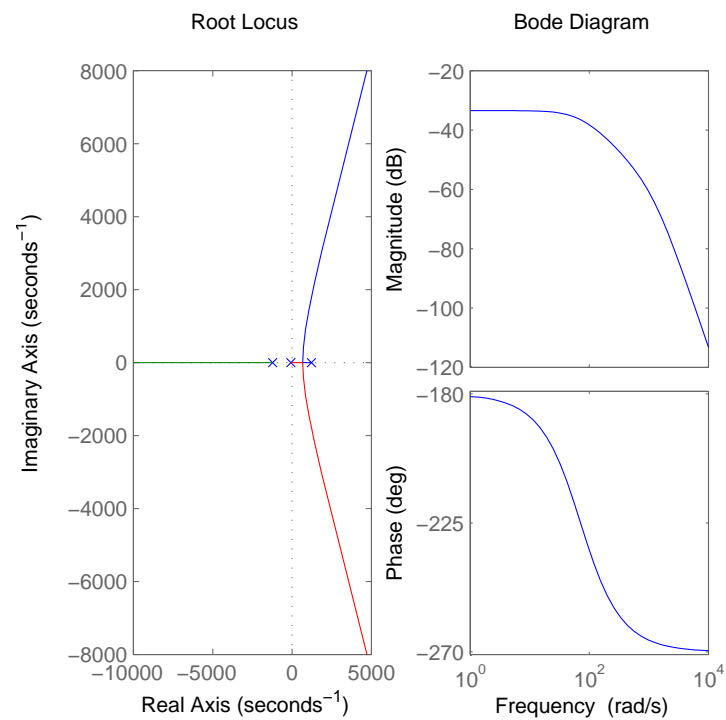
A partir do diagrama de blocos ilustrado na Fig. 4.4, um modelo em torno do ponto de operação pode ser levantando, o modelo servirá para o projeto do controlador. O sistema é do tipo 0 possuindo três polos localizados em:  $[1.21 - 1.21 - 0.07] 10^3$ , sua função de transferência é:

$$G(s) = \frac{46530}{0.02077 s^3 + 1.478 s^2 - 3.08e04 s - 2.191e06} \quad (4.19)$$



**Figura 4.4** – Diagrama de blocos do modelo linearizado para descolamentos em x e y

Verificamos através da análise em frequência (Fig. 4.5) que o sistema é instável em malha aberta e um controlador deve ser projetado para instabilizar o sistema.



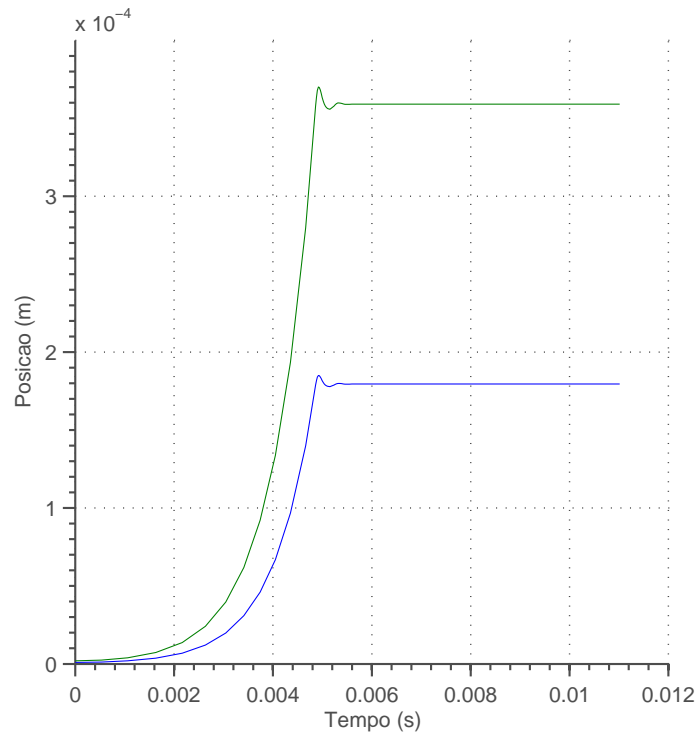
**Figura 4.5** – Característica do sistema para um dos eixos em malha aberta



## 4.6 Simulações

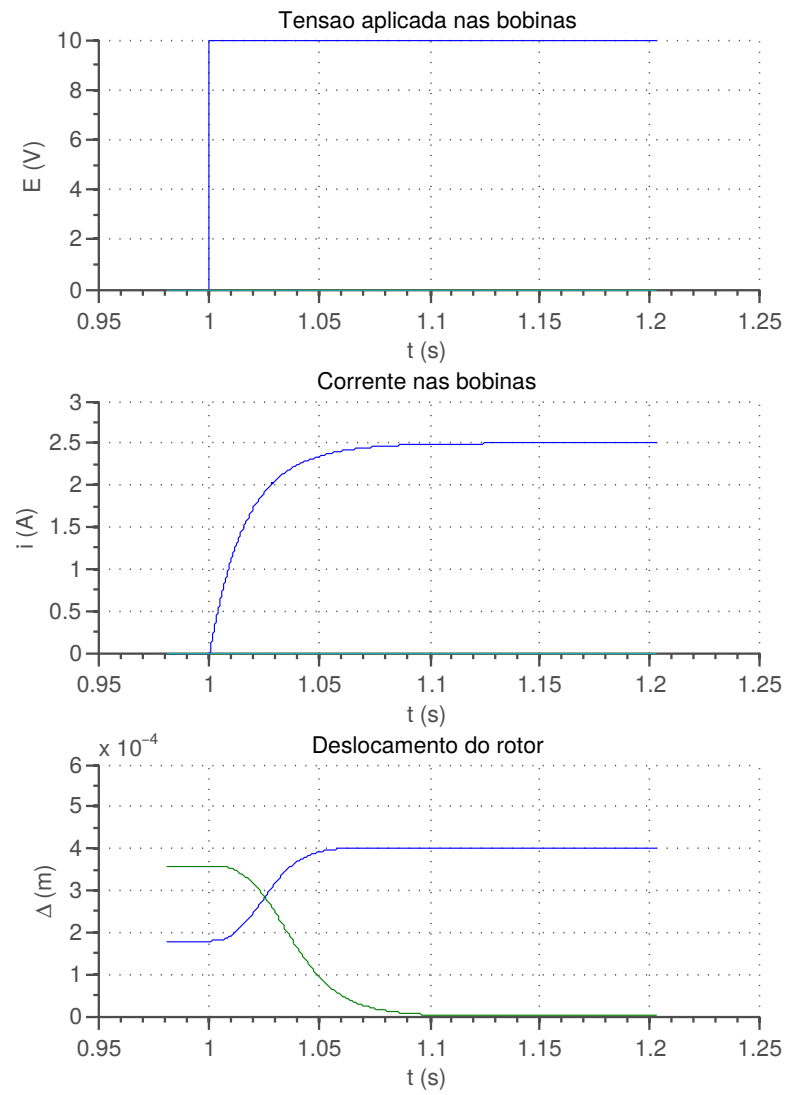
Simulações foram realizadas em malha aberta com o modelo não linear das forças, a Fig. 4.6 é o comportamento do rotor quando nenhuma corrente é aplicada nos polos, verificamos o choque com o batente em torno do 5ms.

Posição x,y (mm) do rotor ao longo do tempo (s)



**Figura 4.6** – Dinâmica instável do rotor e choque no batente

A Fig. 4.7 mostra o deslocamento do rotor dado a aplicação de 2.5 V nas bobinas x+, verificamos a dinâmica da corrente dado a aplicação da corrente.



**Figura 4.7** – Dinâmica do rotor dado a aplicação de tensão na bobina X+

# Referências Bibliográficas

- Bangcheng, H., Shiqiang, Z., Xi, W., e Qian, Y. (2012). Integral Design and Analysis of Passive Magnetic Bearing and Active Radial Magnetic Bearing for Agile Satellite Application. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(6):1959–1966.
- Bernus, C., Jamain, P., e Roland, J. (1998). Magnetic bearing with alternating actuators and sensors. *US Patent 5,763,972*.
- Chiba, A. e Fukao (2005). *Magnetic bearings and bearingless drives*. Elsevier.
- Detoni, J. G. (2012). *Developments on Electrodynamic Levitation of Rotors*. PhD thesis, Politecnico di Torino.
- Han, B., Zheng, S., e Hu, X. (2013). Dynamic Factor Models of a Thrust Magnetic Bearing With Permanent Magnet Bias and Subsidiary Air Gap. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(3):1221–1230.
- Hofer, M., Schmidt, E., e Schrodll, M. (2009). Design of a Three Phase Permanent Magnet Biased Radial Active Magnetic Bearing Regarding a Position Sensorless Control. *2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pgs. 1716–1721.
- Jimenez-Lizafraga, M. e Alcorta, a. (2007). Multi-Model Robust LQ Control of an Active Magnetic Bearing. *2007 American Control Conference*, pgs. 5977–5982.
- Krishnan, S., Lee, S.-h., Hsu, H.-y., e Konchady, G. (2010). Lubrication of Attitude Control Systems. *Advances in Spacecraft Technologies*, 1.
- Leupold, H. e Potenziani, E. (1990). An Overview of Modern Permanent Magnet Design. *US Army Laboratory Command*.
- Marble, S. e Tow, D. (2006). Bearing health monitoring and life extension in satellite momentum/reaction wheels. *Aerospace Conference, 2006 IEEE*, pgs. 1–7.

- Mukhopadhyay, S. (2005). Do we really need sensors? A Sensorless Magnetic Bearing Perspective. *1st International Conference on Sensing . . .*, pgs. 425–431.
- Pilat, A. (2007). Automatic generation of Active Magnetic Bearing geometry with COMSOL Multiphysics.
- Republica Brasileira, P. D. (2011). Desafios do programa espacial brasileiro. *Secretaria De assuntos Estratégicos*, pg. 267.
- Rundell, A. E. e Drakunov, S. V. (1996). A Sliding Mode Observer and Controller for Stabilization of Rotational Motion. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, pgs. 598–608.
- Scharfe, M., Roschke, T., Bindl, E., e Blonski, D. (2001). Design and development of a compact magnetic bearing momentum wheel for micro and small satellites. Em *Proceedings of the 15th Annual Utah State University Conference on Small Satellites*, volume 15, pgs. 1–9.
- Schuhmann, T., Hofmann, W., e Werner, R. (2012). Improving Operational Performance of Active Magnetic Bearings Using Kalman Filter and State Feedback Control. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 59(2):821–829.
- Schweitzer, G., Bleuler, H., Maslen, E., e Cole, M. (2009). *Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery*. Springer.
- Sun, G., a.B. Palazzolo, Provenza, A., e Montague, G. (2004). Detailed ball bearing model for magnetic suspension auxiliary service. *Journal of Sound and Vibration*, 269(3-5):933–963.
- Taniwaki, Shigemune and Ohkami, Y. (2003). Experimental and numerical analysis of reaction wheel disturbances. *JSME International Journal Series C*, 46:519—526.
- Tezuka, T., Kurita, N., e Ishikawa, T. (2013). Design and Simulation of a Five Degrees of Freedom Active Control Magnetic Levitated Motor. *Magnetics, IEEE Transactions . . .*, 49(5):2257–2262.
- Veloso, E. e Rollemberg, R. (2009). A política espacial brasileira. *Conselho de Altos Estudos e Avaliação Tecnológica*, 2:270.
- Vischer, D. e Bleuler, H. (1993). Self-sensing active magnetic levitation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 29(2):1276–1281.