

Rafael Corsi Ferrão

Desenvolvimento de Mancal Magnético  
para Rodas de Reação

**São Paulo**  
**2014**



Rafael Corsi Ferrão

# Desenvolvimento de Mancal Magnético para Rodas de Reação

**O que eu devo colocar aqui?**

Orientador: Prof. Dr. José Jaime  
da Cruz

**São Paulo  
2014**

Aluno, Nome C.

Desenvolvimento de Mancal Magnético para Rodas de Reação

56 páginas

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Controle e Automação.

1. Mancal Magnético
2. Roda de Reação
3. Controle Multivariável

I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Eletrônica.

## Comissão Julgadora:

---

Prof. Dr.  
Nome

---

Prof. Dr.  
Nome

---

Prof. Dr.  
José Jaime da Cruz

## Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, ao meu co-orientador, aos meus colaboradores, aos técnicos, à seção administrativa, à fundação que liberou verba para minhas pesquisas, aos meus amigos, à minha família....

## *Resumo*

Este trabalho vem ao encontro de projetar um mancal magnético para rodas de reação que tem utilização na malha de controle de atitude de satélites. ...

**Palavras-chave:** Mancal Magnético, Roda de Reação, Controle Multivariável

*Abstract*

Este trabalho vem ao encontro de projetar um mancal magnético para rodas de reação que tem utilização na malha de controle de atitude de satélites. ...

**Keywords:** Magnetic Bearing, Reaction Wheel, Multivariable Control

# 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 . . . . .	9
1.2	Corte da topologia proposta por Scharfe et al. (2001) a: estator externo; b: rotor; c: estator interno; d: ímãs permanentes . . . . .	9
1.3	Corte da topologia proposta por Bangcheng et al. (2012) . . . . .	10
2.1	Corte ilustrativo do mancal magnético . . . . .	15
2.2	Corte ilustrativo do mancal magnético . . . . .	16
2.3	Circuito magnético do estator externo . . . . .	17
2.4	Fluxo magnético no estator externo e rotor . . . . .	19
2.5	Vista de meio estator interno . . . . .	20
2.6	Fluxo magnético . . . . .	21
2.7	Circuito eletromagnético estator interno e rotor . . . . .	22
3.1	Dimensões do mancal . . . . .	26
3.2	Circuito magnético passivo suposto . . . . .	26
3.3	Corte da topologia francesa . . . . .	27
3.4	Curva de saturação de um material ferro magnético . . . . .	29
3.5	Deslocamento em X e Y . . . . .	32



3.6	Cálculo do fator de espraçamento . . . . .	34
3.7	Decomposição de força passiva para uma determinada secção . . .	35
3.8	Força atuante no rotor dado uma translação radial . . . . .	37
3.9	. . . . .	38
3.10	Força atuante no rotor dado uma translação axial . . . . .	38
3.11	Força atuante no rotor dado variação na corrente . . . . .	44
3.12	Campo magnético no ferro principal . . . . .	44
3.13	Modelo Comsol do circuito passivo Malha utilizada nos cálculos .	45
3.14	Modulo do campo magnético do modelo no Comsol do circuito passivo . . . . .	46
3.15	Força calculado por elementos finitos com deslocamento em apenas um eixo . . . . .	47
3.16	Linhas de campo magnético para deslocamentos na vertical . . . .	47
3.17	Comparativo do cálculo da força magnética pela Eq. (3.29) e pelo modelo no Comsol com $\Delta_x = 1.2$ mm . . . . .	48
4.1	Forças resultantes no rotor . . . . .	50
4.2	Visão geral do modelo dinâmico . . . . .	53

# Lista de Tabelas

2.1	Especificações de requisito do sistema . . . . .	14
-----	--	----

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivo . . . . .	2
1.2	Justificativa . . . . .	3
1.3	Revisão bibliográfica . . . . .	4
1.3.1	Graus de liberdade . . . . .	6
1.3.2	Topologias com aplicação em rodas de reação . . . . .	8
1.3.3	Sensoriamento . . . . .	10
1.3.4	Mancais auxiliares . . . . .	11
1.3.5	Técnicas de controle . . . . .	11
1.4	Metodologia . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Mancal magnético</b>	<b>13</b>
2.1	Visão Geral . . . . .	14
2.2	Estator externo . . . . .	17
2.3	Rotor . . . . .	19
2.4	Estator interno . . . . .	20
2.5	Batente . . . . .	23
2.6	Base . . . . .	23

2.7	Eletronica . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Modelagem Eletromagnética do Mancal</b>	<b>25</b>
3.1	Circuito passivo . . . . .	25
3.1.1	Campo magnético no entreferro . . . . .	28
3.1.2	Decomposição do campo magnético B em X e Z . . . . .	32
3.1.3	Parâmetros Físicos . . . . .	33
3.1.4	Força . . . . .	34
3.1.5	Simulações . . . . .	36
3.2	Circuito Ativo . . . . .	39
3.2.1	Modelo sem saturação . . . . .	39
3.2.2	Força . . . . .	43
3.2.3	Simulações . . . . .	43
3.3	Modelagem Elementos Finitos . . . . .	45
3.3.1	Circuito passivo . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Modelagem Dinâmica</b>	<b>49</b>
4.1	Rotor . . . . .	49
4.2	Estator externo . . . . .	52
4.3	Estator interno . . . . .	52
4.4	Simulação . . . . .	53
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>54</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 inércia 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.

## 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).

## 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.

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

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 aerospaciais, 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.

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.

A outra solução é a utilização de um mancal magnético ([Marble e Tow, 2006](#); [Bangcheng, 2010](#)) 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 ([Ludner e Ragsdale, 1995](#)), 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, 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.

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.

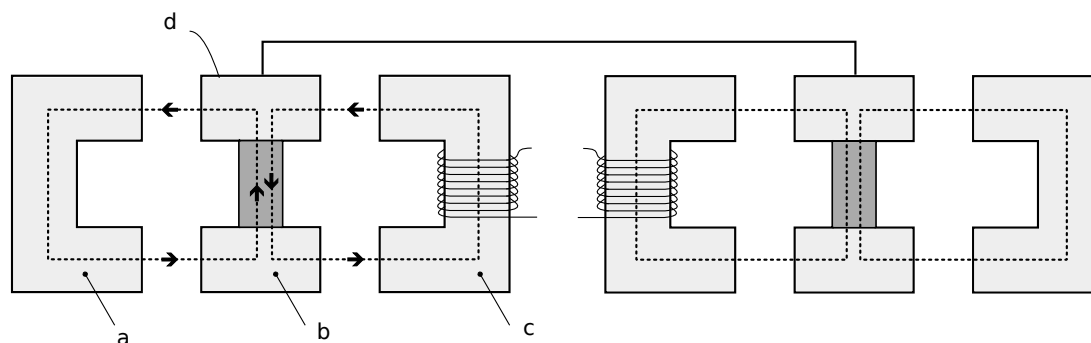
### 1.3.2 Topologias com aplicação em rodas de reação

Podemos classificar os mancais magnéticos para rodas de reação em basicamente duas topologias distintas.

A francesa, com dois graus de liberdades ativos é proposta por [Bernus et al. \(1998\)](#) possuindo ímãs permanentes no rotor e dois estatores: um interno com bobinas para o controlo do fluxo magnético no rotor (por consequência na posição radial) e outro externo para estabilização axial e por contribuir com a rigidez radiais.

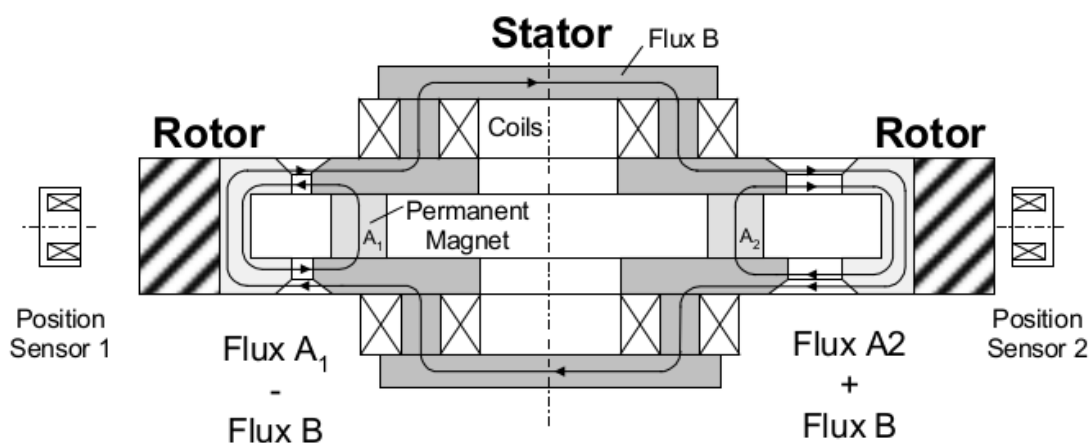
Nessa topologia (Fig. [1.1](#)), um fluxo magnético contínuo é gerado no rotor por ímãs permanentes ali instalados, as bobinas instaladas no estator interno conseguem gerar campos aditivos e subtrativos no rotor (dependente do sentido

da corrente). Se o campo for aditivo, consegue-se aumentar a rigidez do eixo axial, caso o campo for subtrativo, consegue-se diminuir ambas rigidezes, tornando assim mais fácil o deslocamento radial do rotor.



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

A segunda topologia, alemã, é 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.



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

passar a figura  
a limpo

Com essa arquitetura é possível utilizar as bobinas tanto para exercer uma força atrativa no rotor quanto para torna a sua rigidez mas branda, atenuando assim a rigidez radial 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 uma equipe chinesa [Bangcheng et al. \(2012\)](#) para ser utilizado em uma roda de reação de um satélite ágil, como nos mancais anteriores o eixo axial é estabilizado passivamente pela geração de um campo magnético por ímãs permanentes situado no rotor e no

continuar estator.

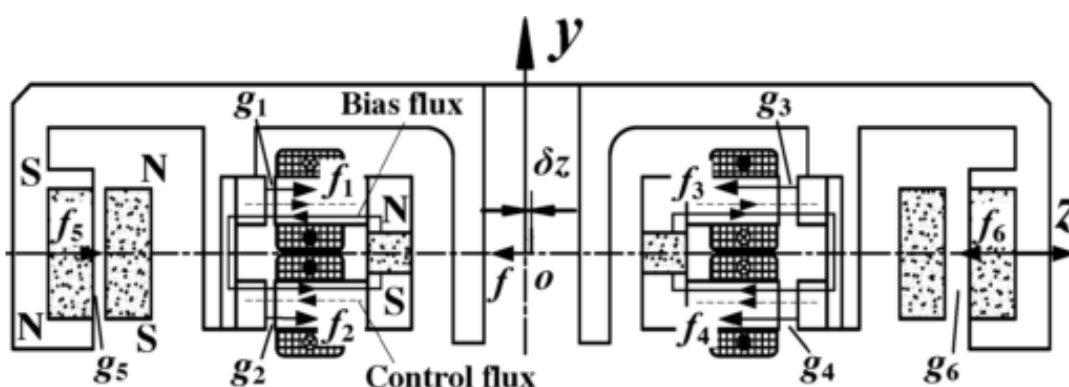


Figura 1.3 – Corte da topologia proposta por [Bangcheng et al. \(2012\)](#)

passar a figura  
a limpo

### 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 a própria bobina 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 e medição da força contra-eletromotriz que pela medição da corrente na bobina consegue estimar a posição e velocidade do rotor.

Já os mancais sensoreados utilizam sensores de deslocamentos exclusivos para a medição da posição do rotor e por consequência do entreferro. Os sensores podem ser dos tipos capacitivos e indutivos dependendo do material construtivo do sistema. Geralmente são instalados para funcionar de forma diferencial.

cite

#### 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 altas rotações não possuem bom rendimento na inicialização (aceleração) e utilizam dos mancais auxiliares nessa zona .

cite

Os mancais auxiliares podem ser compostos por rolamentos esféricos (Sun et al., 2004) ou mancais puramente sólidos podendo ser compostos de diversos materiais.

cite

#### 1.3.5 Técnicas de controle

Em alguns casos controles aplicados na indústria são utilizados com bom frequência em mancais magnéticos, é o caso de controles proporcionais e derivativos (PID) (?) com uma malha de controle por grau de liberdade, em casos com acoplamento

dinâmico, controle feedforward pode 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 ()

## 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 auxílio nas escolhas dos parâmetros físicos do sistema porém não é o foco do projeto o aprofundamento nesse tipo de modelagem.

Após a decisão da topologia a ser empregada, estudos foram realizados em pró de decidir os parâmetros físicos que satisfaçam as restrições empоста para o sistema. Primeiramente considerou-se somente a parte passiva (estator externo e rotor) até atingirmos um conjunto com rigidez suficiente no eixo axial e menor força de atração no eixo radial. Após a decisão dessas dimensões, projetamos o estator interno capaz de exercer força de atração suficiente no rotor para estabilizar-lo em seu ponto de operação.

Com um modelo satisfatório em elementos finitos, um protótipo foi construído

ainda não

e suas propriedades eletromagnéticas validadas com o modelo .



## 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 os blocos mais críticos, influenciando diretamente a qualidade da roda de reação e o cumprimento dos requisitos. Nesse projeto de pesquisa, busca-se projetar um mancal magnético que possa fazer parte de uma roda de reação. 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 (Velooso e Rollemberg, 2009), possibilitando que o mesmo possa rejeitar perturbações orbitais e executar manobras de posicionamento ?.

cite

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

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

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

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).

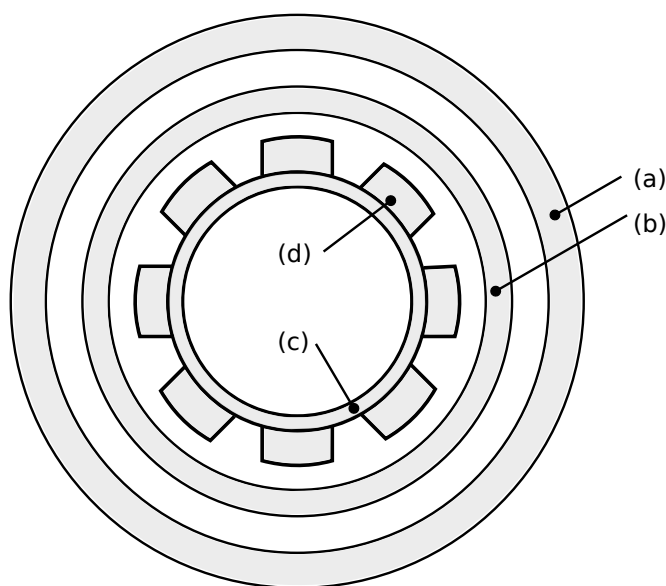
## 2.1 Visão Geral

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*, *roll*, *pitch* e sua posição axial, e 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 e mas será desenvolvida por um motor elétrico de corrente contínua sem

escovas (BLDC), instalado no centro do mancal.

As parte magnéticas do mancal são compostas 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, com isso atingindo uma maior rigidez no eixo axial. A Fig. 2.1 ilustra o mancal proposto. O rotor é a parte móvel do mancal e onde é conectado o motor. Verifica-se que foi adotado uma geometria plana visando uma melhor rigidez nos modos instáveis do mancal, além de possibilitar a montagem em modo painel.

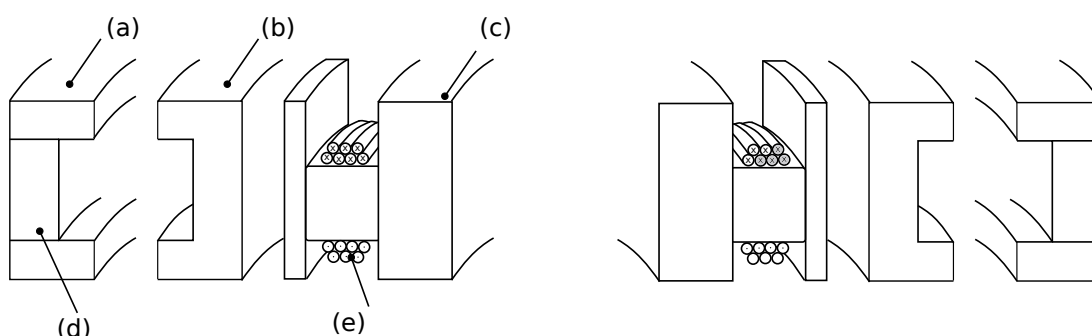
porque mancal  
fora do motor



**Figura 2.1** – Corte ilustrativo do mancal magnético. Onde: a) Estator externo, b) Rotor, c) Estator interno, d) núcleos

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 atrativas 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 tirar-lo da posição de equilíbrio (rotor batido) e estabilizar-lo 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 o sistema é fixa em uma base também não magnética.

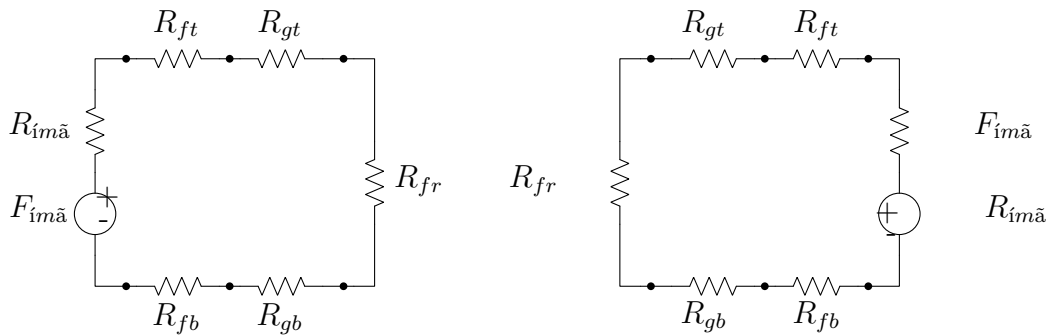
Uma eletrônica de acionamento, sensoriamento e processamento é alocada na parte inferior da base, tornando o sistema compacto. A eletrônica possui *drivers* para controle das correntes nas bobinas e também um sistema de sensoriamento para mediar a posição do rotor. Uma sistema microprocessado realizara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

A seguir será exposta a descrição detalhada de cada subsistema . . . .

## 2.2 Estator externo

O Estator externo, responsável pela estabilização dos graus de liberdade passivamente estáveis é formado de três partes : Ferro topo, Ímã, 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

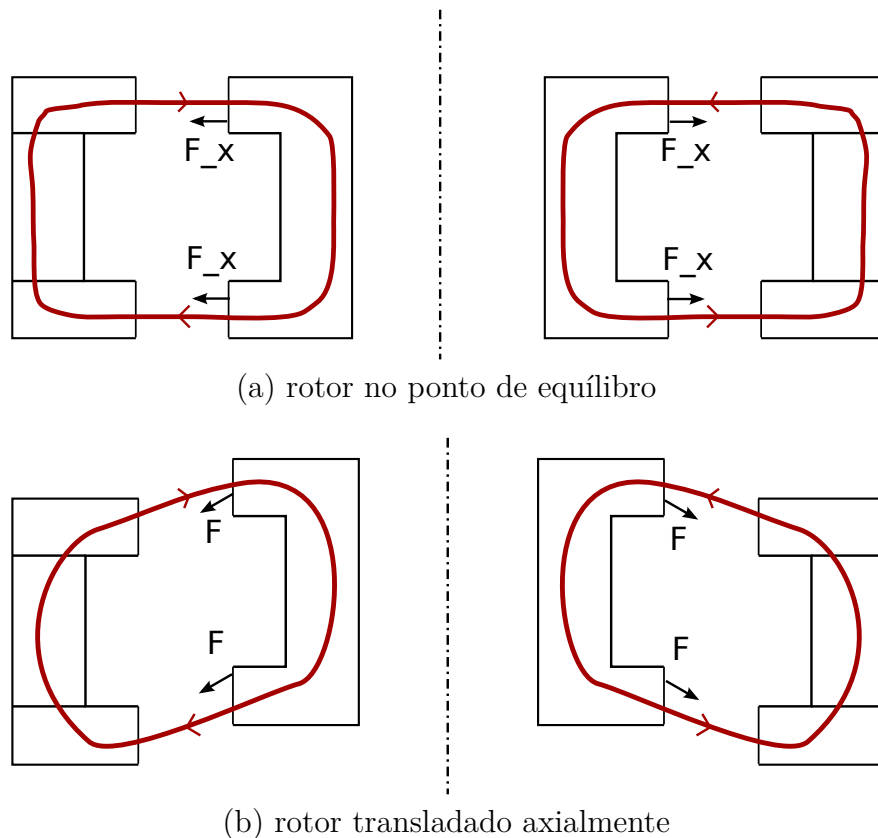
Além das relutâncias, temos como fonte geradora de campo magnético o ímã localizado entre os ferros :  $F_{ima}$ . Devido ao fluxo magnético permanente o rotor sofre atração em ambos os lados, se no ponto de equilíbrio, ou seja, com um entreferro simétrico em ambos os lados, a força resultante tende a ser nula e o rotor permanece 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 seja linear. Para tanto projetamos o estator externo do mancal para que trabalhe sempre com o ferro saturado, na citar saturação a relação B-H torna-se praticamente linear.

Além da linearização tem-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 um aumento ocorrerá 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 sua posição 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.



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

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.

falar do tilt

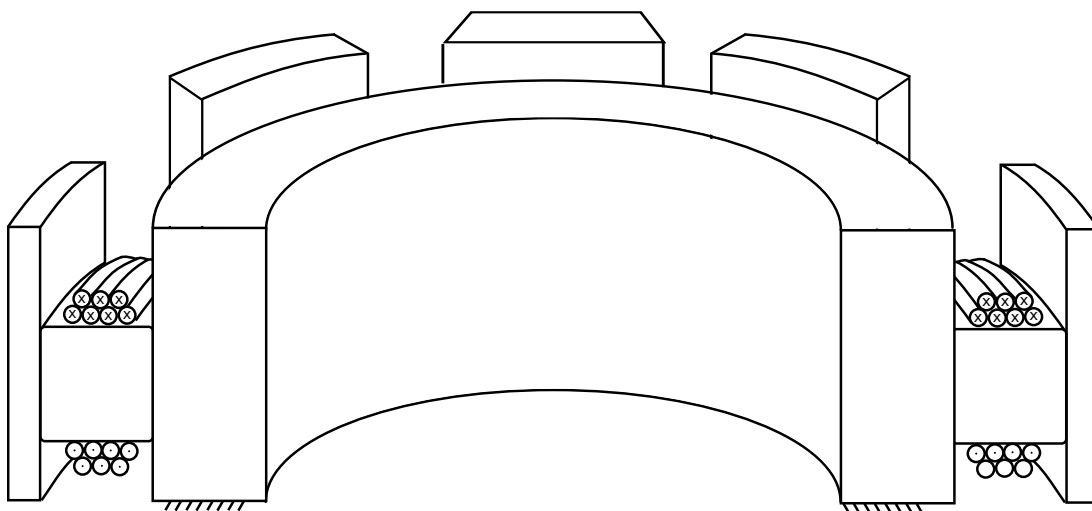
## 2.3 Rotor

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

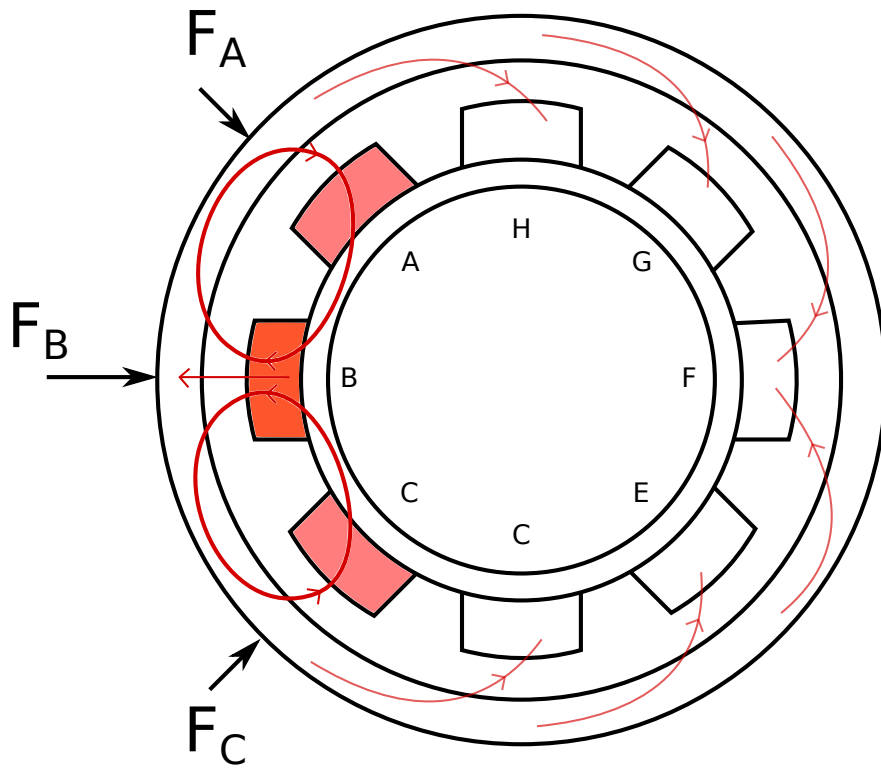


**Figura 2.5** – Vista de meio estator interno

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 a onde deseja-se realizar a máxima 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) para evitar que o polo B atinja a saturação, já que o campo que o atravessa é composto pela totalidade induzido em sua bobina mais parte dos campos de (A) e (C).



**Figura 2.6** – Fluxo magnético

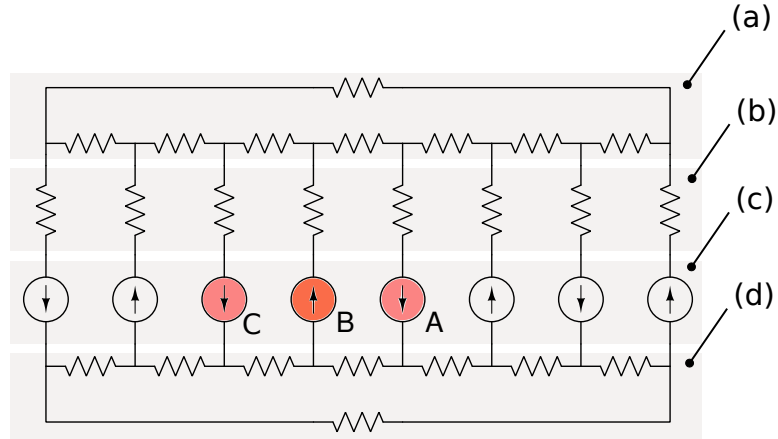
As forças geradas  $F_A$  e  $F_C$  possuem componentes em x e y, as componentes y são de mesma intensidade e se cancelam, restando uma componente aditiva em x. A força resultantes são portanto:

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

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

Nesse modo de operação pode-se gerar uma força y e x, para isso passa 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 2.7** – Circuito eletromagnético estator interno e rotor: (a) relutâncias do rotor, (b) relutâncias do entreferro, (c)

Os parâmetros geométricos do estator interno foram levantados partindo da restrição de potência imposta pela especificação da Tab. 2.1, o fluxo de desenvolvimento é descrito a seguir:

- a. potencia máxima (especificada):  $P = 100\text{W}$
- b. tensão de trabalho (decisão de projeto):  $V = 24\text{V}$
- c. corrente máxima:  $I = P/V = 4\text{A}$
- d. força exigida da bobina:  $F = 140\text{N}$  ( = força dos ímãs na direção contrária com o rotor no batente, levantado na simulação em elementos finitos)
- e. entreferro:  $g=0.001\text{m}$  (na condição de rotor no batente do lado oposto) densidade de campo máxima:  $B=1.5\text{T}$  (valor de saturação pro material - Aço 1020, vem da curva  $B \times H$ )
- f. área transversal do polo do estator: sai da equação  $B^2 \cdot A / (l / \mu + 2g)^2$
- g.  $N$ =numero de voltas necessárias pra saturar o material com  $I = 4\text{A}$
- h. area longitudinal do polo: espaço necessário pra dar  $N$  voltas
- i. tamanho do fio: definido pelo numero de voltas  $N$  e área transversal do polo
- j. bitola do fio: bitola tal que co mo tamanho acima tenha a resistência  $R=V/I$
- k. altura do estator: definido para caber  $N$  voltas com a bitola acima

citar, verificar  
com modela-  
gem

## 2.5 Batente

## 2.6 Base

## 2.7 Eletronica



## 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.

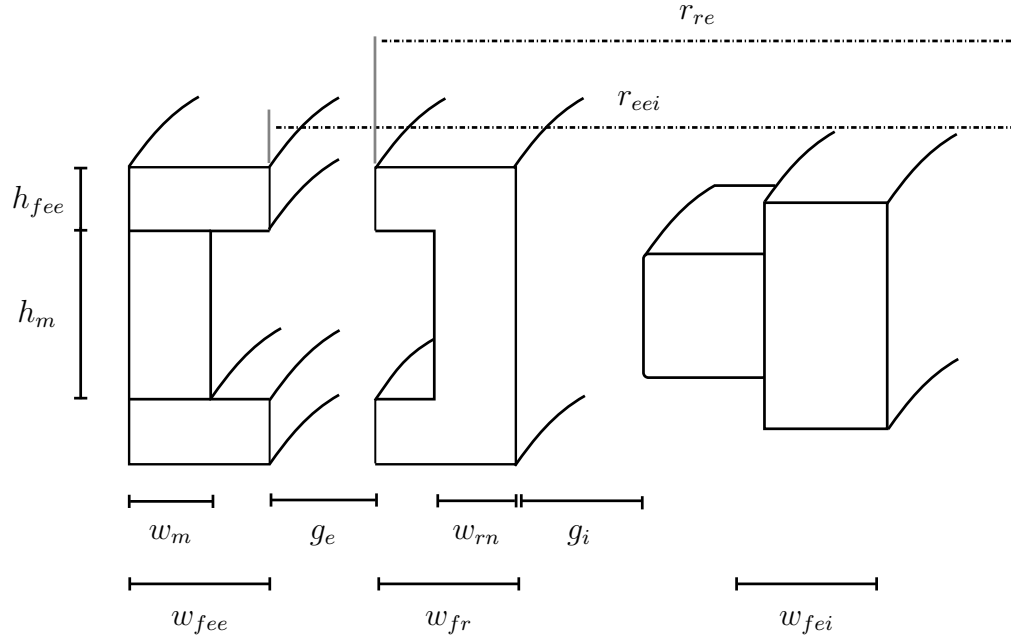
### 3.1 Circuito passivo

A parte passiva do mancal 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.

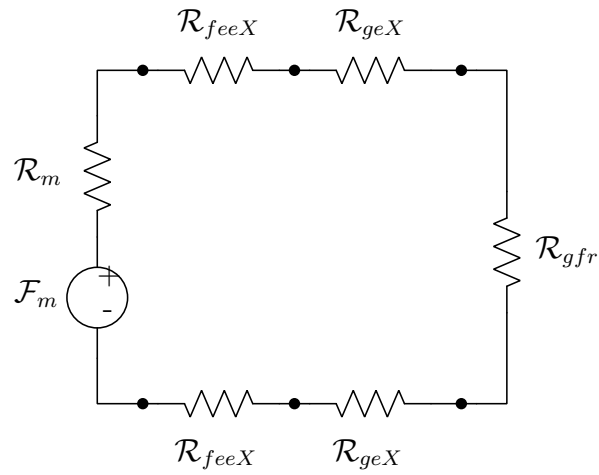
Sendo:

- $\mathcal{F}_m$  : Força Eletromotriz gerado pelo ímã permanente;

atualizar figura  
mancal V2



**Figura 3.1** – Dimensões do mancal

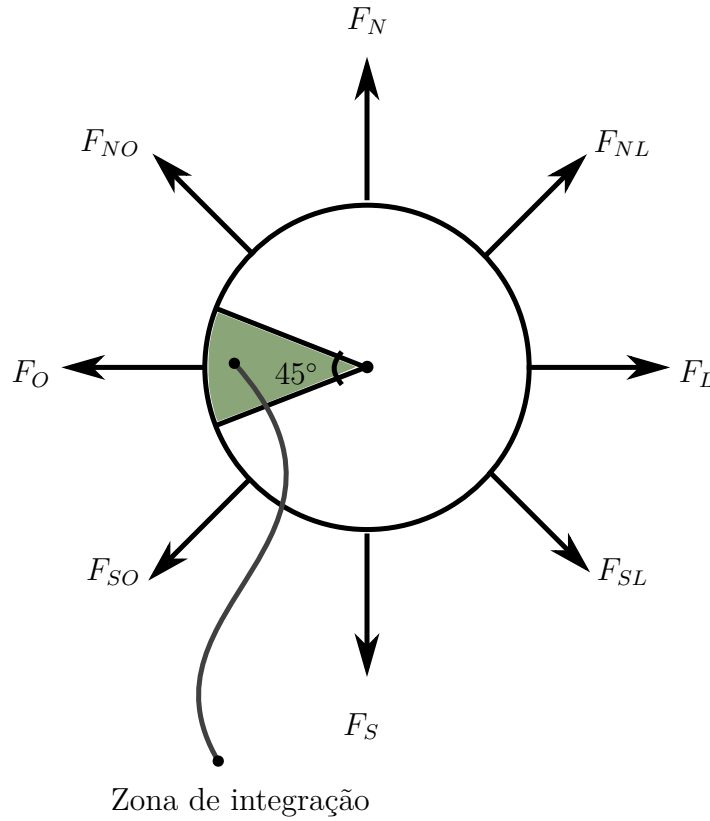


**Figura 3.2** – Circuito magnético passivo suposto

- $\phi_m$  : 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** – Corte da topologia francesa

### 3.1.1 Campo magnético no entreferro

Com a premissa de que todas as linhas de campo passem pelo gap e, e que os ferros do estator externo estão 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 gap).

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

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \mathcal{I}_t^0$$

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

Podemos derivar da Eq. 3.1:

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

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

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

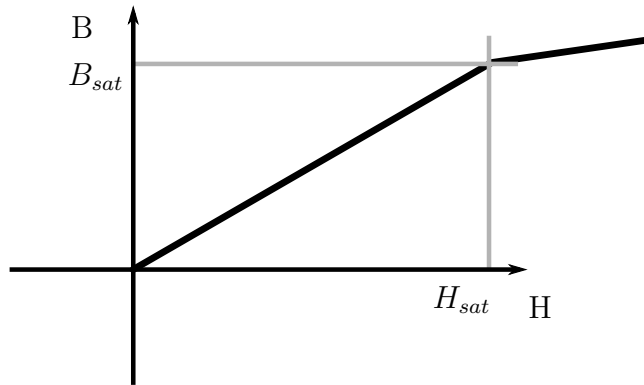
A relação  $B_m/H_m$  para imãs de terra rara como Samário-Cobalto ou Neodímio é praticamente linear podendo ser aproximada para:



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

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 :

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



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

Substituindo (3.6) e (3.7) na equação (3.3)

$$\left[B_r - \frac{B_r}{H_c} H_m\right] S_m = [B_{fs} + \mu_s(H_f - H_{fs})] S_f$$

Isolando  $H_m$  em função de  $H_f$  :

$$H_m = \left[ - \left[ B_{fs} + \mu_s(H_f - H_{fs}) \frac{S_f}{S_m} \right] + B_r \right] \frac{H_c}{B_r} \quad (3.8)$$

$$= -H_f \frac{\mu_s S_f}{S_m} \frac{H_c}{B_r} + \left( \mu_s H_{fs} \frac{S_f}{S_m} + B_r - B_{fs} \right) \frac{H_c}{B_r} \quad (3.9)$$

Obtemos da Eq. (3.4):

$$B_f S_f = B_g S_g$$

$$[B_{fs} + \mu_s(H_f - H_{fs})] S_f = \mu_0 H_g S_g$$

Isolando  $H_g$  em função de  $H_f$  :

$$H_g = \frac{B_{fs} S_f - \mu_s S_f H_{fs}}{\mu_0 S_g} + H_f \frac{\mu_s S_f}{\mu_0 S_g} \quad (3.10)$$

Substituindo na Eq. (3.2) os valores de  $H_g$ ,  $H_m$  obtemos o campo magnético no ferro:

$$\begin{aligned} & \left( -H_f \frac{\mu_s S_f}{S_m} \frac{H_c}{H_m} + \left( \mu_s H_{fs} \frac{S_f}{S_m} + B_r - B_{fs} \right) \frac{H_c}{H_m} \right) l_m + \\ & + 2H_f l_f + 2 \left( \frac{B_{fs} B_{fs} S_f - \mu_s S_f H_{fs}}{\mu_0 S_g} + H_f \frac{\mu_s S_f}{\mu_0 S_g} \right) l_g = 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$H_f \left[ -\frac{\mu_s S_f}{S_m} \frac{H_c}{H_m} l_m + 2l_f + 2\frac{\mu_s S_f}{\mu_0 S_g} l_g \right] = \\ - \left( \mu_s H_{fs} \frac{S_f}{S_m} + B_r - B_{fs} \right) \frac{H_c}{H_m} l_m - 2 \left( \frac{B_{fs} S_f - \mu_s S_f H_{fs}}{\mu_0 S_g} \right) l_g \quad (3.12)$$

Definido as variáveis auxiliares

$$C_1 = -\frac{\mu_s S_f}{S_m} \frac{H_c}{H_m} l_m + 2l_f \quad (3.13)$$

$$C_2 = 2\frac{\mu_s S_f}{\mu_0} \quad (3.14)$$

$$C_3 = - \left( \mu_s H_{fs} \frac{S_f}{S_m} + B_r - B_{fs} \right) \frac{l_m H_c}{H_m} \quad (3.15)$$

$$C_4 = -2 \left( \frac{B_{fs} S_f - \mu_s S_f H_{fs}}{\mu_0} \right) \quad (3.16)$$

Obtemos o valor do vetor campo magnético  $H_f$  :

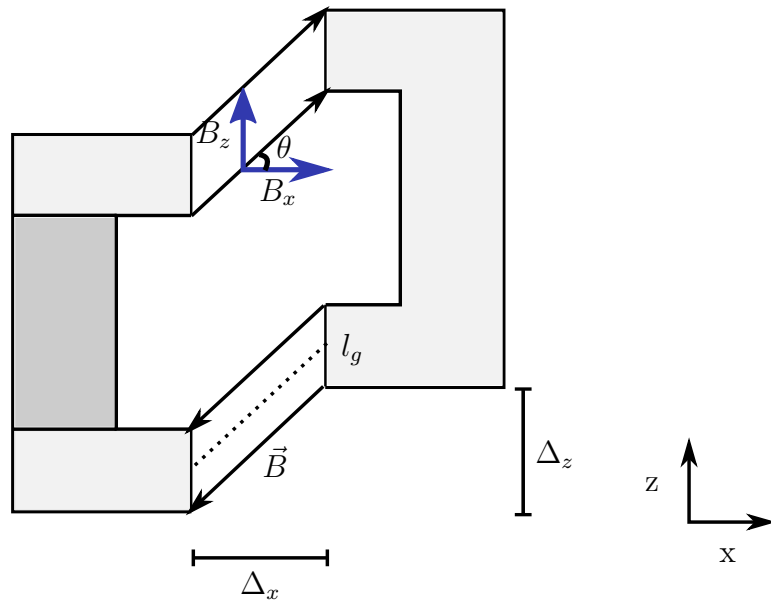
$$H_f = \frac{C_3 + C_4 l_g / S_g}{C_1 + C_2 l_g / S_g} \quad (3.17)$$

Sendo  $B_f = B_{fs} + \mu_s H_f (H_f - H_{fs})$  podemos então, calcular o valor do campo magnético no entreferro (3.10):

$$B_g = \frac{B_f S_f}{S_g} \quad (3.18)$$

### 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.



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

Os campos podem então ser derivados:

$$\theta_z = tg^{-1}\left(\frac{\Delta_z}{\Delta_x}\right) \quad (3.19)$$

$$l_g = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_z^2} \quad (3.20)$$

$$B_{gx} = B \cos(\theta_z) \quad (3.21)$$

$$B_{gz} = B \sin(\theta_z) \quad (3.22)$$

### 3.1.3 Parâmetros Físicos

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 ??:

Gerar tabela de  
dim

$$S_m = w_m \frac{2\pi(r_{eei} + w_{fee} - w_m)}{8} \quad (3.23)$$

$$S_f = h_{fee} \frac{2\pi r_{eei}}{8} \quad (3.24)$$

$$S_g(l_g) = h_{fee} \frac{2\pi(r_{eei} - l_g/2)}{8} \alpha_g \quad (3.25)$$

$$l_m = h_m \quad (3.26)$$

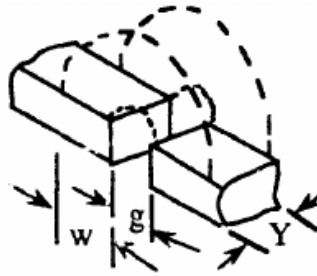
$$l_f = w_{fee} \quad (3.27)$$

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 Po-

[tenziani \(1990\)](#)) como sendo dependente do tamanho do entreferro e da geometria, podemos assumir como aproximação que o espraçamento é regido pela seguinte equação:

$$P = 0.318 \ln \left( 1 + \frac{2w}{g} \right) \quad (3.28)$$



**Figura 3.6** – Cálculo do fator de espraçamento

### 3.1.4 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](#)) :

$$\vec{F}(l_g) = - \frac{\vec{B}_g^2 S_g}{\mu_0} \quad (3.29)$$

#### 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

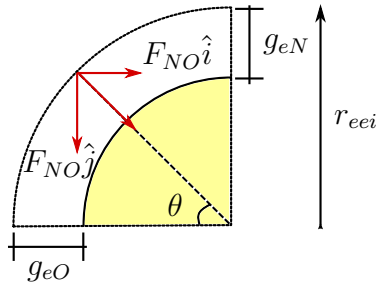
partes distintas sendo que cada parte possui um componente de campo magnético diferente das outras partes. Para então obtermos o valor das forças radiais, precisamos calcular todas as forças e então decompor-las nos eixos (Fig. 3.3). Por inspeção :

$$F_x = F_L + F_{NL} \mathbf{i} + F_{SL} \mathbf{i} - F_O - F_{NO} \mathbf{i} - F_{SO} \mathbf{i} \quad (3.30)$$

$$F_y = F_N + F_{NL} \mathbf{j} + F_{SL} \mathbf{j} - F_S - F_{NO} \mathbf{j} - F_{SO} \mathbf{j} \quad (3.31)$$

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. 3.7), a variação no ângulo  $\theta$  pode ser desprezível e sempre ser considerado como 45 graus.

$$\theta_{NO} = 45^\circ$$



**Figura 3.7** – Decomposição de força passiva para uma determinada secção

portanto:

$$F_{NL} \dot{\mathbf{i}} = F_{NL}(G_{eNO}) \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3.32)$$

$$F_{NL} \dot{\mathbf{j}} = F_{NL}(G_{eNO}) \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3.33)$$

E similarmente para as outras forças.

### Equações de força em Z

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

$$F_z(l_g) = \frac{S_g}{\mu_0} \sum_{i=N}^{NO} B_{giz}^2 \quad (3.34)$$

### 3.1.5 Simulações

Simulações foram realizados 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 ?.

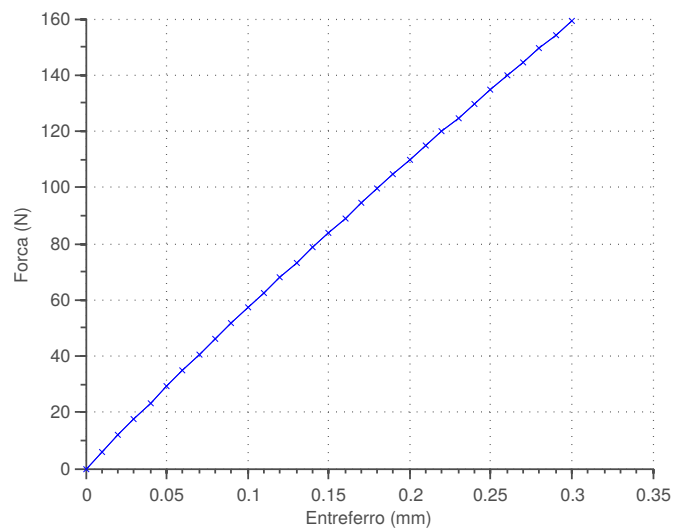
Verificamos na Fig. 3.8 a simulação da translação do rotor em apenas um dos eixos radiais, podemos verificar a linearidade da força quando o rotor trabalha em modo diferencial. O máximo deslocamento é truncado em 0,35mm pelo batente.

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

colocar ajuste  
para reta



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



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

que tem que ser capaz de vencer essa força.

A força devido a translação axial é ilustrado na Fig. fig:força: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.

Módulo Força (N) x Deslocamento (mm)

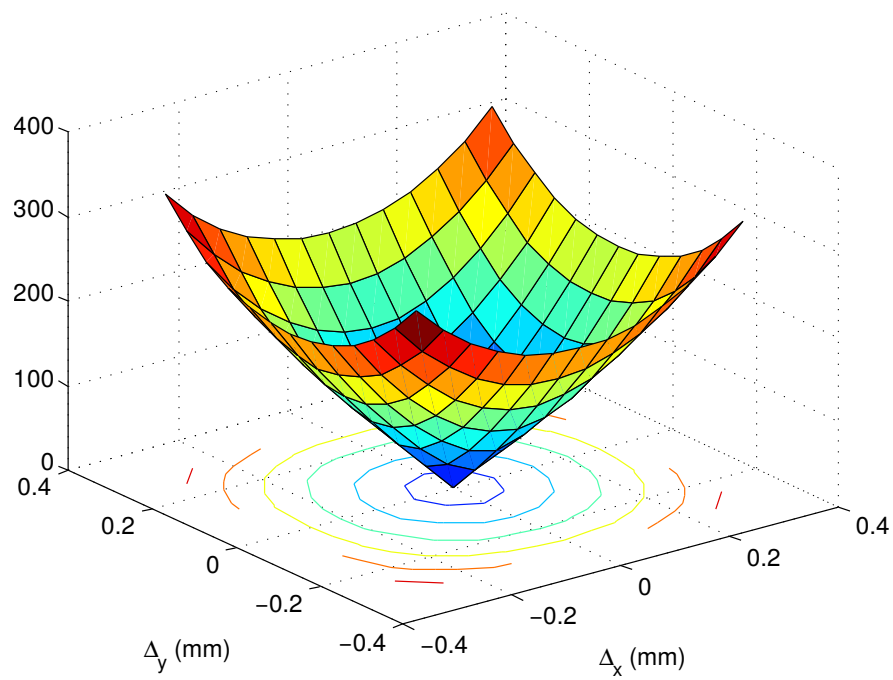


Figura 3.9

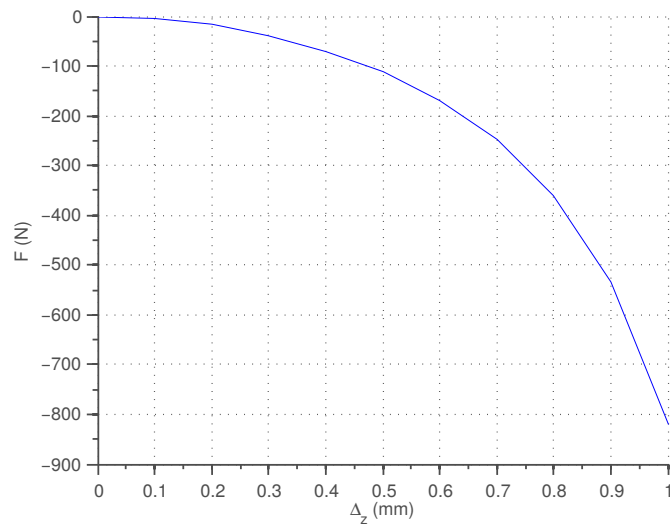
Força (N) x  $\Delta_z$  (mm) - Deslocamento Axial:  $x = 0$ ,  $y = 0$ 

Figura 3.10 – Força atuante no rotor dado uma translação 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 como ilustrado na Fig.

não é verdade -  
refazer

### 3.2.1 Modelo sem saturação

Pela lei de Ampere:

$$H_{fn}l_{fn} + H_{gn}l_{gn} + H_{fa}l_{fa} + H_{ga}l_{ga} + H_{ra}l_{ra} = \Sigma \mathcal{F}_a \quad (3.35)$$

$$H_{fn}l_{fn} + H_{gn}l_{gn} + H_{fb}l_{fb} + H_{gb}l_{gb} + H_{rb}l_{rb} = \Sigma \mathcal{F}_b \quad (3.36)$$

Da conservação do fluxo magnético:

$$\begin{aligned} B_{gn}S_{gn} &= B_{ga}S_{ga} + B_{gb}S_{gb} \\ \rightarrow H_{gn}S_{gn} &= H_{ga}S_{ga} + H_{gb}S_{gb} \end{aligned} \quad (3.37)$$

núcleo

$$\begin{aligned}
B_{gn}S_{gn} &= B_{fn}S_{fn} \\
H_{gn}S_{gn}\mu_0 &= H_{fn}S_{fn}\mu \\
H_{fn} &= \frac{H_{gn}S_{gn}\mu_0}{S_{fn}\mu}
\end{aligned} \tag{3.38}$$

loop I

$$\begin{aligned}
B_{ga}S_{ga} &= B_{fa}S_{fa} \\
H_{ga}S_{ga}\mu_0 &= H_{fa}S_{fa}\mu \\
H_{fa} &= \frac{H_{ga}S_{ga}\mu_0}{S_{fa}\mu}
\end{aligned} \tag{3.39}$$

$$\begin{aligned}
B_{ga}S_{ga} &= B_{ra}S_{ra} \\
H_{ga}S_{ga}\mu_0 &= H_{ra}S_{ra}\mu \\
H_{ra} &= \frac{H_{ga}S_{ga}\mu_0}{S_{ra}\mu}
\end{aligned} \tag{3.40}$$

loop II

$$\begin{aligned}
B_{gb}S_{gb} &= B_{fb}S_{fb} \\
H_{gb}S_{gb}\mu_0 &= H_{fb}S_{fb}\mu \\
H_{fb} &= \frac{H_{gb}S_{gb}\mu_0}{S_{fb}\mu}
\end{aligned} \tag{3.41}$$

$$\begin{aligned}
B_{gb}S_{gb} &= B_{rb}S_{rb} \\
H_{gb}S_{gb}\mu_0 &= H_{rb}S_{rb}\mu \\
H_{rb} &= \frac{H_{ga}S_{gb}\mu_0}{S_{rb}\mu}
\end{aligned} \tag{3.42}$$

Substituindo as equações (3.39) e (3.40) em (3.35) :

$$\begin{aligned}
\frac{H_{gn}S_{gn}\mu_0}{S_{fn}\mu}l_{fn} + H_{gn}l_{gn} + \frac{H_{ga}S_{ga}\mu_0}{S_{fa}\mu}l_{fa} + H_{ga}l_{ga} + \frac{H_{ga}S_{ga}\mu_0}{S_{ra}\mu}l_{ra} &= \Sigma\mathcal{F}_a \\
H_{gn} \left[ \frac{S_{gn}l_{fn}\mu_0}{S_{fn}\mu} + l_{gn} \right] + H_{ga} \left[ \frac{S_{ga}l_{fa}\mu_0}{S_{fa}\mu} + l_{ga} + \frac{S_{ga}l_{ra}\mu_0}{S_{ra}\mu} \right] &= \Sigma\mathcal{F}_a \\
H_{ga} = \left( \Sigma\mathcal{F}_a - H_{gn} \left[ \frac{S_{gn}l_{fn}\mu_0}{S_{fn}\mu} + l_{gn} \right] \right) \left[ \frac{S_{ga}l_{fa}\mu_0}{S_{fa}\mu} + \frac{S_{ga}l_{ra}\mu_0}{S_{ra}\mu} + l_{ga} \right]^{-1}
\end{aligned} \tag{3.43}$$

Assim como na equação anterior, podemos encontrar a dependência de  $H_{gb}(H_{gn})$  com (3.41) e (3.42) em (3.36):

$$H_{gb} = \left( \Sigma\mathcal{F}_b - H_{gn} \left[ \frac{S_{gn}l_{fn}\mu_0}{S_{fn}\mu} + l_{gn} \right] \right) \left[ \frac{S_{gb}l_{fb}\mu_0}{S_{fb}\mu} + \frac{S_{gb}l_{rb}\mu_0}{S_{rb}\mu} + l_{gb} \right]^{-1} \tag{3.44}$$

Pela Eq. (3.37) :

$$H_{gn}S_{gn} = \left( \Sigma \mathcal{F}_a - H_{gn} \left[ \frac{S_{gn}l_{fn}\mu_0}{S_{fn}\mu} + l_{gn} \right] \right) \left[ \frac{S_{ga}\mu_0}{S_{fa}\mu} l_{fa} + \frac{S_{ga}\mu_0}{S_{ra}\mu} l_{ra} + l_{ga} \right]^{-1} S_{ga} +$$

$$\left( \Sigma \mathcal{F}_b - H_{gn} \left[ \frac{S_{gn}l_{fn}\mu_0}{S_{fn}\mu} + l_{gn} \right] \right) \left[ \frac{S_{gb}l_{fb}\mu_0}{S_{fb}\mu} + \frac{S_{gb}l_{rb}\mu_0}{S_{rb}\mu} + l_{gb} \right]^{-1} S_{gb}$$

Definindo as variáveis auxiliares:

$$C_1(S_{gn}, l_{gn}) = \frac{S_{gn}l_{fn}\mu_0}{S_{fn}\mu} + l_{gn} \quad (3.45)$$

$$C_2(S_{ga}, l_{ga}) = \left[ \frac{S_{ga}\mu_0}{S_{fa}\mu} l_{fa} + \frac{S_{ga}\mu_0}{S_{ra}\mu} l_{ra} + l_{ga} \right]^{-1} S_{ga} \quad (3.46)$$

$$C_3(S_{gb}, l_{gb}) = \left[ \frac{S_{gb}l_{fb}\mu_0}{S_{fb}\mu} + \frac{S_{gb}l_{rb}\mu_0}{S_{rb}\mu} + l_{gb} \right]^{-1} S_{gb} \quad (3.47)$$

Obtemos a Eq. ?? simplificada:

$$H_{gn}S_{gn} = \Sigma \mathcal{F}_a C_2 + \Sigma \mathcal{F}_b C_3 - H_{gn} C_1 (C_2 + C_3) \quad (3.48)$$

Que implica em:

$$H_{gn} = \frac{\Sigma \mathcal{F}_a C_2 + \Sigma \mathcal{F}_b C_3}{S_{gn} + C_1 (C_2 + C_3)} \quad (3.49)$$

Pelas equações: (3.43) e (3.44):

$$H_{ga} = (\Sigma \mathcal{F}_a - H_{gn} C_1) C_2 \quad (3.50)$$

$$H_{gb} = (\Sigma \mathcal{F}_b - H_{gn} C_1) C_3 \quad (3.51)$$

Podemos então deduzir o componente campo magnético dos gaps:

$$B_{gn} = \mu_0 H_{gn} \quad (3.52)$$

$$B_{ga} = \mu_0 H_{ga} \quad (3.53)$$

$$B_{gb} = \mu_0 H_{gb} \quad (3.54)$$

### 3.2.2 Força

A força magnética resultante é calculada através das parciais de cada bobina:

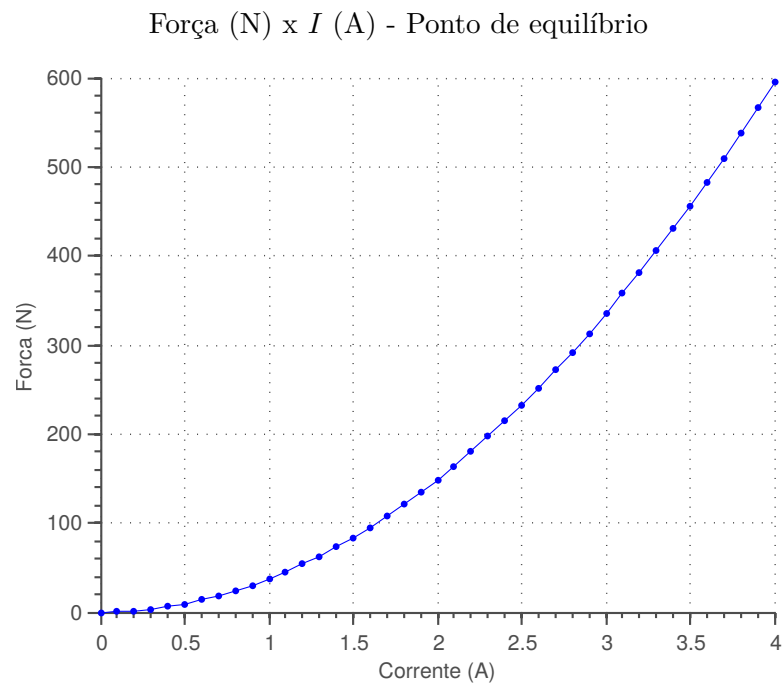
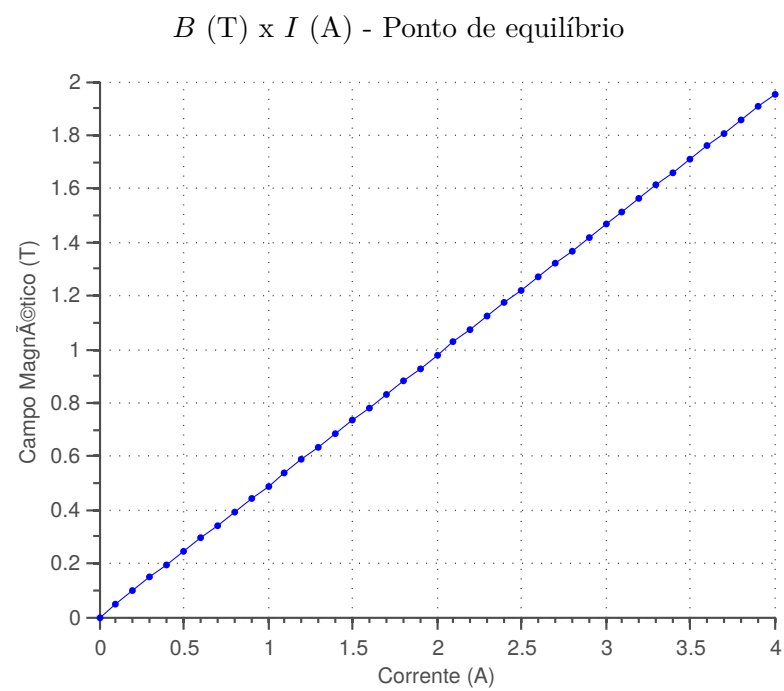
$$\vec{F} = \vec{F}_{gn} + \vec{F}_{ga} + \vec{F}_{gb} \quad (3.55)$$

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

$$\vec{F}_n = \frac{\vec{B}_n^2 S_n}{\mu_0} \quad (3.56)$$

### 3.2.3 Simulações

Falar da saturação do ferro e propor um outro modelo com saturação

**Figura 3.11** – Força atuante no rotor dado variação na corrente**Figura 3.12** – Campo magnético no ferro principal

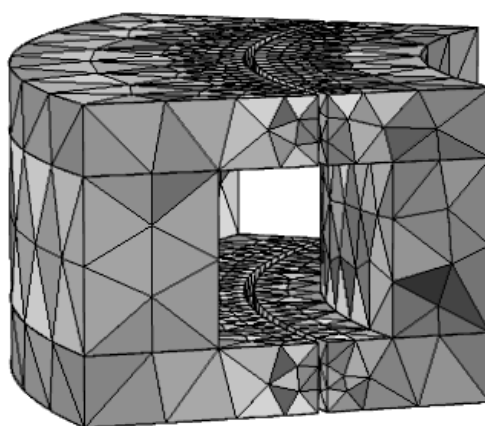


### 3.3 Modelagem Elementos Finitos

Foi utilizado como ferramenta de modelagem o Software de elementos finitos e multi física *Comsol* . Nas simulações foram utilizados a curva de histerese do Aço 1020 (Curva em anexo) , as simulações foram realizadas com uma solido tridimensional. A Fig. 3.13 ilustra a malha utilizada na execução das simulações com um número aproximado de 19000 elementos.

isso deve estar descrito na metodologia

Colocar tabela B-H em anexo

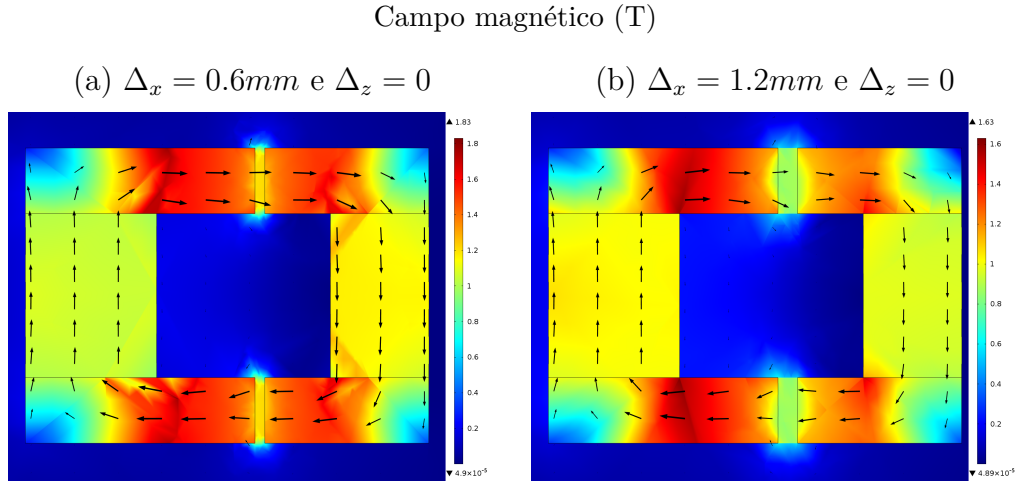


**Figura 3.13** – Modelo Comsol do circuito passivo Malha utilizada nos cálculos

#### 3.3.1 Circuito passivo

O módulo do campo magnético pode ser visualizado para dois casos distintos na Fig. 3.14. 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 espraçamento aumento assim sua área resultando em uma ligeira diminuição no cálculo da força. Verificamos também que o ponto de operação do

imã sofre uma pequena variação passando de 1.05T para 1.06T.

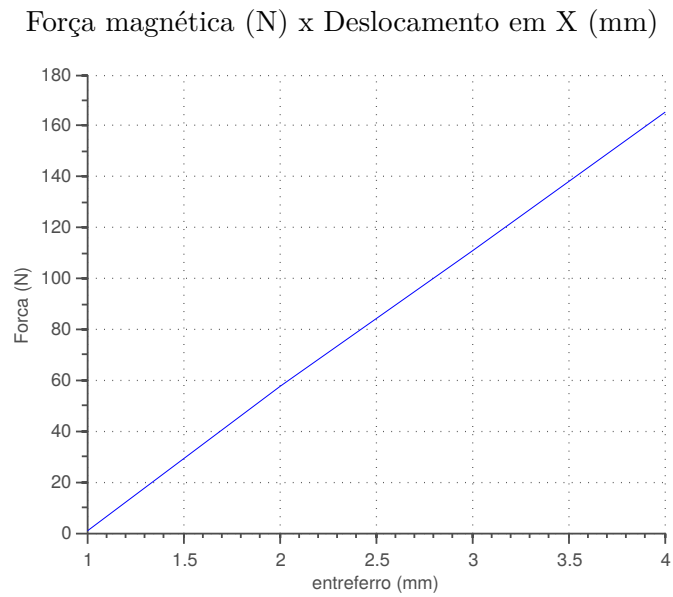


**Figura 3.14** – Modulo do campo magnético do modelo no Comsol do circuito passivo

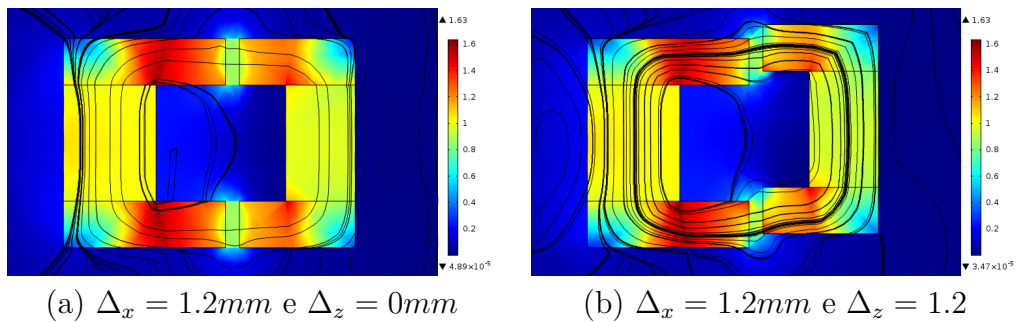
A força magnética de atração do rotor é ilustrado na Fig. 3.15, o rotor foi deslocado em apenas um eixo (x). Foram utilizado os valores nominais do protótipo. Verificamos que o modelo apresenta uma curva linear em termos de força de atração por deslocamento, o que era desejado, já que implica em uma simplicidade no modelo e por consequência na malha de controle.

A Fig. 3.16 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 calculo da força já que supusemos na Subsec. 3.1.2 que as linhas de campo podem ser decompostas em x e z e que essa decomposição é diretamente relacionada com o deslocamento do rotor ( $\theta$ ).

A Fig. 3.17 é o resultado das forças no rotor quando submetido a um deslo-



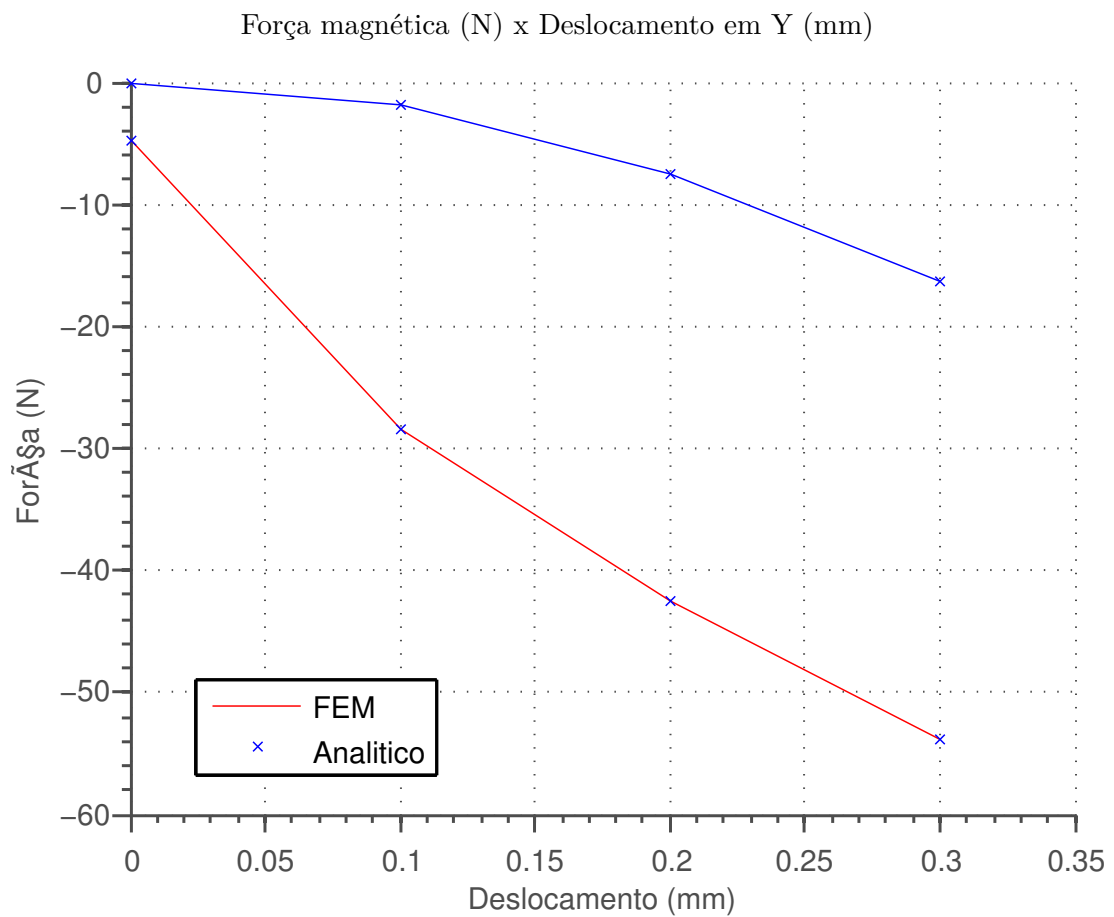
**Figura 3.15** – Força calculado por elementos finitos com deslocamento em apenas um eixo



**Figura 3.16** – Linhas de campo magnético para deslocamentos na vertical

camento axial, verificamos que a força possui um componente diferente de zero quando o rotor está alinhado com o estator externo ( $z = 0$ ), esse resultado é diferente do esperado já que

Verificar o Dy



**Figura 3.17** – Comparativo do cálculo da força magnética pela Eq. (3.29) e pelo modelo no Comsol com  $\Delta_x = 1.2$  mm

# Capítulo 4

## Modelagem Dinâmica

Passos da modelagem:

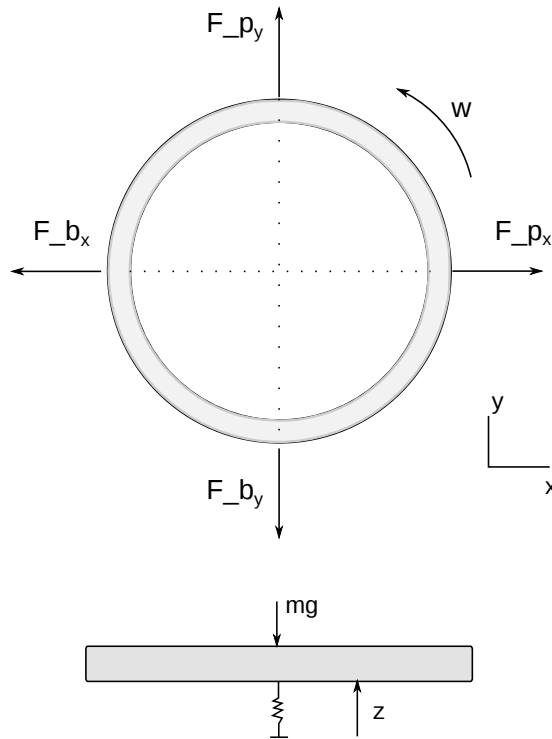
- a. Imãs
- b. Enrolamento
- c. Rotor
- d. Equação
- e. Linearização

### 4.1 Rotor

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

- $F_p$  : Força devido ao imã permanente

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



**Figura 4.1** – Forças resultantes no rotor

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:

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

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 são resultantes dos imãs permanentes no estator externo :

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

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

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

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

$$L = T - V$$

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

## 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 3.1.4. Assumi-se que a força de atração no roto tanto em  $x$  ( $F_{px}$ ) quanto em  $y$  ( $F_{py}$ ) pode ser representada pela decomposição:

$$F_p(x) = K_p x \quad (4.10)$$

$$F_p(y) = K_p y \quad (4.11)$$

$$(4.12)$$

Onde  $K_p$  é a constante de proporção entre a força e a posição. O diagrama de blocos (para cada estado),  $x$  e  $y$  são os deslocamento em torno do ponto de equilíbrio do rotor com relação ao estator externo.

## 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



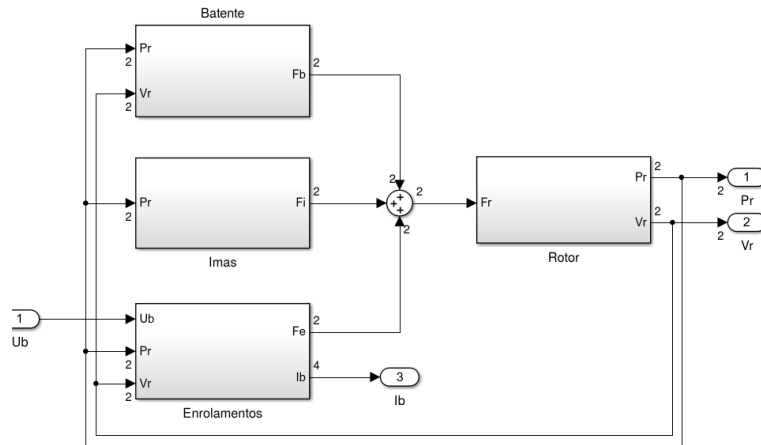
corrente de excitação aplicada as bobinas. Além desses fatores, uma dinâmica do atuador atrelada a indutância deve ser considerada.

Como verificado na Sec. 3.2.2 a força de atração no rotor é :

$$\vec{F}(x,y,i) = \vec{F}_{gn} + \vec{F}_{gn} + \vec{F}_{gn} \quad (4.13)$$

$$\vec{F}_a(x,y,i) = \frac{\vec{B}_a^2 S_a}{\mu_0} \quad (4.14)$$

## 4.4 Simulação



**Figura 4.2** – Visão geral do modelo dinâmico

# Referências Bibliográficas

- Bangcheng, H. (2010). Modeling and analysis of novel integrated radial hybrid magnetic bearing for magnetic bearing reaction wheel. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 23.
- 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.
- Hofer, M., Schmidt, E., e Schrod, 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*.
- Ludner, J. e Ragsdale, G. (1995). Earth orbital satellite lifetime. *NASA TECHNICAL NOTE NAKT . . .*
- 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.
- 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.
- 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.