

# DESENVOLVIMENTO DE MANCAL MAGNÉTICO PARA RODAS DE RE- AÇÃO

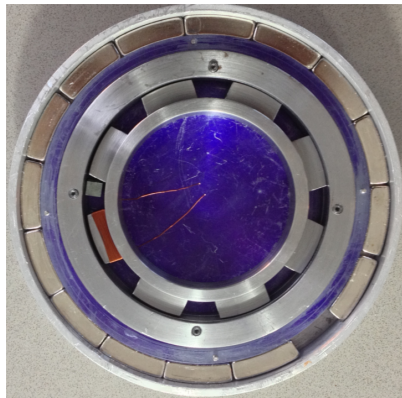
Escola Politécnica - LAC

Outubro de 2015

Rafael Corsi Ferrão

[corsiferrao@gmail.com](mailto:corsiferrao@gmail.com)

<http://www.maua.br>



1. Introdução
  - 1.1 Rodas de Reação
  - 1.2 Revisão
2. O mancal magnético
3. Estator externo e rotor
4. Estator Interno
5. Modelagem dinâmica
6. Controlador
7. Considerações Finais
8. FIM

# INTRODUÇÃO

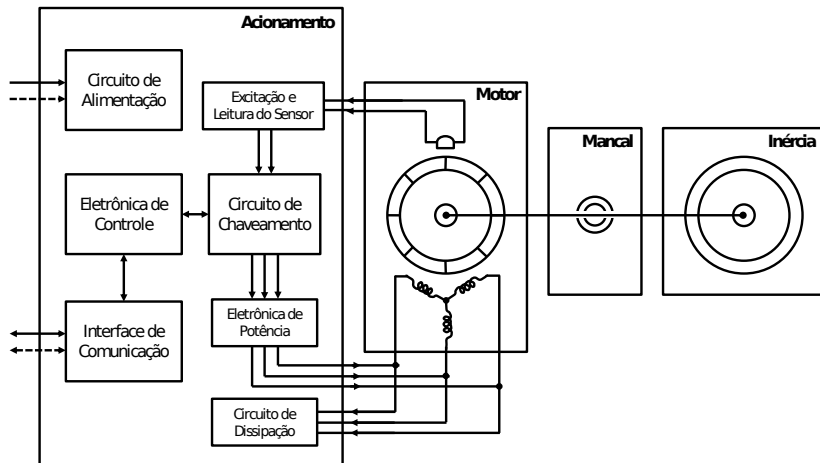
# RODAS DE REAÇÃO

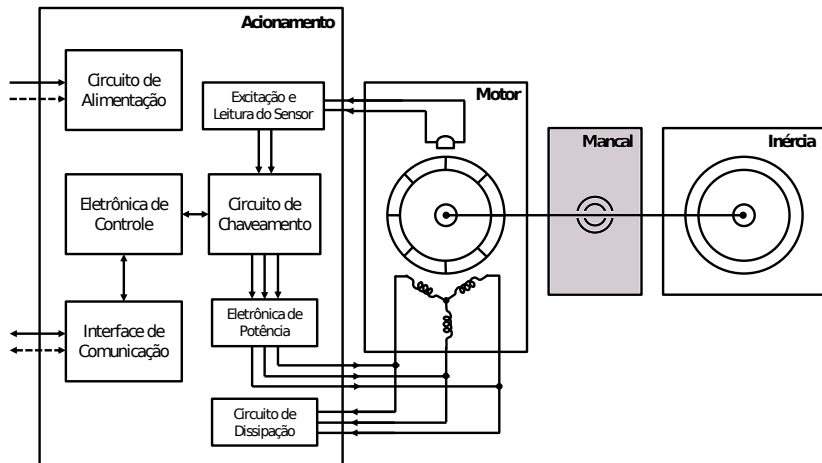
- ▶ atuador eletromecânico
- ▶ conservação de momento angular



é constituída de :

- ▶ Motor de corrente contínua sem escovas (BLDC)
- ▶ Inércia
- ▶ Mancal
- ▶ Eletrônica





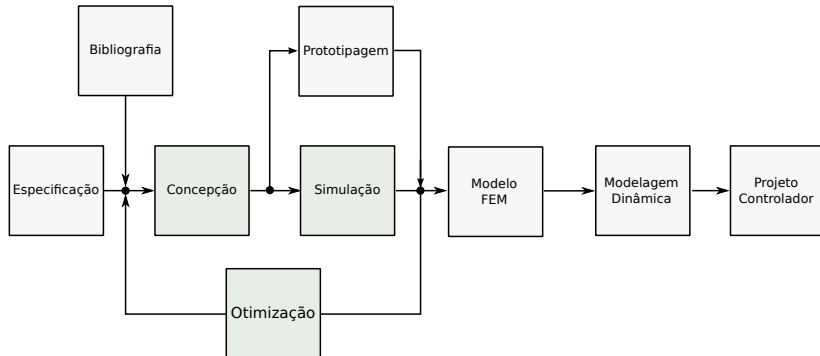
Solução mais usual porém apesar de sua aparente simplicidade apresenta sérios desafios:

- ▶ Lubrificantes (Ciclos térmicos, radiação, pressão atmosférica)
  - ▶ Fluida
  - ▶ Seca
- ▶ Eventual necessidade de um selamento hermético
- ▶ Difícil modelagem

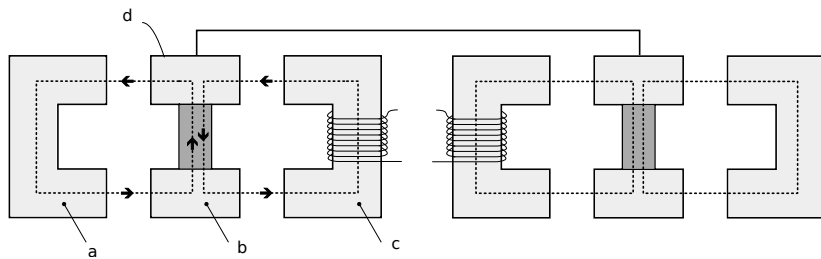
Mancal magnético:

- ▶ solução sem contato mecânico entre o estator e rotor
- ▶ confiabilidade depende basicamente da eletrônica
- ▶ validação em ambiente terrestre
- ▶ eliminação da zona morta
- ▶ aumento na complexidade da malha de controle

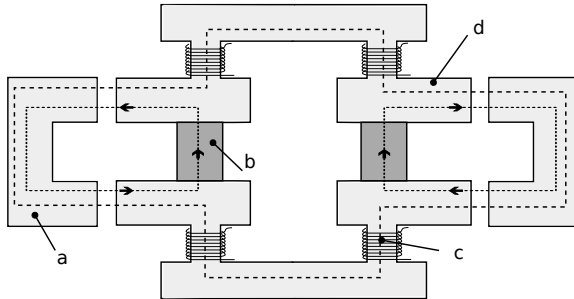




- ▶ tipos de mancais magnéticos
- ▶ teoria de funcionamento
- ▶ mancais com aplicação em rodas de reação



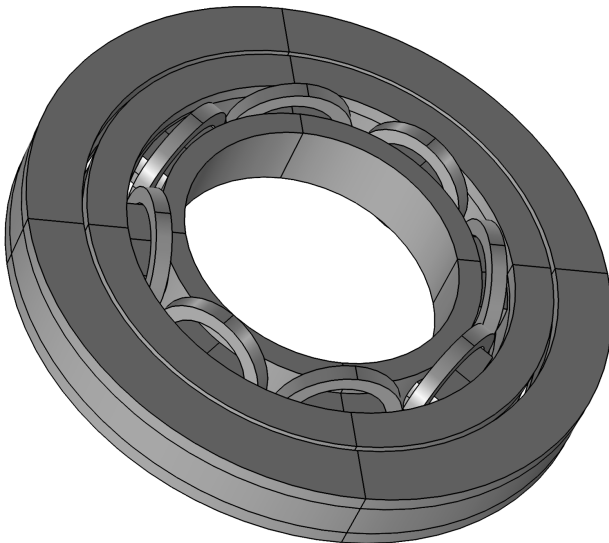
(1998) Bernus

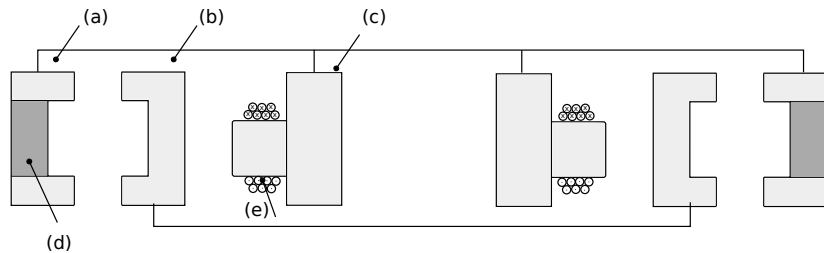


(2001) Scharf

# O MANCAL MAGNÉTICO

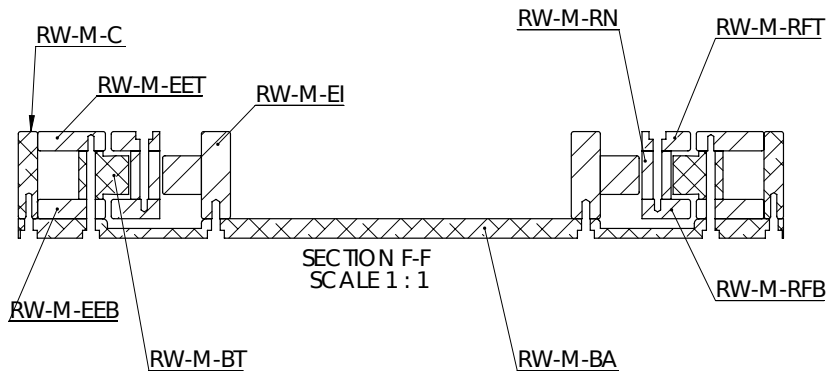
- ▶ dois graus de liberdade ativos (radial)
- ▶ graus de liberdade passivos estabilizados por ímãs permanentes
- ▶ geometria plana
- ▶ mancal localizado externamente ao motor
- ▶ ímãs no estator
- ▶ escalonável





Corte longitudinal do mancal magnético





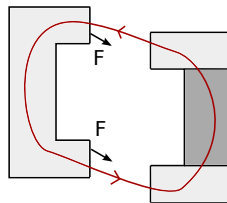
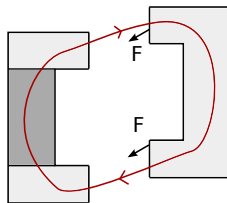
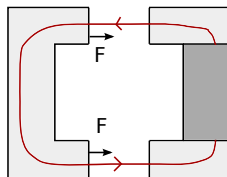
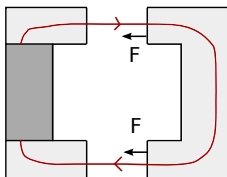
ESTATOR EXTERNO E ROTOR

Objetivo :

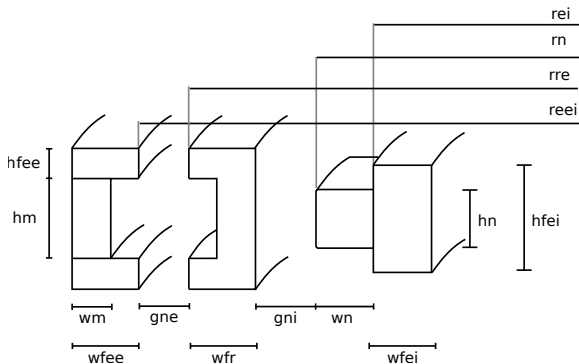
- ▶ Estabilizar passivamente o eixo axial
- ▶ Estabilizar passivamente em *tilt*

Objetivo :

- ▶ Estabilizar passivamente o eixo axial
- ▶ Estabilizar passivamente em *tilt*



Dada a definição da geometria, como escolher as dimensões ?



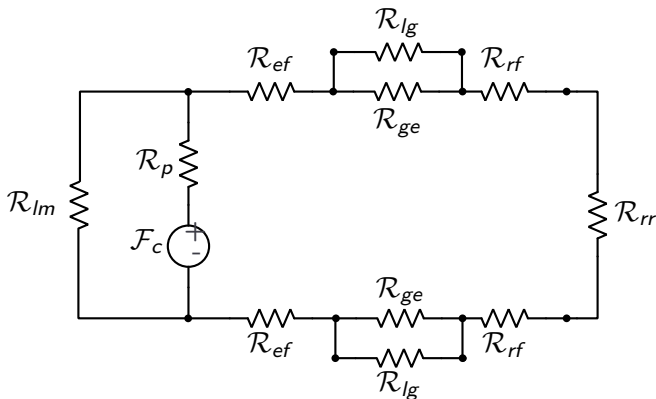


Dada a definição da geometria, como escolher as dimensões ?

Duas possibilidades :

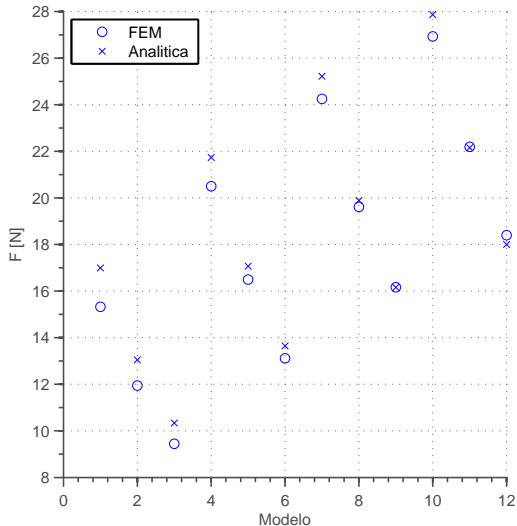
- ▶ Elementos finitos
  - ▶ alto custo computacional
  - ▶ resultado mais preciso
- ▶ Modelagem analítica
  - ▶ baixo custo computacional
  - ▶ resultado menos preciso

- ▶ Modelo não linear :  $B(H) = \mu(H)H$
- ▶ Curva de magnetização do ímã :  $B_m = B_r + \frac{B_r}{H_c} H_m$
- ▶ Solução por Newton-Raphson





Para combinações distintas de parâmetros:



Método escolhido :

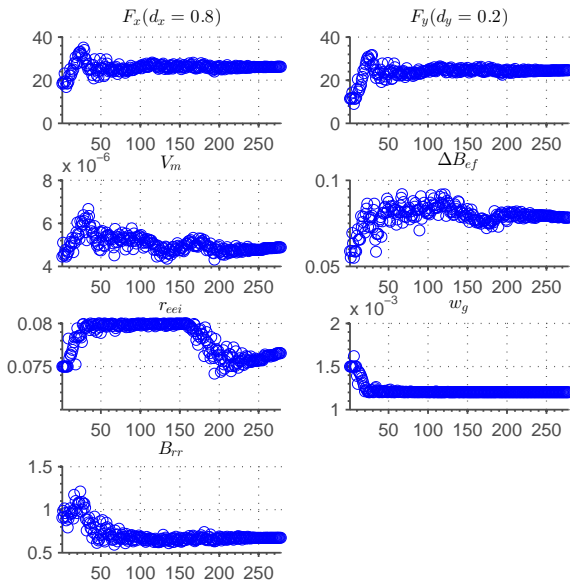
- ▶ Nelder-Mead Simplex com restrição de fronteira

Parâmetros otimizados:

- ▶ Largura e altura : ferro externo, ferro interno, ímã
- ▶ tamanho do entreferro e raio externo total

Funcional visa alcançar uma :

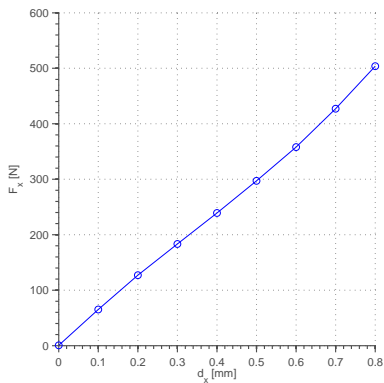
- ▶ Maior
  - ▶ Força axial; entreferro
- ▶ Menor
  - ▶ Força radial; variação do campo magnético; raio; volume



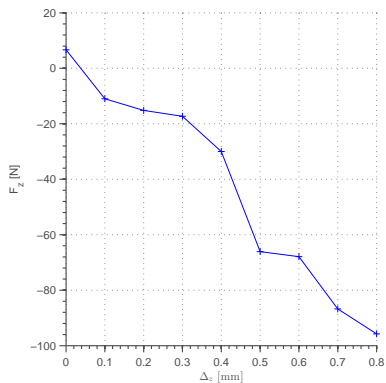
|       | $h_{fee}$ | $\Delta w_{fee}$ | $w_m$ | $h_m$ | $g_{ne}$ | $\Delta w_{rf}$ | $w_{rr}$ | $r_{eei}$ |
|-------|-----------|------------------|-------|-------|----------|-----------------|----------|-----------|
| $L_n$ | 4.2       | 10               | 10    | 12    | 1.4      | 7               | 6        | 70        |

[mm]

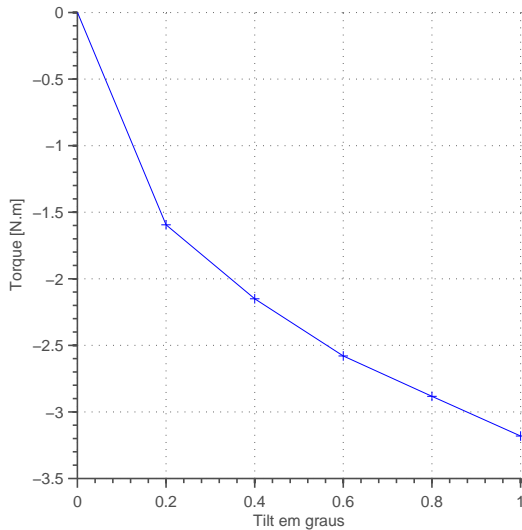
- ▶ Rigidez axial :  $140N/mm$
- ▶ Rigidez radial:  $625N/mm$
- ▶ Rigidez Tilt :  $3.3N/grau$



(a) Plano x,y



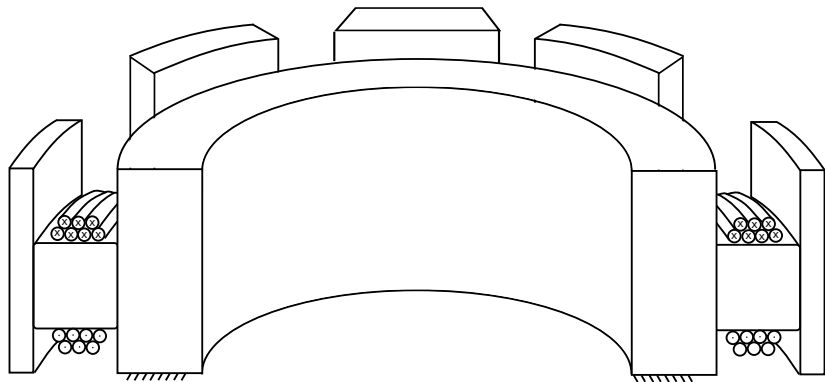
Axial - Equilíbrio

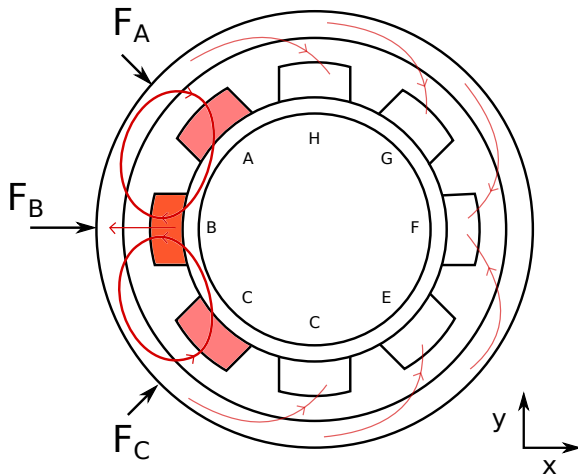


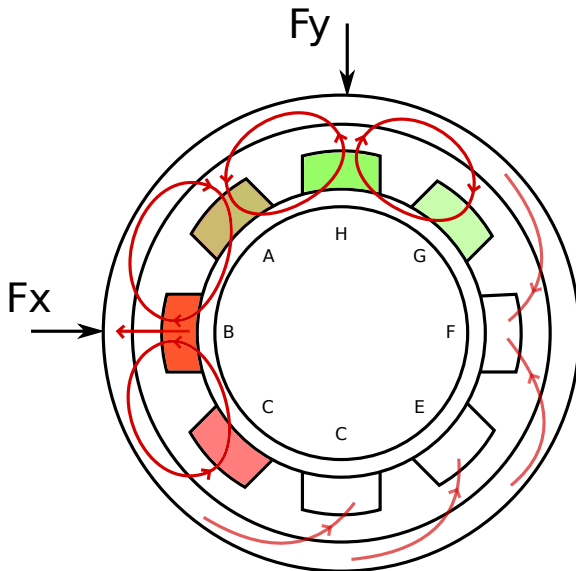


ESTATOR INTERNO

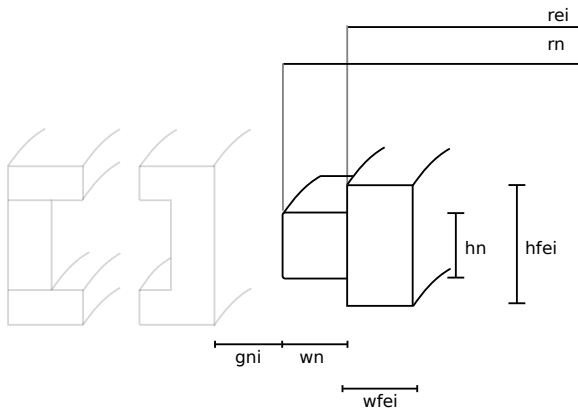


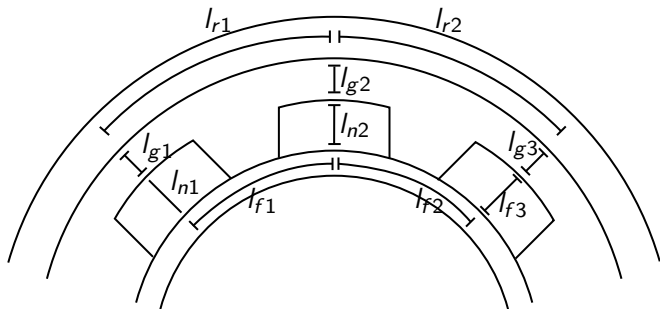


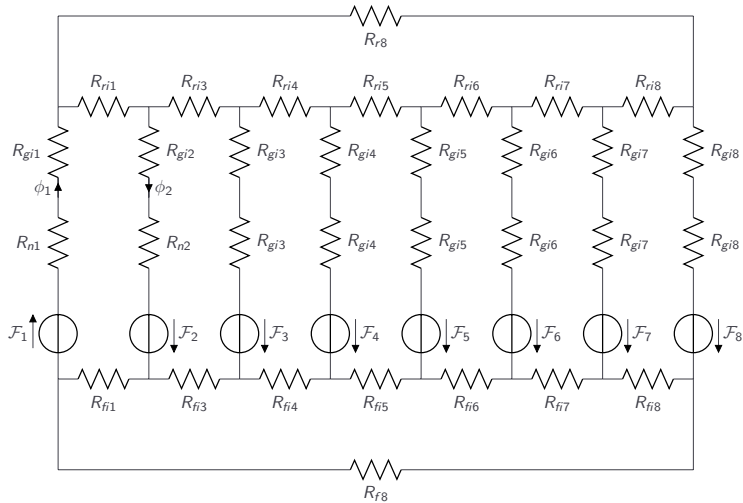


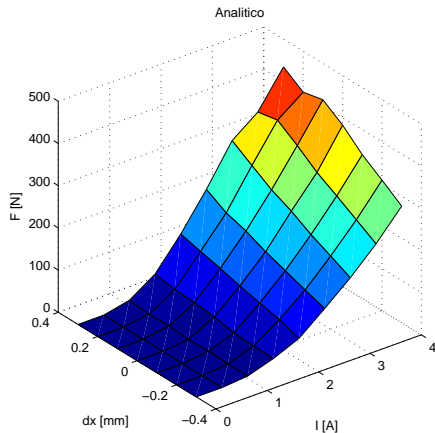


Dada a definição da geometria, como escolher as dimensões ?

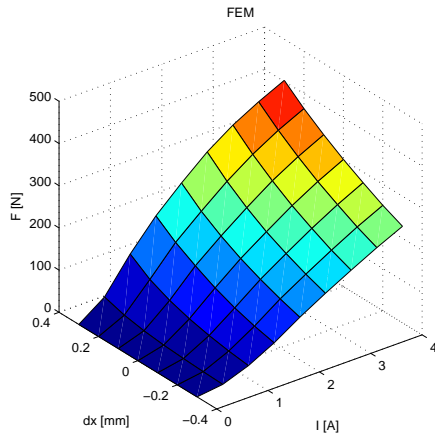








Analítico



FEM

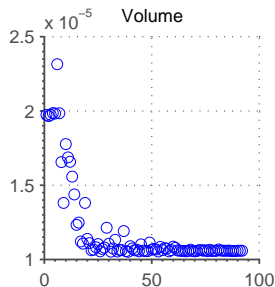
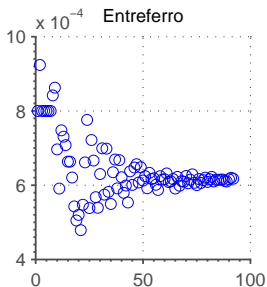
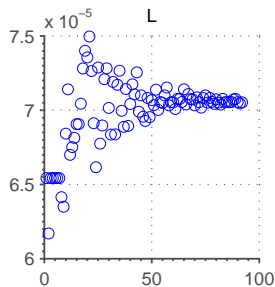
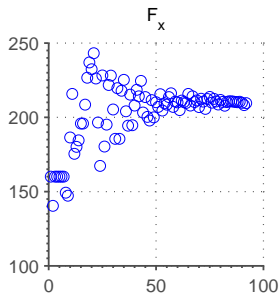
Parâmetros otimizados:

- ▶ número de voltas do embobinamento; altura do núcleo; comprimento; entreferro; raio externo.

Funcional visa alcançar uma :

- ▶ Maior
  - ▶ Força de atração; entreferro;
- ▶ Menor
  - ▶ Indutância; Volume;

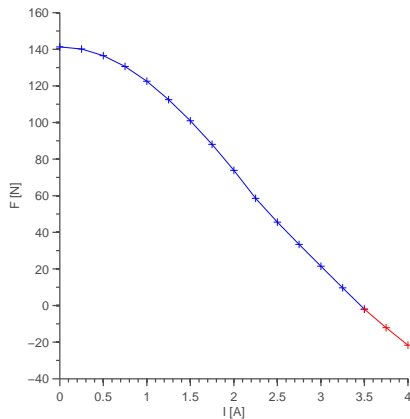




| $w_{gi}$ | $N$ | $h_n$ | $w_n$ | $w_{fei}$ |
|----------|-----|-------|-------|-----------|
| 0.7      | 300 | 10.8  | 14.9  | 6         |

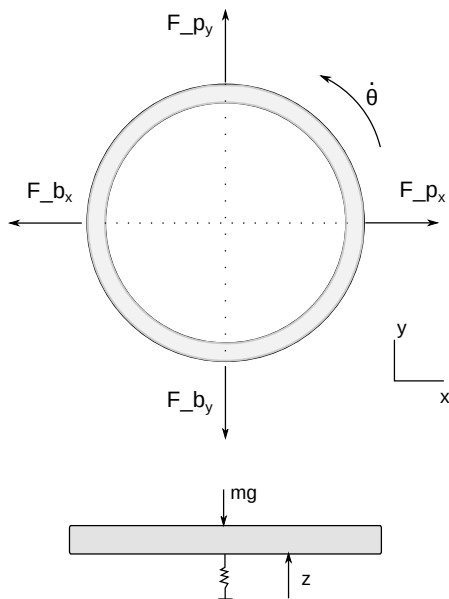
[mm]

Força de atração (N) x Corrente (A)





# MODELAGEM DINÂMICA



$$T = \frac{1}{2} I_z \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2)$$

$$V = m g z + \frac{1}{2} K_z z^2$$

Modelo :

$$I \ddot{\theta} = 0$$

$$m \ddot{x} = K_p x - F_{bx}(x, i)$$

$$m \ddot{y} = K_p y - F_{by}(y, i)$$

$$m \ddot{z} = K_z z + mg$$

Problema:

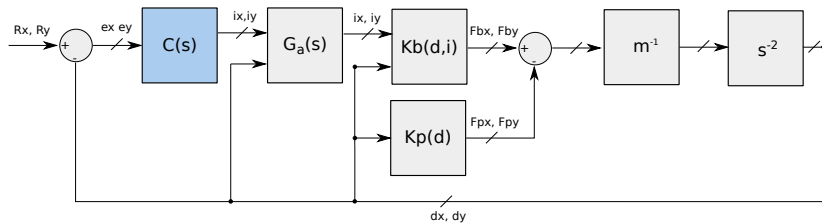
- ▶ Dinâmica atrelada à bobina
- ▶ valor da indutância varia com a posição e corrente

Solução:

- ▶ Equação linearizada para ponto de operação ( $dx = 0$ )
- ▶ dados levantados via modelo FEM

$$L(x) = -1.206 \cdot 10^{-5} x + 2.807 \cdot 10^{-5}$$

$$M(x) = -6.756 \cdot 10^{-6} x + 1.867 \cdot 10^{-6}$$



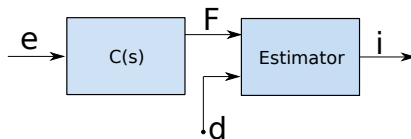
CONTROLADOR

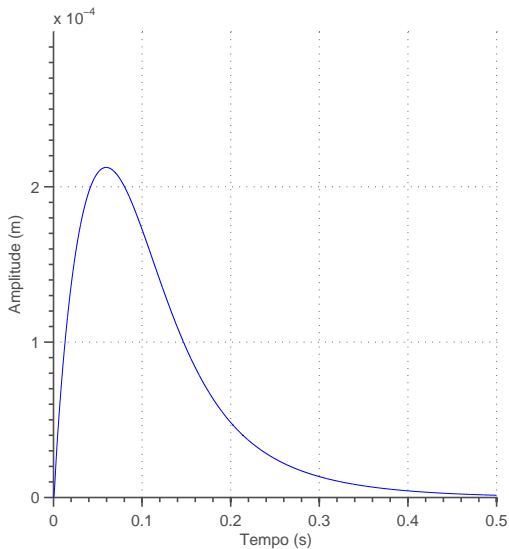


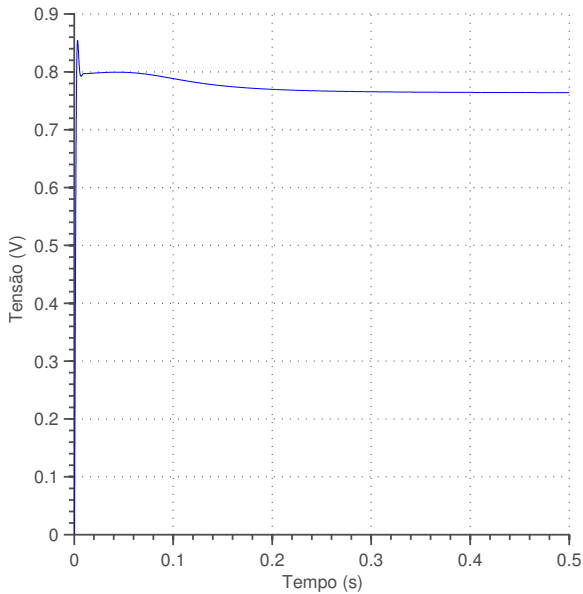
Premissas:

- ▶ Estabilizar o rotor no ponto de operação
- ▶ saturação de corrente
- ▶ controle SISO
- ▶ PID

Dada a não linearidade do atuador, optou-se por trabalhar com o controle de força e não corrente





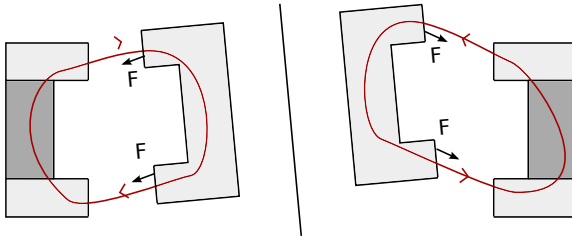


# CONSIDERAÇÕES FINAIS

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

- ▶ Uma topologia nova
- ▶ Processo de otimização permite o projeto de mancais com a partir de especificações
- ▶ Utilização de clusters para melhoria na computação do FEM
- ▶ Escolha de novos materiais
- ▶ Construção de um protótipo
- ▶ Fomento

FIM



- ▶ 1 grau ->
  - ▶ Delta radial é de 0.0107 mm
  - ▶ Delta axial de 1.2 mm
- ▶ 3.3 N/grau





