



ESTUDO DE UM MOTOR DE RELUTÂNCIA SÍNCRONA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Caio Alexandre T. Graciano

Orientador: Prof. Cleiton Magalhães Freitas, D.Sc

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica (Sistemas de Potência)

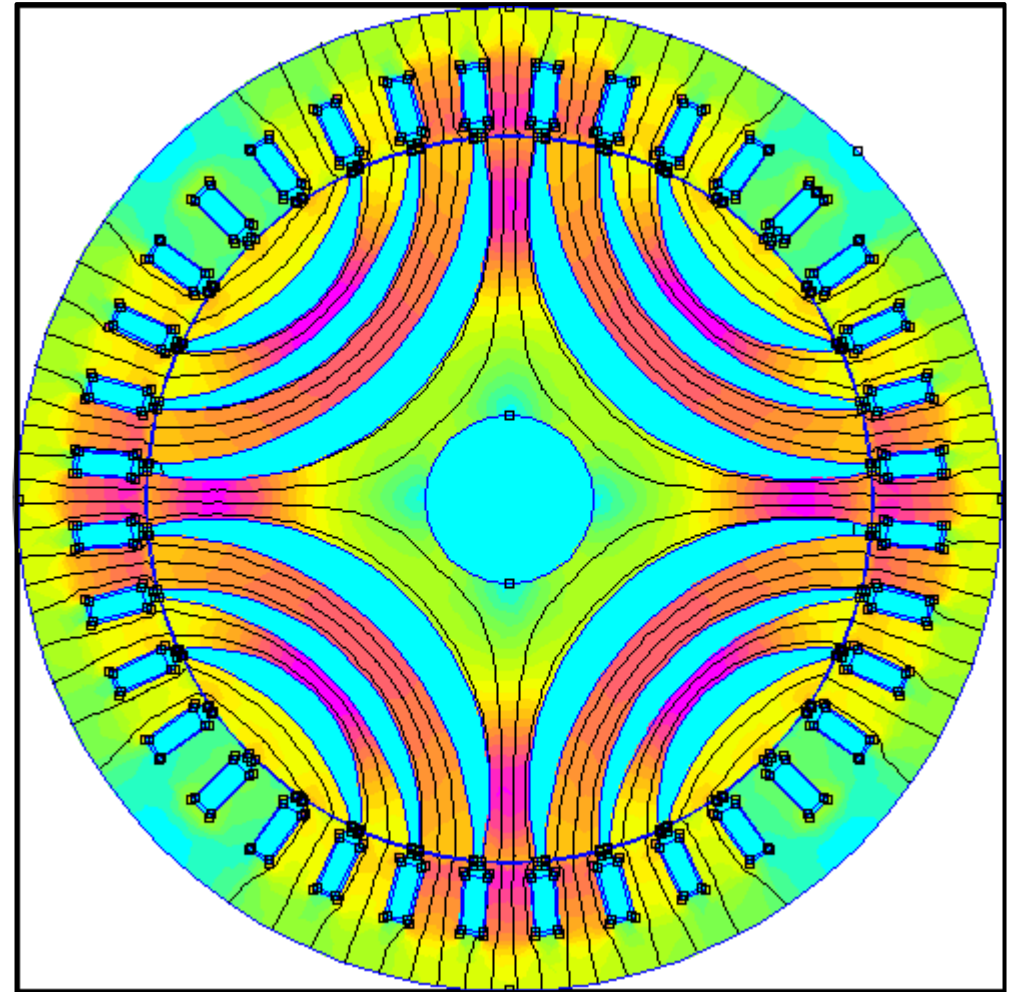


Introdução

- **Objetivo do trabalho**
- **Motivação**
- **O que será abordado**

Objetivo

- **Desenhar e simular uma MRS elementar;**
- **Obter Indutâncias;**
- **Conjugado e Tensão induzida;**
- **Distribuição de Fluxo;**
- **Verificar efeitos de Saturação Magnética.**



Motivação

- Avanço da tecnologia de Controles;
- Ascensão do uso na Indústria;
- Divulgação Científica.

Máquina de Relutância Síncrona comercial





Organização

- **Princípio de Funcionamento;**
- **Convenções, considerações e metodologia de simulação;**
- **Resultados das Simulações e suas conclusões.**

Princípio de Funcionamento

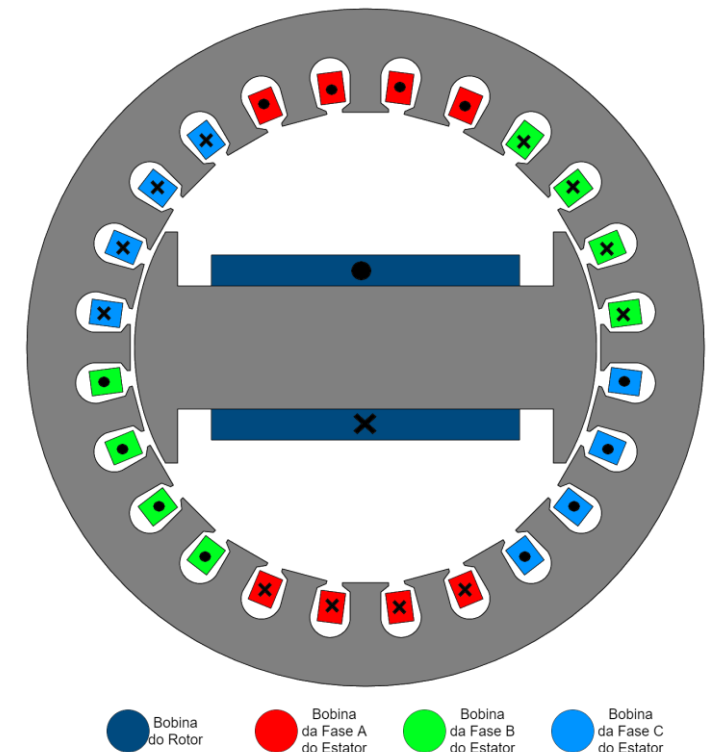
Conceito de Torque de Relutância

$$T = \frac{\partial W'_\phi}{\partial \theta_r} = -3I_s^2 L_B \left[\sin(2\phi) - \frac{1}{2} \sin(2\phi - 4\theta_r) \right]$$

Com corrente de campo igual a zero, ainda é possível ver a existência de um torque.

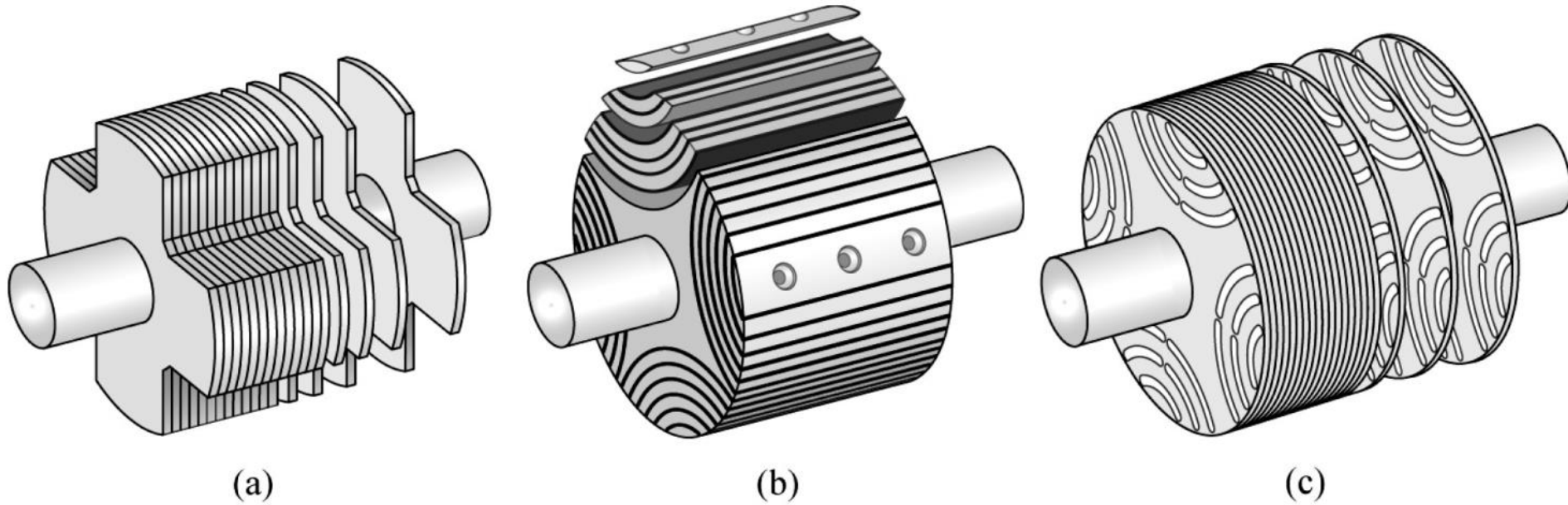
Este torque alinha o eixo direto do rotor com o eixo magnético do estator.

Máquina de Síncrona de Polos Salientes



Princípio de Funcionamento

Máquina de Relutância Síncrona

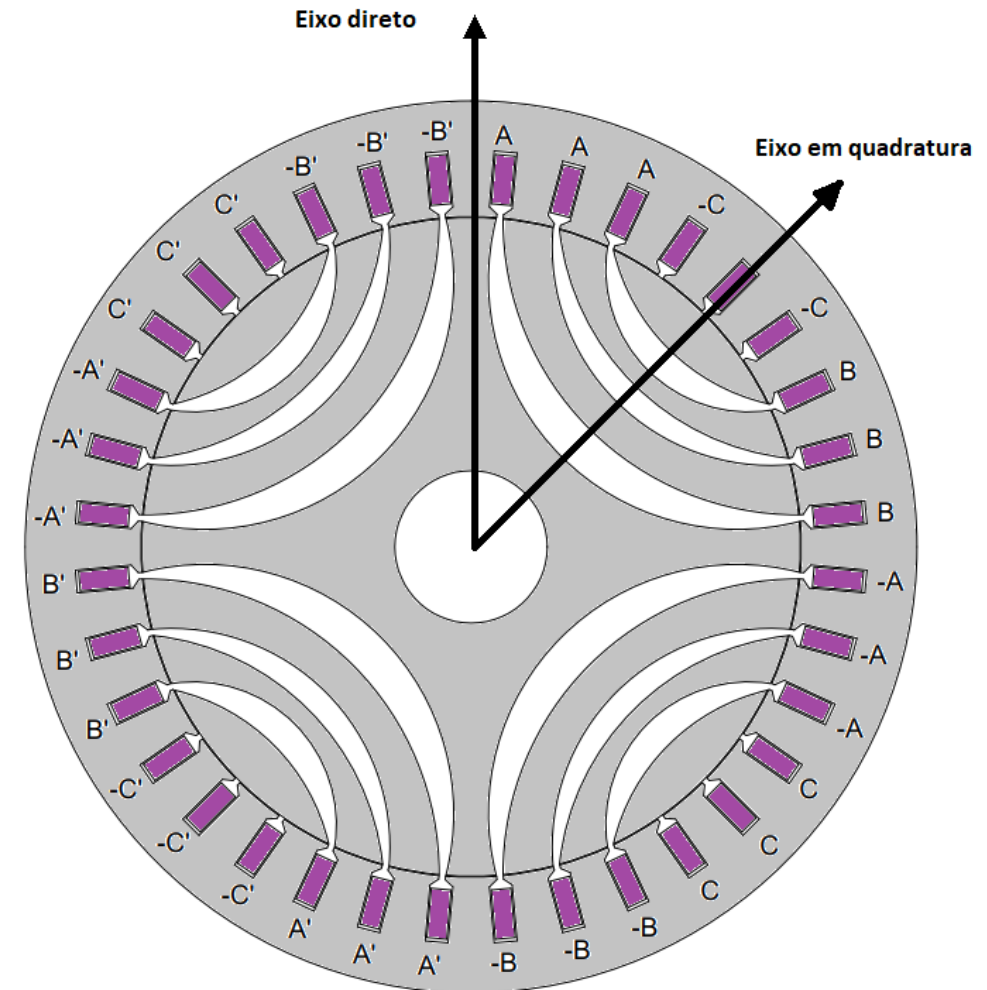


O que caracteriza uma MRS é a natureza anisotrópica do seu rotor, já o estator é igual ao de máquinas síncronas CA.

Princípio de Funcionamento

Definição de Eixo Direto e em Quadratura

- O eixo direto é o eixo de menor relutância;
- As barreiras magnéticas garantem que o eixo de quadratura seja de maior relutância;
- Os eixos dq estão defasados de 45° mecânicos e 90° elétricos;
- Essa geometria do rotor lhe garante uma característica anisotrópica.





Princípio de Funcionamento

Conceitos Teóricos Aplicados

$$T_{em-g} = \frac{3p}{2} (\lambda_m \times i_m) = \frac{3p}{2} |\lambda_m| \cdot |i_m| \sin \beta$$

$$= \frac{3p}{2} (\lambda_{dm} i_{qm} - \lambda_{qm} i_{dm}) = \frac{3p}{2} (L_{dm} i_{dm} - L_{qm}) \cdot i_{dm} i_{qm}$$

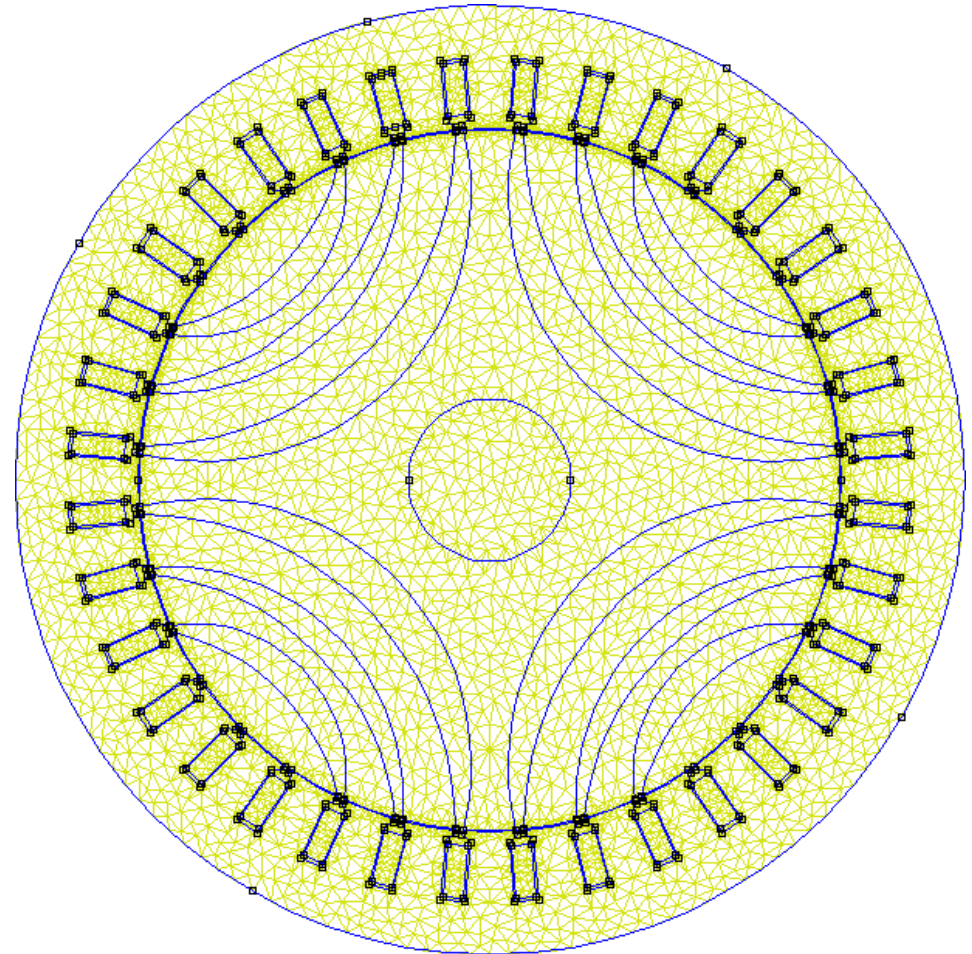
$$= \frac{3p}{2} (L_{dm}(i_{dm}) - L_{qm}) \cdot I_m^2 \sin(2\theta) \quad \text{Torque médio teórico}$$

$$\xi = \frac{L_{dm}}{L_{qm}} \quad \text{Razão de saliência}$$

Convenções, considerações e metodologia de simulação

Método dos Elementos Finitos

- O MEF divide a estrutura em diversos polígonos;
- As equações de Maxwell são resolvidas para cada nó, seguindo regras definidas anteriormente;
- Desse modo o que ocorre na área de cada polígono é influenciado por polígonos vizinhos.



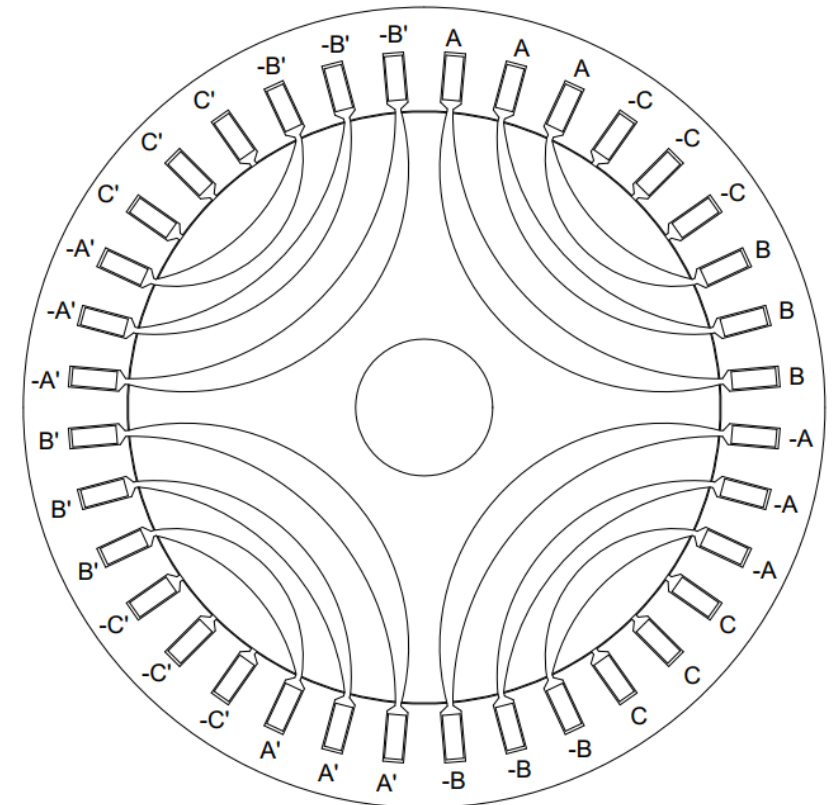
Convenções, considerações e metodologia de simulação

Definição da Máquina a ser estudada

Tabela 1 - Parâmetros Físicos da Máquina Simulada

Parâmetro da Máquina	Valor
Número de par de polos	2
Número de fases	3
Ângulo entre fases (Graus)	30
Ranhuras no estator	36
Ângulo entre ranhuras no estator (Graus)	10
Número de voltas nas bobinas	12
Diâmetro do rotor (cm)	19.93
Diâmetro interno do estator (cm)	20
Diâmetro externo do estator (cm)	27
Comprimento do Entreferro (mm)	35
Corrente Nominal (A)	8
Material do Rotor	Aço M-36
Material do Estator	Aço M-15
Material do Enrolamento do Estator	14 AWG

Fonte: O Autor

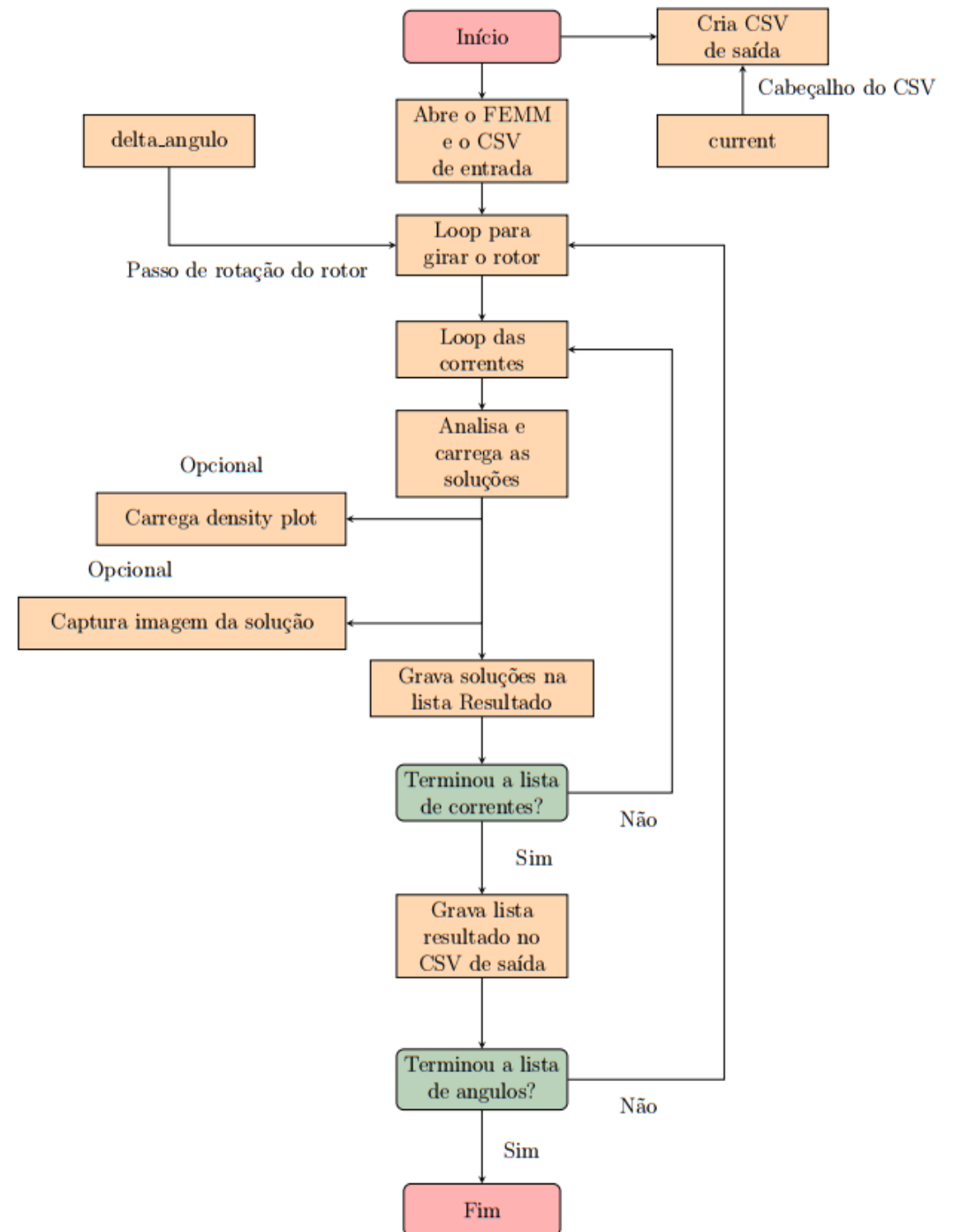




Convenções, considerações e metodologia de simulação

Metodologia de Simulação

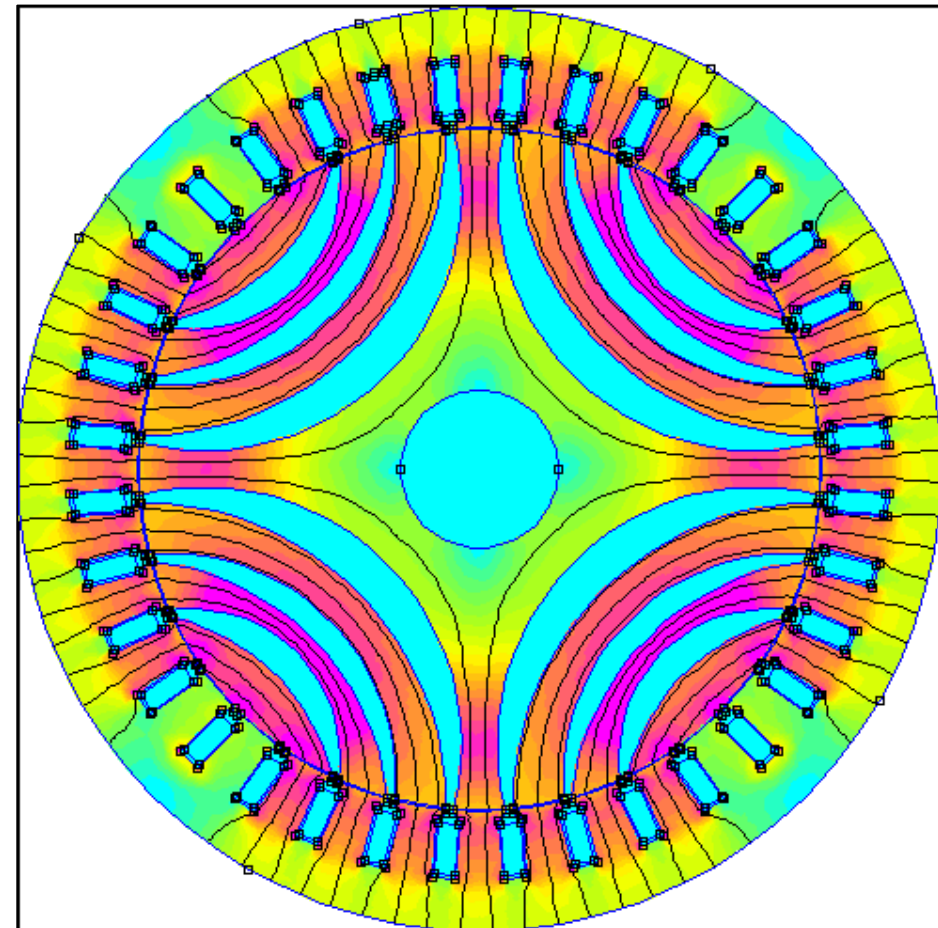
- FEMM 4.2
- Python 3
- Biblioteca pyFEMM
- Biblioteca csv



Convenções, considerações e metodologia de simulação

Testes Iniciais da Geometria do Rotor

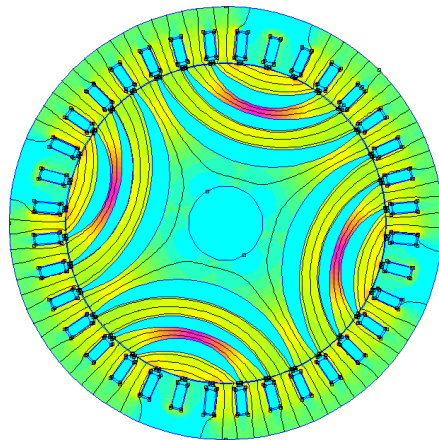
- Material de Ferro artificial
 $\mu(x,y) = 2000 \times 2000$;
- Relação $B \times H$ linear;
- Corrente contínua de 5 A na bobina A;



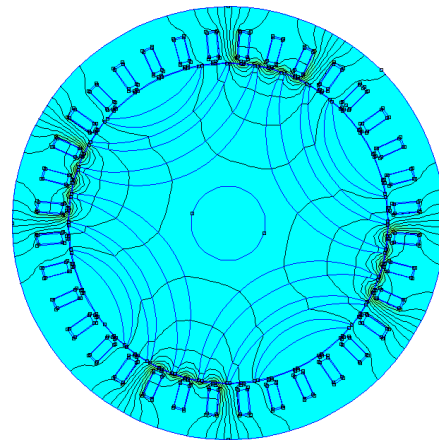
Convenções, considerações e metodologia de simulação

Testes Iniciais da Geometria do Rotor

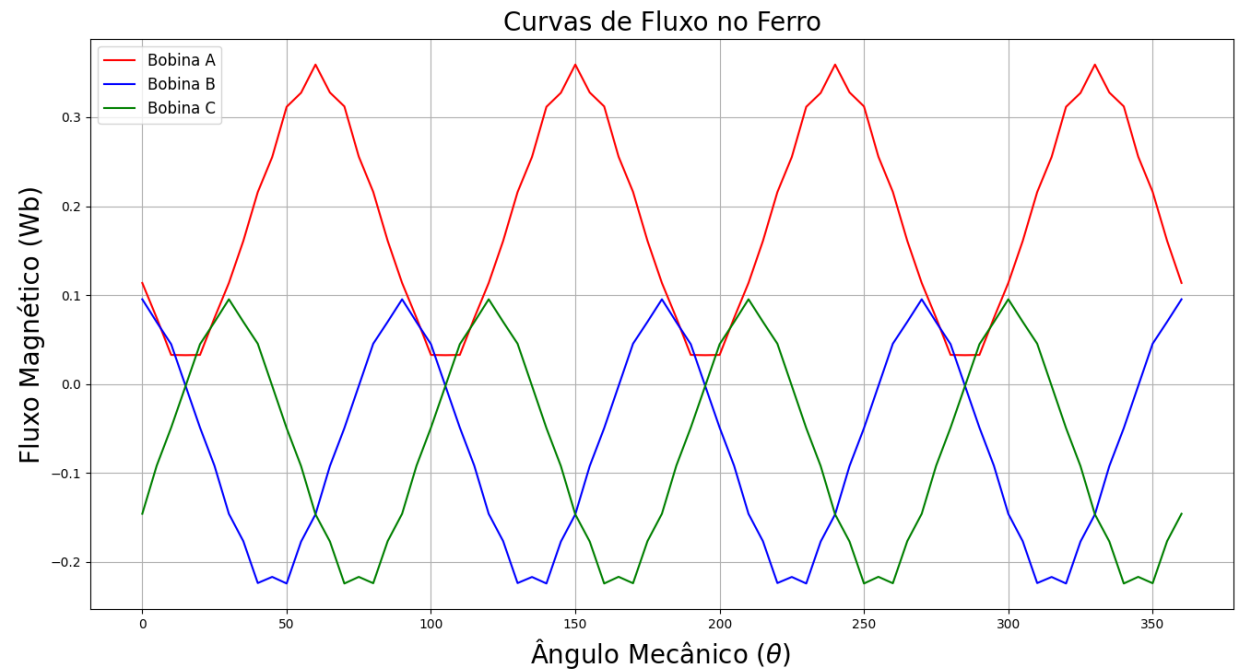
Corrente na Bobina A e rotor girante.



Fluxo
Concatenado
máximo (60°)



Fluxo
Concatenado
mínimo (15°)

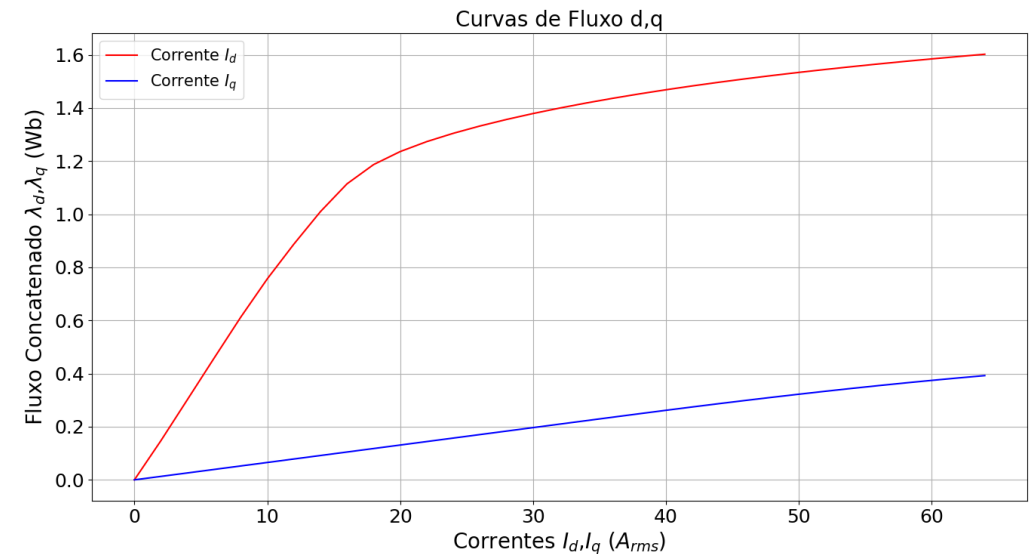
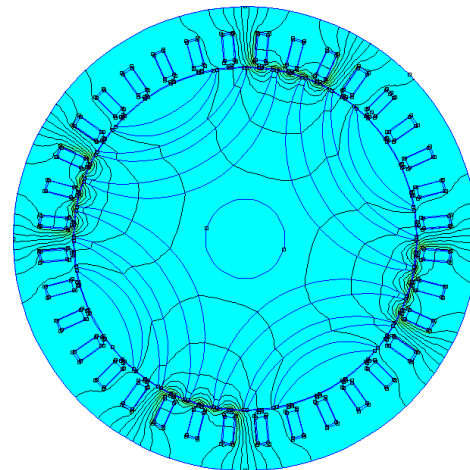
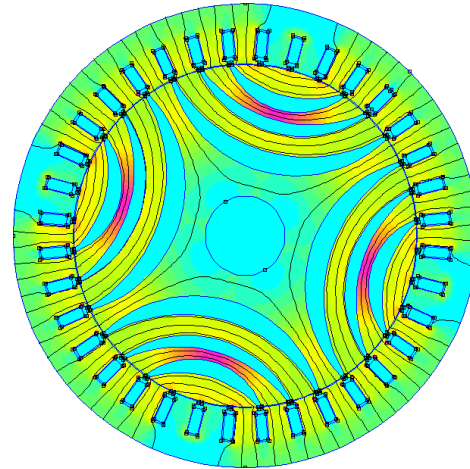


Resultados das Simulações e suas conclusões.

1. Levantamento das Curvas de Magnetização

Levantamento de λ_{dq} :

- Para λ_d , o eixo direto do rotor foi alinhado com a bobina A;
- Já para λ_q , o rotor foi rotacionado de 45° em relação ao eixo direto.



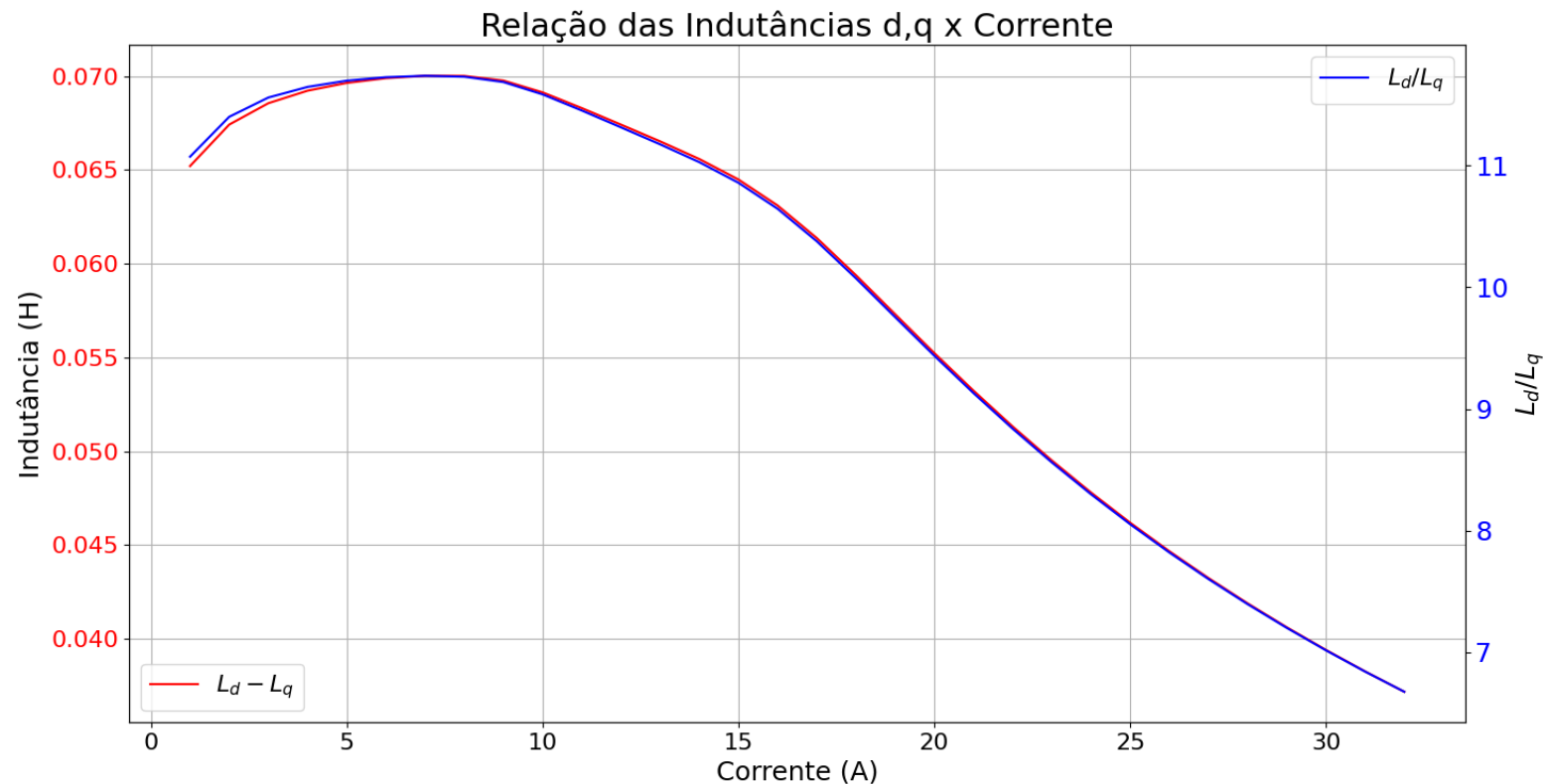
- O λ_d satura em 1.2Wb;
- O λ_q não satura;
- Antes de saturar, λ_d e λ_q possuem relação linear.

$$\lambda_d = \xi \cdot \lambda_q, \text{ tal que } \lambda_d < 1,15Wb$$

Resultados das Simulações e suas conclusões.

2. Levantamento das Indutâncias da Máquina

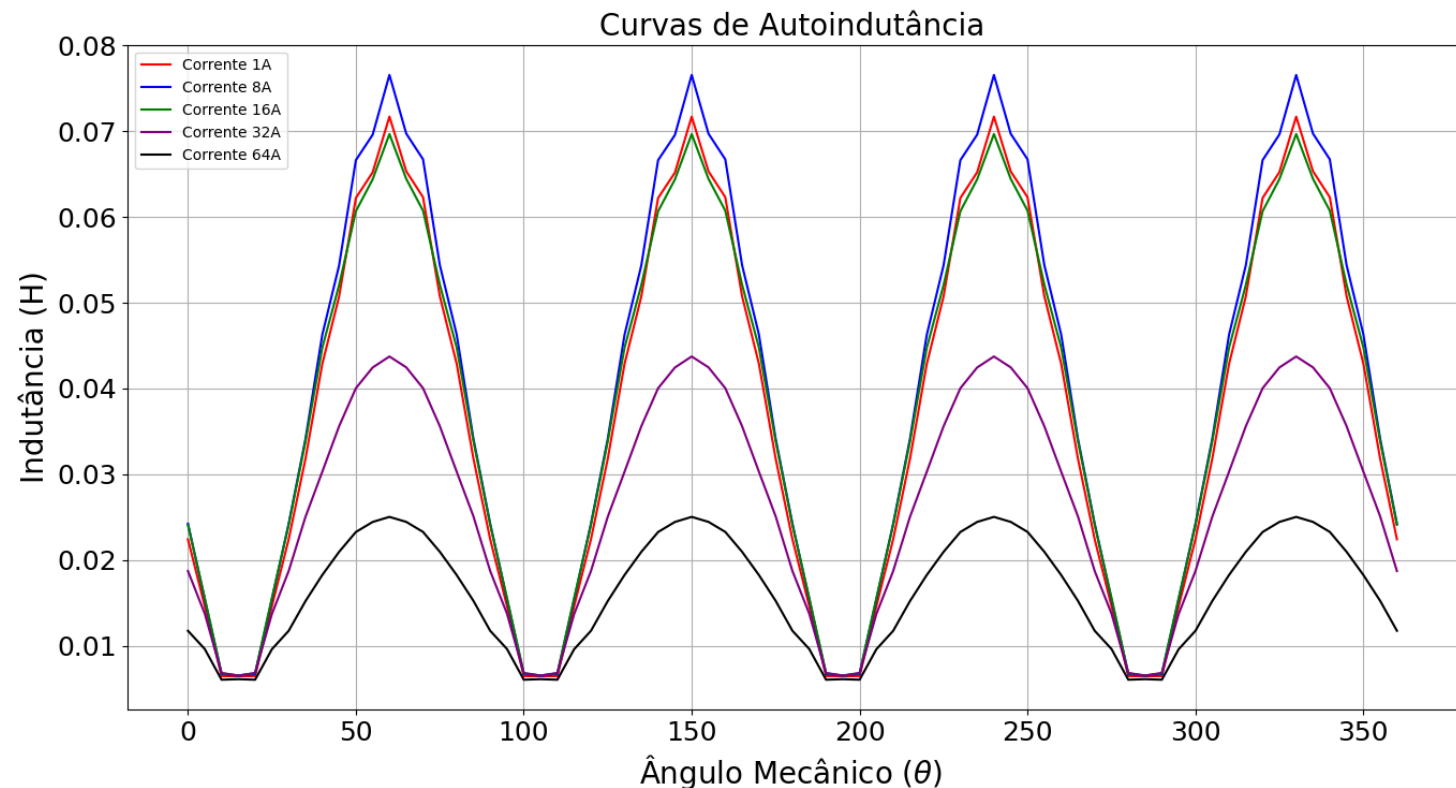
- A corrente de 8 A maximiza ambos $L_d - L_q$ e L_d/L_q ;
- Com $L_d - L_q$ igual a 0.07 H;
- E razão de saliência (ξ) de 11,73.



Resultados das Simulações e suas conclusões.

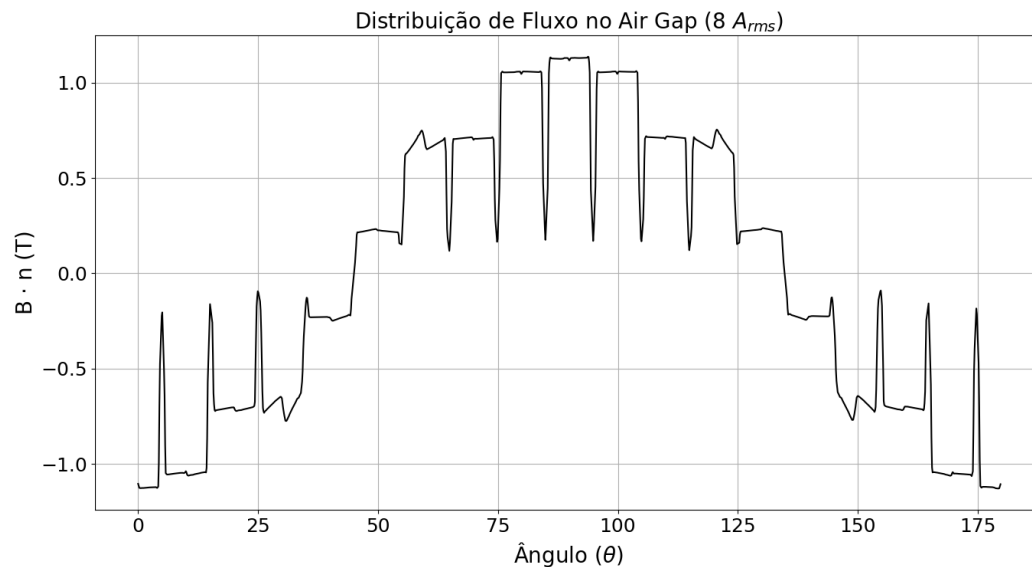
2. Levantamento das Indutâncias da Máquina

- As indutâncias variam com a posição do campo em relação ao rotor;
- É possível ver o efeito da saturação em 32A e 64A.

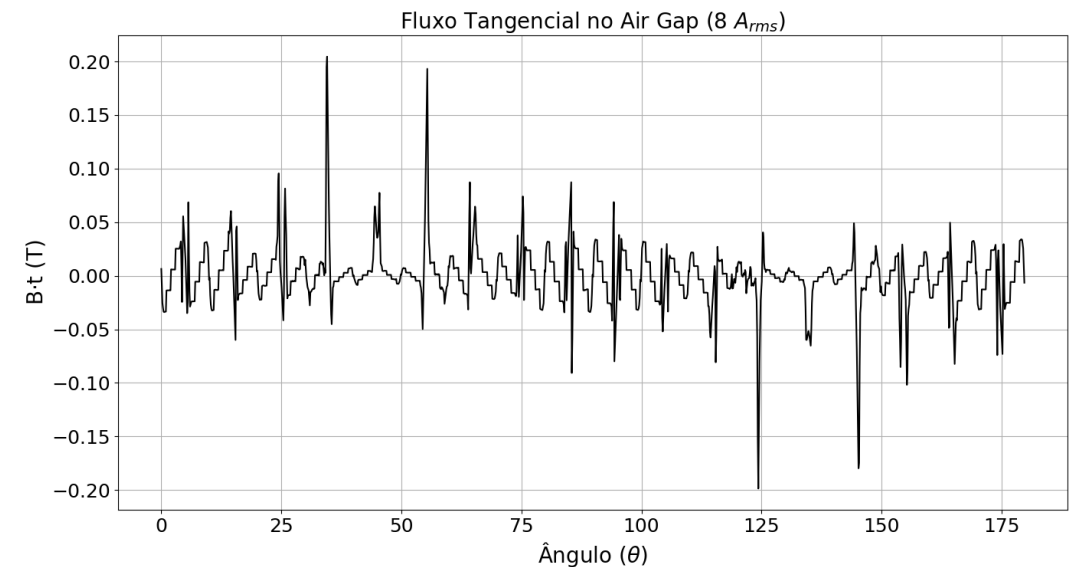


Resultados das Simulações e suas conclusões.

3. Levantamento dos vetores de campo magnético espaciais no entreferro.



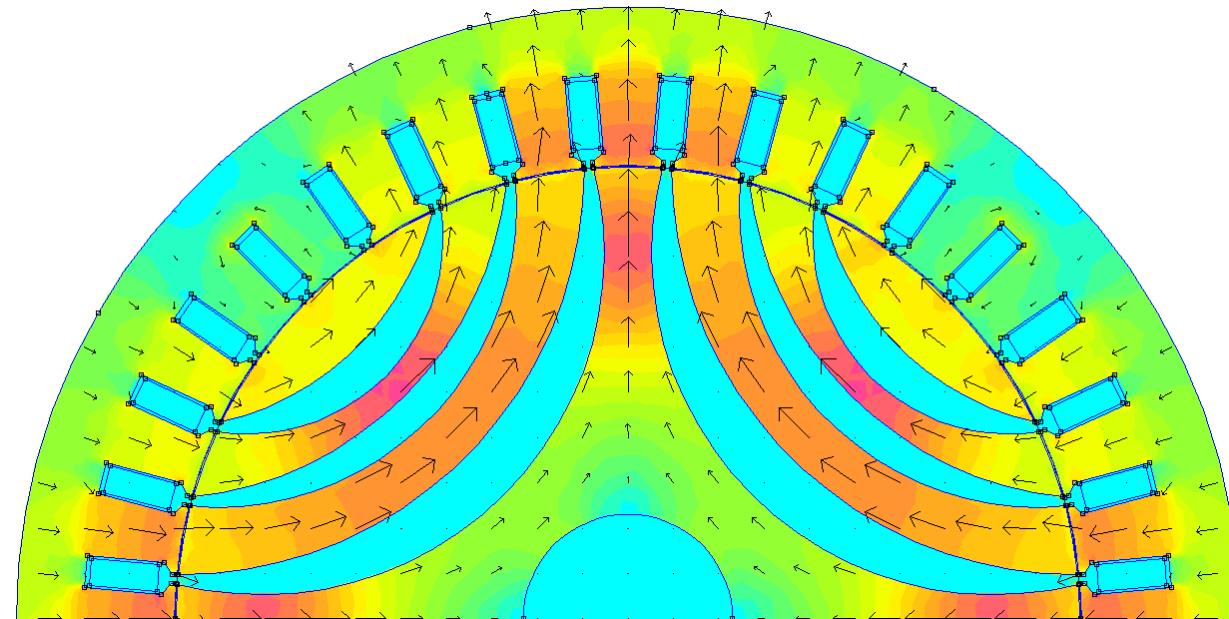
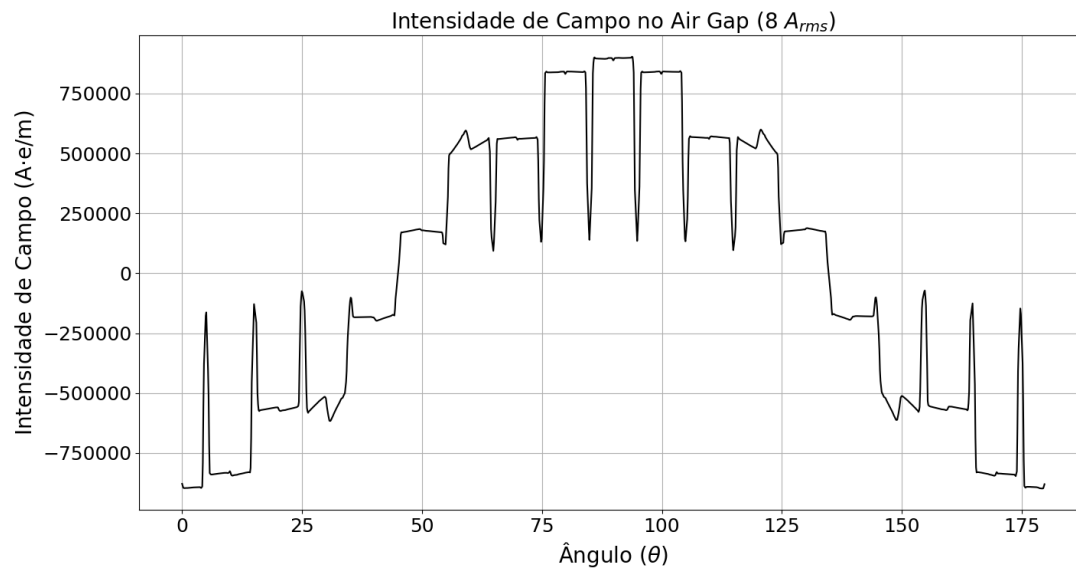
Curva aparentemente senoidal.



Valores de Fluxo tangencial de 5x a 20x menor que o Fluxo normal.

Resultados das Simulações e suas conclusões.

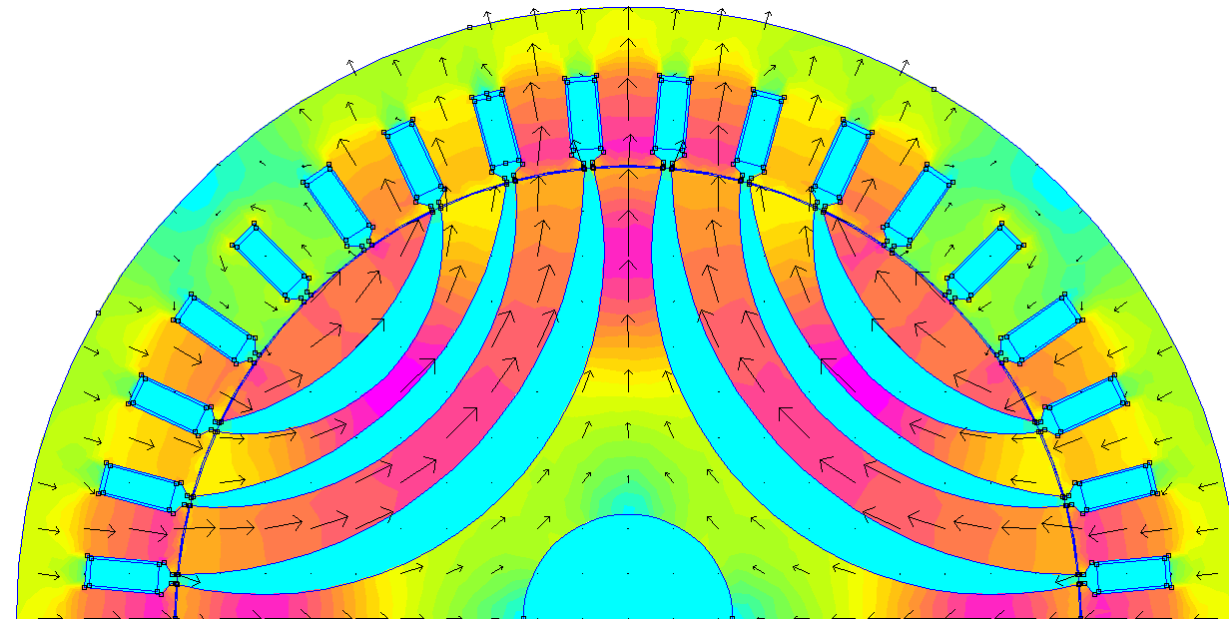
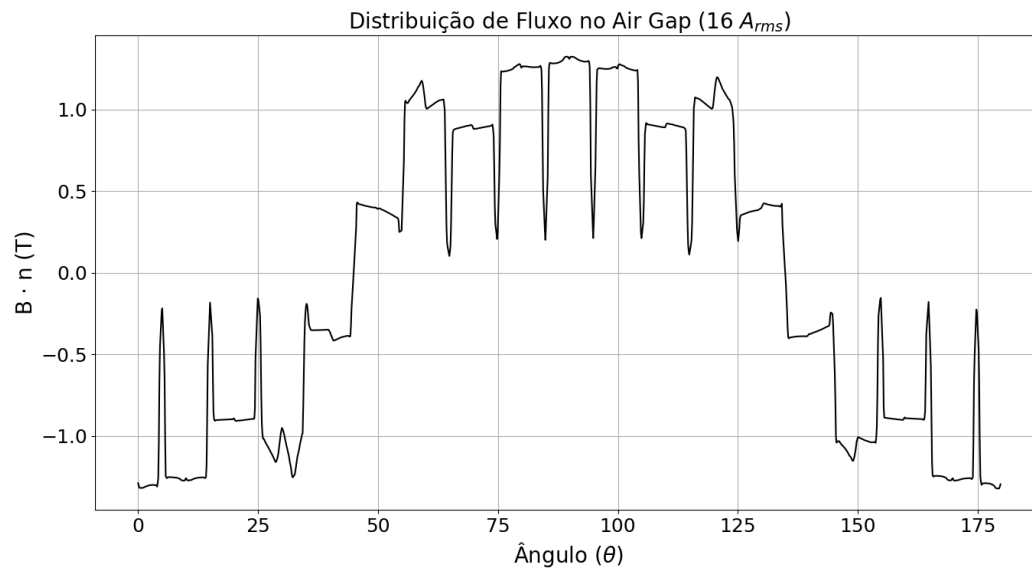
3. Levantamento dos vetores de campo magnético espaciais no entreferro.



Distribuição de fluxo normal de 8A

Resultados das Simulações e suas conclusões.

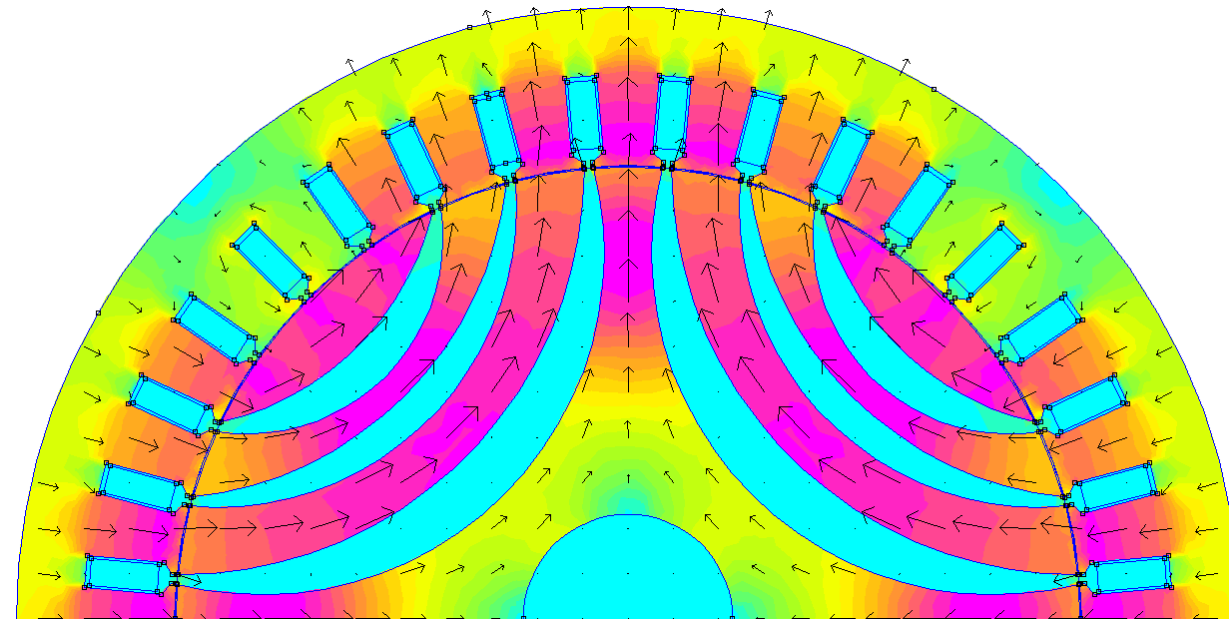
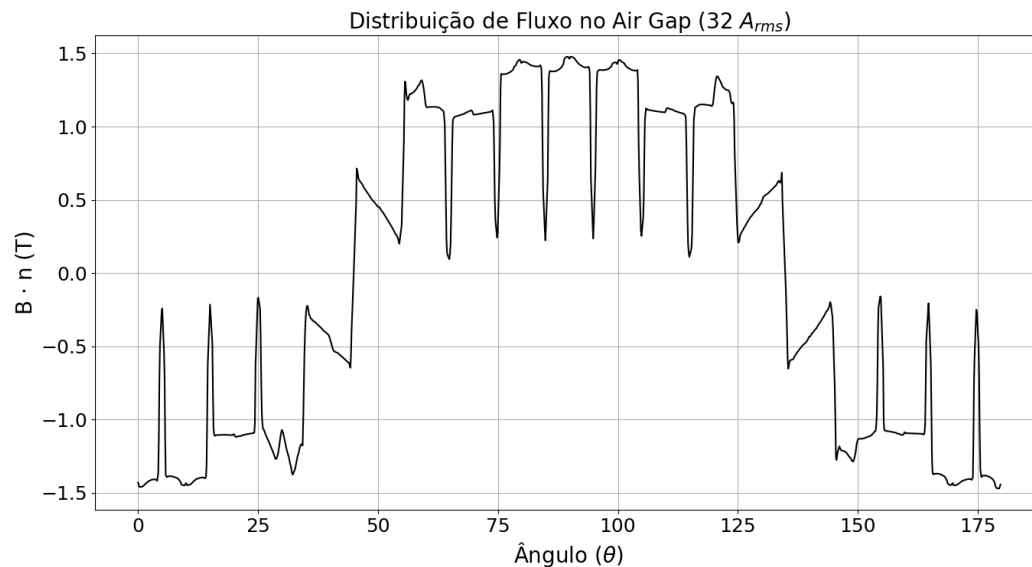
3. Levantamento dos vetores de campo magnético espaciais no entreferro.



Distribuição de fluxo normal de 16A

Resultados das Simulações e suas conclusões.

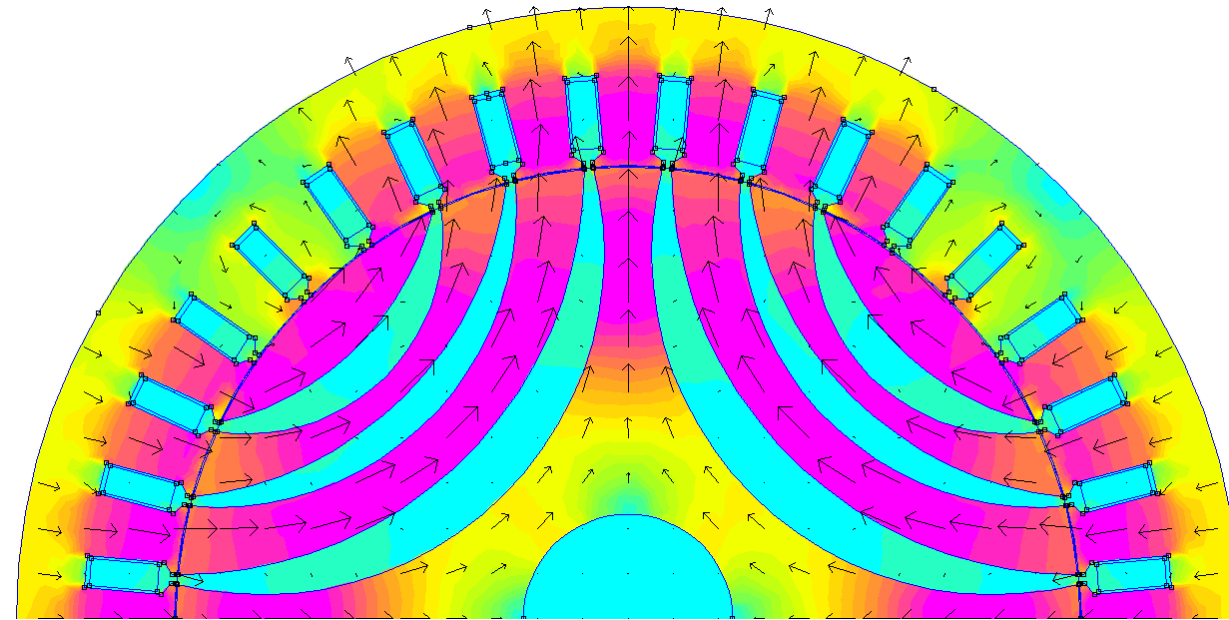
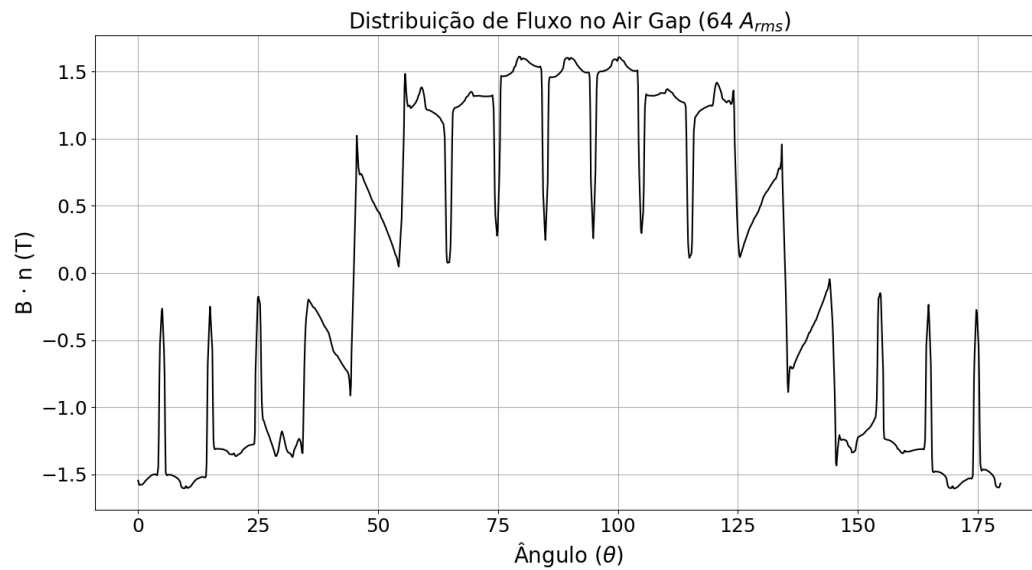
3. Levantamento dos vetores de campo magnético espaciais no entreferro.



Distribuição de fluxo normal de 32A

Resultados das Simulações e suas conclusões.

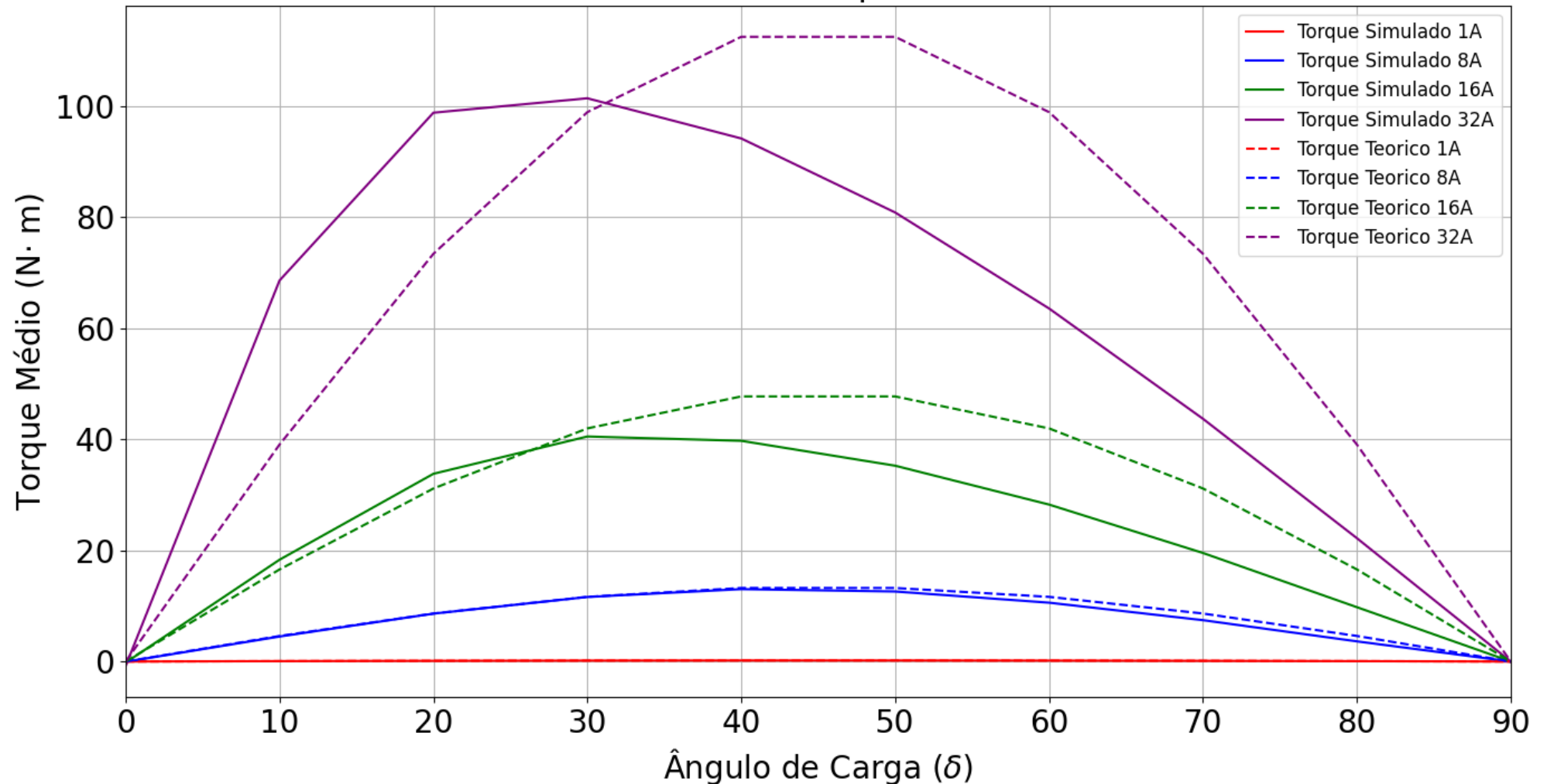
3. Levantamento dos vetores de campo magnético espaciais no entreferro.



Distribuição de fluxo normal de 64A



Curvas de Torque Médio





Resultados das Simulações e suas conclusões.

3. Levantamento de Tensão Induzida.

- Devido à metodologia de simulação, não é possível obter dados de tensão induzida diretamente do FEMM;
- Será efetuada uma diferenciação discretizada do Fluxo concatenado para obter os dados de tensão.

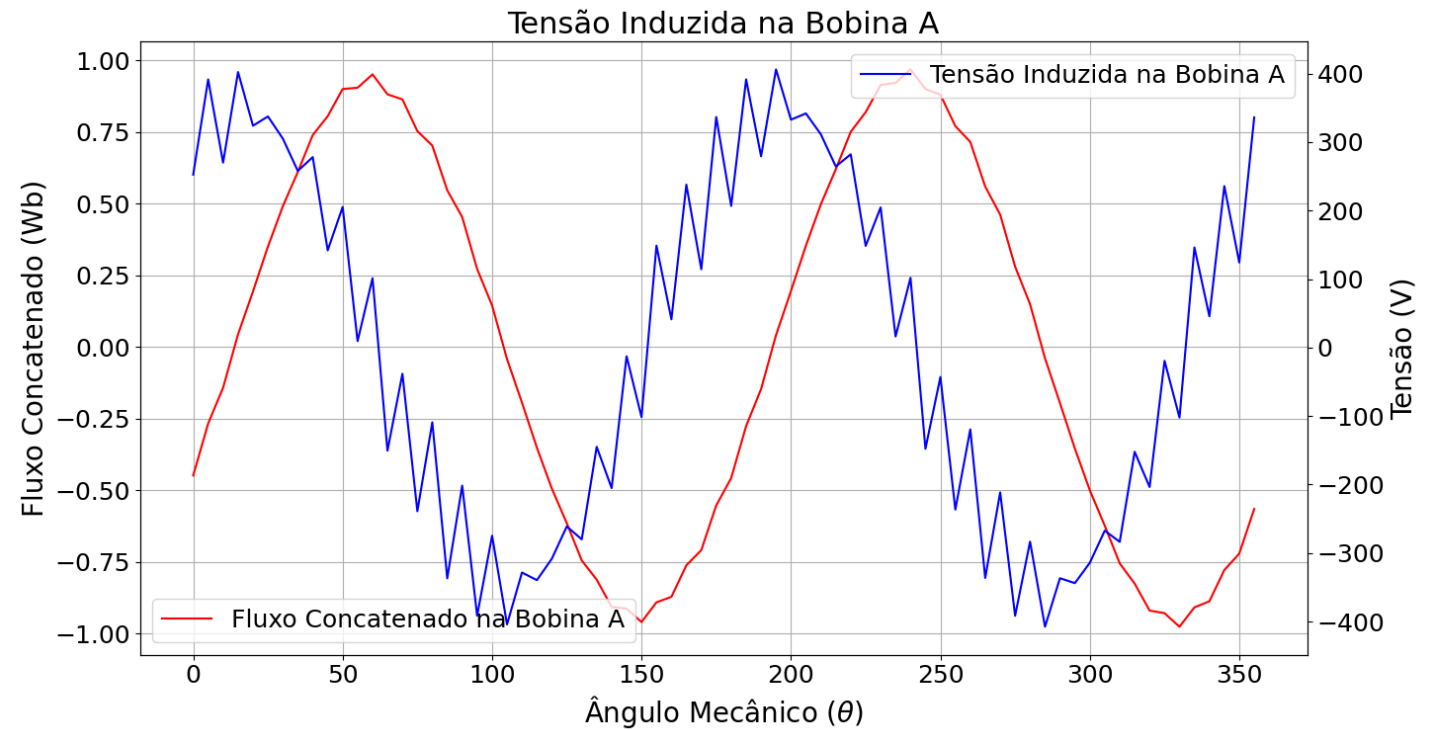
$$E_a = \frac{d\lambda_a}{dt}$$

$$E_a[k] = \frac{\lambda_a[k] - \lambda_a[k - 1]}{\Delta t}$$

Resultados das Simulações e suas conclusões.

3. Levantamento de Tensão Induzida.

- A tensão induzida está adiantada de 90° em relação ao fluxo (Lembrando que o ângulo elétrico é o dobro do ângulo mecânico para este motor).
- Harmônicos de fluxo espaciais geram curvas de tensão harmônicas que somam à curva principal, a distorcendo.





Conclusão

- O levantamento das curvas de magnetização foram importantes para compreender o efeito das correntes nos fluxos de eixo direto e em quadratura;
- A saturação afeta a diferença entre L_d e L_q e a razão de saliência (ξ). É importante ter atenção a esses parâmetros para garantir a eficiência do MRS;
- Ao fazer o levantamento dos vetores de campo magnéticos espaciais foram evidenciados os harmônicos espaciais que os slots do estator induzem no entreferro da máquina.



Conclusão

Sugestão para trabalhos futuros:

- **Variar parâmetros da geometria do rotor, de modo a verificar o impacto nos fluxos e nas indutâncias;**
- **Calcular perdas resistivas no rotor da máquina, de modo a confirmar o conceito de rotor frio;**
- **Fazer um estudo de comparação com outro tipo de máquina ou até mesmo com uma variação do MRS.**



Obrigado!

**Caio Alexandre T. Graciano,
Cleiton M. Freitas**

Email: caioalexandretg@gmail.com

**Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
Rio de Janeiro - Brasil**