



Projeto Eletromagnético de um Gerador Linear Tubular para Conversão das Ondas Oceânicas

Aluno: César Augusto Santana Castelo Branco (UFMA)

Orientador: Prof. Dr. Luiz Antônio de Souza Ribeiro (UFMA)

Coorientador: Prof. Dr. Osvaldo Ronald Saavedra (UFMA)

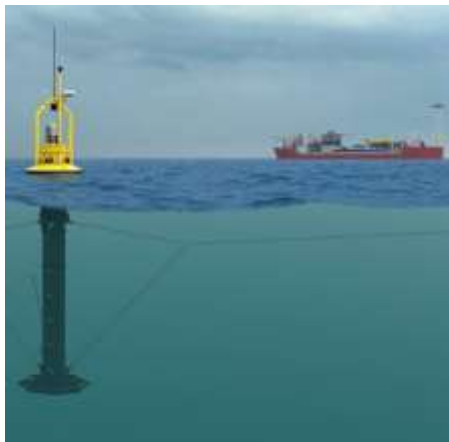
INTRODUÇÃO

- Título do Projeto de Tese de Doutorado:

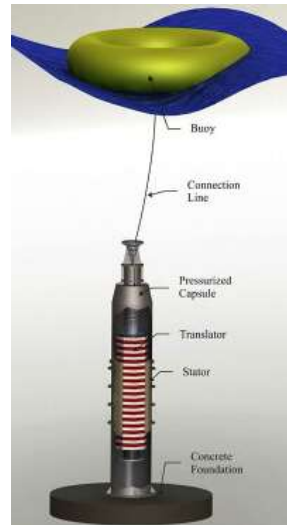
Projeto e Análise de um Gerador Linear para Geração de Energia Elétrica a partir das Ondas Oceânicas

- Objetivos:

- Projetar um gerador linear para conversão da energia das ondas oceânicas;
- Realizar um estudo comparativo com outras tecnologias.

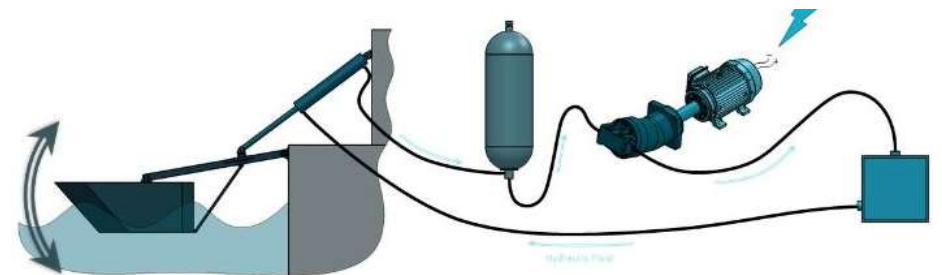


PowerBuoy (OPT)

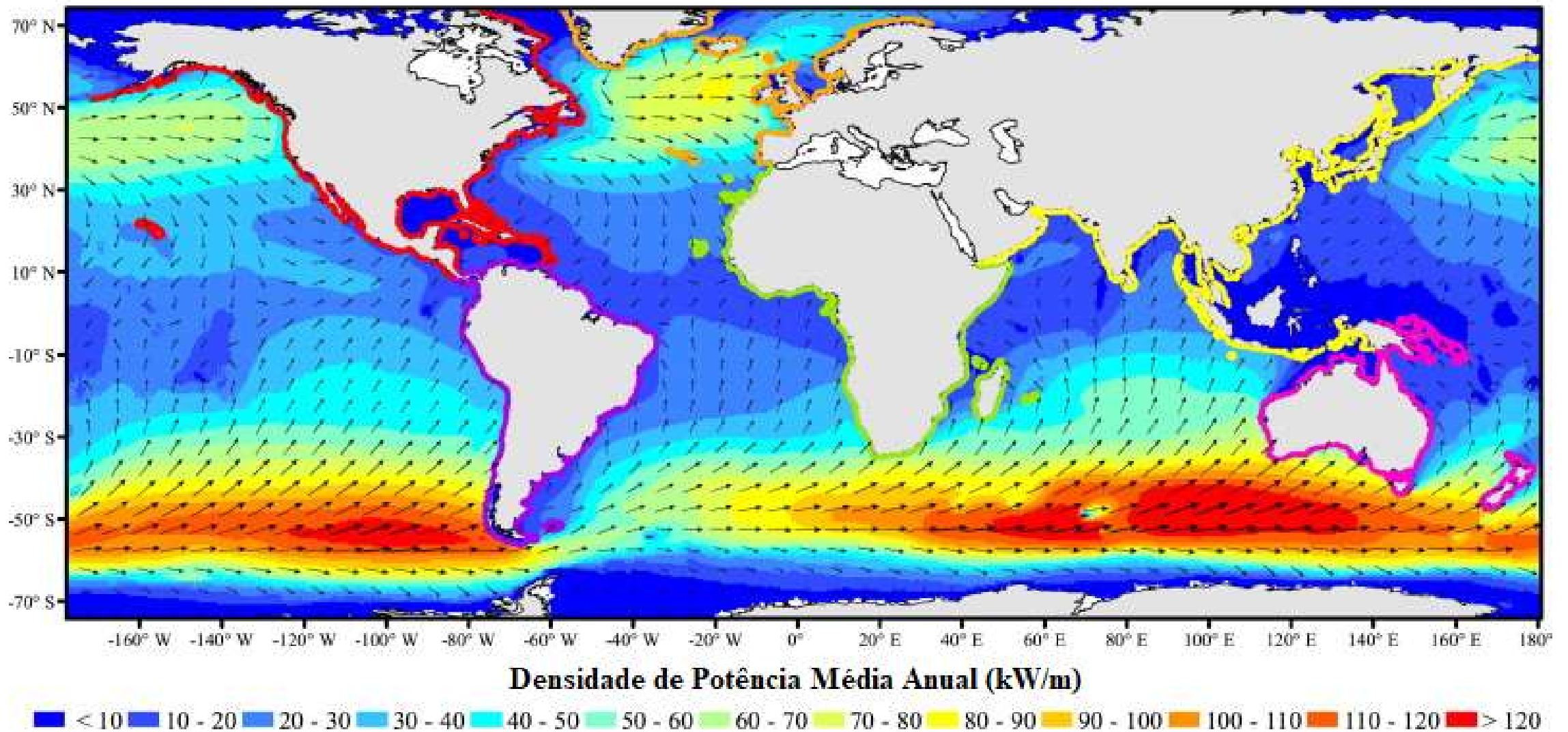


Lysekil (Uppsala Univ)

X

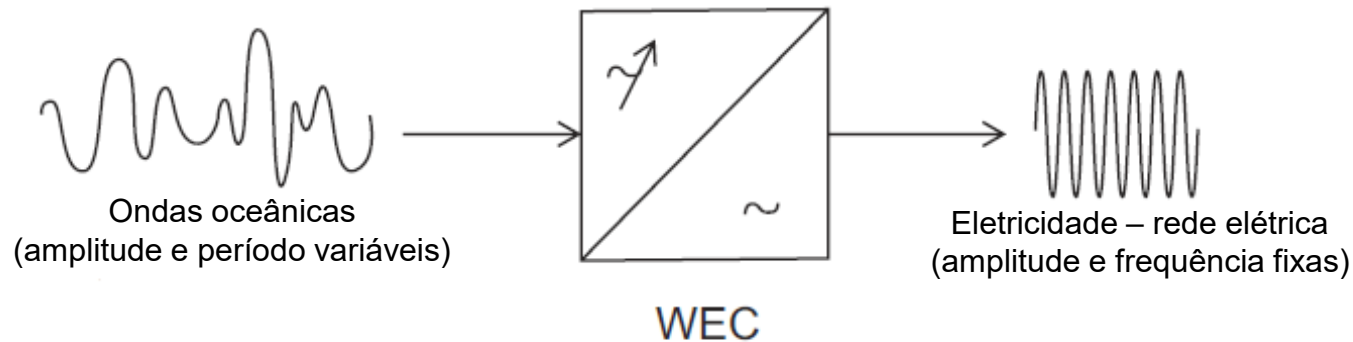


POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS OCEÂNICAS



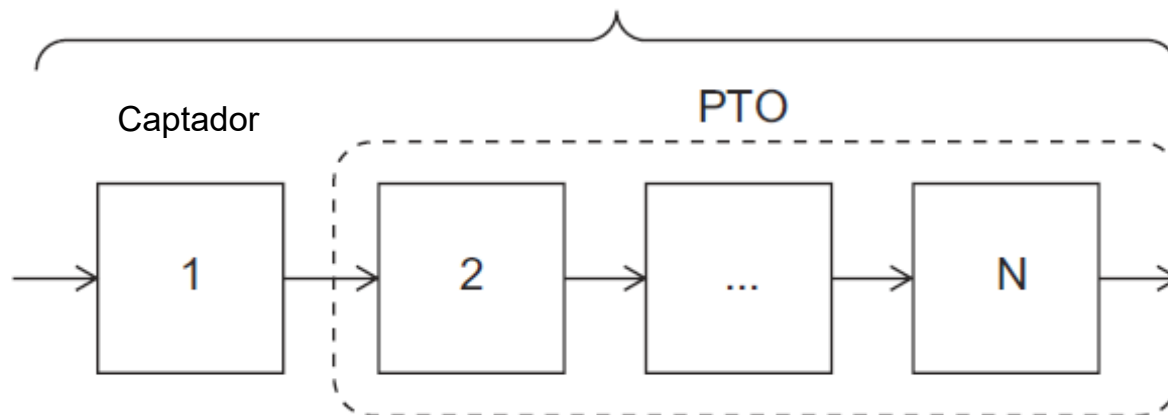
CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS OCEÂNICAS

- Conversor de Energia das Ondas Oceânicas (*wave energy converter* - WEC):
 - Converte o movimento das ondas oceânicas em eletricidade e/ou outras formas de energia;
 - Pode conter uma ou mais etapas de conversão;



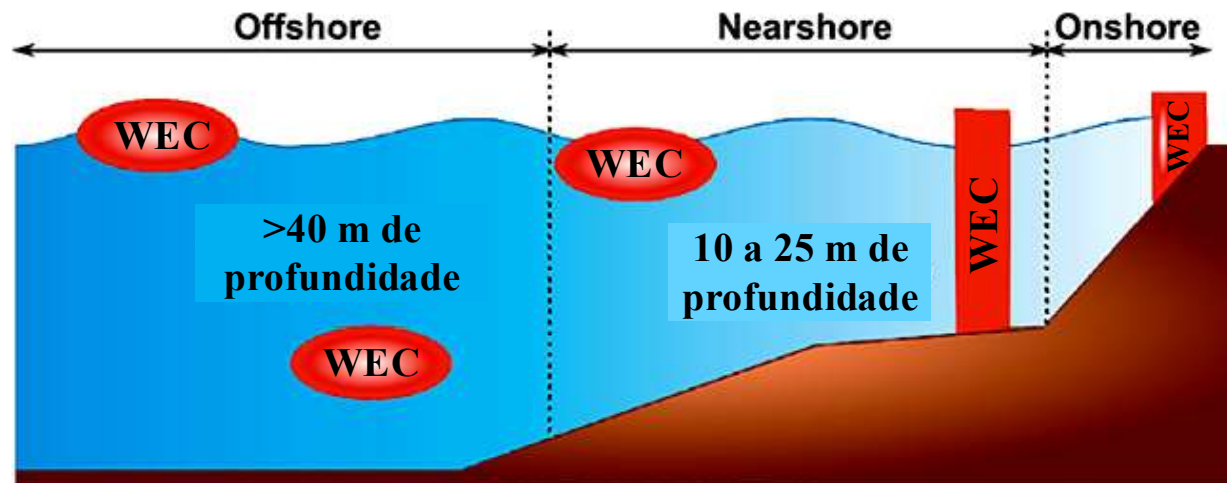
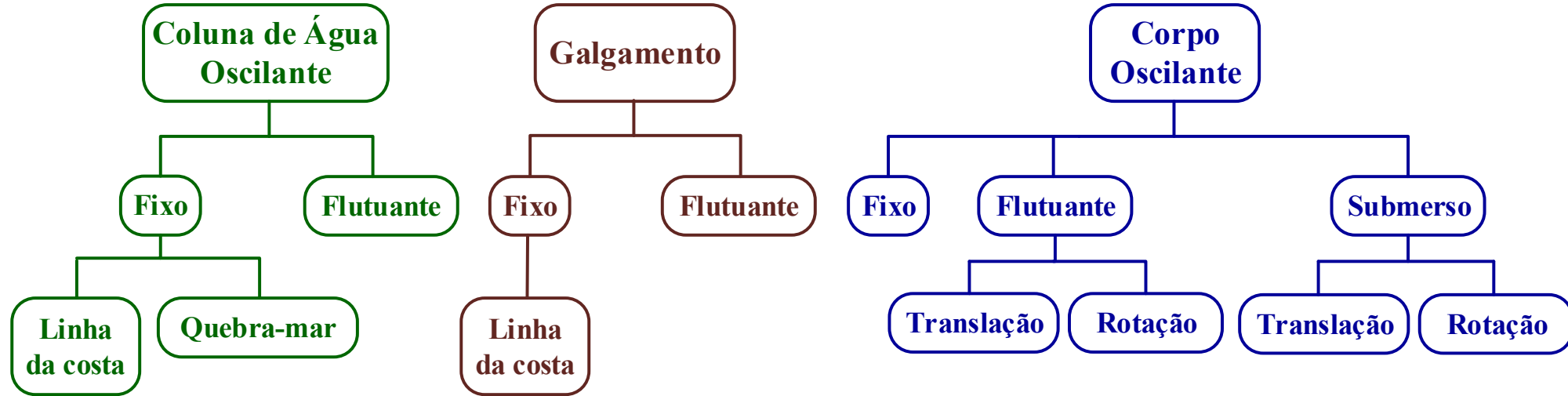
PTO – *power take-off system*.

1, 2, ..., N – estágios de conversão.



TIPOS DE CONVERSORES DAS ONDAS (WECs)

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO WEC



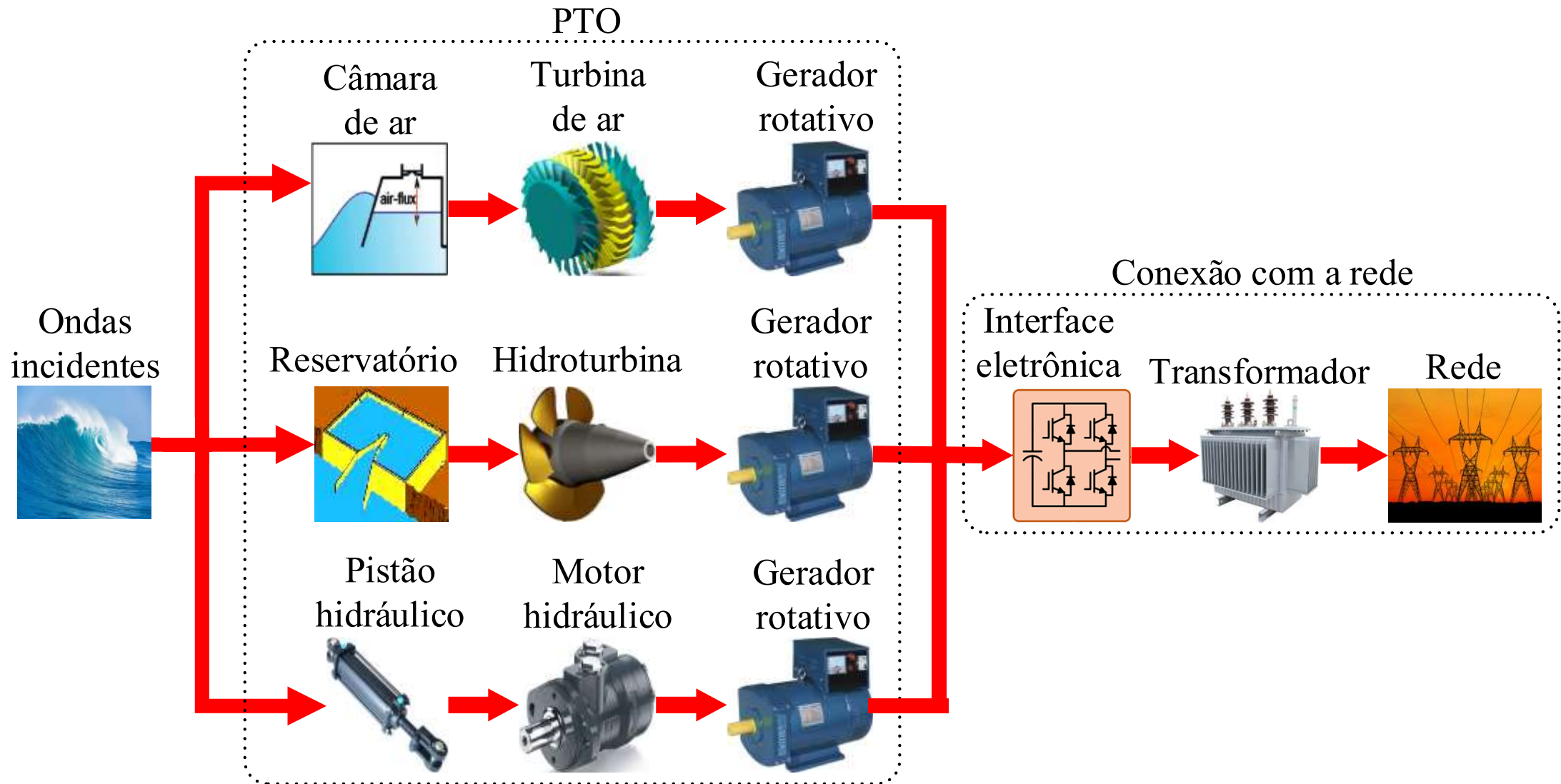
Onshore: linha da costa;

Nearshore: próximo à costa;

Offshore: longe da costa.

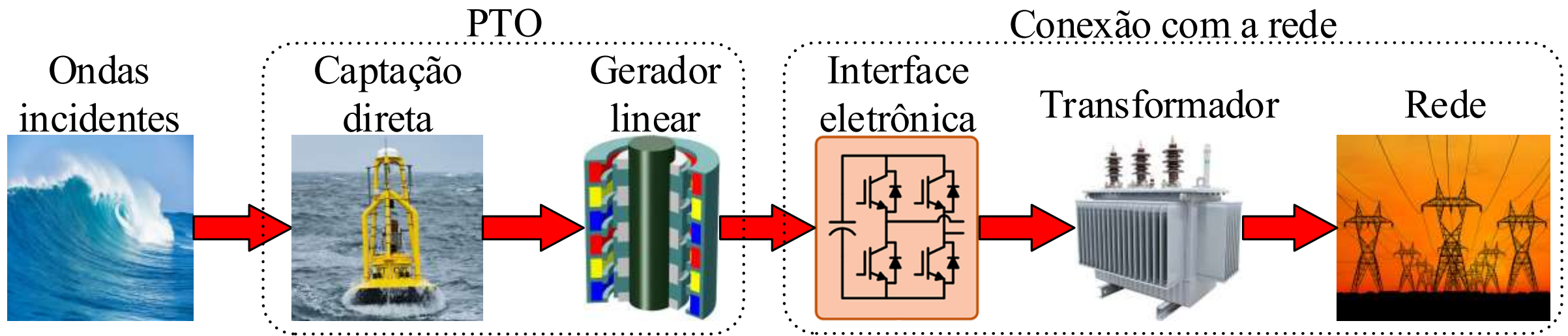
SISTEMA DE CONVERSÃO DAS ONDAS (PTOs)

- WECs indiretos (várias etapas de conversão):



SISTEMA DE CONVERSÃO DAS ONDAS (PTOs)

- WECs diretos (apenas uma etapa de conversão):
 - Usam geradores lineares a ímãs permanentes;
 - Mais eficientes energeticamente;
 - Maior confiabilidade.



GERADORES LINEARES A ÍMÃS PERMANENTES

Composição / Topologia

■ Estator (parte fixa):

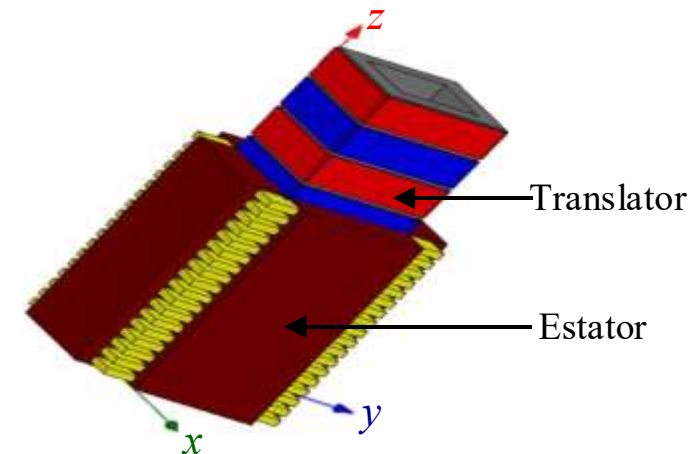
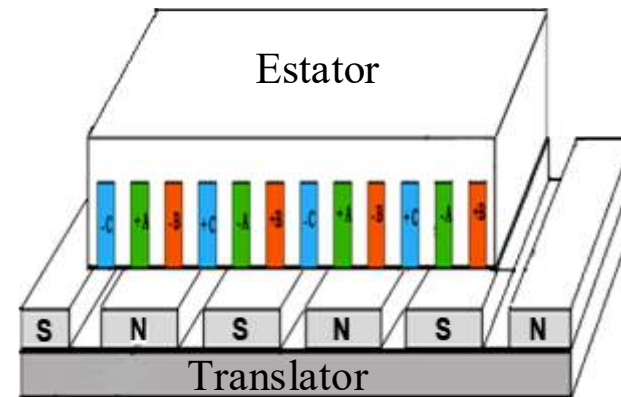
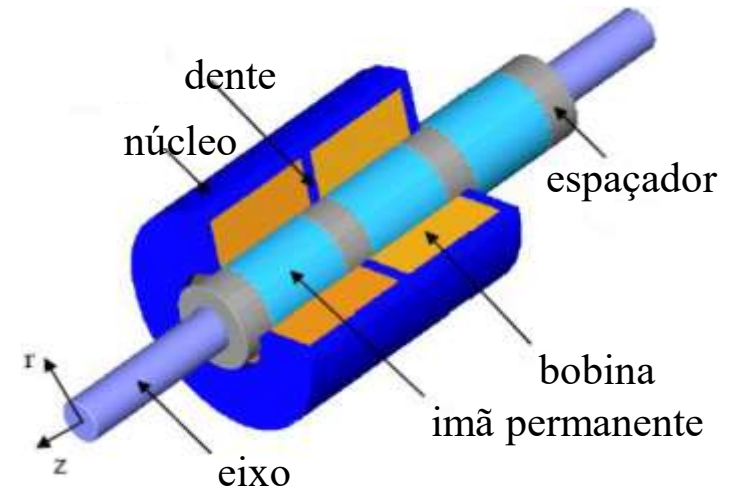
- Enrolamentos;
- Núcleo (ferromagnético ou vazado);
- Dentes e ranhuras (opcionais).

■ Tradutor (parte móvel):

- Excitação (ímãs permanentes);
- Espaçadores (ferromagnéticos ou não);
- Eixo.

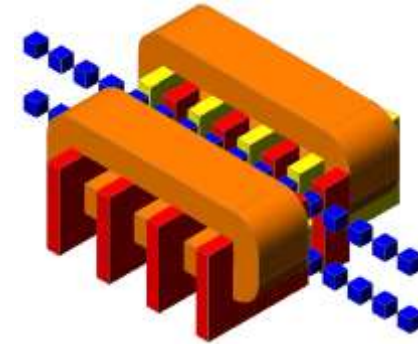
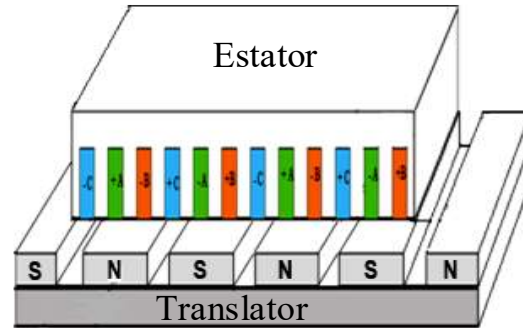
■ Entreferro:

- Espaço entre estator e tradutor.

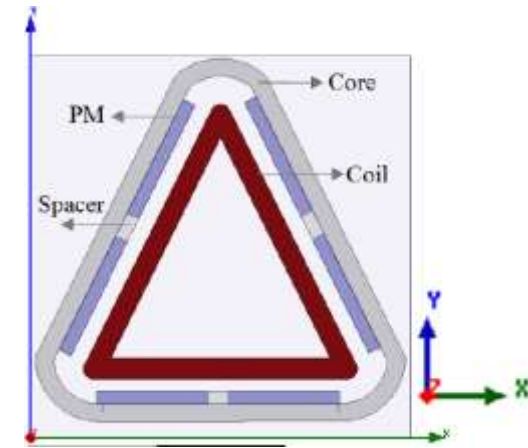
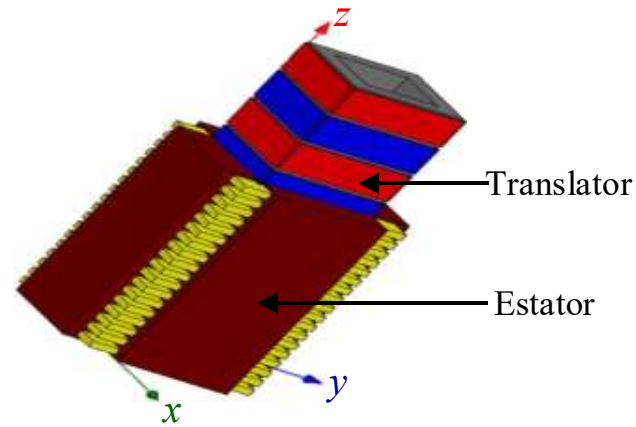


TOPOLOGIAS DE GERADORES LINEARES

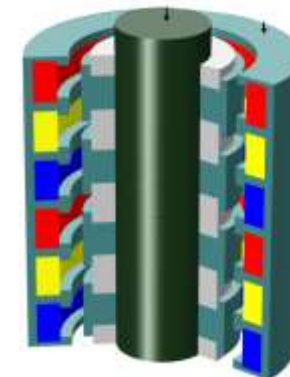
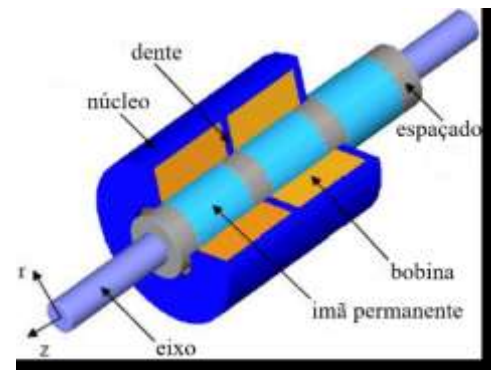
- Planar:



- Multiplanar:



- Tubular:



GERADORES LINEARES A ÍMÃS PERMANENTES

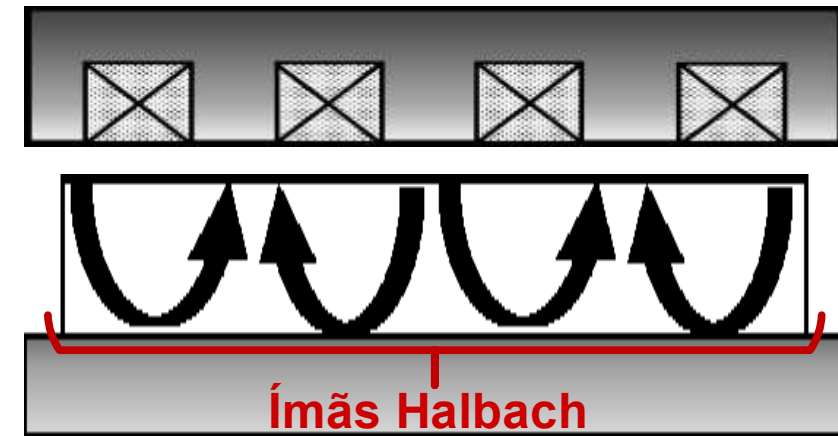
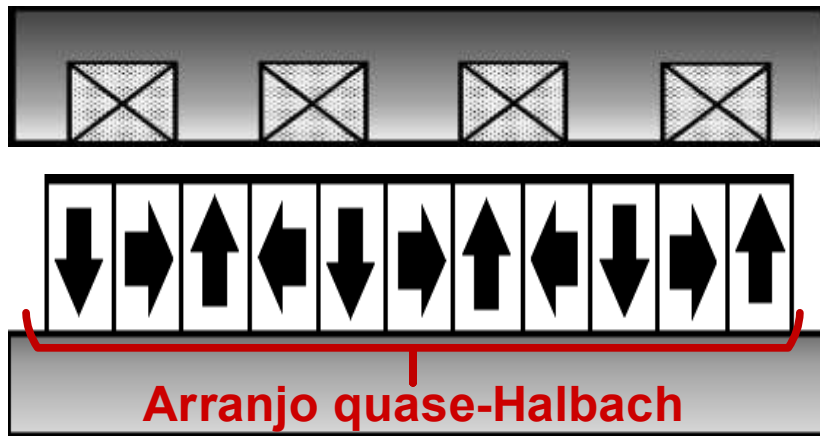
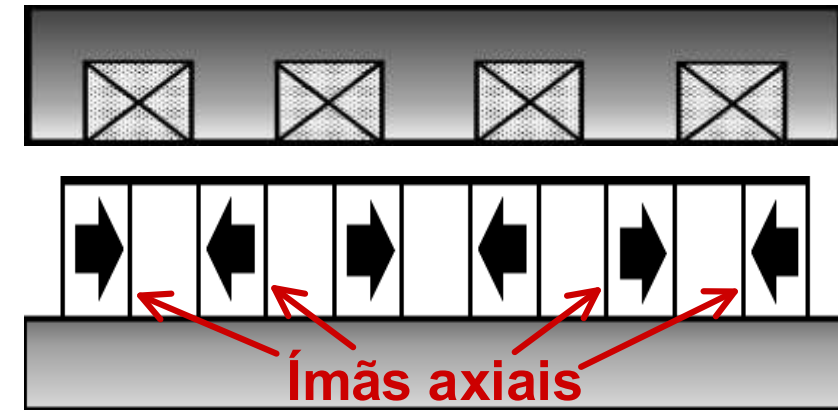
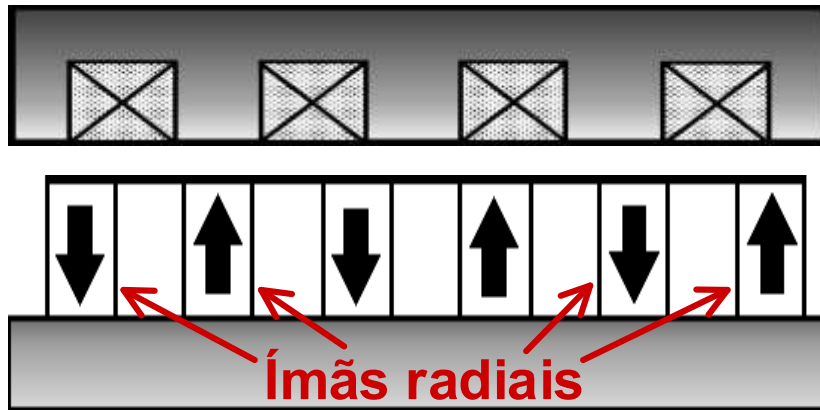
Comparação entre topologias

Atributo/Característica	Configuração	
	Planar	Tubular
Complexidade da estrutura	Menor	Maior
Uso dos ímãs permanentes	Pior	Melhor
Fins de espiras	Há	Não há
Perdas no cobre (ôhmicas)	Maiores	Menores
Uniformidade do entreferro	Menor	Maior
Indutância de dispersão	Maior	Menor
Densidade de potência (kW/massa)	Menor	Maior
Equilíbrio de forças de atração	Pior	Melhor
Facilidade de fabricação	Maior	Menor
Custo de fabricação	Menor	Maior

GERADORES LINEARES A ÍMÃS PERMANENTES

Tipos de ímãs permanentes (direções de magnetização)

- Radial;
- Axial;
- Halbach;
- Quase-Halbach.

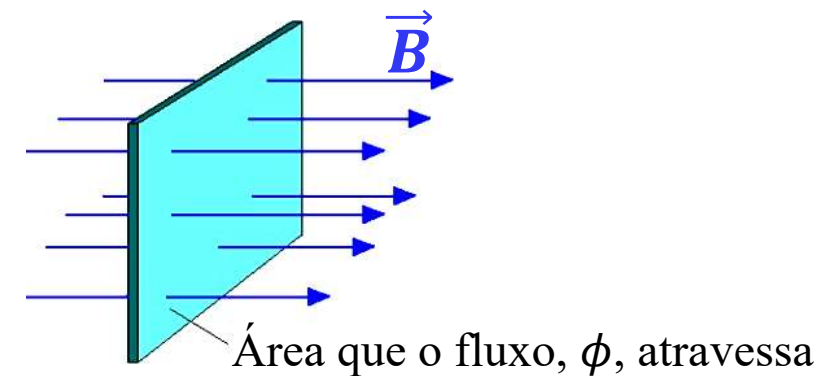
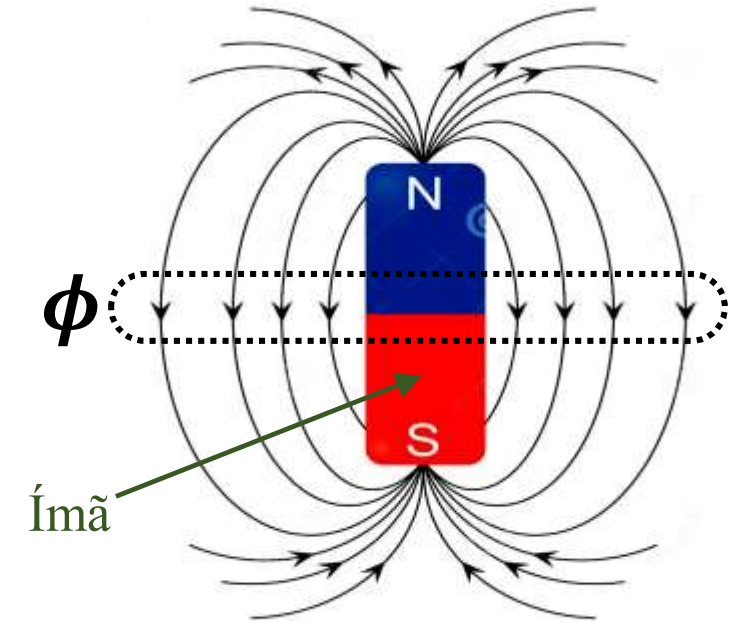


Obs.: setas pretas indicam o caminho do fluxo magnético, ϕ .

GERADORES LINEARES A ÍMÃS PERMANENTES

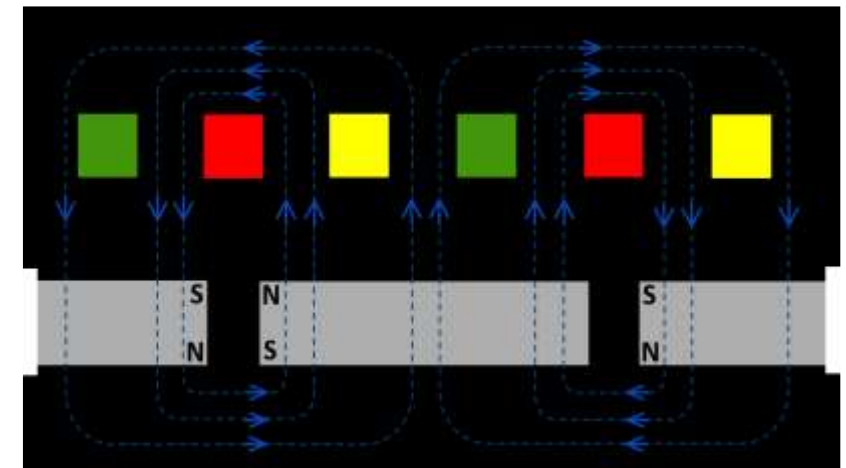
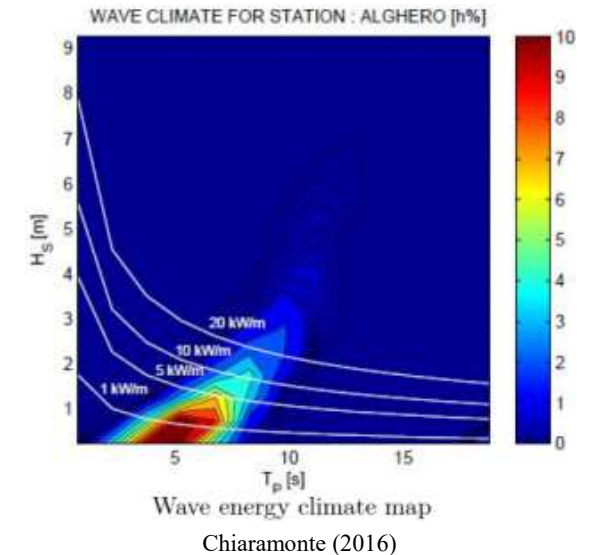
Fluxo magnético e densidade de fluxo

- Fluxo magnético, ϕ :
 - gerado pelos ímãs permanentes;
 - percorre as várias partes do gerador.
- Densidade de fluxo, \vec{B} :
 - fluxo magnético por unidade de área;
 - elo da conversão eletromagnética:
 - *fluxo magnético* \rightarrow *corrente elétrica*



METODOLOGIA DE PROJETO PROPOSTA

- Baseada em:
 - Característica das ondas do local:
 - Comportamento (amplitude, período);
 - Potencial energético.
 - Modelagem do sistema ondas-gerador:
 - Deslocamento do translator;
 - Circuito magnético equivalente (distribuição do fluxo magnético).
 - Objetivos eletromagnéticos do gerador:
 - Potência, tensão, densidade de fluxo no entreferro.
 - Restrições dos materiais do gerador:
 - Limitações eletromagnéticas.
- Tipo do gerador linear:
 - **Tubular Síncrono a Imãs Permanentes.**



MODELAGEM DO GERADOR PROPOSTO

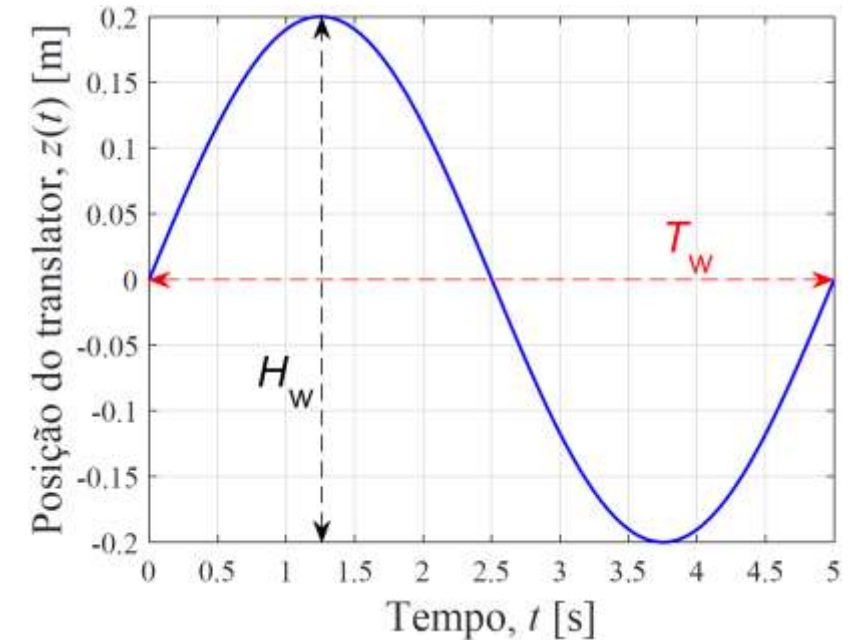
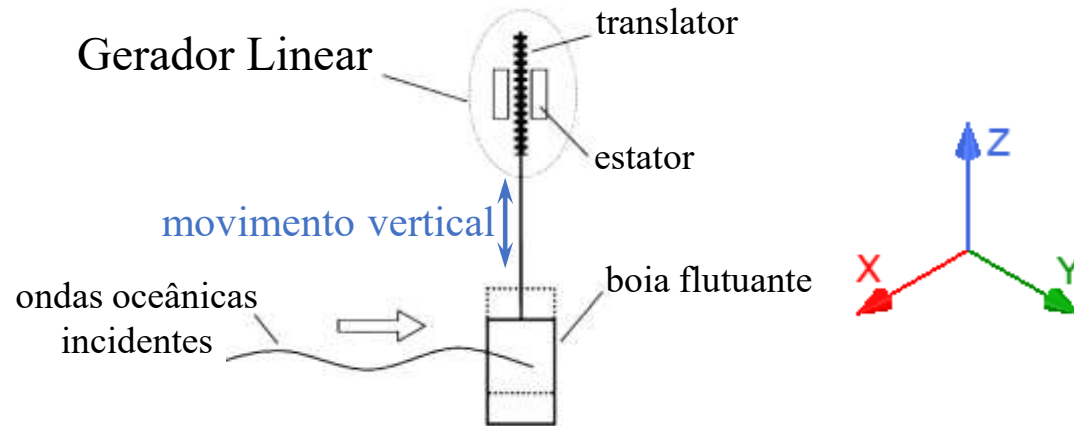
Deslocamento do translator, $z(t)$

➤ Considera:

- Movimento vertical (eixo 'z');
- Amplitude da onda: H_w ;
- Período da onda: T_w .

➤ Modelo simplificado:

$$z(t) = \frac{H_w}{2} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{T_w} t\right)$$

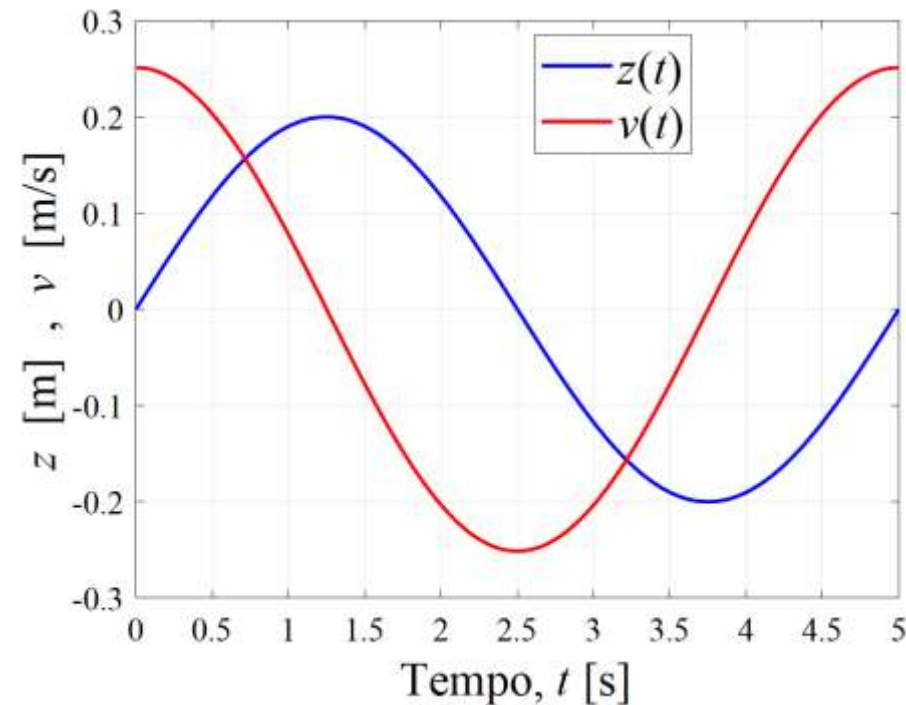


MODELAGEM DO GERADOR PROPOSTO

Velocidade de deslocamento do translator, $v(t)$

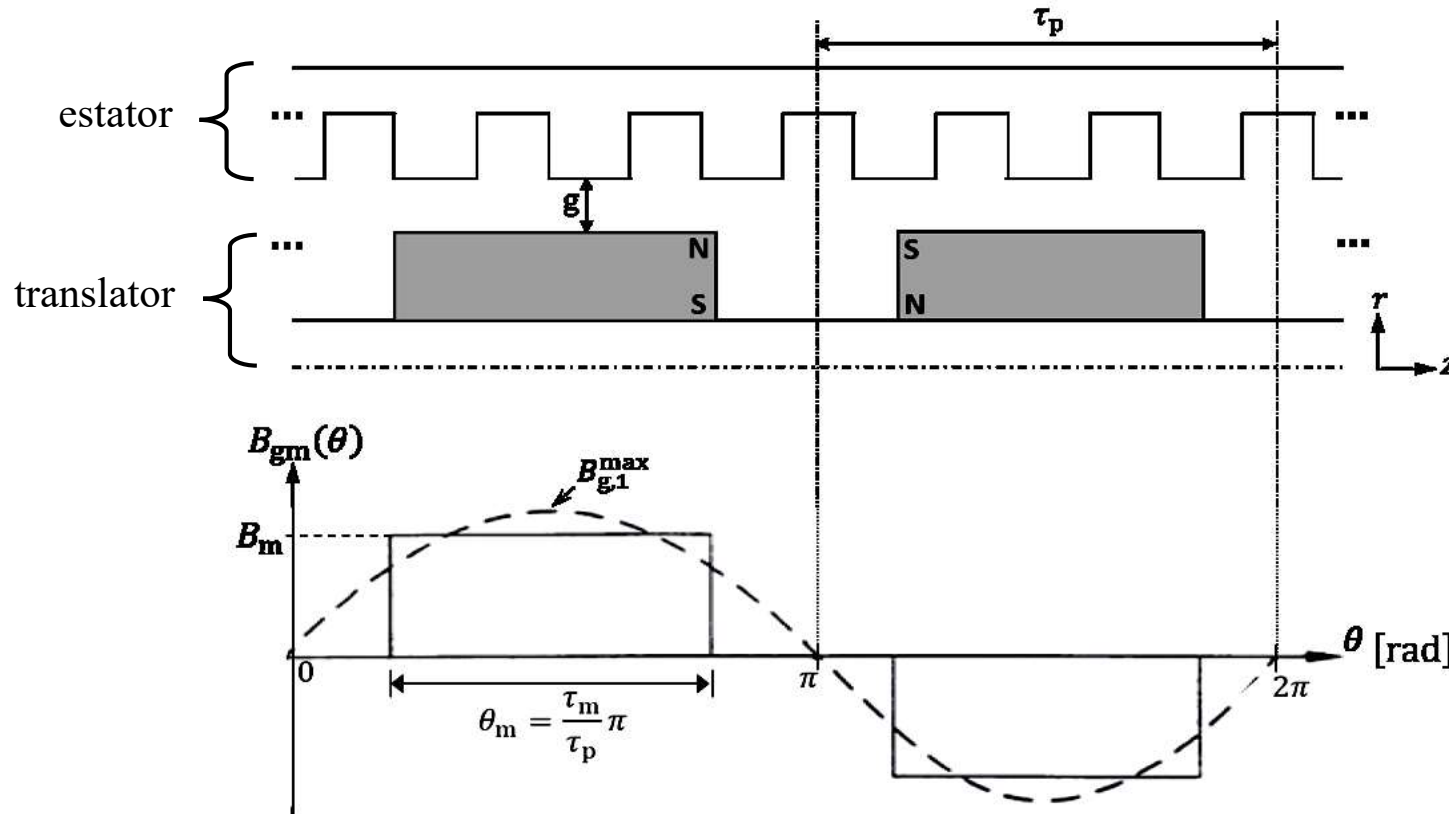
➤ Modelo simplificado:

$$v(t) = \frac{dz(t)}{dt} = \frac{\pi H_w}{T_w} \cos\left(\frac{2\pi}{T_w} t\right)$$



MODELAGEM PROPOSTA

Densidade de fluxo no entreferro, $B_g(z)$



$\tau_p \rightarrow$ passo polar;

$g \rightarrow$ entreferro;

$B_{gm}(\theta) \rightarrow$ densidade de fluxo no entreferro;

$B_{g,1}^{max} \rightarrow$ componente fundamental;

$B_m \rightarrow$ densidade de fluxo nos imãs;

$\theta \rightarrow$ posição angular;

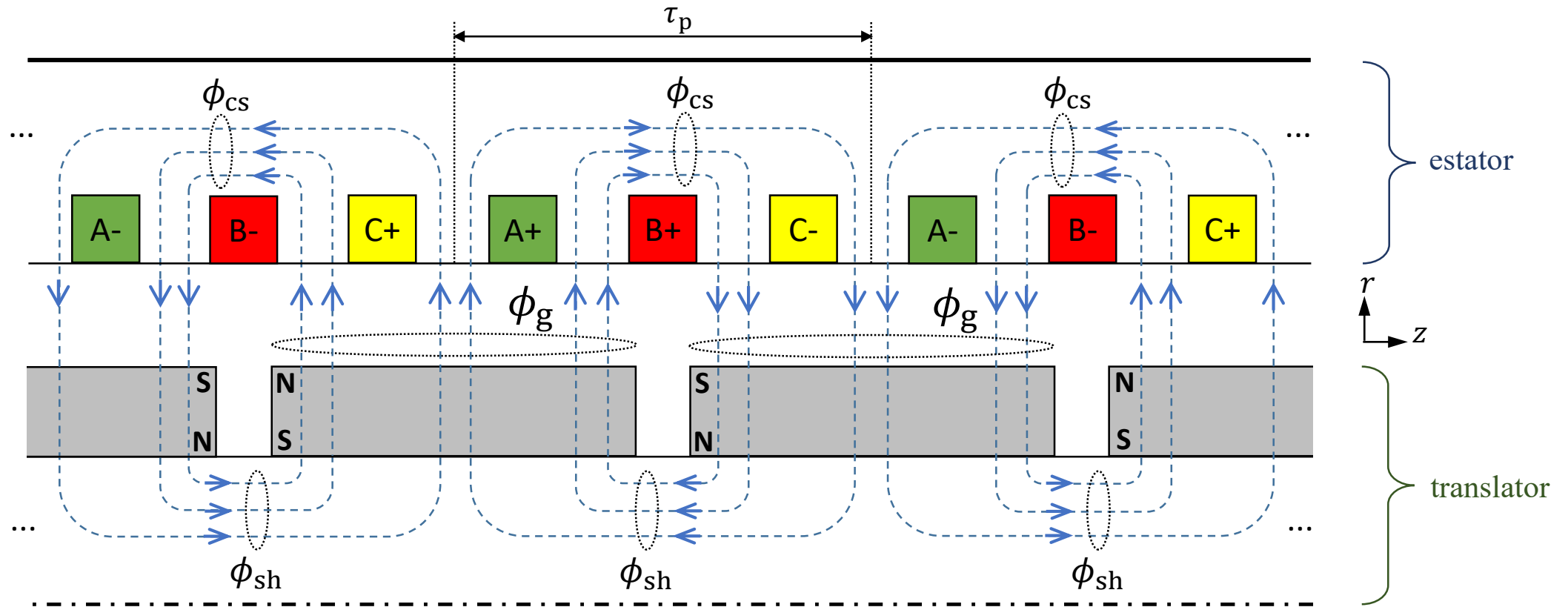
$\theta_m \rightarrow$ ângulo dos imãs.

Modelo (série de Fourier):

$$B_g(z) = \sum_{h \text{ ímpar}}^{\infty} \frac{4}{h\pi} B_g^{\text{avg}} (-1)^{\frac{h-1}{2}} \text{sen} \left(h \frac{\theta_m}{2} \right) \text{sen} \left(h \frac{\pi}{\tau_p} z - h\omega_w t \right)$$

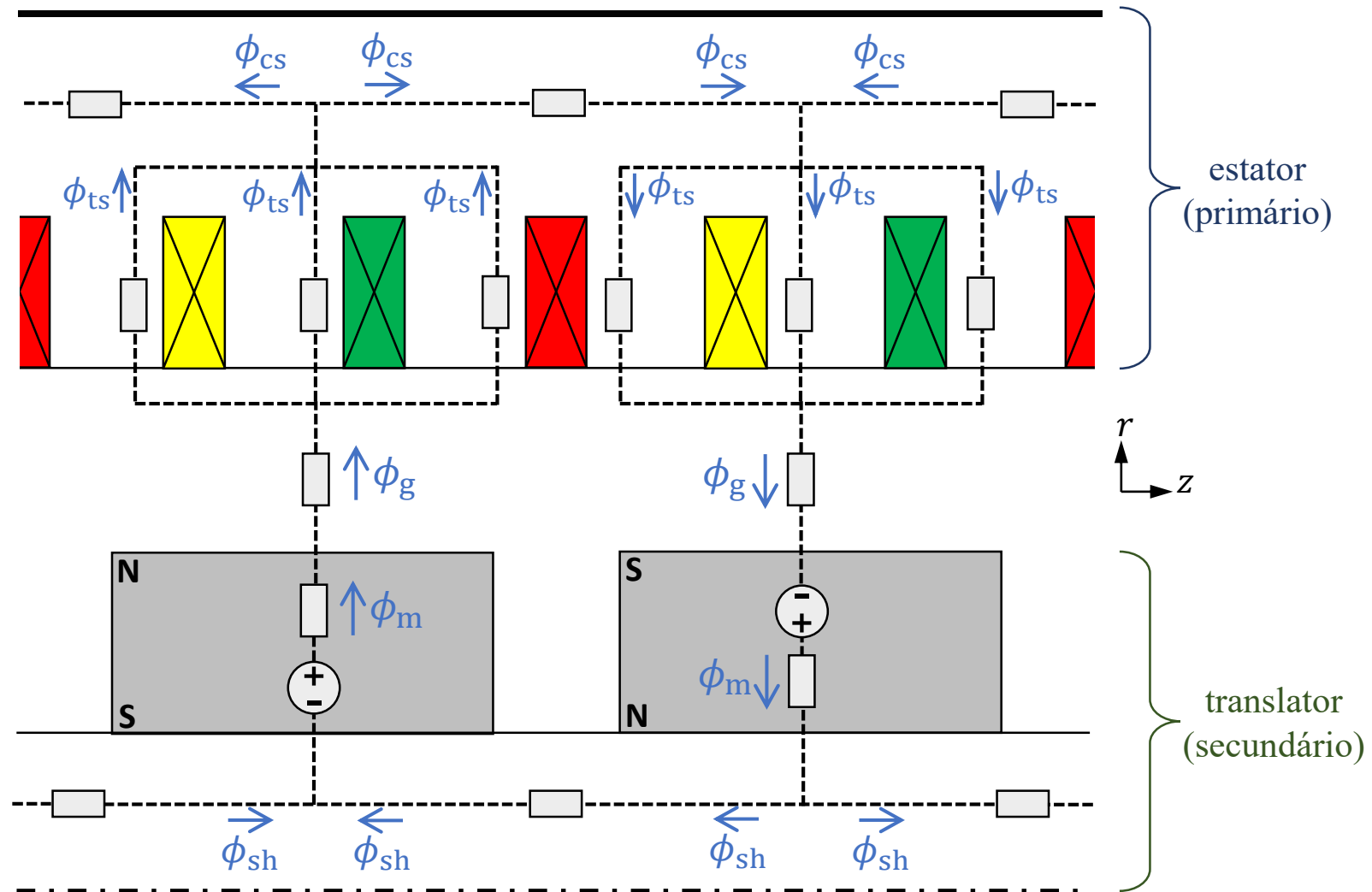
MODELAGEM PROPOSTA

Distribuição do fluxo magnético, $\phi(z)$

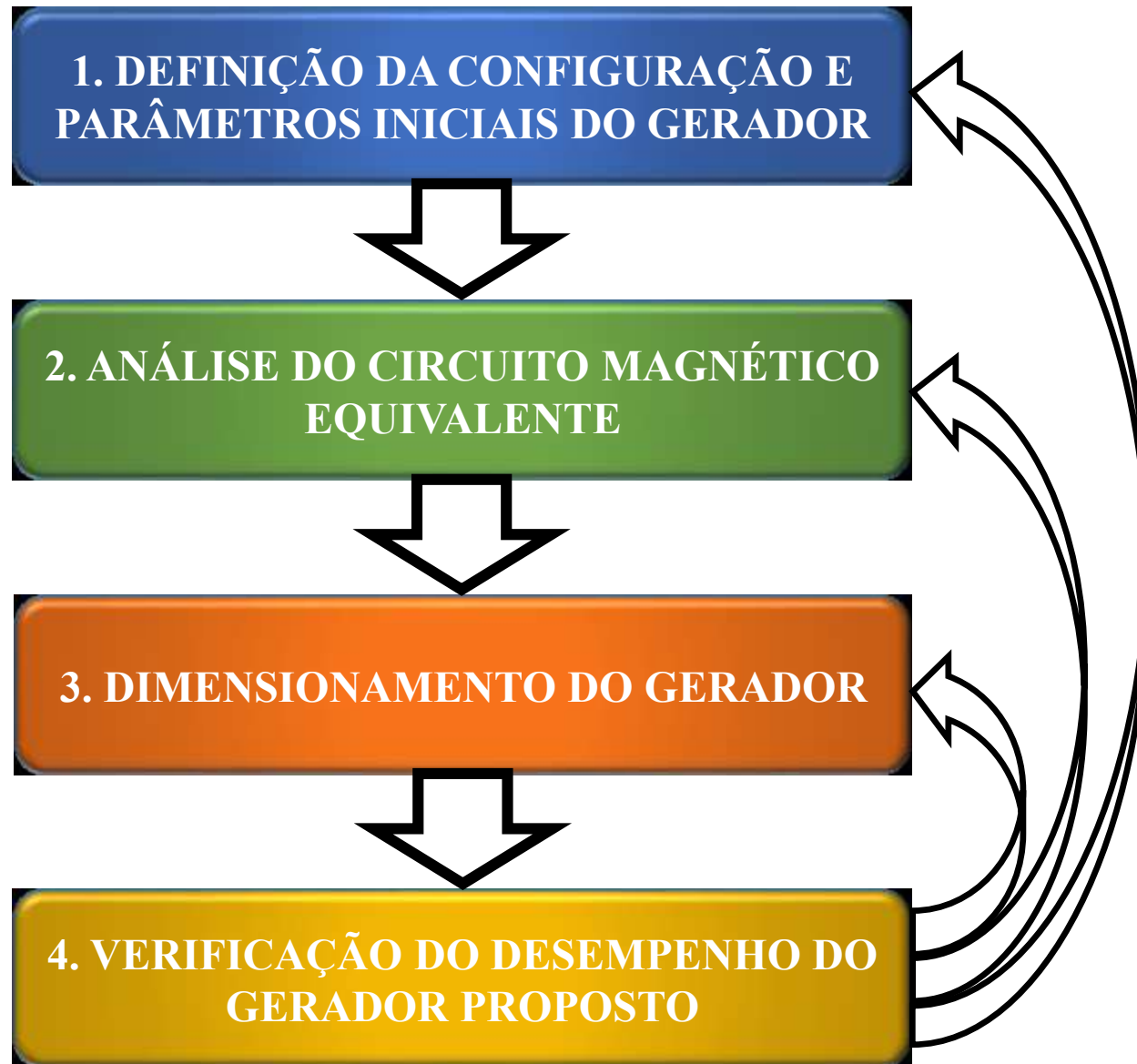


MODELAGEM DO GERADOR PROPOSTO

Circuito Magnético Equivalente (CME)



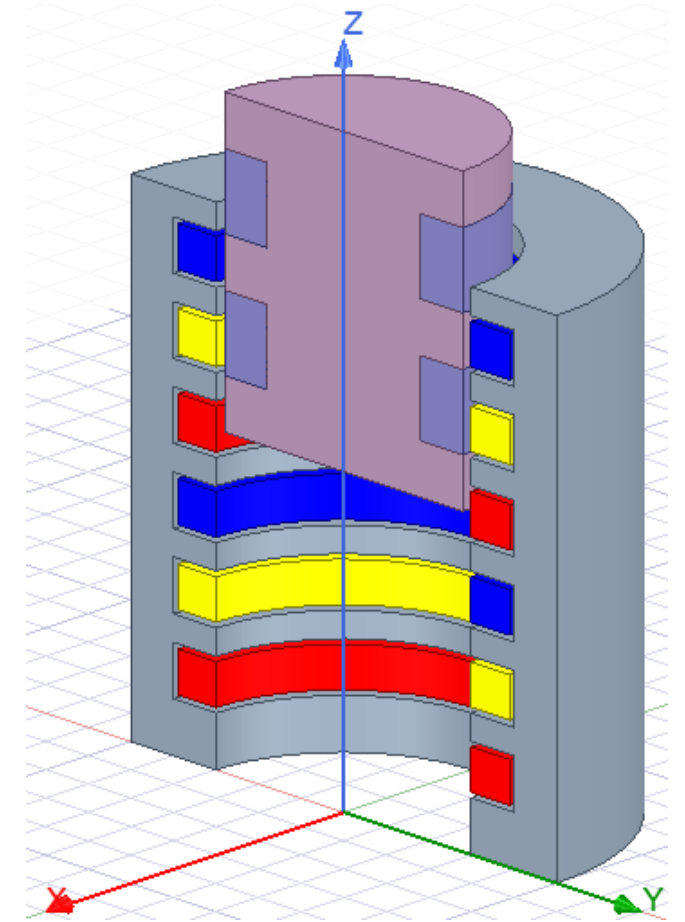
PROJETO DO GERADOR PROPOSTO



1. CONFIGURAÇÃO E PARÂMETROS INICIAIS

1.1. Configuração do Gerador

- Topologia: tubular;
- Translador: interno;
- Excitação – ímãs permanentes:
 - ímãs radiais;
 - anexados à superfície do eixo do translador.
- Estator: externo;
- Enrolamentos:
 - Embutidos nas ranhuras do estator;
 - Três fases ($m = 3$);
 - Ligação em estrela (Y).



1. CONFIGURAÇÃO E PARÂMETROS INICIAIS

1.2. Parâmetros Iniciais

- Características das ondas do local;
- Parâmetros elétricos e magnéticos;
- Objetivos eletromagnéticos do gerador;
- Materiais utilizados:
 - Restrições e características.

EMBOLO	VALOR
S	10 kVA
V_L	380 V
m	3
p	4
q	1
g	1 mm
—	NdFeB
H_c	939 kA/m
B_r	1,31 T
B_g^{avg}	0,8 T
C_ϕ	0,9
B_{sh}^{max}	1,8 T
B_{ts}^{max}	2,2 T
B_{cs}^{max}	1,8 T
H_w	0,5 m
T_w	2 s

1. PARÂMETROS E DEFINIÇÕES INICIAIS

1.3. Definições Iniciais

- Passo polar, τ_p :

➤ Determinado a partir de H_w ;

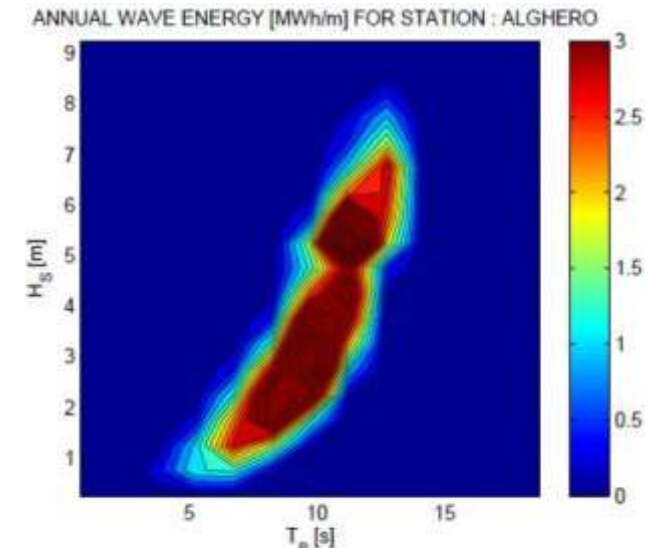
$$\tau_p \leq \frac{H_w}{k} \quad ; \quad k \in \mathbb{N}^*$$

Obs.: k é escolhido pelo projetista.

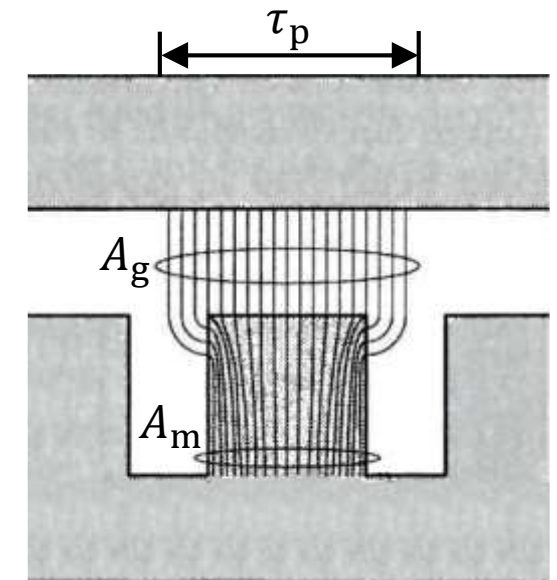
- Coeficiente de concentração de fluxo, C_ϕ :

$$C_\phi = \frac{B_g^{\text{avg}}}{B_m} = \frac{A_m}{A_g}$$

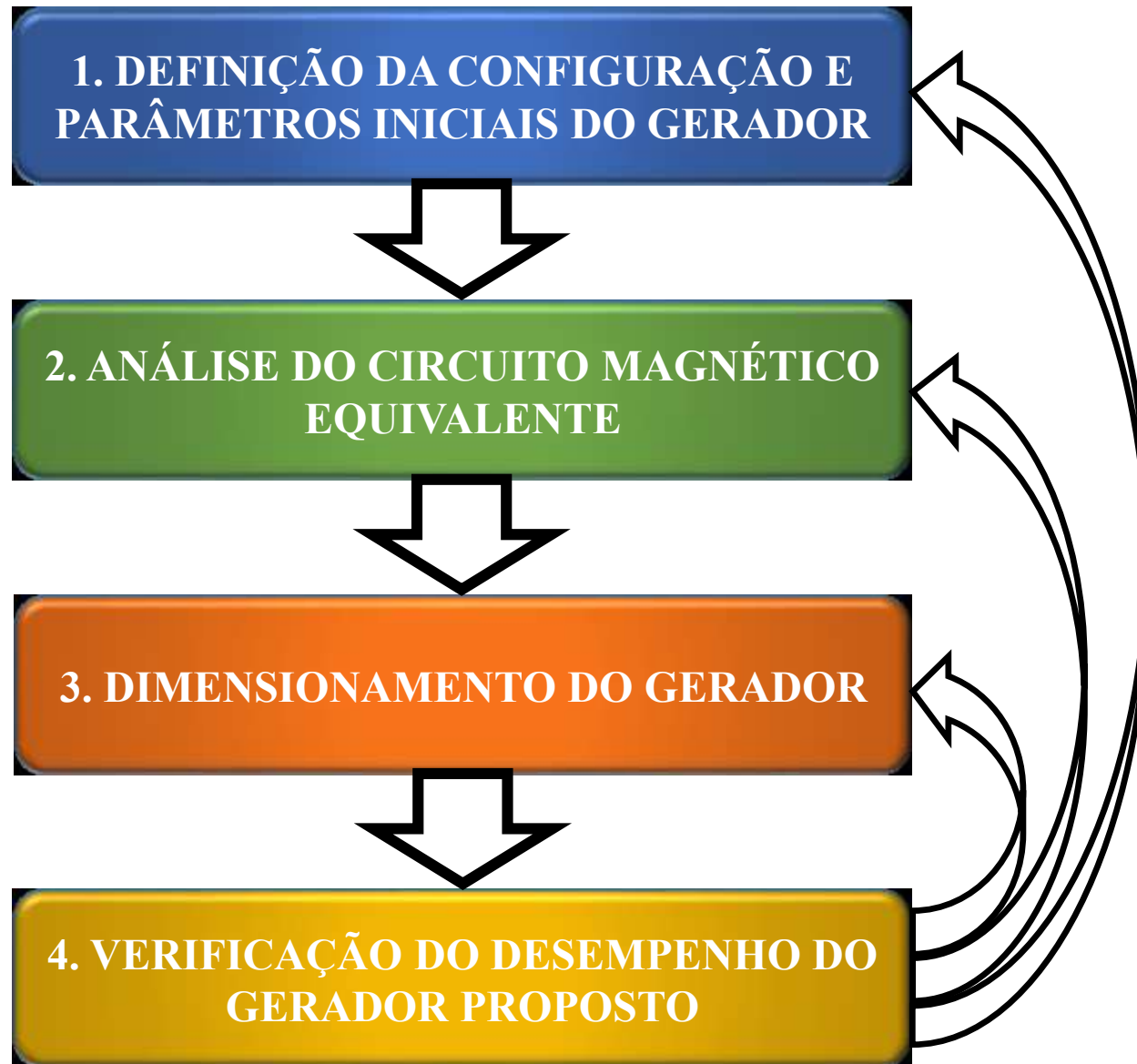
Obs.: $A_m, A_g \rightarrow$ áreas seção transversal ímãs e entreferro.



Annual wave energy map from Alghero site
(Chiaromonte, 2016)

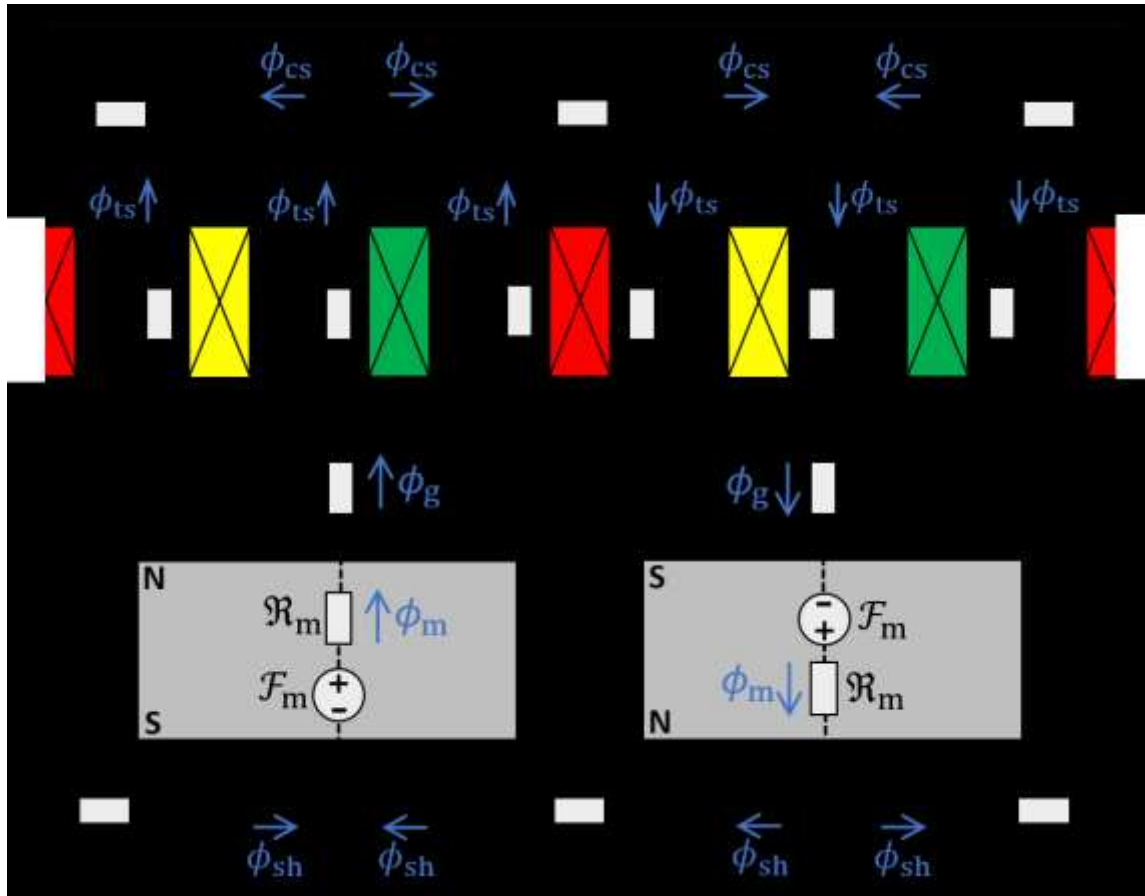


PROJETO DO GERADOR PROPOSTO



PROJETO DO GERADOR PROPOSTO

2. Análise do Circuito Magnético Equivalente



Fluxos:

$$\phi_m = \phi_g$$

$$\phi_m = 2 * \phi_{sh}$$

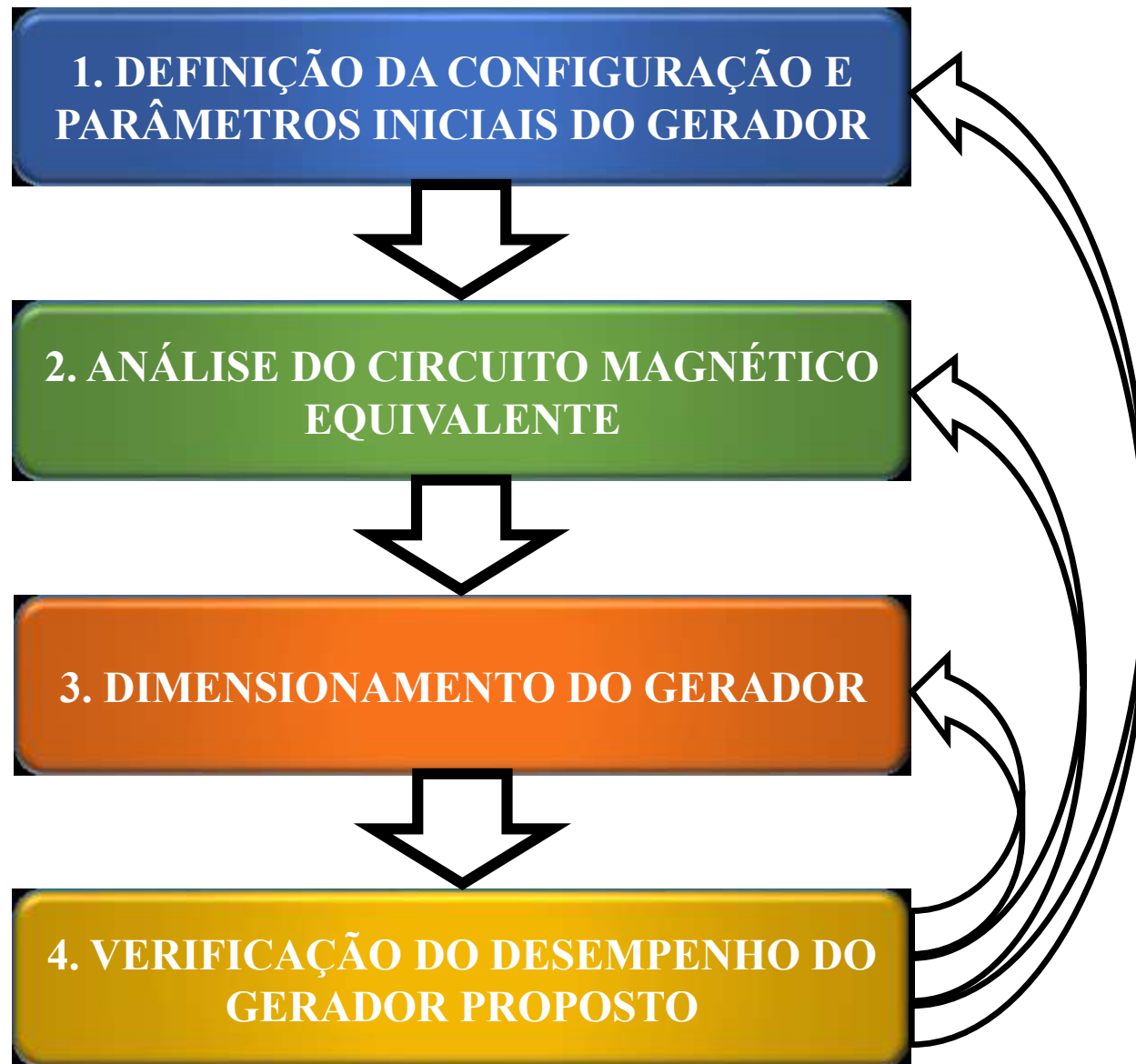
$$\phi_m = 2 * \phi_{cs}$$

$$\phi_m = m * q * \phi_{ts}$$

Aplicando a Lei de Ampère ($\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \mathcal{F}_{encl}$):

$$\phi_m = \frac{4 * m * q * \mathcal{F}_m}{m * q * (4\mathcal{R}_m + 4\mathcal{R}_g + \mathcal{R}_{sh} + \mathcal{R}_{cs}) + 4\mathcal{R}_{ts}}$$

PROJETO DO GERADOR PROPOSTO



3. DIMENSIONAMENTO DO GERADOR

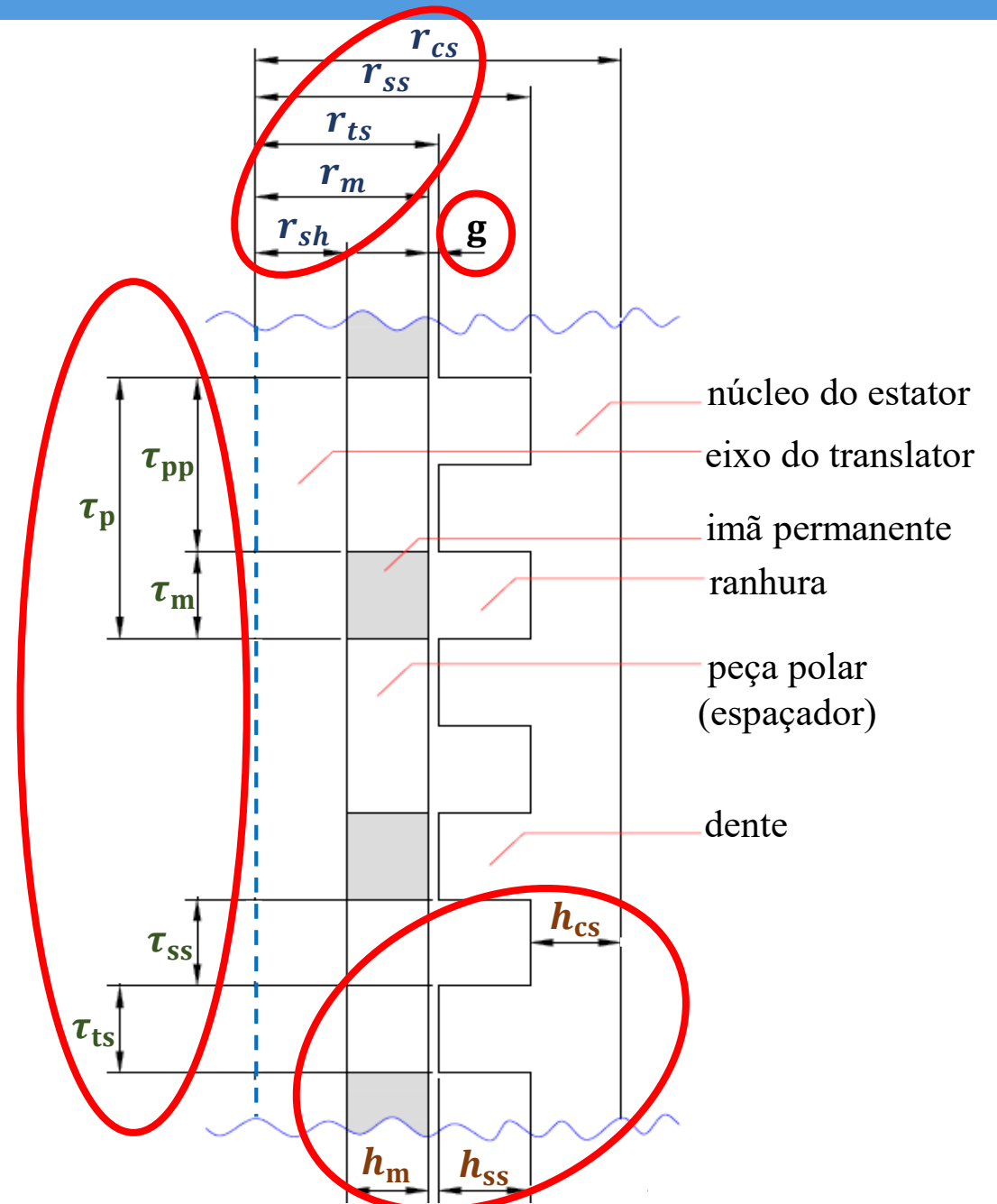
Determinar

- raios
- r_{cs} → núcleo do estator [m]
 - r_{ss} → ranhuras do estator [m]
 - r_{ts} → dentes do estator [m]
 - r_m → ímãs permanentes [m]
 - r_{sh} → eixo do translator [m]

g → entreferro [m]

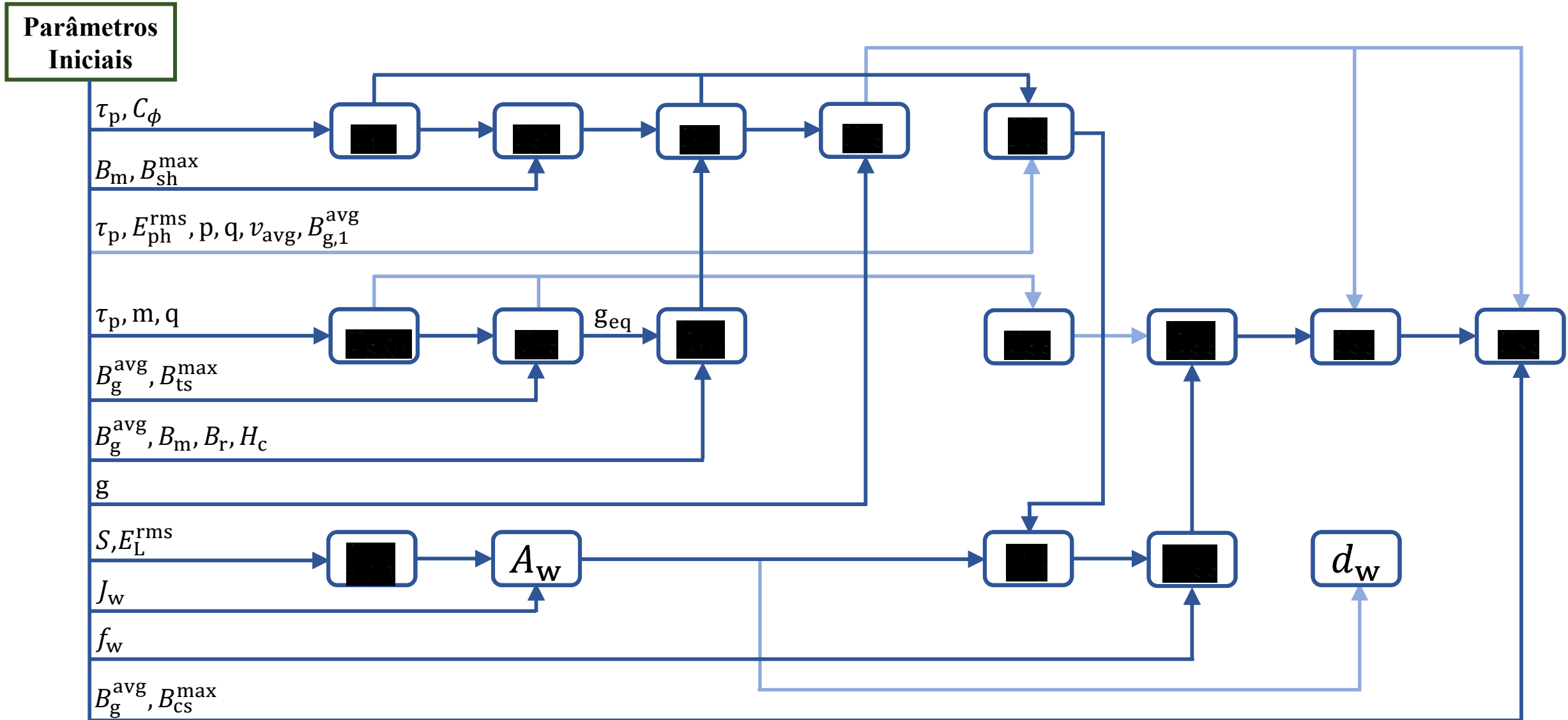
- passos/larguras
- τ_p → polar [m]
 - τ_{pp} → espaçadores [m]
 - τ_m → ímãs permanentes [m]
 - τ_{ss} → ranhuras do estator [m]
 - τ_{ts} → dentes do estator [m]

- espessuras / profundidades
- h_{cs} → núcleo do estator [m]
 - h_{ss} → ranhuras do estator [m]
 - h_m → ímãs permanentes [m]

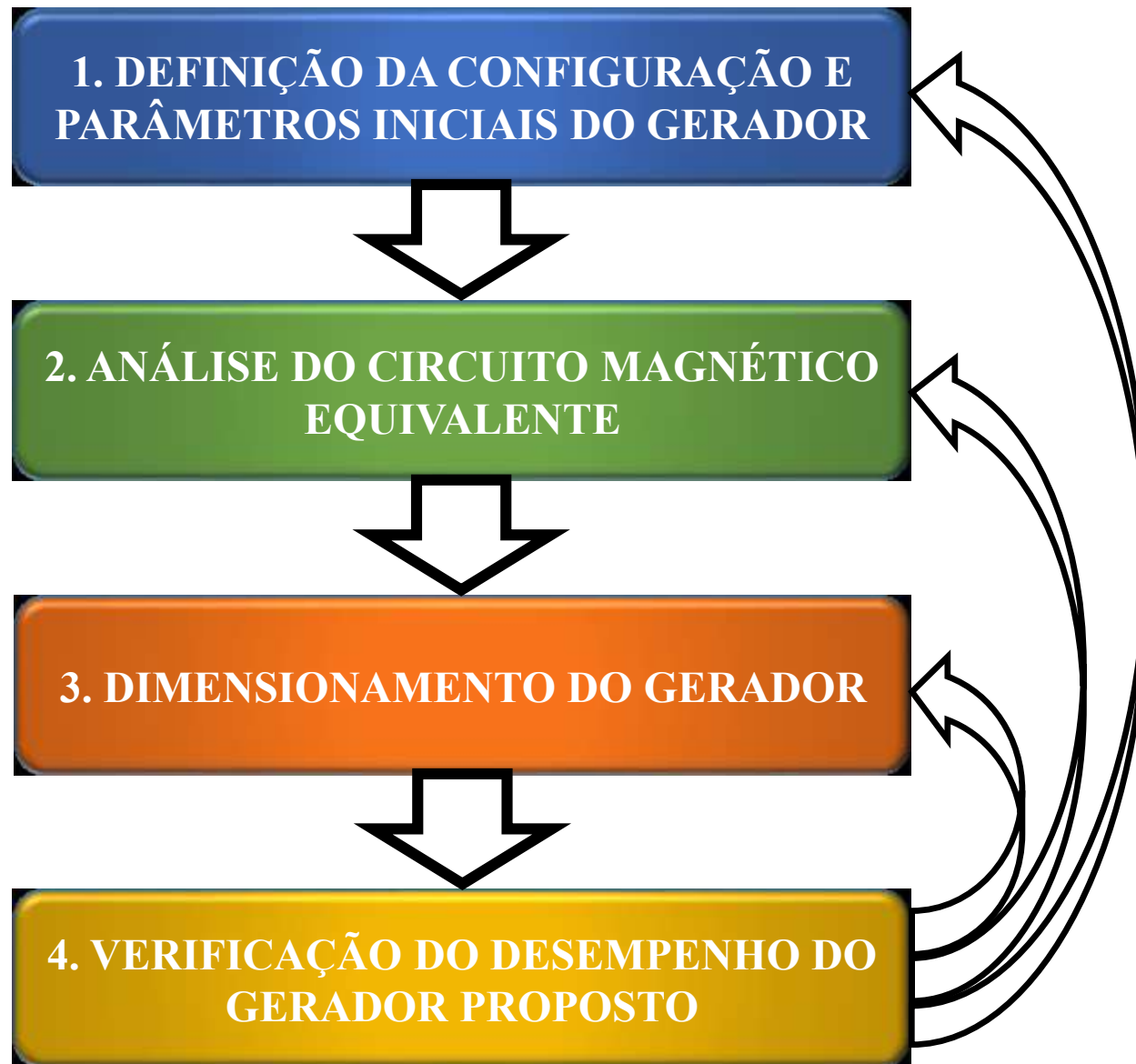


3. DIMENSIONAMENTO DO GERADOR

Resumo do Dimensionamento

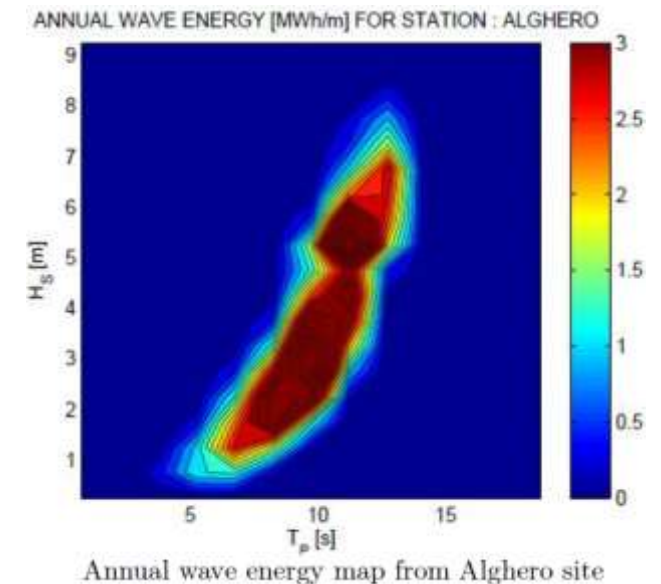
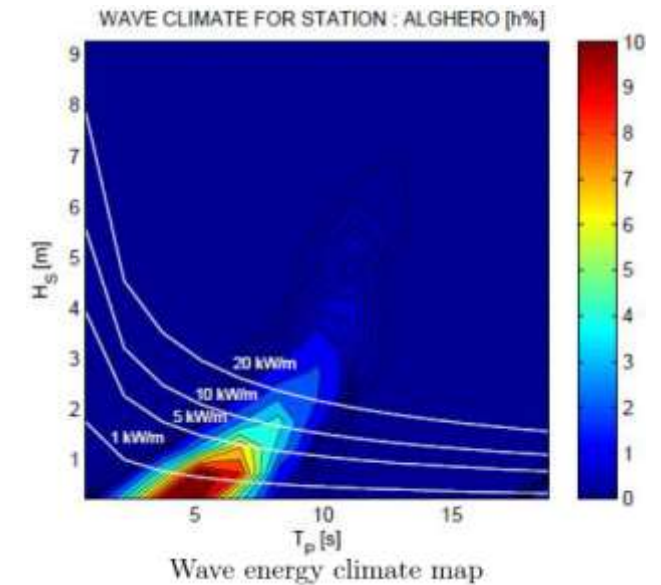


PROJETO DO GERADOR PROPOSTO



4. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

- Ambiente oceânico (Alghero, IT [2]):
 - Período de onda de maior incidência: $T_w = 5$ s;
 - Amplitude de onda de maior incidência: $H_w = 0,5$ m;
 - Pontencial: 9,1 kW/m.
- Objetivos eletromagnéticos do gerador:
 - Potência: 10 kVA;
 - Tensão de fase RMS: 220 V;
 - Densidade de corrente: 3 MA/m².



4. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

- Modelo 2D construído no ANSYS Maxwell (simetria);
 - Simulação transiente;
 - Tempo de simulação: 1,92 s;
 - $v_{\text{avg}} = 0,5 \text{ m/s}$.
- Variáveis avaliadas:
 - Distribuição do fluxo magnético;
 - Densidade de fluxo;
 - Fluxo concatenado pelas fases;
 - Tensão induzida nos enrolamentos;
 - Distorção harmônica;

4. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

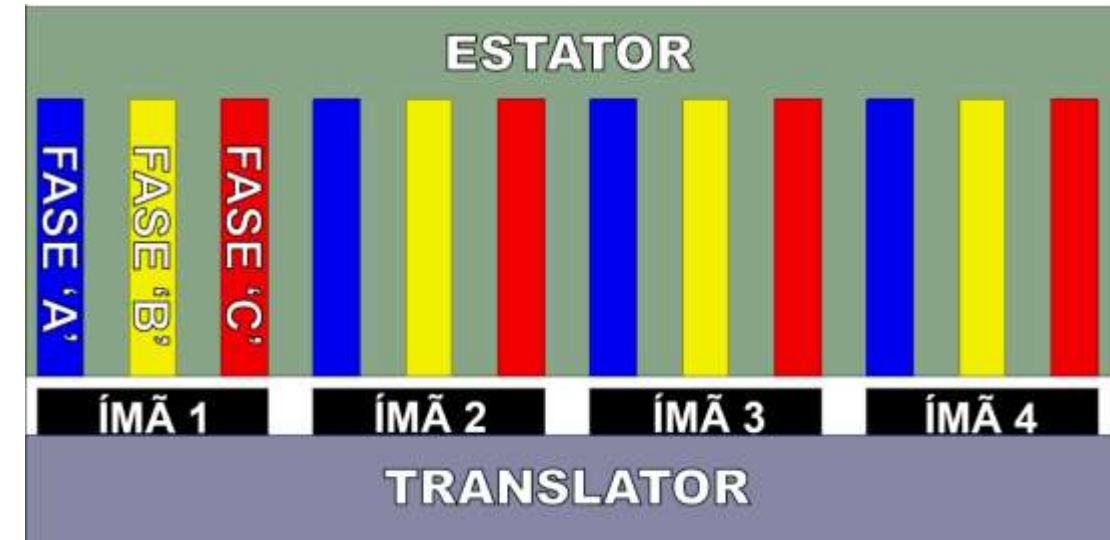
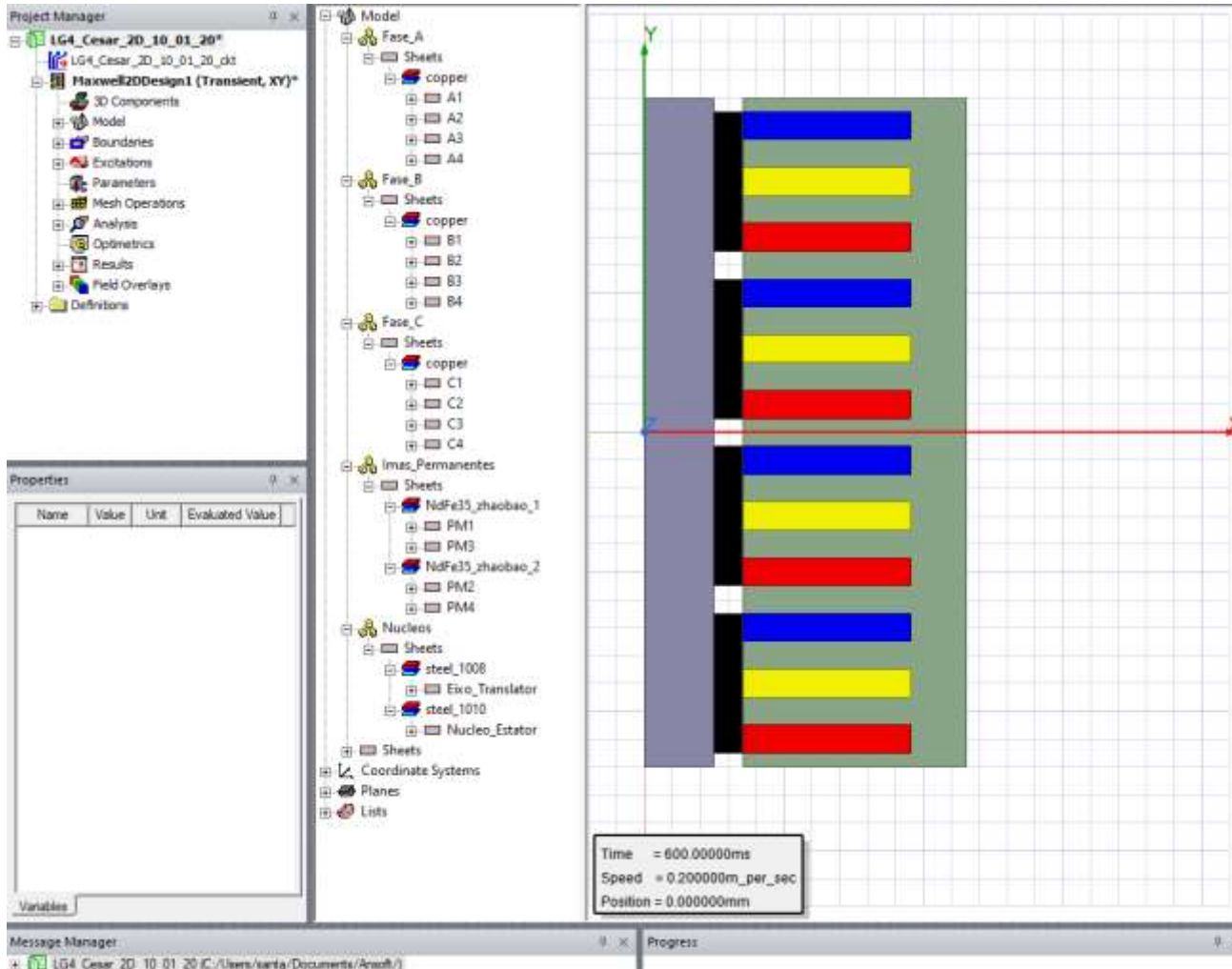
Resumo do Dimensionamento

Raios [cm]:		Entreferro [mm]:		Espessuras/ profundidades [cm]:		Passos/larguras [cm]:	
r_{sh}	5,0	g	1,0	h_m	2,0	τ_p	12,0
r_m	7,0	g_{eq}	2,0	h_{ss}	17,0	τ_m	10,0
r_{ts}	7,1			h_{cs}	4,0	τ_{pp}	2,0
r_{ss}	24,1					τ_{ts}	2,0
r_{cs}	28,1					τ_{ss}	2,0

Nº de espiras por ranhura, N_s :	404
Diâmetro dos condutores, d_w :	2,59 mm
Referência AWG	10

4. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

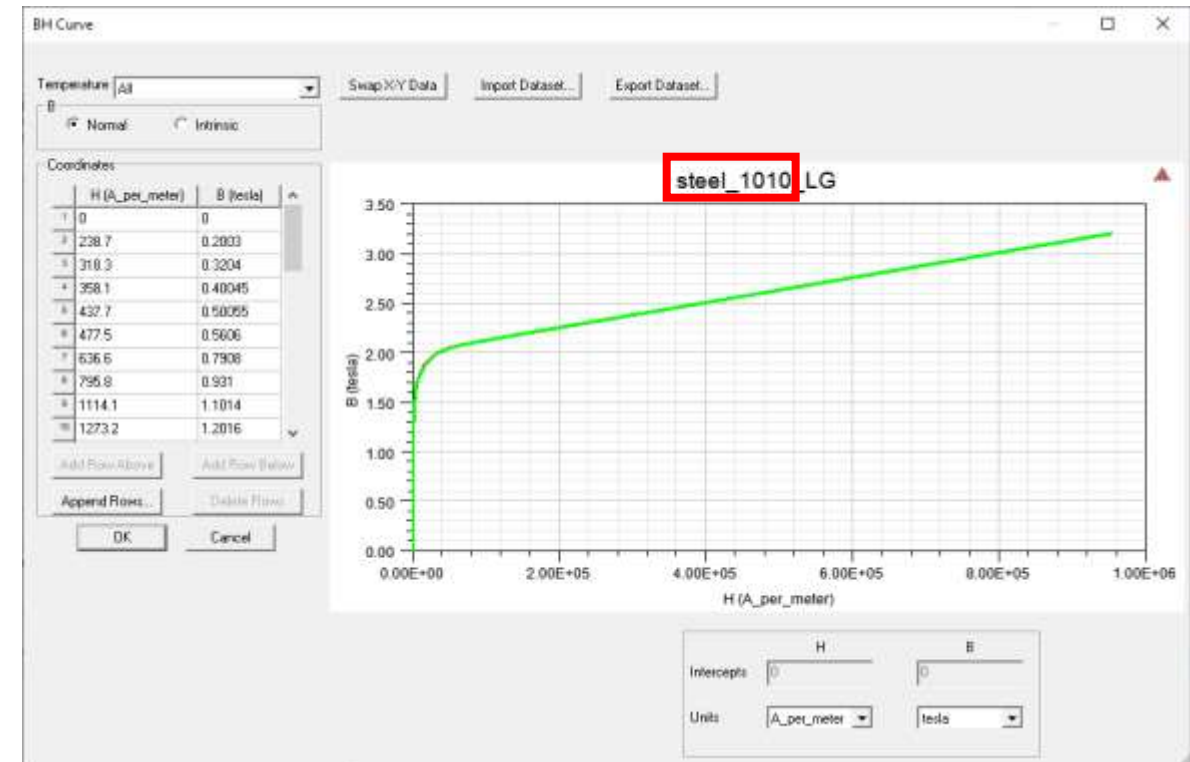
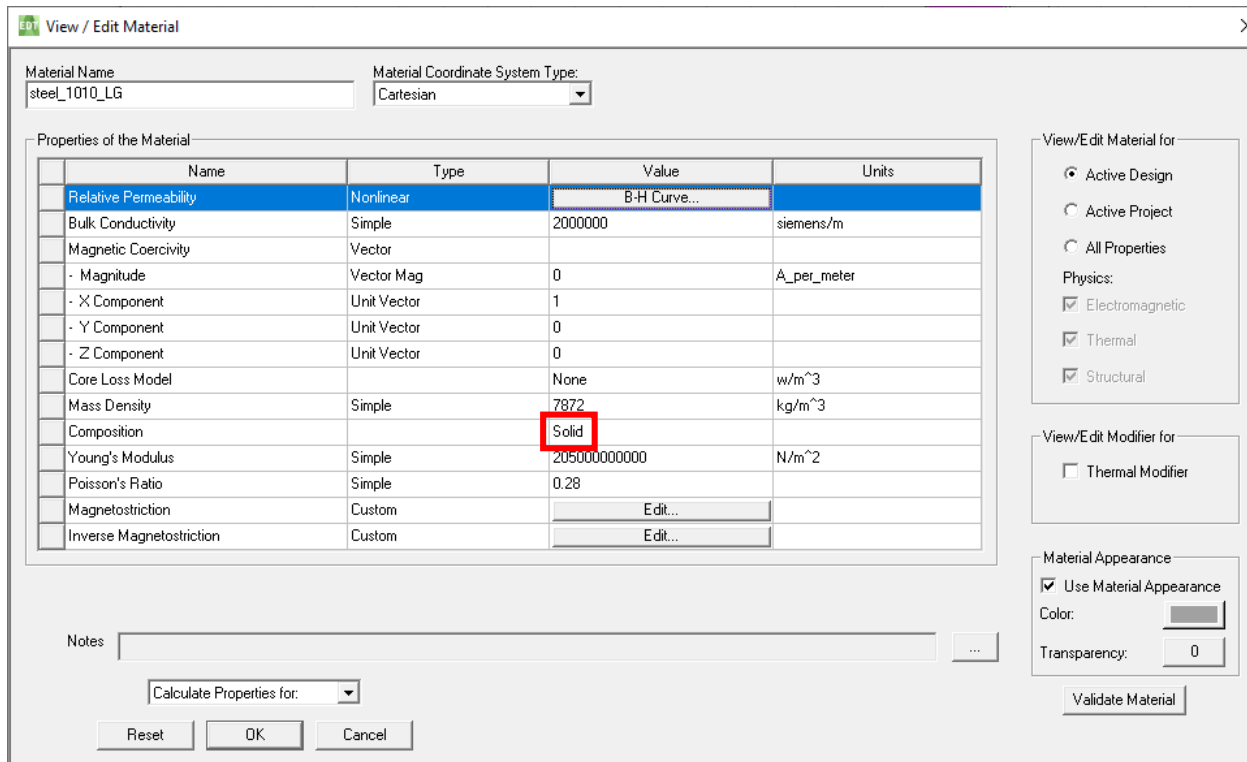
Modelo 2D do Gerador construído no ANSYS Maxwell



4. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

Materials Adotados

- Eixo do translator:



4. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

Materiais Adotados

- Núcleo do estator:

The image displays two windows from a software application. The left window, titled 'View / Edit Material', shows the material properties for 'steel_1008_LG'. The 'Composition' property is highlighted with a red box and set to 'Solid'. The right window, titled 'BH Curve', shows the magnetic hysteresis loop for the same material, with the label 'steel_1008_LG' also highlighted in red. The BH curve plot shows magnetic flux density (B) in tesla on the y-axis (0.00 to 3.75) and magnetic field strength (H) in A_per_meter on the x-axis (0.00E+00 to 1.00E+06). A table of coordinates is provided below the plot.

	H (A_per_meter)	B (tesla)
1	0	0
2	159.2	0.2402
3	318.3	0.8654
4	477.5	1.1106
5	636.6	1.2458
6	795.8	1.331
7	1591.5	1.5
8	3183.1	1.6
9	4774.6	1.683
10	6366.2	1.741

4. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

Materiais Adotados

- Ímãs permanentes (*ZHAOBAO PM Solutions*):

Material Name: NdFeB42

Material Coordinate System Type: Cartesian

Name	Type	Value	Units
Relative Permeability	Simple	0.111018623775497	
Bulk Conductivity	Simple	625000	siemens/m
Magnetic Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector Mag	-9390000	A_per_meter
- X Component	Unit Vector	1	
- Y Component	Unit Vector	0	
- Z Component	Unit Vector	0	
Core Loss Model		None	w/m^3
Mass Density	Simple	7400	kg/m^3
Composition		Solid	
Young's Modulus	Simple	147000000000	N/m^2
Poisson's Ratio	Simple	0	
Magnetostriction	Custom	Edit...	
Inverse Magnetostriction	Custom	Edit...	

Properties for Permanent Magnet

Mu: 0.111018623775497

Hc: -9390000 A_per_meter

Br/Mp

Br: 1.31 tesla

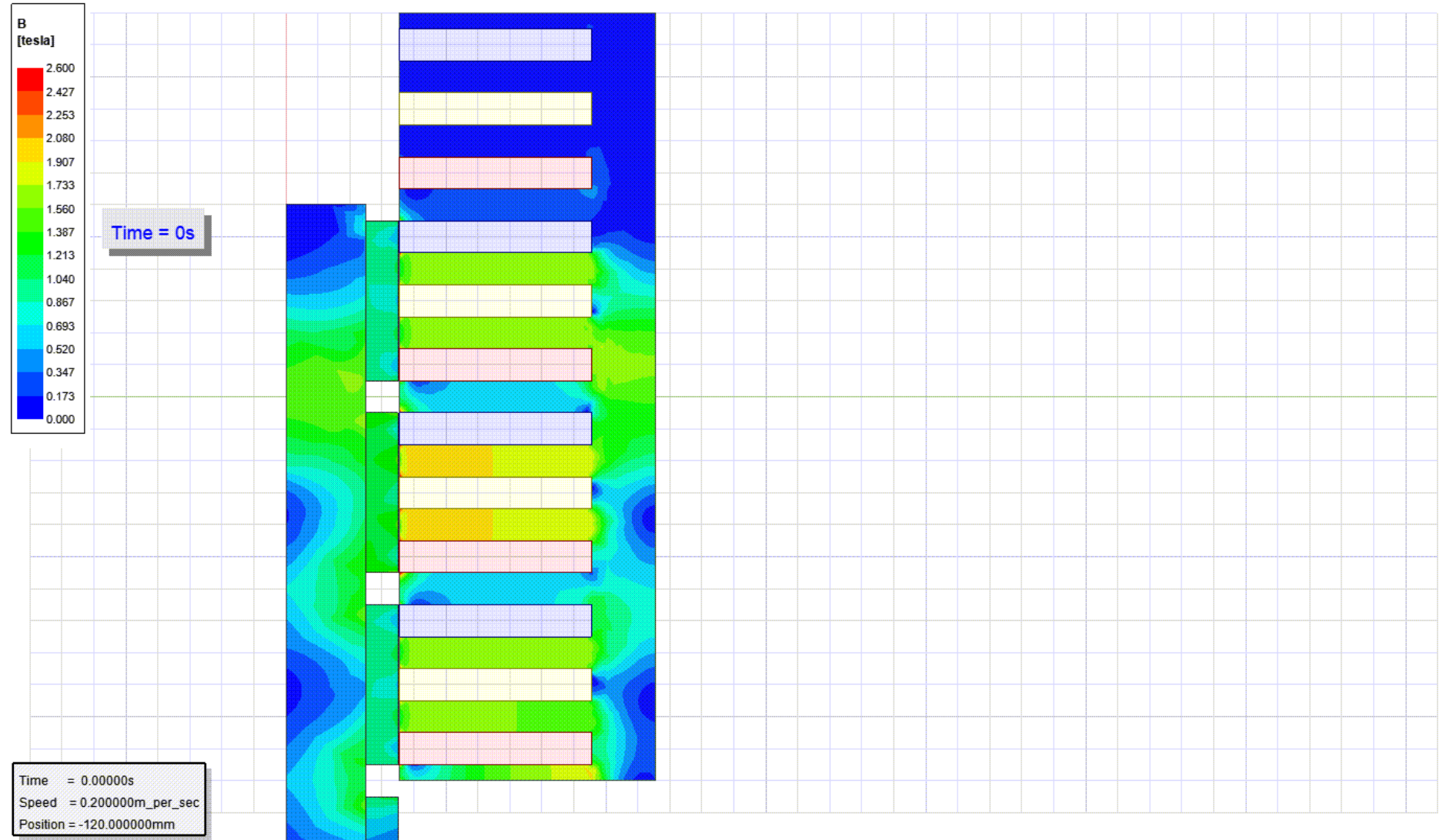
Mp: 1042464.87725191 A_per_meter

OK Cancel

4. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

Resultados

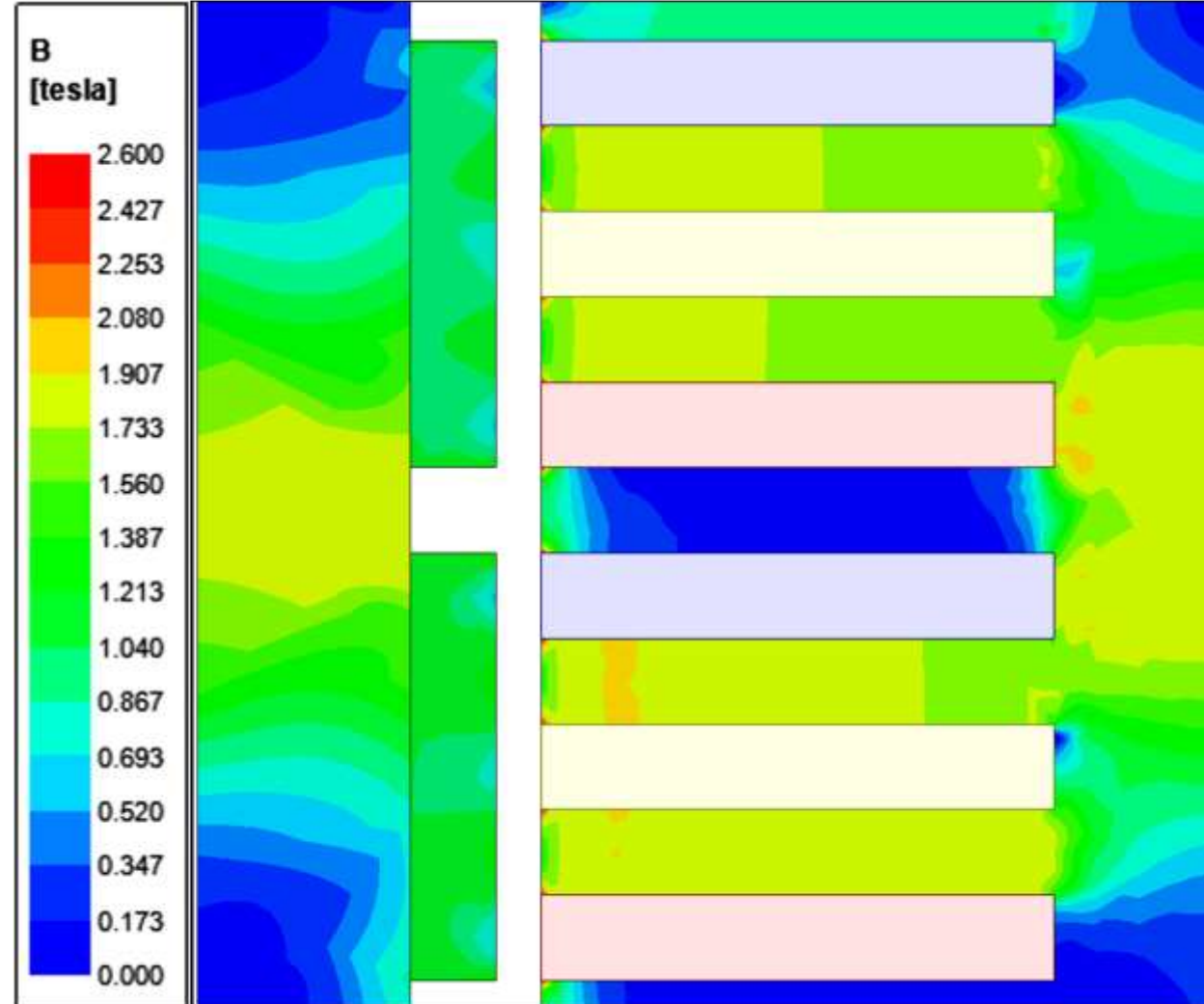
- Densidade de fluxo:



4. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

Resultados

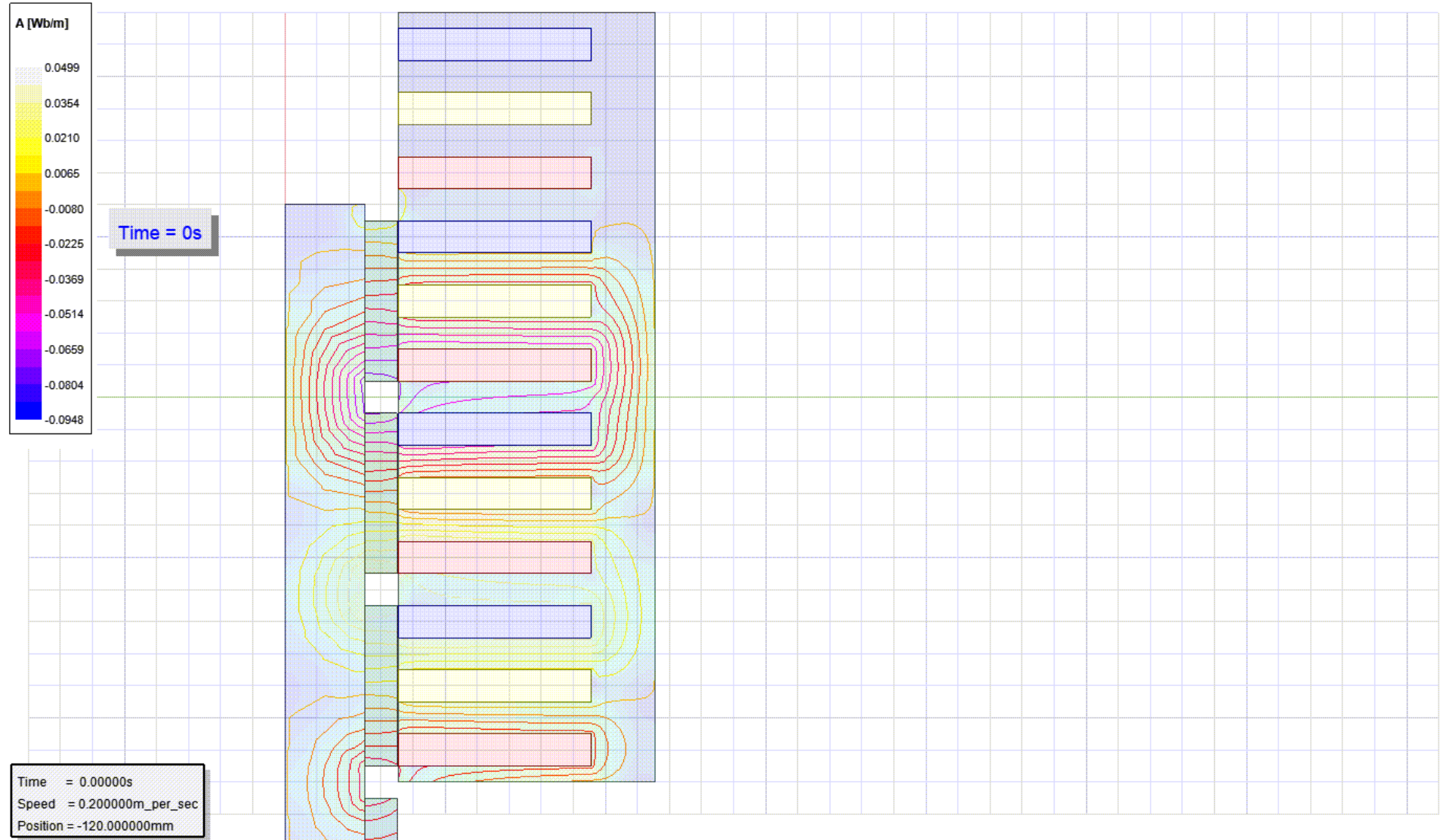
- Densidade de fluxo:



4. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

Resultados

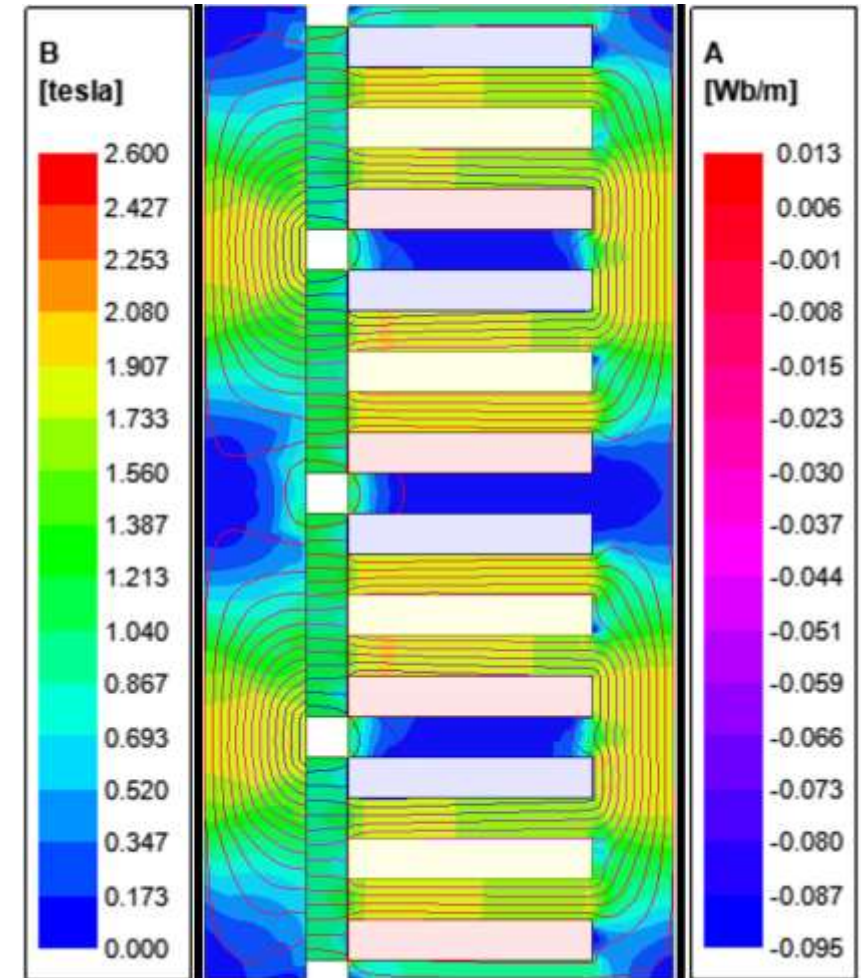
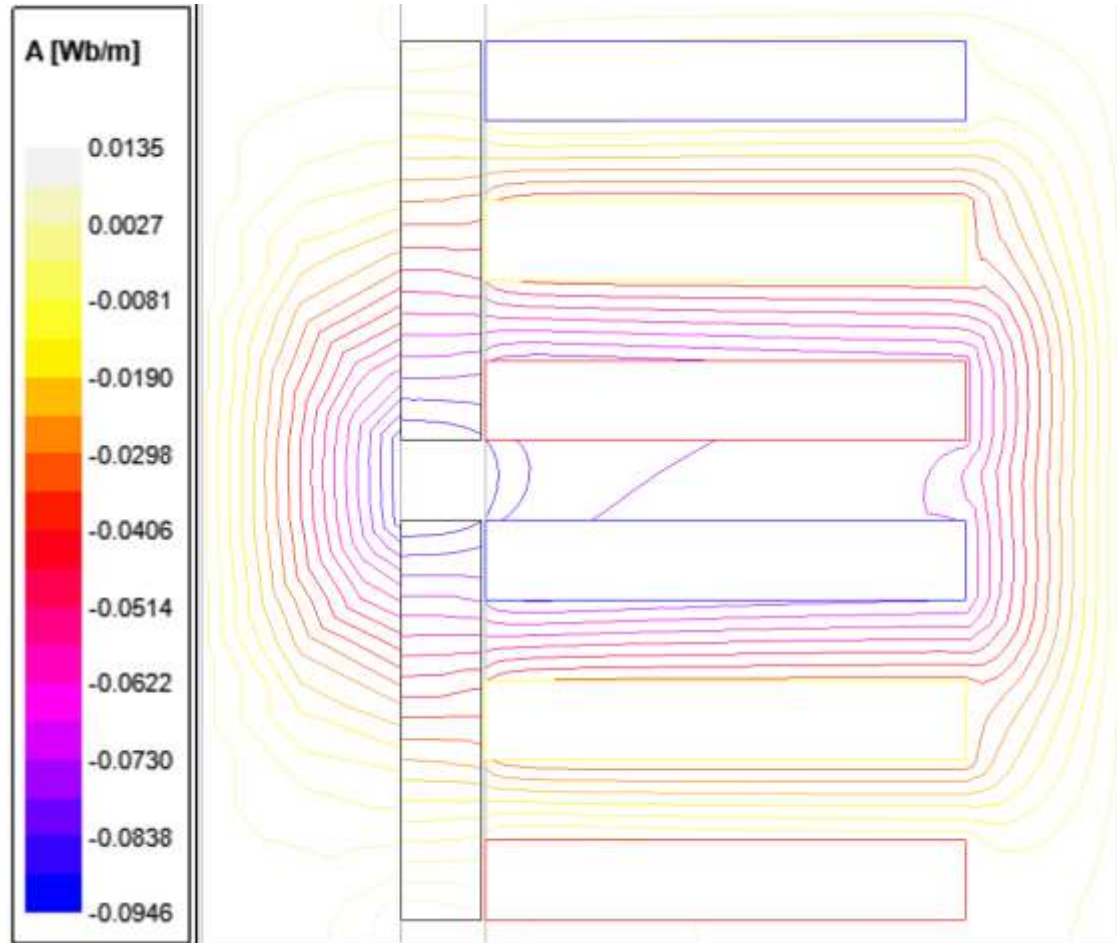
- Linhas de fluxo:



4. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

Resultados

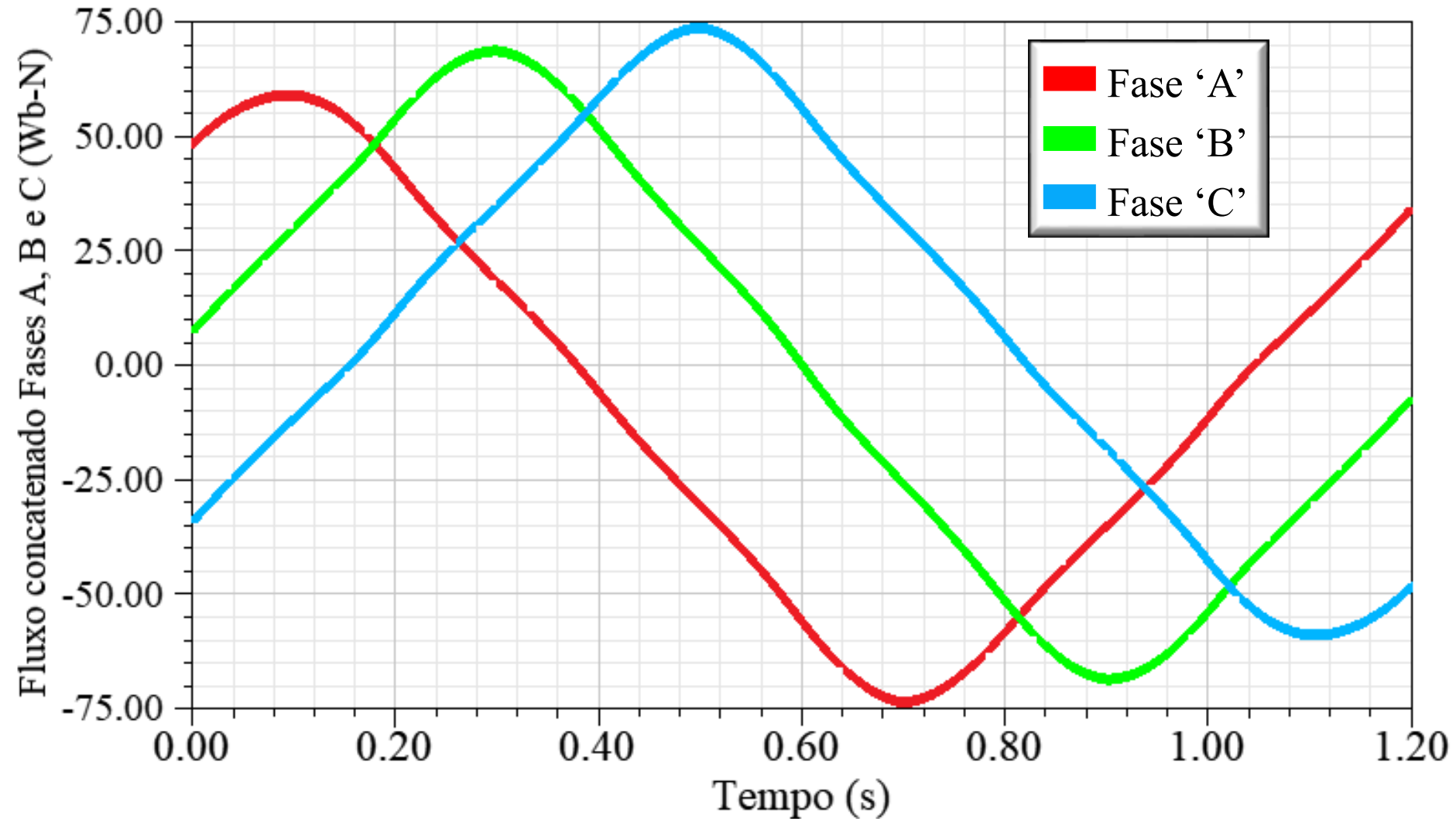
- Linhas de fluxo:



4. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

Resultados

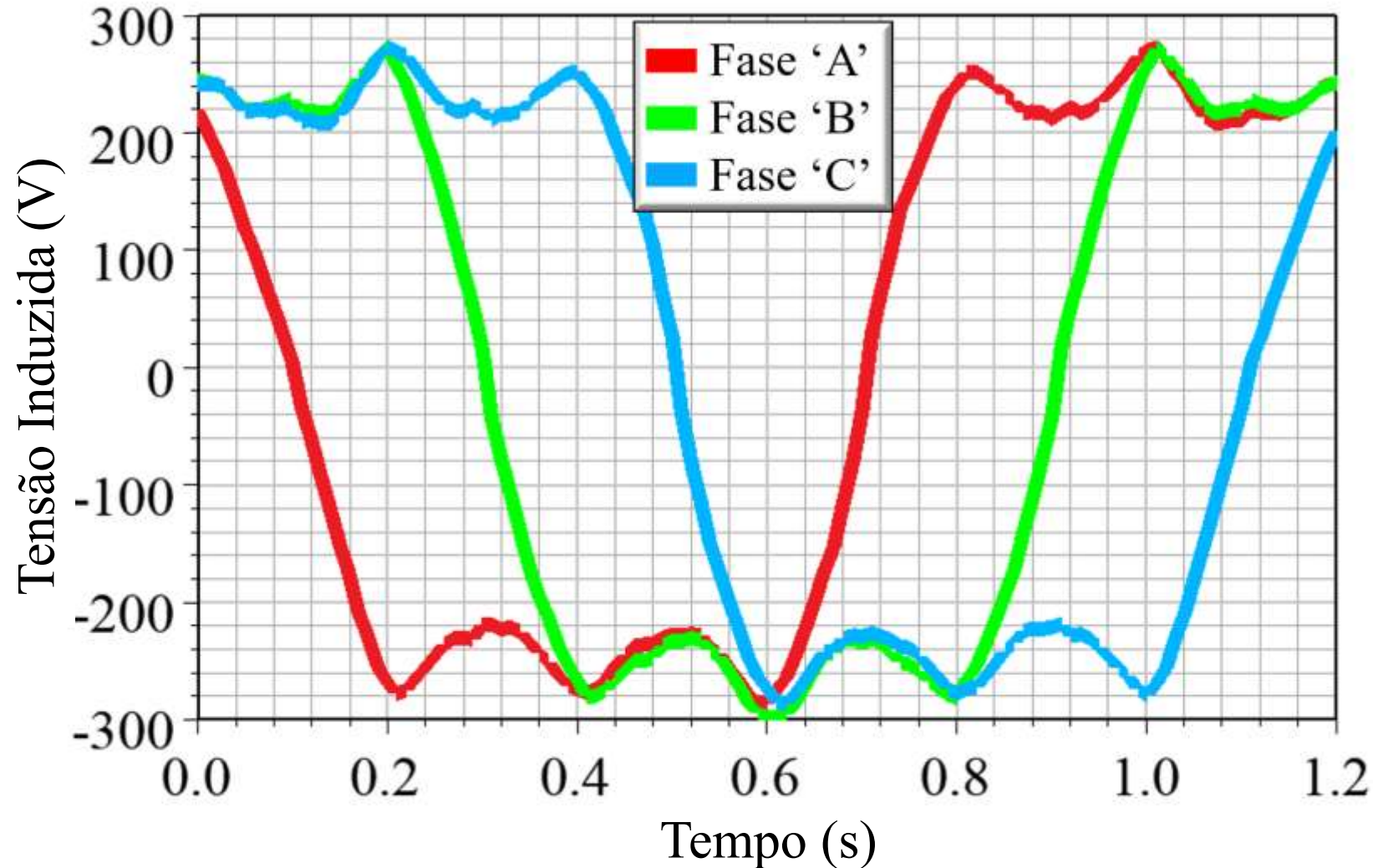
- Fluxo concatenado:



4. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

Resultados

- Tensão induzida:



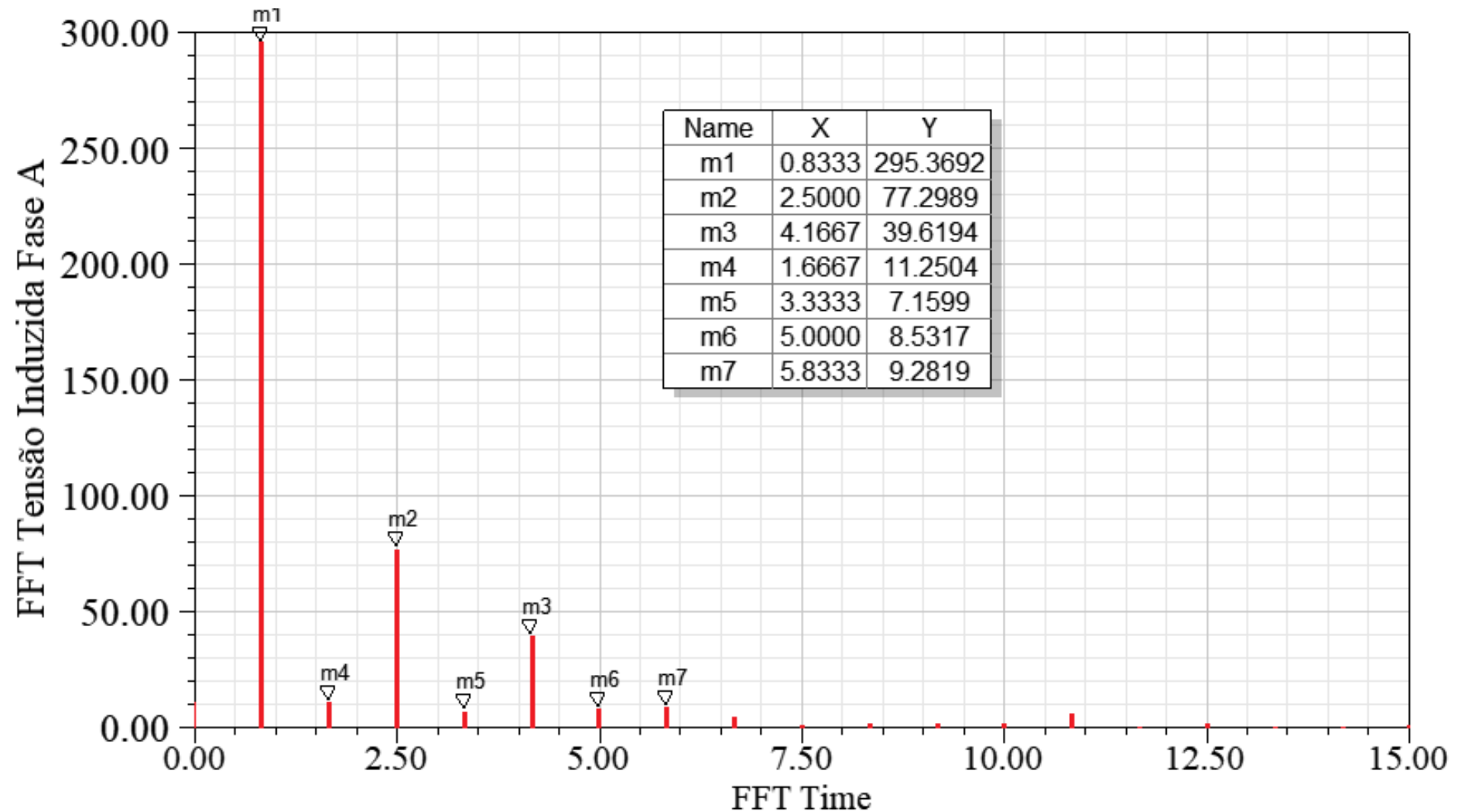
Tensões de fase RMS:

- Fase 'A': 218 V
- Fase 'B': 225 V
- Fase 'C': 219 V

4. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

Resultados

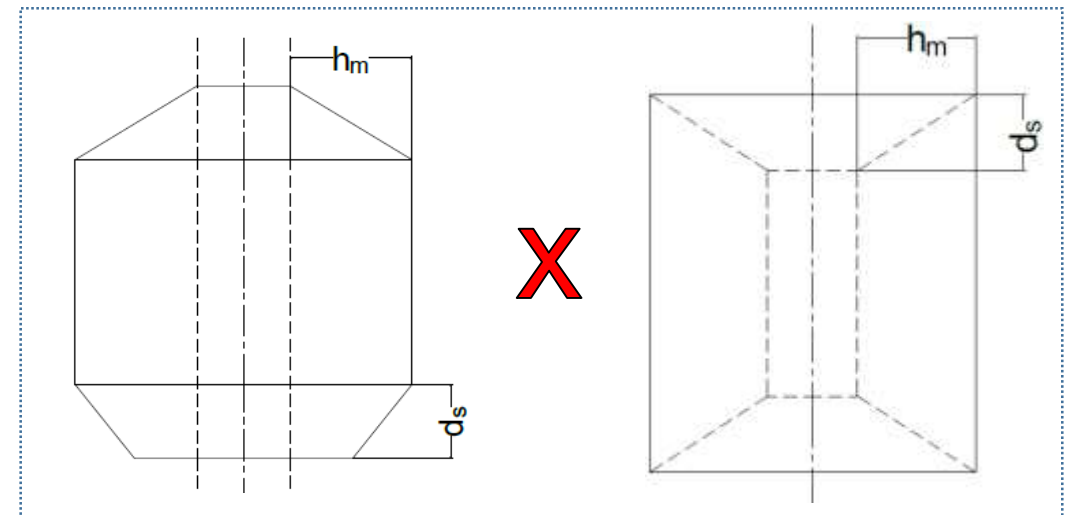
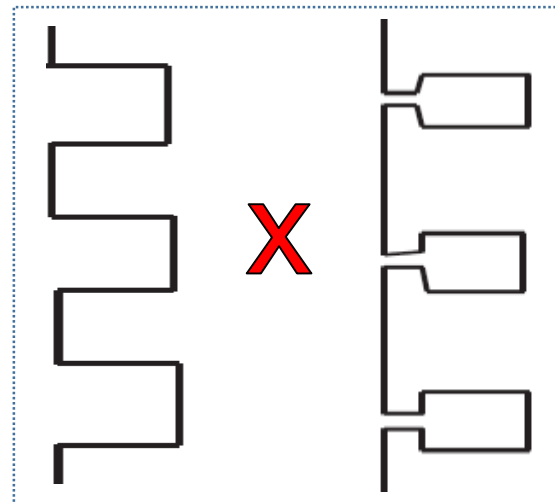
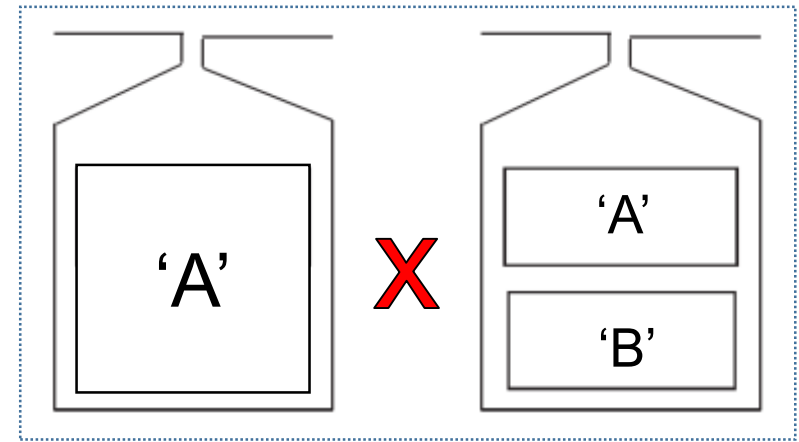
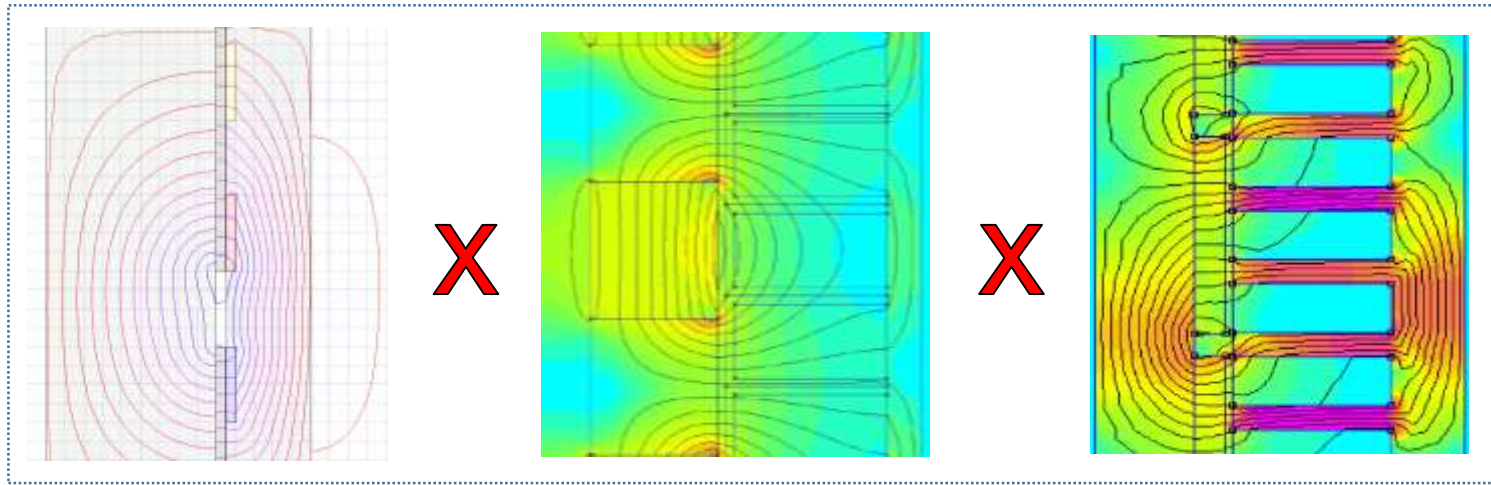
- FFT Tensão Fase 'A' (normalizada):



4. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

Passos em Andamento

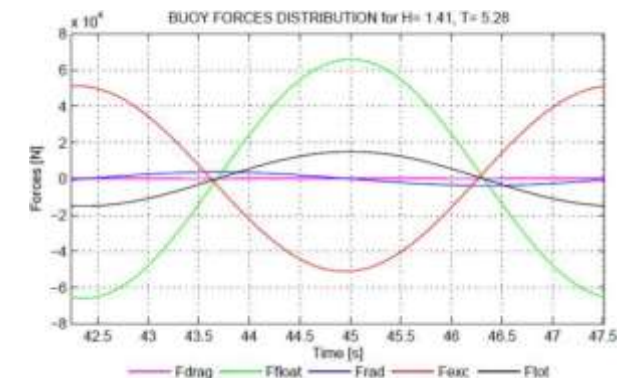
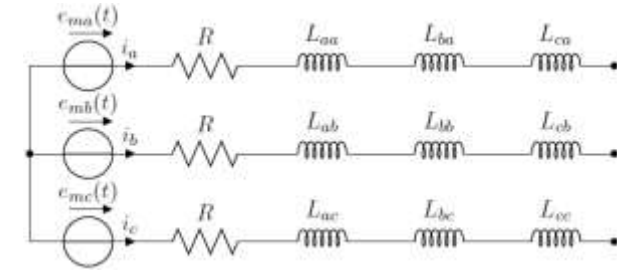
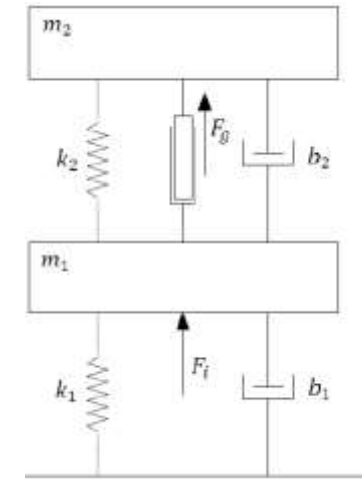
- Melhorias no modelo/método de dimensionamento:



4. VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO

Passos em andamento

- Análise da máquina em regime:
 - Circuito elétrico equivalente;
 - Sistema de extração;
 - Modelo dinâmico.





OBRIGADO!

REFERÊNCIAS

- [1] I. Boldea, “Variable Speed Generators.” CRC Press, FL, USA, 2015.
- [2] G. Chiaramonte, “Design of a tubular permanent magnet linear generator for marine applications.” Master of Science in Electrical Engineering Thesis, Politecnico di Milano, Italy, 2016.
- [3] L. M. E. Coelho, “Conversores de acção directa no aproveitamento de energia das ondas.” Dissertação de Mestrado. 67p. IST, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2007.
- [4] J. M. E. Ribeiro, “Desenvolvimento de Gerador Linear de Baixa Velocidade para aplicação em conversor de energia renovável.” Dissertação de Mestrado. 222p. Universidade do Algarve, Portugal, 2010.
- [5] D. Hanselman, “Brushless Permanent Magnet Motor Design.” The Writer’s Collective, Cranston, Rhode Island, 2006.
- [6] R. Parthasarathy, “Linear PM generator for wave energy conversion.” Master Thesis, Louisiana State University, 2012.
- [7] T. A. Lipo, “Introduction to AC Machine Design.” IEEE Press & Wiley, Hoboken, New Jersey, 2017.
- [8] N. Bianchi, S. Bolognani, and F. Tonel. “Design criteria of a tubular linear IPM motor”. In: IEEE IEMDC 2001, pp. 1–7.
- [9] J. Faiz, A. Nematsaberi, “Linear electrical generator topologies for direct-drive marine wave energy conversion – an overview,” in IET Renewable Power Generation, vol. 11, no. 9, pp.1163-1176, Jun. 2017.
- [10] H Arof, Ahmad M Eid, and KM Nor. “Cogging force reduction using special magnet design for tubular permanent magnet linear generators”. In: Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. 39th International. Vol. 2. IEEE. 2004, pp. 523–527.