



**Carlota Minderico Maçaneiro**

Licenciada em Ciências de Engenharia Eletrotécnica e de  
Computadores

**Projeto de um alternador síncrono em  
disco para um gerador com energia das  
ondas**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Eletrotécnica e Computadores

Orientador: Professor Doutor Mário Fernando Ventim Neves  
FCT-UNL

Coorientador: Professor Doutor João Miguel Murta Pina  
FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Anabela Gonçalves Pronto  
Arguente: Prof. Doutor Manuel Guerreiro das Neves  
Vogal: Prof. Doutor Mário Ventim Neves



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Maio 2014



## **Projeto de um alternador síncrono em disco para um gerador com energia das ondas**

Copyright @ Carlota Minderico Maçaneiro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

O apoio oferecido ao longo de todo este trabalho foi fundamental para a realização do mesmo. São expressos aqui os meus sinceros agradecimentos, tentando não esquecer ninguém.

Ao Professor Doutor Mário Ventim Neves, meu orientador, que se mostrou sempre disponível para transmitir a sua sabedoria e conselhos, acompanhando de perto todo o projeto.

Ao Professor Doutor João Murta Pina, meu co-orientador, que se disponibilizou para ajudar no que fosse preciso.

Ao Engenheiro José Lima, pela sua maravilhosa ajuda com o *software* utilizado.

A todos os meus colegas e amigos que estiveram do meu lado e acompanharam todo o trabalho, nomeadamente, Filipa Matias, Rafaela Nunes, Flávio Páscoa, Gonçalo Amaro, Bruno Rodrigues, Júlio Oliveira, João Santos, Hugo Viana e Joana Martelo.

Às minhas amigas, Rita Lains, Neuza Peso, Carla Costa, Raquel Lopes e Rafaela Canto, que muitas das vezes sentiram a minha ausência e estiveram sempre presentes para uma palavra amiga.

À Margarida Pires e ao Sérgio Sarabando, pela sua amizade e disponibilidade para ajudar sempre que possível.

Agradeço especialmente a toda a minha família, em particular às minhas avós, que durante todo o percurso académico estiveram do meu lado, tornando possível o sucesso do mesmo.

Por último, um agradecimento da maior importância ao meu namorado, Ricardo Pires, por toda a compreensão, paciência, amizade e amor oferecidos ao longo deste período.

A todos, um muito obrigado.



# Resumo

A energia natural é cada vez mais relevante no contexto da produção de energia elétrica, verificando-se uma grande necessidade de procurar respostas para a substituição de combustíveis fósseis por recursos renováveis e mais económicos.

No contexto atual, é incontornável o recurso às potencialidades da tecnologia para facilitar e promover o processo de conversão de energia. Assim, a presente dissertação procura ser um contributo para o desenvolvimento de alternadores que executam essa conversão, através do projeto de construção de uma máquina elétrica, que pode ser integrada num sistema de geração de energia elétrica a partir da energia das ondas.

A geometria utilizada é o ponto fulcral para a eficiência do alternador, sendo o rotor deste um disco giratório onde se podem encontrar magnetos permanentes que serão responsáveis pela magnetização. É importante salientar que, dada a utilização de ímanes, não existe a necessidade de alimentar o alternador, tendo este maior estabilidade e menor custo.

Após a realização de diversas simulações, encontra-se o alternador que, de entre os dimensionados, poderá ser a solução ótima, de acordo com a potência que o mesmo irá fornecer. Em última análise, apresenta-se um orçamento para o referido alternador e a sua viabilidade de construção.

**Palavras-chave:** Energias Alternativas, Conversão de Energia, Alternador Síncrono, Magnetos Permanentes.



# Abstract

Natural resources are increasingly becoming more important in the field of electric energy production. Solutions to allow the change from fossil fuels to a more reusable and economic type in the energy production are required.

Technology can be used to facilitate and promote the energy conversion process. The work presented in this thesis will then contribute to the research being made in the development of alternators to obtain this energy conversion. This is achieved through a project that aims to build an electrical machine to be used in an electric energy production system using the sea waves.

The used geometry is the key point for the alternator efficiency, having a rotor formed by a disc with magnets responsible for the magnetization. Due to the usage of magnets there is no need to feed the alternator having bigger reliability and lower cost.

After several configurations simulations, a viable alternator that complies with the needed requirements is found. Finally, a budget for the alternator is presented and its manufacturing viability assessed.

**Keywords:** Alternative Energies, Energy Conversion, Synchronous Alternator, Permanent Magnets.



# Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação e objetivo .....	1
1.2	Estrutura do documento .....	2
2	Estado de arte.....	5
3	Enquadramento teórico.....	13
3.1	Energia das ondas .....	13
3.2	Tipos de geradores .....	13
3.2.1	Máquina assíncrona.....	13
3.2.2	Máquina síncrona .....	14
3.2.3	Máquina síncrona de fluxo radial com magnetos permanentes.....	14
3.2.4	Máquina síncrona de fluxo axial com magnetos permanentes.....	14
3.3	Magnetos permanentes.....	15
4	Solução Proposta.....	17
4.1	Descrição do problema .....	17
4.2	Sistema elétrico.....	17
4.2.1	Circuito Elétrico.....	20
5	Dimensionamento.....	23
5.1	Alternador síncrono em disco com 12 polos com base retangular .....	23
5.2	Alternador síncrono em disco com 12 polos com base trapezoidal.....	25
5.3	Alternador síncrono em disco com 14 polos com base retangular .....	27
5.4	Alternador síncrono em disco com 14 polos com base trapezoidal.....	29
5.5	Alternador síncrono em disco com 16 polos com base retangular .....	32
5.6	Alternador síncrono em disco com 16 polos com base trapezoidal.....	34
6	Simulação e análise de resultados.....	37
6.1	Regime monofásico.....	37
6.1.1	Alternador síncrono em disco com 12 polos com base retangular.....	37
6.1.2	Alternador síncrono em disco com 12 polos com base trapezoidal.....	44

6.1.3	Alternador síncrono em disco com 14 polos com base trapezoidal .....	50
6.1.4	Alternador síncrono em disco com 16 polos com base trapezoidal .....	56
6.2	Análise espectral.....	62
6.3	Alteração do alternador de 12 polos com base trapezoidal .....	64
6.3.1	Funcionamento em vazio.....	64
6.3.2	Funcionamento em carga resistiva pura.....	66
6.3.3	Funcionamento em carga indutiva .....	67
6.4	Regime trifásico.....	69
7	Orçamento e Conclusões .....	71
7.1	Estimativa orçamental .....	71
7.2	Conclusões.....	72
	Referências .....	75

# Índice de Figuras

Figura 2. 1. (a) Disposição dos magnetos permanentes no rotor. (b) Disposição das bobinas no estator. ....	6
Figura 2. 2. (a) Disposição dos enrolamentos do alternador. (b) Disposição dos magnetos permanentes nos rotores. ....	7
Figura 2. 3. (a) Disposição dos magnetos no rotor. (b) Disposição das bobinas. ....	8
Figura 2. 4. Configuração do alternador descrito. ....	9
Figura 2. 5. Configuração do gerador constituído por vários estatores e rotores. ....	9
Figura 2. 6. Configuração do gerador constituído por um estator de dupla face e um rotor duplo. ....	10
Figura 2. 7. Configurações do rotor e do estator. ....	10
Figura 2. 8. (a) Non-Slotted-AFPMG. (b) Slotted-AFPMG. ....	11
Figura 4. 1. Estrutura do alternador em disco, com dois induzidos e um indutor com magnetos permanentes (Desenho obtido através de um software de elementos finitos)...18	
Figura 4. 2. Rolo de chapa de chapa de ferro, do qual são constituídos os semi-induzidos. [26] .....	19
Figura 4. 3. Disposição dos magnetos permanentes no disco. ....	19
Figura 6. 1. Ilustração do alternador de 12 polos com formato retangular. ....	38
Figura 6. 2. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em vazio. ....	39
Figura 6. 3. Figura ilustrativa da densidade de fluxo magnético B. ....	40
Figura 6. 4. Circuito elétrico do enrolamento, com uma carga puramente resistiva de 14 $\Omega$ . ....	41
Figura 6. 5. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga puramente resistiva de 14 $\Omega$ . ....	41
Figura 6. 6. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga puramente resistiva de 14 $\Omega$ . ....	42
Figura 6. 7. Circuito elétrico do enrolamento, com uma carga indutiva de 14 $\Omega$ $\sphericalangle$ 41°. ....	42
Figura 6. 8. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga indutiva de 14 $\Omega$ $\sphericalangle$ 41°. ....	43
Figura 6. 9. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga indutiva de 14 $\Omega$ $\sphericalangle$ 41°. ....	44
Figura 6. 10. Ilustração do alternador de 12 polos com formato trapezoidal. ....	45

Figura 6. 11. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em vazio. ....	45
Figura 6. 12. Figura ilustrativa da densidade de fluxo magnético B.....	46
Figura 6. 13. Circuito elétrico do enrolamento, com uma carga puramente resistiva de 22 $\Omega$ .....	47
Figura 6. 14. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga puramente resistiva de 22 $\Omega$ . ....	47
Figura 6. 15. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga puramente resistiva de 22 $\Omega$ . ....	48
Figura 6. 16. Circuito elétrico do enrolamento, com uma carga indutiva de 22 $\Omega$ $\sphericalangle$ 41°.....	48
Figura 6. 17. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga indutiva de 22 $\Omega$ $\sphericalangle$ 41°.....	49
Figura 6. 18. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga indutiva de 22 $\Omega$ $\sphericalangle$ 41°. ....	49
Figura 6. 19. Ilustração do alternador de 14 polos com formato trapezoidal. ....	51
Figura 6. 20. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em vazio.....	51
Figura 6. 21. Figura ilustrativa da densidade de fluxo magnético B.....	52
Figura 6. 22. Circuito elétrico do enrolamento, com uma carga puramente resistiva de 15 $\Omega$ .....	53
Figura 6. 23. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga puramente resistiva de 15 $\Omega$ . ....	53
Figura 6. 24. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga puramente resistiva de 15 $\Omega$ . ....	54
Figura 6. 25. Circuito elétrico do enrolamento, com uma carga indutiva de 15 $\Omega$ $\sphericalangle$ 41°.....	54
Figura 6. 26. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga indutiva de 15 $\Omega$ $\sphericalangle$ 41°.....	55
Figura 6. 27. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga indutiva de 15 $\Omega$ $\sphericalangle$ 41°. ....	55
Figura 6. 28. Ilustração do alternador de 16 polos com formato trapezoidal. ....	56
Figura 6. 29. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em vazio. ....	57
Figura 6. 30. Figura ilustrativa da densidade de fluxo magnético B.....	58
Figura 6. 31. Circuito elétrico do enrolamento, com uma carga puramente resistiva de 10 $\Omega$ .....	58

Figura 6. 32. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga puramente resistiva de $10 \Omega$ .....	59
Figura 6. 33. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga puramente resistiva de $10 \Omega$ .....	59
Figura 6. 34. Circuito elétrico do enrolamento, com uma carga indutiva de $10 \Omega \angle 41^\circ$ .....	60
Figura 6. 35. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga indutiva de $10 \Omega \angle 41^\circ$ .....	60
Figura 6. 36. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga indutiva de $10 \Omega \angle 41^\circ$ .....	61
Figura 6. 37. Espectro de amplitude do fluxo ligado.....	62
Figura 6. 38. Espectro de amplitude da força eletromotriz induzida.....	63
Figura 6. 39. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em vazio, sendo alterado o entreferro. ....	65
Figura 6. 40. Densidade de fluxo obtida após a redução do entreferro.....	65
Figura 6. 41. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga puramente resistiva de $22 \Omega$ , sendo alterada a dimensão do entreferro. ....	66
Figura 6. 42. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga puramente resistiva de $22 \Omega$ , sendo alterada a dimensão do entreferro.....	67
Figura 6. 43. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga indutiva de $22 \Omega \angle 41^\circ$ , sendo alterada a dimensão do entreferro. ....	68
Figura 6. 44. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga indutiva de $22 \Omega \angle 41^\circ$ , sendo alterada a dimensão do entreferro. ....	68
Figura 6. 45. Alternador de 12 polos com formato trapezoidal, com enrolamento trifásico. ....	69
Figura 6. 46. Esquema da disposição dos enrolamentos em 2D. [25].....	70



# Índice de tabelas

Tabela 5. 1. Características dos 12 polos com formato retangular a utilizar .....	23
Tabela 5. 2. Dimensões do semi-estator para um enrolamento de 12 bobinas .....	24
Tabela 5. 3. Valores de fluxo, força eletromotriz e velocidades obtidos para o alternador a dimensionar .....	24
Tabela 5. 4. Cálculo dos valores teóricos esperados para o referido alternador, quando efetuados os ensaios em carga .....	24
Tabela 5. 5. Dimensionamento dos parâmetros das respectivas cargas a utilizar nos ensaios .....	25
Tabela 5. 6. Cálculo das potências geradas pelo alternador de 12 polos com formato retangular .....	25
Tabela 5. 7. Características dos 12 polos com formato trapezoidal a utilizar .....	25
Tabela 5. 8. Valores de fluxo, força eletromotriz e velocidades obtidos para o alternador a dimensionar .....	26
Tabela 5. 9. Cálculo dos valores teóricos esperados para o referido alternador, quando efetuados os ensaios em carga .....	26
Tabela 5. 10. Dimensionamento dos parâmetros das respectivas cargas a utilizar nos ensaios.....	27
Tabela 5. 11. Cálculo das potências geradas pelo alternador de 12 polos com formato trapezoidal.....	27
Tabela 5. 12. Características dos 14 polos com formato retangular a utilizar .....	27
Tabela 5. 13. Dimensões do semi-estator para um enrolamento de 14 bobinas.....	28
Tabela 5. 14. Valores de fluxo, força eletromotriz e velocidades obtidos para o alternador a dimensionar .....	28
Tabela 5. 15. Cálculo dos valores teóricos esperados para o referido alternador, quando efetuados os ensaios em carga .....	29
Tabela 5. 16. Dimensionamento dos parâmetros das respectivas cargas a utilizar nos ensaios.....	29
Tabela 5. 17. Cálculo das potências geradas pelo alternador de 14 polos com formato retangular .....	29
Tabela 5. 18. Características dos 14 polos com formato trapezoidal a utilizar .....	30
Tabela 5. 19. Valores de fluxo, força eletromotriz e velocidades obtidos para o alternador a dimensionar .....	30

Tabela 5. 20. Cálculo dos valores teóricos esperados para o referido alternador, quando efetuados os ensaios em carga .....	31
Tabela 5. 21. Dimensionamento dos parâmetros das respectivas cargas a utilizar nos ensaios.....	31
Tabela 5. 22. Cálculo das potências geradas pelo alternador de 14 polos com formato trapezoidal.....	31
Tabela 5. 23. Características dos 16 polos com formato retangular a utilizar .....	32
Tabela 5. 24. Dimensões do semi-estator para um enrolamento de 16 bobinas.....	32
Tabela 5. 25. Valores de fluxo, força eletromotriz e velocidades obtidos para o alternador a dimensionar .....	33
Tabela 5. 26. Cálculo dos valores teóricos esperados para o referido alternador, quando efetuados os ensaios em carga .....	33
Tabela 5. 27. Dimensionamento dos parâmetros das respectivas cargas a utilizar nos ensaios.....	33
Tabela 5. 28. Cálculo das potências geradas pelo alternador de 16 polos com formato retangular .....	34
Tabela 5. 29. Características dos 16 polos com formato trapezoidal a utilizar .....	34
Tabela 5. 30. Valores de fluxo, força eletromotriz e velocidades obtidos para o alternador a dimensionar .....	35
Tabela 5. 31. Cálculo dos valores teóricos esperados para o referido alternador, quando efetuados os ensaios em carga .....	35
Tabela 5. 32. Dimensionamento dos parâmetros das respectivas cargas a utilizar nos ensaios.....	35
Tabela 5. 33. Cálculo das potências geradas pelo alternador de 16 polos com formato trapezoidal.....	36
Tabela 5. 34. Quadro síntese dos valores obtidos nos dimensionamentos .....	36

# Simbologia

$\mu_r$	Permeabilidade magnética relativa	<i>Adimensional</i>
$H$	Intensidade de campo magnético	$A \cdot m^{-1}$
$H_c$	Campo magnético coercivo	$A \cdot m^{-1}$
$B_r$	Indução magnética remanescente	$T$
$B$	Densidade de fluxo magnético	$T$
$BH_{max}$	Produto energético máximo	$kJ \cdot m^{-3}$
$T_c$	Temperatura de Curie	$K$
$S_{magneto}$	Secção do magneto	$m^2$
$\phi_{polo}$	Fluxo por polo	$Wb$
$\phi_{bobina}$	Fluxo por bobina	$Wb$
$f$	Frequência de alternância magnética	$Hz$
$\omega$	Frequência angular	$rad \cdot s^{-1}$
$p$	Número de pares de polos	<i>Adimensional</i>
$E_{MAX_{espira}}$	Força eletromotriz máxima induzida por espira	$V$
$n_e$	Número de espiras	<i>Adimensional</i>
$U_{ef}$	Tensão eficaz	$V$
$I_{ef}$	Corrente eficaz	$A$
$I_{ef_{espira}}$	Corrente eficaz por espira	$A$
$S_{util_{cava}}$	Secção útil da cava	$m^2$
$S_{util_{1camada}}$	Secção útil para uma camada de condutores	$m^2$
$S_{fio}$	Secção do fio condutor	$m^2$
$U_{MAX}$	Tensão máxima	$V$

$I_{MAX}$	Corrente máxima	$A$
$P$	Potência ativa	$W$
$S$	Potência aparente	$VA$
$\cos \varphi$	Fator de potência	<i>Adimensional</i>
$\varphi_{carga}$	Ângulo de carga	$^{\circ}$
$Z_{carga}$	Impedância de carga	$\Omega$
$R$	Resistência elétrica de carga	$\Omega$
$L$	Coefficiente de autoindução de carga	$H$

# 1 Introdução

No primeiro capítulo encontra-se descrito o enquadramento do projeto, como a motivação para o desenvolver. De seguida são expostos os objetivos, que são tomados como ponto central do desenvolvimento do alternador, por último a estrutura adotada ao longo do documento.

## 1.1 Motivação e objetivo

*“Todos os corpos e magnitudes naturais são capazes de locomoção, pois a natureza é o seu princípio de movimento. Mas todo o movimento que acontece em um lugar, toda locomoção, é ou reto ou circular ou uma combinação desses dois.”* Caelo I [1]

Os meios naturais são cada vez mais procurados como base dos recursos energéticos, uma vez que se tornam menos poluentes e mais económicos, comparados com os combustíveis fósseis.

A energia é um recurso captado da natureza e pode ser utilizado de forma a rentabilizar o desenvolvimento sustentável. Existe a necessidade de criar meios que conduzam a esse aproveitamento elétrico.

O movimento vertical das ondas pode ser transformado em movimento circular através de um sistema mecânico-elétrico. Este pode ser otimizado procedendo a algumas alterações geométricas, as quais foram os motes para o desenvolvimento do projeto.

É de salientar o trabalho de pesquisa ao longo de toda a dissertação, uma vez que já existem vários alternadores semelhantes no mercado que podem servir de base para a seleção da geometria e das dimensões do projetado.

Existindo a necessidade de desenvolver um alternador que funcione a baixas rotações, utiliza-se o formato de panqueca como base da sua geometria tendo este que possuir um grande número de pares de polos no seu rotor.

Assim sendo o principal objetivo desta dissertação é verificar quais os parâmetros do alternador que sendo otimizados influenciam de forma significativa a potência fornecida.

De forma a encontrar a solução ótima é necessário estudar o sistema elétrico alterando o número e o formato dos polos do alternador, como também a espessura do entreferro que se encontra entre o rotor e os semi-induzidos.

Como ideia inicial pensa-se que quantos mais polos o alternador possuir mais potência irá fornecer, porque a frequência aumenta, mas contrariamente se verifica analiticamente que este aumento não compensa o decréscimo dos valores de fluxo ligado causado pela diminuição da área dos magnetos como também pela redução do número de espiras dos enrolamentos.

Para obter uma melhor análise, utiliza-se um programa de elementos finitos para simular vários casos de funcionamento do alternador, que conduz a valores de potência, força eletromotriz e corrente, produzidos pelo mesmo.

Os resultados a adquirir com as simulações permitem que se faça uma comparação entre várias geometrias e seleccionar qual delas é a melhor solução para o problema proposto.

Inicialmente pensou-se também em projetar o alternador em regime trifásico para encontrar valores mais próximos dos reais, mas este apenas se encontra dimensionado teoricamente e não simulado devido a problemas de *software*, como descrito posteriormente.

Para terminar o projeto do alternador, apresenta-se uma estimativa orçamental que, de grosso modo, indica o custo da construção dos dois alternadores que podem constituir o gerador de energia elétrica.

## **1.2 Estrutura do documento**

Na continuação deste capítulo que introduz o conceito do documento, encontram-se dispostos os seguintes:

A evolução das máquinas elétricas será descrita ao longo do segundo capítulo, dando maior incidência aos alternadores desenvolvidos recentemente.

O capítulo 3, enquadramento teórico, tem como finalidade a contextualização do projeto. Inicialmente é dada a conhecer a definição de energia das ondas e qual a sua utilização para a produção de energia elétrica. Ao longo do capítulo são expostas algumas máquinas elétricas, as mais comuns, e as diferenças entre elas. Por último, apresentam-se as propriedades dos magnetos permanentes e o porquê da sua utilização no desenvolvimento de alternadores.

No quarto capítulo encontra-se exposto o problema em questão, sendo dada a conhecer a solução proposta, englobando assim o estudo do sistema elétrico do gerador.

Ao longo do capítulo 5, estão dispostos os dimensionamentos realizados a todos os alternadores a estudar, que tiveram como base o sistema elétrico desenvolvido no capítulo anterior.

O sexto capítulo fornece os resultados encontrados com as simulações realizadas no *software* de elementos finitos, reunindo as curvas de corrente, força eletromotriz e potência provenientes dos ensaios realizados em regime monofásico e trifásico.

No capítulo 7, observa-se uma estimativa detalhada do orçamento necessário para o desenvolvimento do alternador que conduz à melhor relação rendimento/custo.

Por último, encontra-se uma síntese do trabalho desenvolvido, sendo retiradas diversas conclusões sobre o funcionamento do melhor alternador estudado e o impacto deste na produção de energia elétrica.



## 2 Estado de arte

As primeiras máquinas elétricas apareceram em 1831 por Michael Faraday, possuíam fluxo axial e já adotavam o rotor em formato de disco. Durante os anos seguintes foram sendo desenvolvidas por outros inventores, mas em 1837, Thomas Davenport registrou a primeira patente de um alternador com fluxo radial, o qual passou a ser a solução mais aceitável para problemas de conversão de energia elétrica.

A dificuldade de fabrico do estator laminado, o elevado custo e a dificuldade de montagem do alternador de fluxo axial foram os motivos que levaram à pouca utilização da máquina em forma de disco, voltando a ser abordada apenas em 1889 na patente de Nicholas Tesla. [2]

Ao longo dos anos, Brook Crompton tornou-se o principal fabricante de motores de fluxo axial, desenvolvendo máquinas de pequeno comprimento mas com diâmetro maior, estator bobinado e entreferros reduzidos, tendo estas grandes vantagens. Os alternadores deste podem ter várias configurações, fornecendo potências de 100 W a 2.2 kW. [3]

No início do século XIX, começaram a ser criadas máquinas de rotores com magnetos permanentes, mas ainda assim os materiais magnéticos duros descobertos não eram suficientemente fortes, o que fez com que numa fase inicial esses alternadores não tivessem o impacto esperado no mercado, tendo sido adotada a solução convencional.

Foi a partir dos anos 90 do século XX, que diversos fabricantes começaram a desenvolver alternadores com ímanes permanentes, mas apenas para sistemas de baixa e média potência. A evolução dos magnetos terras raras, materiais duros com determinadas características que constituem os magnetos, interfere no rendimento das máquinas elétricas. [4]

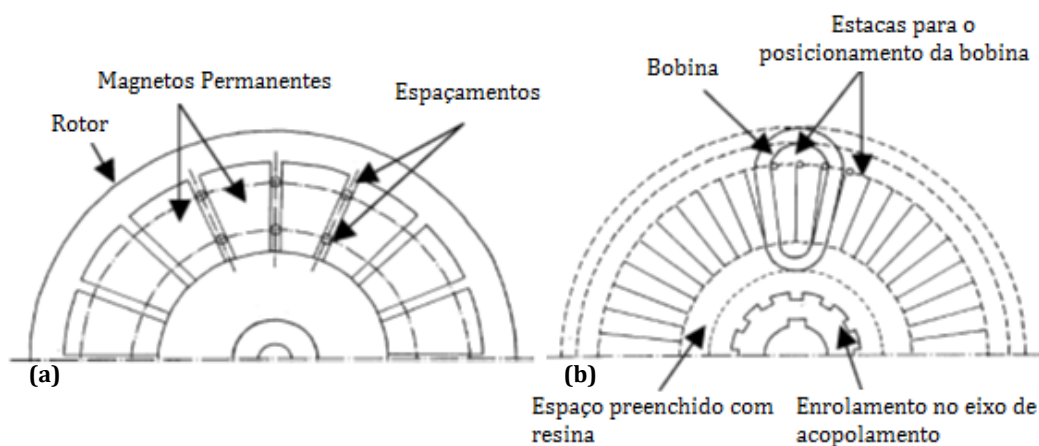
Na atualidade, já se encontram estudadas diversas máquinas de fluxo axial com ímanes permanentes no rotor. As topologias são todas semelhantes variando o número de polos, a velocidade a que operam, a potência fornecida e o tipo de energia renovável que convertem. De seguida encontram-se descritos alguns projetos que foram desenvolvidos recentemente.

Em 2007, foram publicados três projetos que retratam o gerador de fluxo axial, descritos em [5], [6] e [7], abordando apenas o gerador para um sistema de turbinas eólicas de acoplamento direto, [5], que tem mais semelhanças com o alternador que se encontra estudado ao longo deste projeto, já que este opera a baixas rotações.

Como o próprio nome indica, o gerador abordado nos artigos está direcionado para a energia eólica, mas sendo que este funciona a velocidades baixas, entre 200 RPM e 600 RPM, a fim de produzir energia numa faixa de frequência de 25 Hz a 70 Hz, poderia ser adaptado para um sistema de conversão de energia das ondas.

Possui uma construção simples, alta eficiência e confiabilidade. Este gerador funciona com acoplamento direto eliminando a engrenagem de redução mecânica, o que por sua vez reduz os custos de manutenção, o desgaste e o ruído. Tem a particularidade de ser ligeiramente maior, quando comparado com os comuns e necessita de um elevado número de polos.

Na figura seguinte, apresenta-se a disposição dos magnetos permanentes e dos enrolamentos deste gerador.



**Figura 2. 1. (a) Disposição dos magnetos permanentes no rotor. (b) Disposição das bobinas no estator.**

Especificando o gerador apresentado, o rotor deste possui 16 magnetos permanentes de 6 milímetros de espessura, um diâmetro externo de 200 milímetros, um diâmetro interno de 110 milímetros, tendo o disco uma espessura de 5 milímetros. Relativamente ao estator, este possui 48 bobinas com 7 espiras cada e cada entreferro tem 0.7 milímetros de espessura, é de notar que é bastante reduzido.

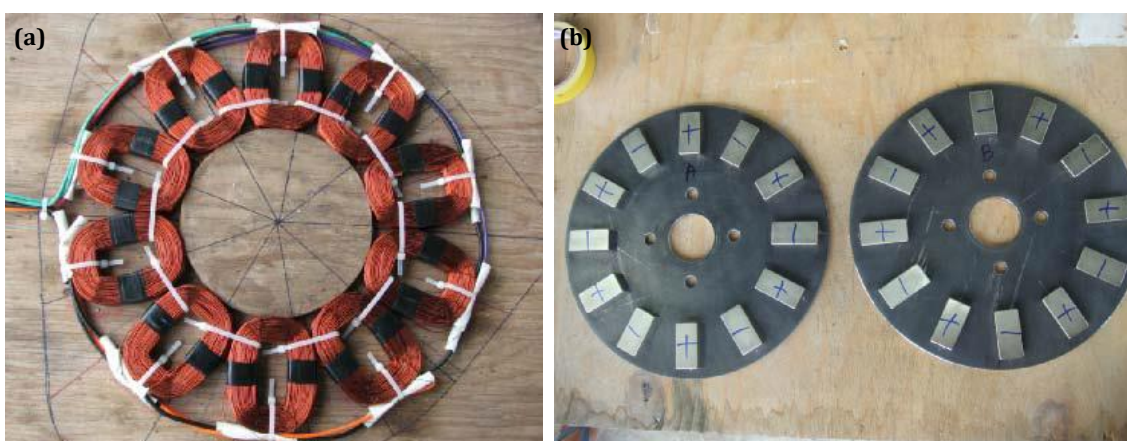
À velocidade nominal obtém-se na saída do gerador 230 W de potência. Verifica-se que o gerador é adequado para um sistema de turbina eólica de acoplamento direto, sendo necessárias algumas alterações a fim de outras aplicações.

Em 2011, P. Wannakarn, T. Tanmaneeprasert, N. Rugthaicharoencheep e S. Nedphograw, publicaram um artigo que descreve o desenvolvimento, projeto e construção, de um gerador de fluxo axial com ímanes permanentes para uma turbina eólica. [8]

O gerador possui um elevado número de polos, o que faz com que a frequência de alternância magnética se encontre na faixa de 10 Hz a 100 Hz. Como o rotor possui magnetos permanentes, as perdas de joule na excitação são nulas o que aumentará a eficiência da máquina. No estator encontram-se os enrolamentos do alternador.

No artigo observa-se uma geometria constituída por dois rotores e um estator, em que este último é colocado no meio dos dois discos dos rotores.

O gerador caracteriza-se por ter 10 bobinas no estator com 185 espiras cada, e 12 polos em cada disco de cada rotor, como se encontra apresentado nas figuras seguintes. O diâmetro externo da máquina aproxima-se de 900 milímetros.



**Figura 2. 2. (a) Disposição dos enrolamentos do alternador. (b) Disposição dos magnetos permanentes nos rotores.**

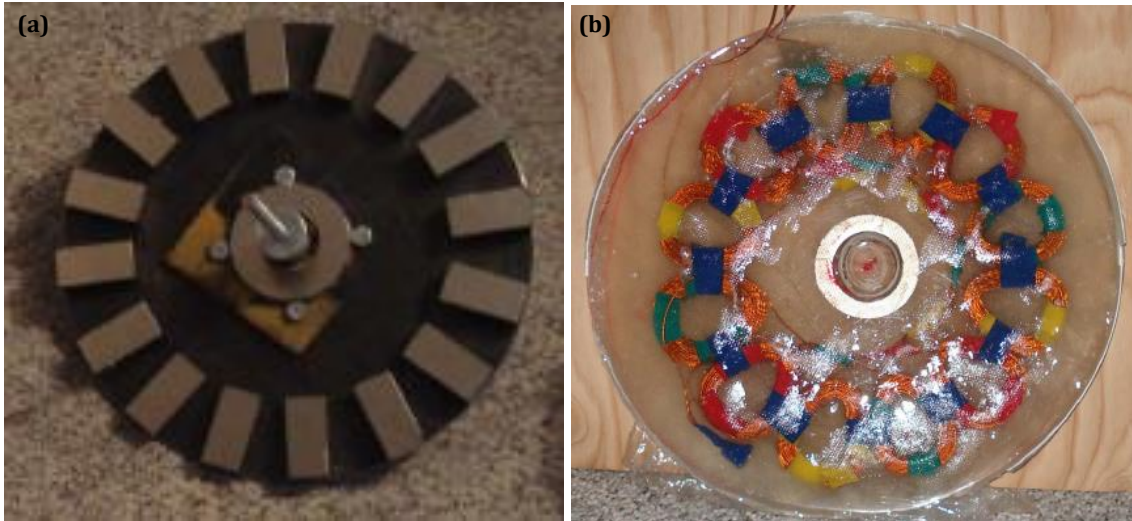
Conclui-se, que o gerador apresentado no artigo fornece uma potência de aproximadamente 1500 W quando ligado a uma carga resistiva, funcionando o seu rotor a 1000 RPM e com uma tensão de corrente contínua de 189 V.

Em meados de 2012, foi publicado um artigo que estuda o desempenho de um gerador de fluxo axial adaptado para uma turbina eólica. [9] O gerador proposto é constituído por dois rotores e um estator, tendo cada rotor 16 polos e o estator 12 bobinas com 100 espiras cada, a observar na figura 2.3.

Esta geometria proporciona uma melhoria no desempenho do gerador como também uma redução do ruído e da vibração indesejada, os quais têm sido bastante perturbadores.

Este projeto reduz também a manutenção e o custo, aumentando em outra perspectiva a vida útil do sistema.

É de salientar que esta solução é viável para sistemas de baixa velocidade devido à sua simples configuração.

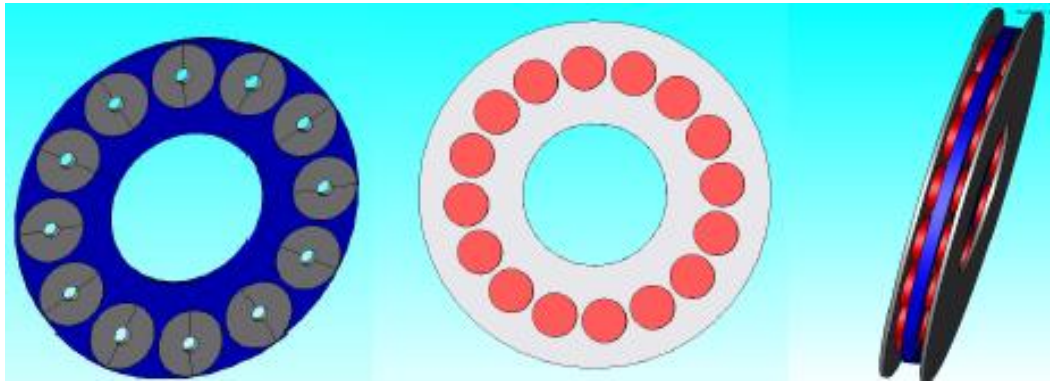


**Figura 2. 3. (a) Disposição dos magnetos no rotor. (b) Disposição das bobinas.**

Ao longo do ano 2013, o número de artigos publicados com base em geradores de fluxo axial foi aumentando, sendo apresentados alguns de seguida.

Primeiramente, o artigo [10] apresenta uma comparação entre geradores síncronos de fluxo radial e de fluxo axial com ímanes permanentes. Como o gerador a desenvolver neste projeto é de fluxo axial, aborda-se de seguida apenas essa topologia.

O gerador a considerar tem dois rotores e um estator, possui 16 magnetos permanentes de NdFeB em cada rotor e opera a uma velocidade nominal de 200 RPM. A máquina tem um custo elevado devido à quantidade de magnetos permanentes, mas pelo contrário torna-se mais leve e mais fácil de fabricar. A geometria do alternador pode ser observada na figura que se segue.



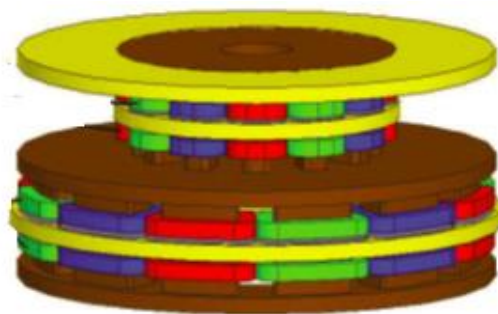
**Figura 2. 4. Configuração do alternador descrito.**

Das topologias estudadas no artigo, é de notar que a apresentada previamente é a mais eficiente.

Num artigo de Erol Kurt, Serdal Aslan, Halil Gör e Mehmet Demirtaş, publicado em Maio de 2013, encontram-se analisados dois geradores de fluxo axial com ímanes permanentes de NdFeB, que operam a baixas velocidades.

É afirmado que alternadores com vários estatores e rotores têm várias vantagens, como uma maior estabilidade e eficiência. Os autores apresentam duas geometrias diferentes, cada uma com características muito específicas.

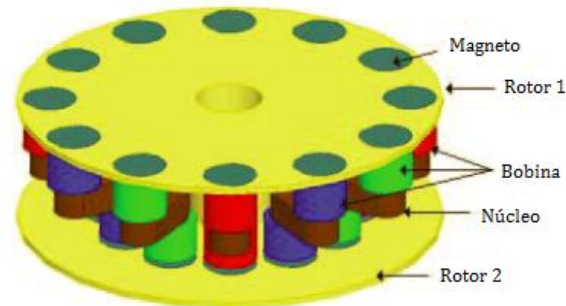
Primeiramente, a observar na figura 2.5, apresenta-se uma máquina constituída por vários estatores e vários rotores duplos, onde os ímanes permanentes se encontram desfasados de quinze graus. A configuração apresenta entreferros de dois milímetros entre os estatores e os rotores



**Figura 2. 5. Configuração do gerador constituído por vários estatores e rotores.**

Com a utilização desta geometria prevê-se que a potência fornecida pelo gerador seja de 2.7 kW, a uma velocidade de rotação de 125 RPM a partir de 48 bobinas.

A segunda geometria tem a particularidade de ter um estator de dupla face e um rotor duplo, ou seja tem um rotor de cada lado do estator. Os magnetos permanentes aqui são circulares com 40 milímetros de diâmetro. A figura 2.6 ilustra este alternador.



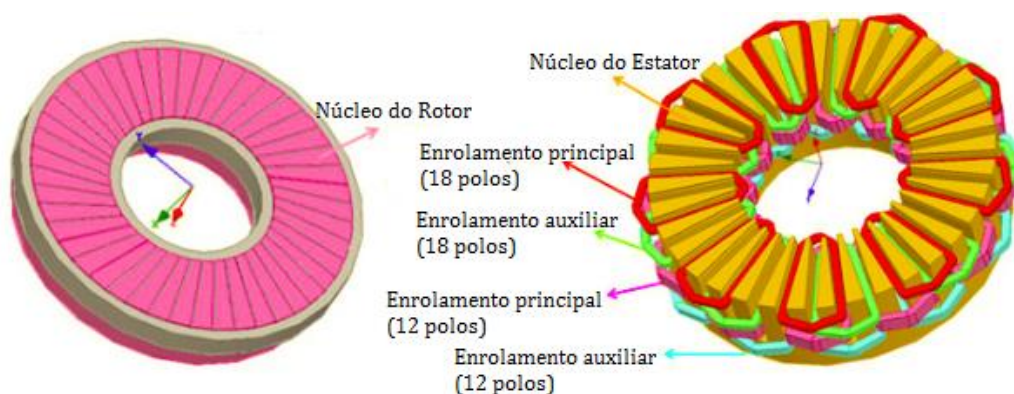
**Figura 2. 6. Configuração do gerador constituído por um estator de dupla face e um rotor duplo.**

Através desta geometria estima-se a geração de cerca de 150 W a 100 RPM a partir de 24 bobinas.

Relativamente ao fabrico, a segunda geometria apresentada tem uma maior facilidade na construção uma vez que os ímanes são todos circulares e não trapezoidais e triangulares como na primeira. [11]

Outro dos artigos publicado em 2013 retrata um alternador de fluxo axial, onde o entreferro pode ser ajustado de forma a se encontrar a solução ótima. [12] O autor refere que o alternador apresentado poderá fornecer cerca de 18375 W de potência.

Na figura 2.7, são observadas as configurações do rotor e do estator da máquina elétrica.



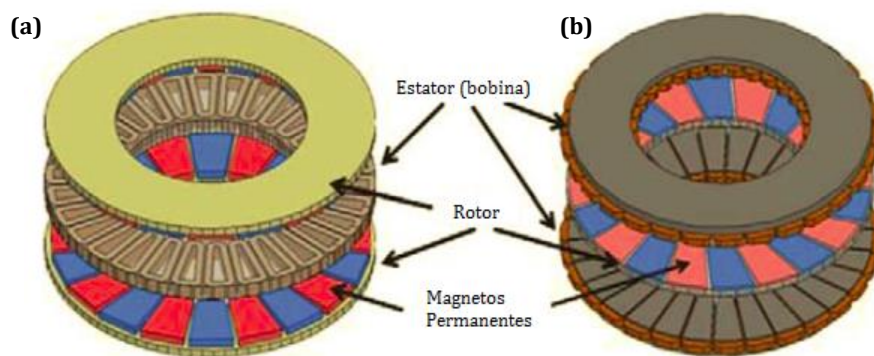
**Figura 2. 7. Configurações do rotor e do estator.**

O estator tem dois grupos de enrolamentos para que o alternador possa operar a baixas e a altas velocidades, como visto na figura. No projeto descrito no artigo, desenvolvem uma nova estrutura para estas máquinas de modo a poder superar problemas de bloqueio do rotor que podem ser causados pela atração magnética que existe entre o rotor e o estator, diminuindo o comprimento do entreferro.

Por último, faz-se referência ao artigo publicado por Gyeong-Chan Lee e Tae-Uk Jung, [13], em 2013 também, que descreve um projeto de um gerador de fluxo axial com magnetos permanentes para uma pequena turbina eólica, com a particularidade de possuir uma estrutura dupla.

No artigo são apresentadas duas configurações. A primeira tem dois rotores em disco em ambos os lados do estator, sendo intitulada de Non-Slotted-AFPMG, pelo contrário a segunda topologia tem uma estrutura mais simples possuindo um rotor no centro de dois estatores separados por ranhuras, conhecida por Slotted-AFPMG.

Nesta última a estabilidade é maior garantindo maior potência à saída, sendo que existe menor relutância do entreferro.



**Figura 2. 8. (a) Non-Slotted-AFPMG. (b) Slotted-AFPMG.**

Tendo a S-AFPM uma geometria semelhante à que irá ser desenvolvida neste trabalho, especificam-se algumas características, como os 20 magnetos permanentes de NdFeB no rotor, 12 bobinas por fase em cada estator e o diâmetro interno quase metade do diâmetro externo do alternador. A potência fornecida pelo gerador aproxima-se de 1.328 kW.

Tendo em conta que a dimensão exterior da máquina é de 211 milímetros, esta é bastante menor que a desenvolvida neste projeto, uma vez que esta se encontra adaptada para uma pequena turbina eólica e não para um sistema de conversão de energia das ondas. Para tal teria que sofrer determinadas alterações.



# 3 Enquadramento teórico

O capítulo 3 tem como objetivo fundamental a descrição de alguns conceitos que envolvem o desenvolvimento do alternador, o que facilitará a compreensão do funcionamento e da finalidade do mesmo.

## 3.1 Energia das ondas

Diversos fenómenos naturais encontram-se interligados entre si, como tal, também as ondas existentes nos oceanos provêm da incidência do vento na superfície marítima, sendo este o principal influente da sua velocidade. [14]

O potencial da energia das ondas passou a ter uma maior relevância desde que o decaimento da indústria petrolífera iniciou, assim sendo foi necessário criar métodos para a sua utilização como recurso energético. Após a formação da onda, esta pode percorrer longas distâncias sem que exista dispersão, como tal são colocados dispositivos na costa, perto ou longe desta, que facilitam a extração da energia. [15]

Após a extração, a energia integra um sistema mecânico, que através de geradores que o constituem a reutilizam produzindo energia elétrica, os mais comuns encontram-se descritos de seguida.

## 3.2 Tipos de geradores

Neste subcapítulo apresentam-se algumas máquinas elétricas já existentes, sendo apresentadas vantagens e desvantagens de cada uma. A máquina de fluxo axial com magnetos permanentes é evidenciada, uma vez que projeto tem como base este modelo de alternador.

### 3.2.1 Máquina assíncrona

A máquina assíncrona também conhecida por máquina de indução, uma vez que as correntes do induzido são produzidas pelas correntes do indutor. O rotor deste gerador pode ser bobinado ou em gaiola de esquilo, o que interfere no seu funcionamento.

Embora seja uma máquina bastante económica, tem baixo desempenho na geração de energia elétrica, o que faz com que não seja usada em grandes sistemas de conversão de energia.

No entanto, por ser uma máquina assíncrona é usada em pequenos ou médios geradores de energia, em que a velocidade do atuador é variável, como por exemplo nos geradores eólicos.

### **3.2.2 Máquina síncrona**

A máquina síncrona funciona à velocidade de sincronismo, ou seja, a velocidade do rotor é igual à velocidade dos campos magnéticos do rotor e do estator. Através desta igualdade de velocidades consegue-se produzir um binário eletromecânico constante. Por norma este tipo de alternador é utilizado em centrais termoelétricas e hidroelétricas.

Existem máquinas síncronas de diversas formas e dimensões, quanto ao indutor, este pode ser cilíndrico ou com polos salientes.

A principal desvantagem é a elevada manutenção necessária, que tem um custo muito elevado. [16]

### **3.2.3 Máquina síncrona de fluxo radial com magnetos permanentes**

A máquina de fluxo radial é utilizada em sistemas clássicos de conversão de energia. Não se aplica em sistemas em que existe necessidade ter elevado número de polos porque frequentemente o espaço no rotor é reduzido, nem para geradores de baixas velocidades.

Devido à sua topologia, estas máquinas permitem atingir elevados valores de potência, como também, o binário produzido é elevado. [17]

### **3.2.4 Máquina síncrona de fluxo axial com magnetos permanentes**

A principal característica que distingue estas máquinas das outras referidas anteriormente, é o campo magnético criado paralelo ao eixo de rotação. O rotor é um disco que gira face ao estator criando um campo magnético. [18] A geometria deste alternador pode variar, podendo o estator ser dividido em dois semi-induzidos e o disco ter magnetos permanentes nele inseridos.

Para ter mais eficiência é necessário ter em conta a espessura do entreferro, este tem que ser mais pequeno que o passo polar de forma a não existir dispersão de fluxo de polo para polo. [19]

A forma e a constituição dos magnetos também influenciam no funcionamento da máquina, já que o fluxo depende da área do íman que atravessa.

Este tipo de máquinas está adaptado para operar em sistemas de baixas velocidades e produz valores de potência médios. A nível económico são alternadores de preço elevado

devido ao custo dos magnetos que tem em elevado número. Relativamente às dimensões, tendo o formato de disco, ou seja, pequena espessura, é facilmente adaptada aos sistemas mecânicos. [20] [21]

### 3.3 Magnetos permanentes

Os magnetos permanentes são materiais magnéticos duros que têm propriedades muito específicas, as quais são indicadas de seguida.

Estes possuem largos ciclos de histerese, o que faz com que tenham uma grande área envolvida pela curva B-H, provocando assim uma elevada energia de desmagnetização do material.

Têm como principal função produzir excitação em vários tipos especiais de máquinas rotativas, permitindo assim que estas não necessitem de enrolamentos de excitação.

São materiais de baixa permeabilidade magnética relativa  $\mu_r$ , elevado campo coercivo  $H_c$ , e elevada remanescência  $B_r$ . Por sua vez, conduzem a um produto energético máximo  $BH_{max}$  elevado, como também a um elevado ponto de Curie  $T_c$ . [22]

Os magnetos permanentes podem ser de vários tipos, sendo apresentados aqueles que as cujas propriedades permitem a sua utilização no alternador a desenvolver.

Os *alnicos*, assim designados uma vez que são constituídos por alumínio, níquel, cobalto e ferro, podem ser divididos em dois tipos, um onde têm uma elevada remanescência e baixa coercividade, e outro o contrário. São magnetos versáteis e baratos, para além das máquinas elétricas podem ser utilizados em instrumentos de medida e altifalantes. Como desvantagem, são pouco resistentes.

As ligas de *Samário-Cobalto*, constituídas por esses dois materiais, são caracterizadas pela sua elevada coercividade e baixa remanescência, sendo magnetos mais resistentes e mais estáveis que os anteriores. Pelo contrário o seu custo é bastante elevado devido à escassez da matéria-prima que os compõe. [23]

Os magnetos de *Neodímio-Ferro-Boro* são aqueles que têm as melhores propriedades magnéticas, isto é, maior remanescência e maior coercividade, o que faz com que sejam mais estáveis e mais seguros quando utilizados em sistemas elétricos. Atualmente, já se encontram mais facilmente no mercado, tendo apenas a contrariedade do preço, o qual é elevado. [24]

Este último tipo de magnetos será o escolhido para integrar o alternador, uma vez que são os mais confiáveis a nível de estabilidade magnética e menos sensíveis a oscilações do meio.

# 4 Solução Proposta

Neste capítulo é exposto o problema e a solução adotada para o resolver, sendo apresentada a geometria do alternador e o sistema elétrico que o constitui.

## 4.1 Descrição do problema

Sendo o objetivo final o aproveitamento da energia das ondas, seguiu-se um sistema mecânico já panteado. Este refere que existe uma boia colocada à superfície da água que capta os movimentos verticais produzidos pelas ondas, sendo convertidos através de tambores mecânicos em velocidade constante.

Para aumentar o equilíbrio do grupo conversor, o sistema mecânico é acoplado a dois alternadores síncronos, um em cada extremo do tambor, tendo sido proposto o alternador desenvolvido ao longo de todo o documento como solução. Este teve como base um anteprojecto desenvolvido pelo Professor Mário Ventim Neves. [25]

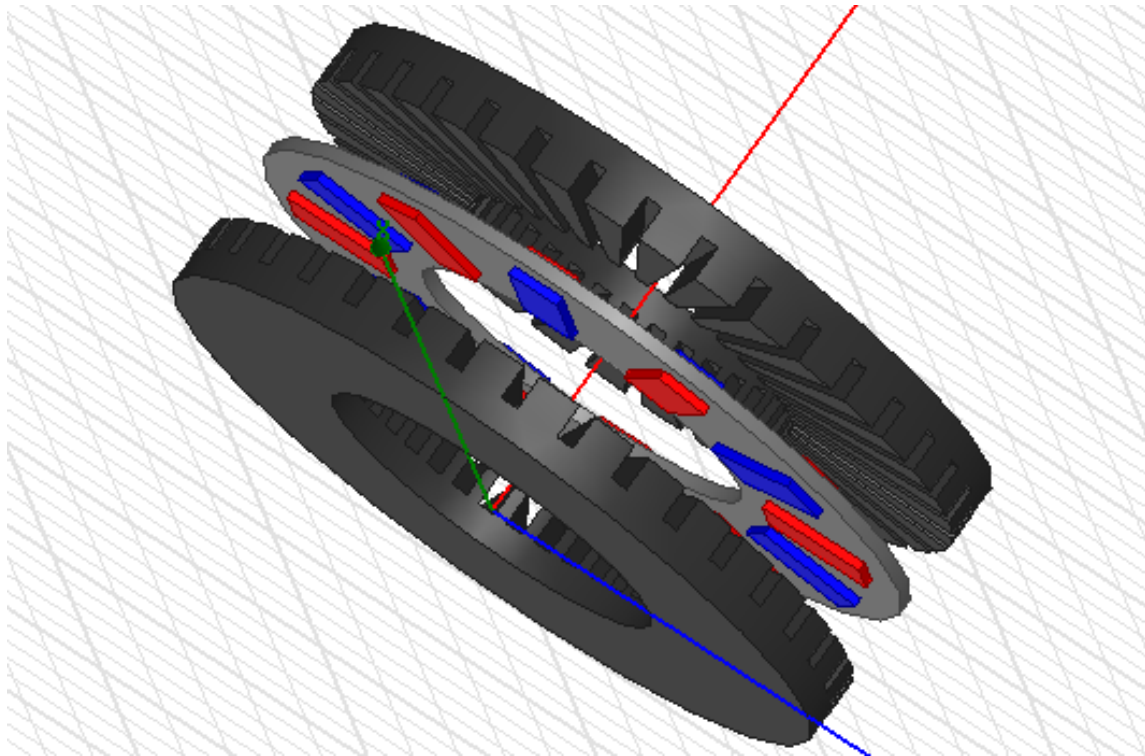
Após a apresentação do sistema mecânico, foi fundamental desenvolver o sistema elétrico do alternador, o qual é descrito de seguida.

## 4.2 Sistema elétrico

No capítulo 3 foram apresentados vários tipos de alternadores, sendo escolhido para incorporar o sistema mecânico o alternador síncrono em disco de fluxo axial com magnetos permanentes.

Como explicitado, o tambor produz uma velocidade constante, mais especificamente de 240 RPM, a qual o alternador irá funcionar. O valor encontrado para a frequência, 4 Hz, ainda não é suficiente para que exista indução, como tal, é necessário ter um alternador com um grande número de pares de polos.

As medidas do alternador foram arbitradas, tendo este quase um metro de diâmetro e vinte e cinco centímetros de espessura, o que faz com que se torne semelhante a um disco, como se pode observar na figura 4.1. A geometria adotada para o alternador faz com que este tenha entreferro radial e fluxo axial.



**Figura 4. 1. Estrutura do alternador em disco, com dois induzidos e um indutor com magnetos permanentes (Desenho obtido através de um software de elementos finitos).**

Ao assumir o indutor em forma de disco com magnetos permanentes evita-se que este tenha que ser alimentado. Uma vez que tanto o indutor como os semi-induzidos rodam em sentidos opostos, existem contactos deslizantes ligados ao induzido de forma a coletar a força eletromotriz induzida.

Considera-se o disco com 84 centímetros de diâmetro externo e 50 centímetros de diâmetro interno e 2 centímetros de espessura.

Relativamente ao induzido, o alternador é constituído por dois semi-induzidos de diâmetros iguais ao do disco. A sua espessura depende do número de par de polos, a qual será arbitrada no próximo capítulo.

Considera-se que o induzido deva ser chapeado, isto é constituído por uma espiral de chapa, o que minimiza as correntes de Foucault, enrolada tomando a forma de um cilindro maciço, como se pode observar na figura 4.2. Após o enrolamento da espiral são efetuados os cortes das cavas. É de notar que a medida *standard* para o interior da espiral é de 50 centímetros, o que faz com que todos os diâmetros internos tenham esse valor. É de salientar que as cabeças das bobinas se encontram fora da espiral.



Figura 4. 2. Rolo de chapa de chapa de ferro, do qual são constituídos os semi-induzidos. [26]

Existem magnetos permanentes de vários materiais, com se observaram descritos no capítulo dois, escolheu-se Neodímio-Ferro-Boro, já que este material possui as melhores propriedades magnéticas. Estes encontram-se dispostos nas duas faces do indutor como se pode observar na figura 4.3.

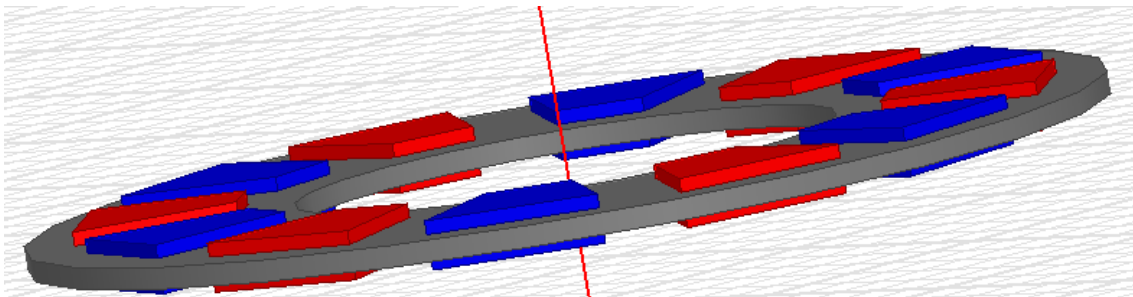


Figura 4. 3. Disposição dos magnetos permanentes no disco.

A indução do magneto é dada pelo fabricante, característica que depende do magneto, mas o seu valor real depende do entreferro e da característica de desmagnetização do material. Para o dimensionamento do alternador admite-se que no circuito o magneto tem uma densidade de fluxo de 0.9 T.

O fluxo por polo depende da área do próprio magneto, esta encontra-se segundo a expressão (4.1).

$$S_{magneto} [m^2] = \text{comprimento do magneto} [m] \times \text{largura do magneto} [m] \quad (4.1)$$

Utilizando a expressão (4.2), encontra-se então o fluxo por polo.

$$\phi_{polo}[Wb] = B[T] \times S_{magneto}[m^2] \quad (4.2)$$

Como já foi referido o disco gira à velocidade de 4 rotações por segundo, isto é 240 RPM, o que tem influência direta no cálculo da frequência de alternância magnética. Estas encontram-se relacionadas com o número de pares de polos,  $p$ , pela expressão apresentada em (4.3).

$$f[Hz] = p \times \text{velocidade do indutor em relação ao induzido}[RPM] \quad (4.3)$$

Dada a frequência, relacionando (4.2), e (4.3), determina-se a força eletromotriz máxima por espira, descrita em (4.4).

$$E_{MAX_{espira}}[V] = 2\pi \times \phi_{polo}[Wb] \times f[Hz] \quad (4.4)$$

Após serem apresentadas as expressões base que constituem o sistema elétrico, procede-se ao estudo do circuito elétrico em si.

#### 4.2.1 Circuito Elétrico

Se se considerar que cada bobina de  $n_e$  espiras, está posicionada em frente a um polo a tensão eficaz de cada bobina pode ser determinada por (4.5).

$$U_{ef}[V] = \frac{n_e \times E_{MAX_{espira}}[V]}{\sqrt{2}} \quad (4.5)$$

As bobinas podem ser dispostas nos semi-induzidos de diversas formas, ligando-as em paralelo e antiparalelo, consoante o sentido do magneto. É de notar que caso as bobinas fossem ligadas em série a força eletromotriz obtida seria muito elevada, o que dificultaria o isolamento do alternador. A corrente eficaz em cada bobina pode ser calculada por (4.6), relacionando a corrente admissível por espira que depende do condutor utilizado e o número de pares de polos.

$$I_{ef}[A] = 2p \times I_{ef_{espira}}[A] \quad (4.6)$$

Relativamente ao número de espiras, este depende de diversos parâmetros do circuito elétrico.

As dimensões das cavas e dos dentes do estator dependem do número de bobinas nele posicionadas, o que por sua vez depende do número de polos, como já referido. Relacionando as dimensões do estator com as dimensões dos magnetos, determina-se a largura e o comprimento de cada cava. Uma vez que estes parâmetros dependem

diretamente da geometria do alternador, encontram-se dimensionados ao longo do capítulo seguinte.

Considerando que se pretende um enrolamento trifásico, em cada cava passam duas camadas de condutores, que constituem duas bobinas que correspondem a duas fases diferentes. É fundamental encontrar a secção útil de cada cava, dada em (4.7), para saber qual a secção disponível para cada camada de condutores. Para tal, considerando uma bobina, admite-se um fator de empacotamento de 50%, valor pessimista.

$$S_{util\_cava}[m^2] = \text{fator de empacotamento} \times \text{largura} \times \text{altura} \quad (4.7)$$

Segundo o resultado da expressão anterior, a secção útil disponível para cada camada é dada por:

$$S_{util\_1camada}[m^2] = \frac{S_{util\_cava}[m^2]}{2} \quad (4.8)$$

Encontrada a secção disponível para cada camada de condutores é necessário saber quais as características do condutor a utilizar, principalmente qual a secção que este ocupa. Consultando alguns catálogos, selecionou-se como condutor um fio esmaltado de cobre AWG, com uma secção de aproximadamente  $0.95 \text{ mm}^2$ , já que este possuía as melhores características a nível de choque térmico, aderência e flexibilidade. Na tabela de fios consultada em [27], pode-se retirar a corrente admissível por espira,  $I_{ef\_espira} = 1,1 \text{ A}$ , valor a considerar posteriormente.

Admitidas as dimensões do fio condutor, o número de espiras pode ser determinado relacionando a secção útil disponível para cada camada e a secção do fio, como se encontra descrito em (4.9).

$$n_e = \frac{S_{util\_1camada}[m^2]}{S_{fio}[m^2]} \quad (4.9)$$

Após encontrado o número de espiras, pode-se calcular o valor do fluxo ligado numa bobina pela expressão seguinte:

$$\phi_{bobina}[Wb] = n_e \times \phi_{polo}[Wb] \quad (4.10)$$

A potência aparente do circuito pode ser determinada através da expressão (4.11). É de notar que na expressão se consideram os dois semi-induzidos e o regime trifásico.

$$S_{trifásica}[VA] = 3 \times 2 \times U_{ef} \times I_{ef} \Leftrightarrow S_{trifásica}[VA] = 3 \times 2 \times \frac{U_{MAX} I_{MAX}}{2} \quad (4.11)$$

Para realizar os ensaios em carga é necessário dimensionar os parâmetros que constituem a carga. Numa primeira fase considerando a carga puramente resistiva, a impedância desta

pode ser calculada pela expressão (4.12). Relaciona-se então a tensão eficaz total do circuito com a corrente que atravessa todas as bobinas do semi-induzido.

$$\mathbf{Z}_{carga} [\Omega] = \frac{U_{ef}[V]}{I_{ef}[A]} \quad (4.12)$$

Sendo a carga puramente resistiva a potência ativa toma o valor da potência aparente já que o fator de potência é unitário, (4.13).

$$\mathbf{P}[W] = \mathbf{S}[VA] \times \cos \varphi \Leftrightarrow \mathbf{P}[W] = \mathbf{S}[VA] \quad (4.13)$$

Seguidamente obtêm-se os parâmetros da carga caso esta seja considerada indutiva.

Através da frequência encontrada em (4.3), determina-se a velocidade angular de funcionamento da máquina:

$$\omega[\text{rad/s}] = 2\pi \times f[\text{Hz}] \quad (4.14)$$

Assume-se um fator de potência indutivo de 0.75, valor arbitrado, o que faz com que se obtenha um ângulo de carga de:

$$\varphi_{carga} [^\circ] = \cos^{-1} 0.75 \Leftrightarrow \varphi_{carga} [^\circ] = 41.4 \quad (4.15)$$

Assim sendo, a impedância na carga é dada por:

$$\mathbf{Z}_{carga} [\Omega] = \frac{U_{ef}[V]}{I_{ef}[A]} \angle \varphi_{carga} [^\circ] \quad (4.16)$$

Obtida a impedância na carga os parâmetros do circuito podem ser definidos do seguinte modo:

$$\mathbf{R}[\Omega] = \frac{U_{ef}[V]}{I_{ef}[A]} \times \cos \varphi_{carga} [^\circ] \quad (4.17)$$

$$\mathbf{L}[H] = \frac{1}{\omega} \times \frac{U_{ef}[V]}{I_{ef}[A]} \times \sin \varphi_{carga} [^\circ] \quad (4.18)$$

É de salientar que ao longo de todo o projeto não é considerada a resistência das bobinas, sendo esta desprezável face à resistência de carga.

Por último, a potência ativa neste caso depende também do fator de potência como demonstrado em (4.19).

$$\mathbf{P}[W] = \mathbf{S}[VA] \times \cos \varphi \Leftrightarrow \mathbf{P}[W] = \mathbf{S}[VA] \times 0.75 \quad (4.19)$$

Este será o valor previsto para a potência máxima fornecida pelo alternador.

# 5 Dimensionamento

No capítulo 5 do presente documento estudam-se as propriedades do alternador consoante a alteração da geometria. Para vários alternadores apresenta-se o dimensionamento de todos os parâmetros envolvidos no sistema elétrico descrito no capítulo anterior.

## 5.1 Alternador síncrono em disco com 12 polos com base retangular

Para esta primeira máquina, consultou-se alguns fornecedores de ímanes permanentes e escolheu-se um da CMS Magnetics [28], onde as características se encontram descritas na tabela 5.1.

**Tabela 5. 1. Características dos 12 polos com formato retangular a utilizar**

Diâmetro do disco		0.84 m	840 mm
Magnetos Nd-Fe-B	Comprimento	0.1524 m	152.4 mm
	Largura	0.0762 m	76.2 mm
	Espessura	0.0127 m	12.7 mm
Campo de indução magnética B		0.9 T	
Secção do magneto		$0.011613 \text{ m}^2$	$11612.88 \text{ mm}^2$

Relacionando os valores da tabela anterior, pode-se concluir que para estas dimensões dos magnetos e tendo em conta o diâmetro do disco, podem-se colocar doze magnetos em cada face do disco. Assim sendo os valores arbitrados para as dimensões dos parâmetros do semi-induzido encontram-se expostos na tabela 5.2. O valor das secções é determinado com base nas (4.7) e (4.8).

**Tabela 5. 2. Dimensões do semi-estator para um enrolamento de 12 bobinas**

Número de pares de polos $p$		6	
Número de cavas	36	2 semi-induzidos	72
Largura da cava		0.025 m	25 mm
Altura da cava		0.05 m	50 mm
Restante do estator		0.04 m	40 mm
Fator de empacotamento (1 camada)		50 %	
Secção útil da cava		$0.000625 \text{ m}^2$	$625 \text{ mm}^2$
Secção útil de cada camada		$0.0003125 \text{ m}^2$	$312.5 \text{ mm}^2$

Aplicando as expressões (4.2), (4.3), (4.4) e (4.14), encontrou-se os valores da tabela 5.3.

**Tabela 5. 3. Valores de fluxo, força eletromotriz e velocidades obtidos para o alternador a dimensionar**

Fluxo por polo $\phi_{polo}$	0.01045 Wb	10.45 mWb	
Tensão máxima induzida por espira $E_{MAX_{espira}}$	1.5761 V		
Velocidade do indutor	4 RPS	240 RPM	
Frequência de alternância magnética $f$	24 Hz	Frequência angular $\omega$	150.8 rad/s

Através de (4.5), (4.6), (4.9) e (4.10), determinaram-se os valores da tabela 5.4.

**Tabela 5. 4. Cálculo dos valores teóricos esperados para o referido alternador, quando efetuados os ensaios em carga**

Tensão eficaz		366.47 V	
Número de espiras		329	
Fluxo por bobina $\phi_{bobina}$		3.438 Wb	
Corrente eficaz	13.2 A	2 semi-induzidos	26.4 A

Os parâmetros do circuito para diferentes cargas obtiveram-se pelas equações (4.12), (4.15), (4.16), (4.17) e (4.18), sendo observados na tabela 5.5.

**Tabela 5. 5. Dimensionamento dos parâmetros das respectivas cargas a utilizar nos ensaios**

Impedância de carga puramente resistiva	13.88 $\Omega$
Impedância de carga indutiva	13.88 $\Omega \angle 41.4^\circ$
Resistência de carga	10.41 $\Omega$
Coefficiente de indução da carga	0.0609 H

Por último e aplicando as expressões (4.11) e (4.13), calculam-se os valores de potência fornecidos pelo alternador, os quais são apresentados na tabela 5.6.

**Tabela 5. 6. Cálculo das potências geradas pelo alternador de 12 polos com formato retangular**

Fator de potência		0.75	
Potência aparente monofásica	9.67 kVA	Potência aparente trifásica	29.02 kVA
Potência ativa monofásica	7.26 kW	Potência ativa trifásica	21.77 kW

Estes valores são comparados com os resultados obtidos pelas simulações.

## 5.2 Alternador síncrono em disco com 12 polos com base trapezoidal

Mantendo o mesmo número de magnetos da secção anterior, neste subcapítulo altera-se a sua estrutura, ou seja considera-se polos com forma de prisma trapezoidal. Isto implica um aumento significativo da área do íman, o qual se pode observar na tabela 5.7.

**Tabela 5. 7. Características dos 12 polos com formato trapezoidal a utilizar**

Diâmetro do disco		0.84 m	840 mm
Magnetos Nd-Fe-B	Base pequena	0.0762 m	76.2 mm
	Base grande	0.16477 m	164.77 mm
	Altura	0.1524 m	152.4 mm
	Espessura	0.0127 m	12.7 mm
Campo de indução magnética B		0.9 T	
Secção do magneto		0.0183619 $m^2$	18361.9 $mm^2$

O aumento da secção do magneto irá provocar por sua vez um aumento na força eletromotriz o que causará alterações nos valores encontrados quando os magnetos assumiam a forma de paralelepípedos.

Os parâmetros do semi-induzido, mantêm-se constantes, uma vez que o número de pares de polos não varia. Assim sendo, podem ser consultados na tabela 5.2 da secção anterior.

Aplicando as expressões (4.2) e (4.4) já descritas, encontrou-se os novos valores de fluxo por polo e força eletromotriz máxima induzida por espira, apresentados na tabela 5.8.

**Tabela 5. 8. Valores de fluxo, força eletromotriz e velocidades obtidos para o alternador a dimensionar**

Fluxo por polo $\phi_{polo}$	0.01653 Wb	16.53 mWb	
Tensão máxima induzida por espira $E_{MAX_{espira}}$	2.49 V		
Velocidade do indutor	4 RPS	240 RPM	
Frequência de alternância magnética $f$	24 Hz	Frequência angular $\omega$	150.8 rad/s

Como se pode verificar o fluxo por polo e a força eletromotriz máxima induzida aumentaram.

Através da equação (4.5), determina-se o novo valor da tensão eficaz, a observar na tabela seguinte.

**Tabela 5. 9. Cálculo dos valores teóricos esperados para o referido alternador, quando efetuados os ensaios em carga**

Tensão eficaz		579.44 V	
Número de espiras		329	
Fluxo por bobina $\phi_{bobina}$		5.438 Wb	
Corrente eficaz	13.2 A	2 semi-induzidos	26.4 A

Os parâmetros do circuito para diferentes cargas podem ser observados na tabela 5.10, sendo obtidos pelas equações (4.12), (4.15), (4.16), (4.17) e (4.18).

**Tabela 5. 10. Dimensionamento dos parâmetros das respectivas cargas a utilizar nos ensaios**

Impedância de carga puramente resistiva	21.9Ω
Impedância de carga indutiva	21.9Ω∠41.4°
Resistência de carga	16.5 Ω
Coefficiente de indução da carga	0.0963 H

Por fim determina-se a potência fornecida pelo alternador, recorrendo às expressões (4.11) e (4.13), sendo apresentados na tabela 5.11.

**Tabela 5. 11. Cálculo das potências geradas pelo alternador de 12 polos com formato trapezoidal**

Fator de potência		0.75	
Potência aparente monofásica	15.297 kVA	Potência aparente trifásica	45.89 kVA
Potência ativa monofásica	11.47 kW	Potência ativa trifásica	34.42 kW

Como é de notar, este alternador fornece mais potência que o anterior, mas nada de significativo se pode concluir.

### 5.3 Alternador síncrono em disco com 14 polos com base retangular

Após dimensionar as máquinas de 12 magnetos permanentes em cada face do disco, obtêm-se nesta secção novos parâmetros caso sejam colocados 14 ímanes em cada face. Para tal, diminui-se a largura do magneto já utilizado em 5.1. As alterações podem observadas na tabela 5.12.

**Tabela 5. 12. Características dos 14 polos com formato retangular a utilizar**

Diâmetro do disco		0.84 m	840 mm
Magnetos Nd-Fe-B	Comprimento	0.1524 m	152.4 mm
	Largura	0.0635 m	63.5 mm
	Espessura	0.0127 m	12.7 mm
Campo de indução magnética B		0.9 T	
Secção do magneto		0.0096774 m <sup>2</sup>	9677.4 mm <sup>2</sup>

Comparando com os valores apresentados na tabela 5.1 repara-se que a secção do magneto diminuiu, o que provoca uma descida do valor da força eletromotriz máxima induzida por espira, a observar na tabela 5.14. É de notar que o aumento de frequência não compensa a diminuição do fluxo.

Arbitram-se novos valores para as dimensões dos parâmetros do semi-induzido, os quais são expostos na tabela 5.13. O valor das secções é calculado com base nas (4.7) e (4.8).

**Tabela 5. 13. Dimensões do semi-estator para um enrolamento de 14 bobinas**

Número de pares de polos $p$		7	
Número de cavas	42	2 semi-induzidos	84
Largura da cava		0.0225 m	22.5 mm
Altura da cava		0.045 m	45 mm
Restante do estator		0.045 m	45 mm
Fator de empacotamento (1 camada)		50 %	
Secção útil da cava		$0.0005062 \text{ m}^2$	$506.2 \text{ mm}^2$
Secção útil de cada camada		$0.0002531 \text{ m}^2$	$253.1 \text{ mm}^2$

Aplicando de novo as expressões (4.2), (4.3), (4.4) e (4.14), encontrou-se os valores da tabela 5.14.

**Tabela 5. 14. Valores de fluxo, força eletromotriz e velocidades obtidos para o alternador a dimensionar**

Fluxo por polo $\phi_{polo}$	0.00871 Wb	8.71 mWb	
Tensão máxima induzida por espira $E_{MAX_{espira}}$	1.532 V		
Velocidade do indutor	4 RPS	240 RPM	
Frequência de alternância magnética $f$	28 Hz	Frequência angular $\omega$	175.9 rad/s

Através de (4.5), (4.6), (4.9) e (4.10), determinam-se os valores da tabela 5.15.

**Tabela 5. 15. Cálculo dos valores teóricos esperados para o referido alternador, quando efetuados os ensaios em carga**

Tensão eficaz		288.59 V	
Número de espiras		267	
Fluxo por bobina $\phi_{bobina}$		2.326 Wb	
Corrente eficaz	15.4 A	2 semi-induzidos	30.8 A

Os parâmetros do circuito para diferentes cargas podem ser observados na tabela 5.16, sendo obtidos pelas equações (4.12), (4.15), (4.16), (4.17) e (4.18).

**Tabela 5. 16. Dimensionamento dos parâmetros das respectivas cargas a utilizar nos ensaios**

Impedância de carga puramente resistiva	9.37 $\Omega$
Impedância de carga indutiva	9.37 $\Omega \angle 41.4^\circ$
Resistência de carga	7.03 $\Omega$
Coefficiente de indução da carga	0.0352 H

Aplicando as expressões (4.11) e (4.13), calculam-se os valores de potência fornecidos pelo alternador, os quais são apresentados na tabela 5.17.

**Tabela 5. 17. Cálculo das potências geradas pelo alternador de 14 polos com formato retangular**

Fator de potência		0.75	
Potência aparente monofásica	8.89 kVA	Potência aparente trifásica	26.67 kVA
Potência ativa monofásica	6.67 kW	Potência ativa trifásica	19.99 kW

## **5.4 Alternador síncrono em disco com 14 polos com base trapezoidal**

Analogamente ao que foi realizado para 12 polos, dimensiona-se nesta secção um alternador com 14 polos em cada face do disco, mas com formato de prisma trapezoidal. A área do íman será alterada como se verifica na tabela 5.18.

**Tabela 5. 18. Características dos 14 polos com formato trapezoidal a utilizar**

Diâmetro do disco		0.84 m	840 mm
Magnetos Nd-Fe-B	Base pequena	0.0635 m	63.5 mm
	Base grande	0.14124 m	141.24 mm
	Altura	0.1524 m	152.4 mm
	Espessura	0.0127 m	12.7 mm
Campo de indução magnética B		0.9 T	
Secção do magneto		0.0156012 m <sup>2</sup>	15601.2 mm <sup>2</sup>

Mais uma vez ao comparar com a secção 5.2 o valor da secção do magneto diminui.

Os parâmetros do semi-induzido, mantêm-se constantes, uma vez que o número de pares de polos não varia. Assim sendo, podem ser consultados na tabela 5.13 da secção anterior.

Aplicando as expressões (4.2) e (4.4) já descritas, encontram-se os novos valores da tabela 5.19.

**Tabela 5. 19. Valores de fluxo, força eletromotriz e velocidades obtidos para o alternador a dimensionar**

Fluxo por polo $\phi_{polo}$	0.01404 Wb	14.04 mWb	
Tensão máxima induzida por espira $E_{MAX_{espira}}$	2.47 V		
Velocidade do indutor	4 RPS	240 RPM	
Frequência de alternância magnética $f$	28 Hz	Frequência angular $\omega$	175.9 rad/s

Como se pode verificar o fluxo por polo e a força eletromotriz máxima induzida aumentaram, relativamente ao caso anterior.

Através da equação (4.5) determina-se o valor da tensão eficaz para este alternador, a observar na tabela seguinte.

**Tabela 5. 20. Cálculo dos valores teóricos esperados para o referido alternador, quando efetuados os ensaios em carga**

Tensão eficaz		465.24 V	
Número de espiras		267	
Fluxo por bobina $\phi_{bobina}$		3.749 Wb	
Corrente eficaz	15.4 A	2 semi-induzidos	30.8 A

Pelas equações (4.12), (4.15), (4.16), (4.17) e (4.18) obtêm-se os parâmetros do circuito para diferentes cargas, os quais podem ser observados na tabela 5.21.

**Tabela 5. 21. Dimensionamento dos parâmetros das respectivas cargas a utilizar nos ensaios**

Impedância de carga puramente resistiva	15.1 $\Omega$
Impedância de carga indutiva	15.1 $\Omega \angle 41.4^\circ$
Resistência de carga	11.3 $\Omega$
Coefficiente de indução da carga	0.0568 H

Determina-se a potência fornecida pelo alternador, recorrendo às expressões (4.11) e (4.13), sendo apresentados na tabela 5.22.

**Tabela 5. 22. Cálculo das potências geradas pelo alternador de 14 polos com formato trapezoidal**

Fator de potência		0.75	
Potência aparente monofásica	14.33 kVA	Potência aparente trifásica	42.99 kVA
Potência ativa monofásica	10.75 kW	Potência ativa trifásica	32.24 kW

Nesta fase, pode-se afirmar apenas que os alternadores constituídos por magnetos com formato de prisma trapezoidal são mais eficientes que os outros, contudo nada é conclusivo sem serem realizadas simulações que indiquem qual o tipo de alternador que tem mais perdas.

## 5.5 Alternador síncrono em disco com 16 polos com base retangular

Experimentou-se colocar ainda mais magnetos de cada lado de forma perceber quais as alterações provocadas. Assim sendo diminui-se a largura do íman utilizado em 5.3, a observar na tabela 5.23.

**Tabela 5. 23. Características dos 16 polos com formato retangular a utilizar**

Diâmetro do disco		0.84 m	840 mm
Magnetos Nd-Fe-B	Comprimento	0.1524 m	152.4 mm
	Largura	0.0508 m	50.8 mm
	Espessura	0.0127 m	12.7 mm
Campo de indução magnética B		0.9 T	
Secção do magneto		0.00774192 m <sup>2</sup>	7741.92 mm <sup>2</sup>

Comparando com os valores apresentados na tabela 5.23 com os obtidos nas secções anteriores, mais uma vez se verifica que a secção do íman diminui o que influenciará diversos parâmetros a observar de seguida.

Os parâmetros do semi-induzido, os quais são expostos na tabela 5.24, voltam a ser alterados. O valor das secções é calculado com base nas (4.7) e (4.8).

**Tabela 5. 24. Dimensões do semi-estator para um enrolamento de 16 bobinas**

Número de pares de polos $p$		7	
Número de cavas	48	2 semi-induzidos	96
Largura da cava		0.02 m	20 mm
Altura da cava		0.04 m	40 mm
Restante do estator		0.05 m	50 mm
Fator de empacotamento (1 camada)		50 %	
Secção útil da cava		0.0004 m <sup>2</sup>	400 mm <sup>2</sup>
Secção útil de cada camada		0.0002 m <sup>2</sup>	200 mm <sup>2</sup>

Aplicando as expressões (4.2), (4.3), (4.4) e (4.14), apresentadas no capítulo 4, encontrou-se os valores da tabela 5.25.

**Tabela 5. 25. Valores de fluxo, força eletromotriz e velocidades obtidos para o alternador a dimensionar**

Fluxo por polo $\phi_{polo}$	0.00697 Wb	6.97 mWb	
Tensão máxima induzida por espira $E_{MAX_{espira}}$	1.40 V		
Velocidade do indutor	4 RPS	240 RPM	
Frequência de alternância magnética $f$	32 Hz	Frequência angular $\omega$	201.1 rad/s

Com (4.5), (4.6) e (4.9), determinam-se os valores da tabela 5.26, estando a ser considerados nesta situação 16 magnetos permanentes com base retangular em cada face do disco.

**Tabela 5. 26. Cálculo dos valores teóricos esperados para o referido alternador, quando efetuados os ensaios em carga**

Tensão eficaz		208.48 V	
Número de espiras		211	
Fluxo por bobina $\phi_{bobina}$		1.471 Wb	
Corrente eficaz	17.6 A	2 semi-induzidos	35.2 A

Os parâmetros do circuito para diferentes cargas podem ser observados na tabela 5.27, sendo obtidos pelas equações (4.12), (4.15), (4.16), (4.17) e (4.18).

**Tabela 5. 27. Dimensionamento dos parâmetros das respectivas cargas a utilizar nos ensaios**

Impedância de carga puramente resistiva	5.92 $\Omega$
Impedância de carga indutiva	5.92 $\Omega \angle 41.4^\circ$
Resistência de carga	4.44 $\Omega$
Coefficiente de indução da carga	0.0195 H

Por fim determinam-se os valores de potência fornecidos pelo alternador, os quais foram encontrados recorrendo às expressões (4.11) e (4.13), sendo apresentados na tabela 5.28.

**Tabela 5. 28. Cálculo das potências geradas pelo alternador de 16 polos com formato retangular**

Fator de potência		0.75	
Potência aparente monofásica	7.34 kVA	Potência aparente trifásica	22.02 kVA
Potência ativa monofásica	5.50 kW	Potência ativa trifásica	16.51 kW

## 5.6 Alternador síncrono em disco com 16 polos com base trapezoidal

Por último, dimensiona-se o alternador com 32 magnetos permanentes com formato de prisma trapezoidal, mais uma vez a secção do íman será afetada, como se observa na tabela seguinte.

**Tabela 5. 29. Características dos 16 polos com formato trapezoidal a utilizar**

Diâmetro do disco		0.84 m	840 mm
Magnetos Nd-Fe-B	Base pequena	0.051 m	51 mm
	Base grande	0.125 m	125 mm
	Altura	0.1524 m	152.4 mm
	Espessura	0.0127 m	12.7 mm
Campo de indução magnética B		0.9 T	
Secção do magneto		$0.0134112 m^2$	$13411.2 mm^2$

Conforme se aumenta o número de pares de polos da máquina a sua secção diminui, fazendo com que o fluxo por polo e a força eletromotriz também diminuam, tabela 5.30.

Os parâmetros do semi-induzido, mantêm-se constantes, uma vez que o número de pares de polos não varia. Assim sendo, podem ser consultados na tabela 5.24 da secção anterior.

Aplicando as expressões (4.2) e (4.4) previamente apresentadas, encontrou-se os valores da tabela 5.30.

**Tabela 5. 30. Valores de fluxo, força eletromotriz e velocidades obtidos para o alternador a dimensionar**

Fluxo por polo $\phi_{polo}$	0.01207 Wb	12.07 mWb	
Tensão máxima induzida por espira $E_{MAX_{espira}}$	2.43 V		
Velocidade do indutor	4 RPS	240 RPM	
Frequência de alternância magnética $f$	32 Hz	Frequência angular $\omega$	201.1 rad/s

Através da equação (4.5), determina-se o valor da tensão eficaz para este alternador, a observar na tabela seguinte.

**Tabela 5. 31. Cálculo dos valores teóricos esperados para o referido alternador, quando efetuados os ensaios em carga**

Tensão eficaz		361.14 V	
Número de espiras		211	
Fluxo por bobina $\phi_{bobina}$		2.547 Wb	
Corrente eficaz	17.6 A	2 semi-induzidos	35.2 A

Pelas equações (4.12), (4.15), (4.16), (4.17) e (4.18), obtêm-se os parâmetros do circuito para diferentes cargas, os quais podem ser observados na tabela 5.32.

**Tabela 5. 32. Dimensionamento dos parâmetros das respectivas cargas a utilizar nos ensaios**

Impedância de carga puramente resistiva	10.26 $\Omega$
Impedância de carga indutiva	10.26 $\Omega \angle 41.4^\circ$
Resistência de carga	7.69 $\Omega$
Coeficiente de indução da carga	0.0338 H

Para terminar, determina-se a potência fornecida pelo alternador, recorrendo às expressões (4.11) e (4.13), sendo apresentados na tabela 5.33.

**Tabela 5. 33. Cálculo das potências geradas pelo alternador de 16 polos com formato trapezoidal**

Fator de potência		0.75	
Potência aparente monofásica	12.71 kVA	Potência aparente trifásica	38.14 kVA
Potência ativa monofásica	9.53 kW	Potência ativa trifásica	28.60 kW

Na tabela 5.34 encontram-se sintetizados os valores obtidos para os seis alternadores dimensionados, isto é, os valores de força eletromotriz, fluxo ligado, corrente, tensão e potência ativa, que sendo expostos num único quadro facilita a comparação entre os alternadores estudados.

**Tabela 5. 34. Quadro síntese dos valores obtidos nos dimensionamentos**

Número de polos	Base retangular			Base trapezoidal		
	12	14	16	12	14	16
Fluxo Ligado	3.438 Wb	2.326 Wb	1.471 Wb	5.438 Wb	3.749 Wb	2.547 Wb
F. e. m. induzida	366.47 V	288.59 V	208.48 V	579.44 V	465.24 V	361.14 V
Corrente	26.4 A	30.8 A	35.2 A	26.4 A	30.8 A	35.2 A
Tensão	366.47 V	288.59 V	208.48 V	579.44 V	465.24 V	361.14 V
Potência Ativa	7256.02 W	6666.47 W	5503.83 W	1147299 W	10747.19 W	9534.19 W

Através da análise teórica destas seis máquinas, é fácil de notar que os alternadores constituídos por magnetos permanentes com base trapezoidal fornecem mais potência e são mais eficazes que os constituídos por polos de base retangular.

Conclui-se também que quanto maior a área dos magnetos melhores são os resultados de potência fornecida, contudo será necessário existir uma comparação com resultados experimentais, porque existem perdas no material, tanto no ferro como no entreferro, que não podem ser evitadas.

Verificou-se que quanto maior for o número de polos maior será o aumento de frequência, mesmo assim não compensa a diminuição de fluxo causada pela diminuição da secção dos magnetos.

No próximo capítulo encontram-se apresentadas simulações do funcionamento da máquina correspondentes aos dimensionamentos apresentados em 5.1, 5.2, 5.4 e 5.6.

# 6 Simulação e análise de resultados

Após o dimensionamento, procede-se à simulação dos alternadores. Esta análise será feita através de um programa de elementos finitos, que permite simular o funcionamento da máquina à velocidade pretendida. Como resposta, o programa permite visualizar gráficos onde se encontram representados os valores obtidos para os parâmetros principais do alternador.

O capítulo encontra-se dividido em quatro partes, onde na primeira são analisados quatro alternadores de forma a verificar qual o mais eficiente, seguindo-se de uma análise espectral. Na continuação, expõe-se o alternador selecionado fazendo alterações no mesmo de forma a obter mais potência fornecida. E por último apresenta-se o alternador em regime trifásico, demonstrando como pode ser realizado o enrolamento.

Ao longo do capítulo, será usado de grosso modo o termo “ensaios” para expressar simulações numéricas de casos de funcionamento, uma vez que não se tratam de ensaios laboratoriais reais.

## 6.1 Regime monofásico

Teoricamente foi verificado que existem geometrias mais eficientes, como tal, de seguida encontra-se a análise dessas mesmas. Para cada geometria são apresentadas simulações de três situações, em vazio, onde a corrente de entrada do circuito é nula, em carga puramente resistiva, sendo adicionada uma resistência aos terminais do alternador com o respetivo valor dimensionado, e em carga indutiva, onde a carga que se encontra aos terminais é constituída por uma bobina e uma resistência com valores também previamente dimensionados.

Nas simulações que se seguem, os alternadores encontram-se a funcionar em regime monofásico, isto é, o enrolamento é apenas constituído por uma fase em ambos os semi-induzidos.

### 6.1.1 Alternador síncrono em disco com 12 polos com base retangular

Inicialmente admite-se que os magnetos assumem a forma semelhante a um paralelepípedo, encontrando-se dispostos com sentido alternado, ou seja, o campo magnético dos magnetos a vermelho toma sentido norte e o campo magnético dos magnetos a azul toma sentido sul.

Na figura 6.1, encontra-se representada a imagem do alternador, onde se pode visualizar a sua geometria. Nesta secção consideram-se doze ímanes de cada lado do disco, correspondendo estes a um enrolamento de doze bobinas em casa semi-induzido. As dimensões da máquina foram referidas nos capítulos anteriores.

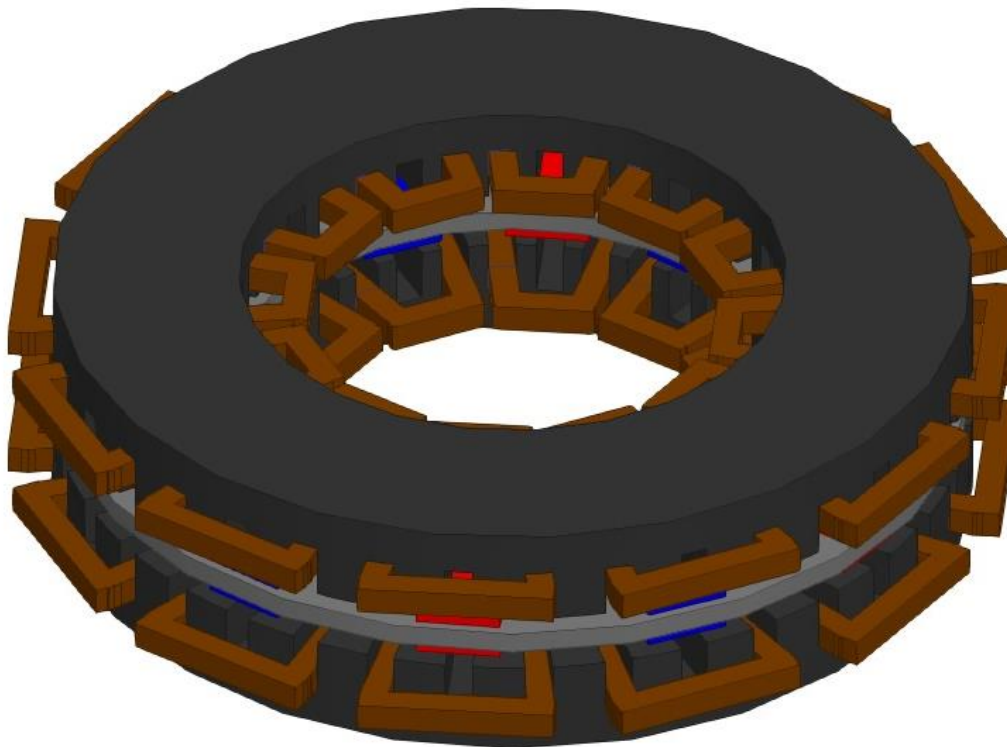
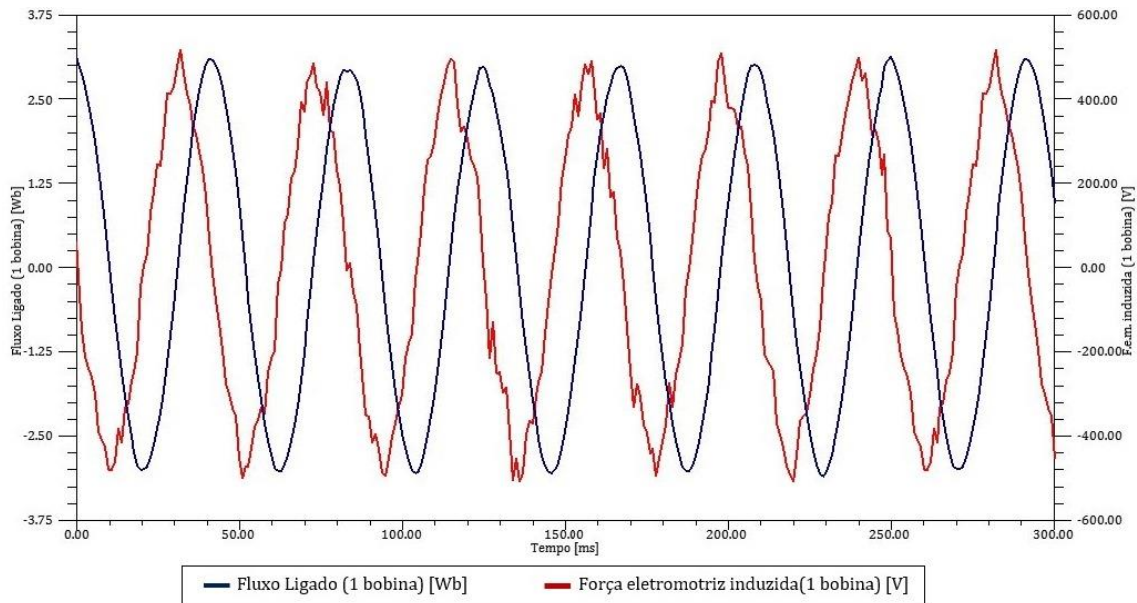


Figura 6. 1. Ilustração do alternador de 12 polos com formato retangular.

#### 6.1.1.1 Funcionamento em vazio

Após se iniciar a simulação deste caso retiram-se os valores correspondentes ao fluxo ligado e à força eletromotriz induzida numa bobina, ao longo de 300 milissegundos de funcionamento do alternador.

No gráfico da figura 6.2, estão representados apenas alguns pontos que unidos se aproximam de sinusoides. De forma a se tornar mais preciso, a análise tem que ser realizada com um maior número de pontos, o que nesta fase não é relevante, sendo que os gráficos obtidos para os alternadores a comparar têm o mesmo espaçamento de tempo.



**Figura 6. 2. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em vazio.**

Observando a figura anterior é de notar que estando o alternador a funcionar a quatro rotações por segundo, uma rotação completa dá-se ao fim de duzentos e cinquenta milissegundos, o que faz com que durante este período de tempo se visualizem seis arcadas positivas e seis arcadas negativas que correspondem aos doze polos de sentido alternado.

Os valores de fluxo ligado e a força eletromotriz induzida são retirados apenas numa bobina, porque encontrando-se as vinte e quatro ligadas em paralelo são os mesmos para todas. Ao longo de uma rotação do disco passam por cada bobina doze magnetos permanentes, o que faz com que a cada passo polar os valores obtidos sejam máximos diminuindo até inverter a polaridade.

O valor máximo para o fluxo seria de 3.44 Wb, dimensionado assumindo como densidade de fluxo magnético 0.9 T, sendo que na prática este valor se encontra ligeiramente inferior, o fluxo ligado máximo obtido também é inferior rondando os 3.20 Wb.

Relativamente à força eletromotriz induzida, esta é obtida derivando o fluxo ligado, sendo obtido para valor máximo aproximadamente 500 V, superior ao esperado, uma vez que estando o alternador a ser ensaiado em vazio não existe qualquer queda de tensão.

Na figura 6.3, observa-se o diagrama de densidade de fluxo magnético. Como se pode verificar nos ímãs permanentes e nos enrolamentos, esta encontra-se próxima da unidade, tomando o valor de aproximadamente 0.8 T. Nas restantes peças, no disco de ferro e nos semi-induzidos de ferro chapeado, é bastante inferior.

Embora a figura seguinte possa criar ilusão dos valores de densidade de fluxo magnético no disco, é de notar que nos locais onde os ímãs se encontram cravados a densidade de fluxo se aproxima da unidade, uma vez que a linha de campo magnético se fecha atravessando o disco.

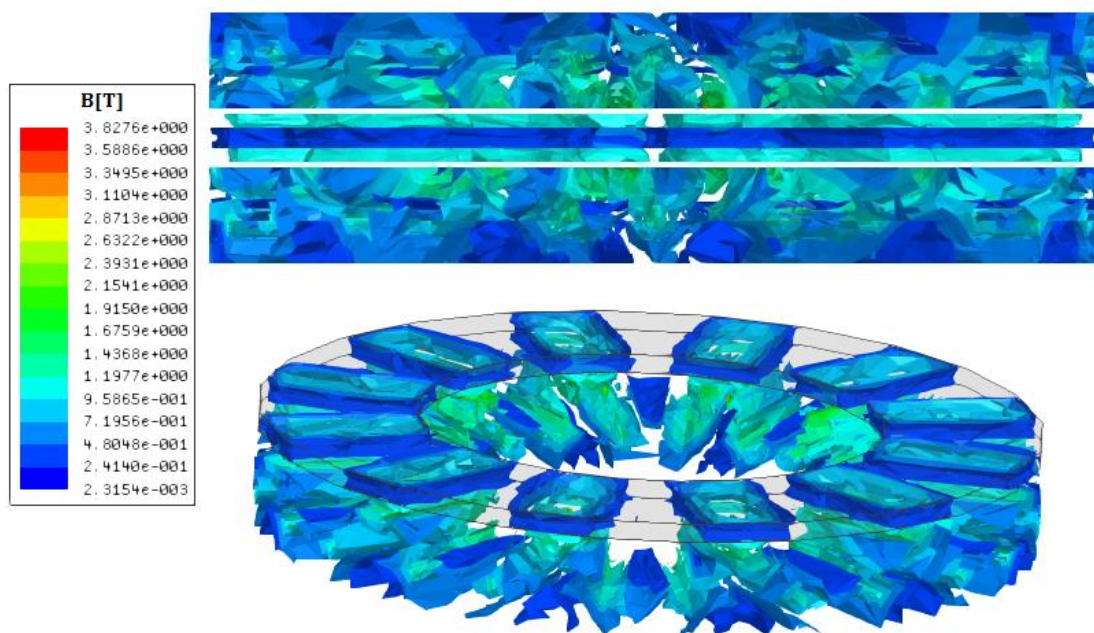
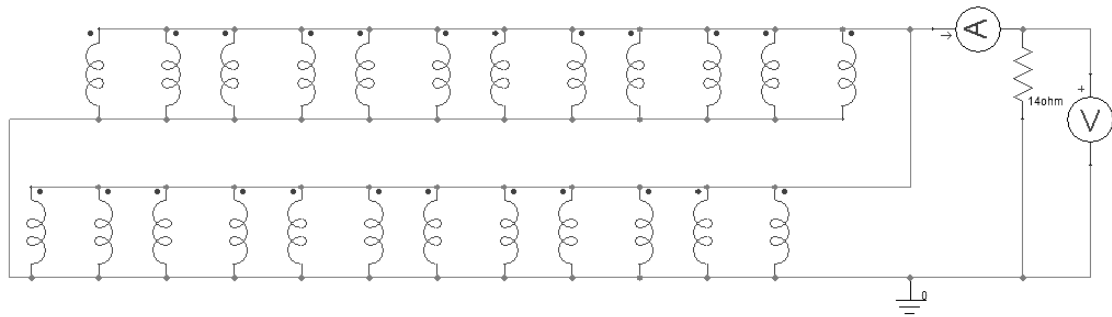


Figura 6. 3. Figura ilustrativa da densidade de fluxo magnético B.

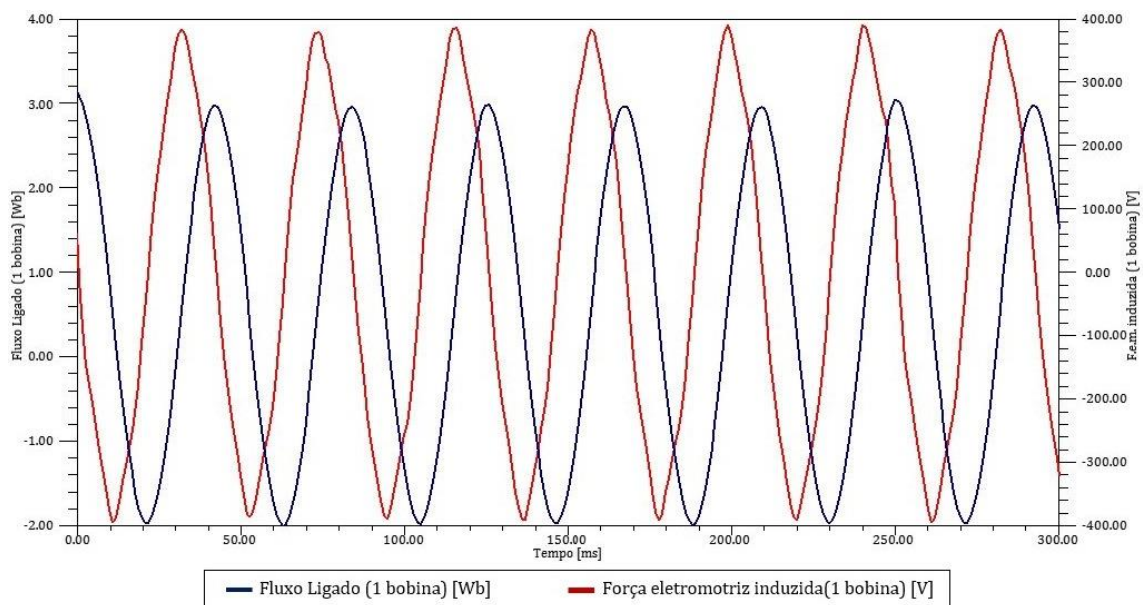
### 6.1.1.2 Funcionamento em carga resistiva pura

Quando se processa a simulação em carga puramente resistiva, aos terminais do circuito elétrico que representa os enrolamentos, liga-se uma resistência elétrica de  $14 \Omega$ , valor dimensionado através dos valores de tensão e corrente. O circuito pode ser visualizado na figura seguinte.



**Figura 6. 4. Circuito elétrico do enrolamento, com uma carga puramente resistiva de 14  $\Omega$ .**

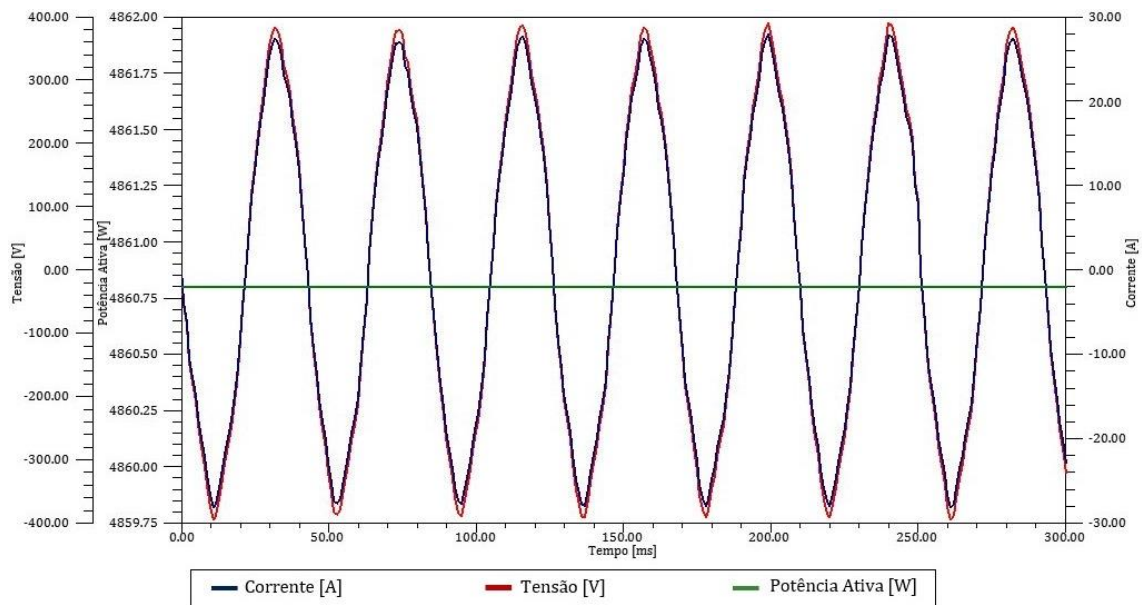
Após se colocar a máquina em funcionamento, agora sendo considerado este ensaio, obtém-se novos valores para o fluxo e para a força eletromotriz, a observar na figura 6.5.



**Figura 6. 5. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga puramente resistiva de 14  $\Omega$ .**

Impondo aos terminais uma carga, era de esperar que os valores a obter fossem inferiores aos observados na figura 6.2, verifica-se que o fluxo ligado máximo é de aproximadamente 3 Wb e que a força eletromotriz máxima induzida é de 370 V, valores aceitáveis, comparando com os dimensionados.

Sendo realizada simulação em carga resistiva, existe condições para visualizar os valores de potência ativa gerada pelo alternador, de tensão e de corrente na carga, a observar no gráfico da figura 6.6.



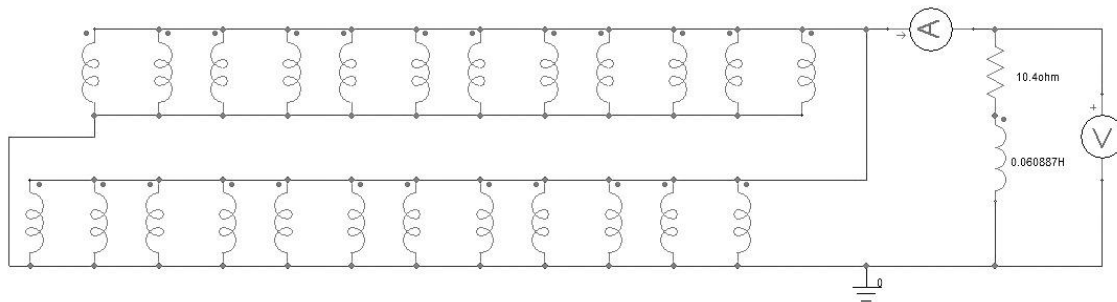
**Figura 6. 6. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga puramente resistiva de 14 Ω.**

Os valores encontrados para a tensão e corrente estão de acordo com o esperado teoricamente e como se pode verificar o ângulo de defasagem entre as curvas é nulo, uma vez que o fator de potência a considerar é unitário devido à carga ser puramente resistiva.

A potência fornecida encontra-se bastante inferior, cerca de cinquenta por cento, tendo sido dimensionado 10 kW e sendo obtido aproximadamente 5 kW.

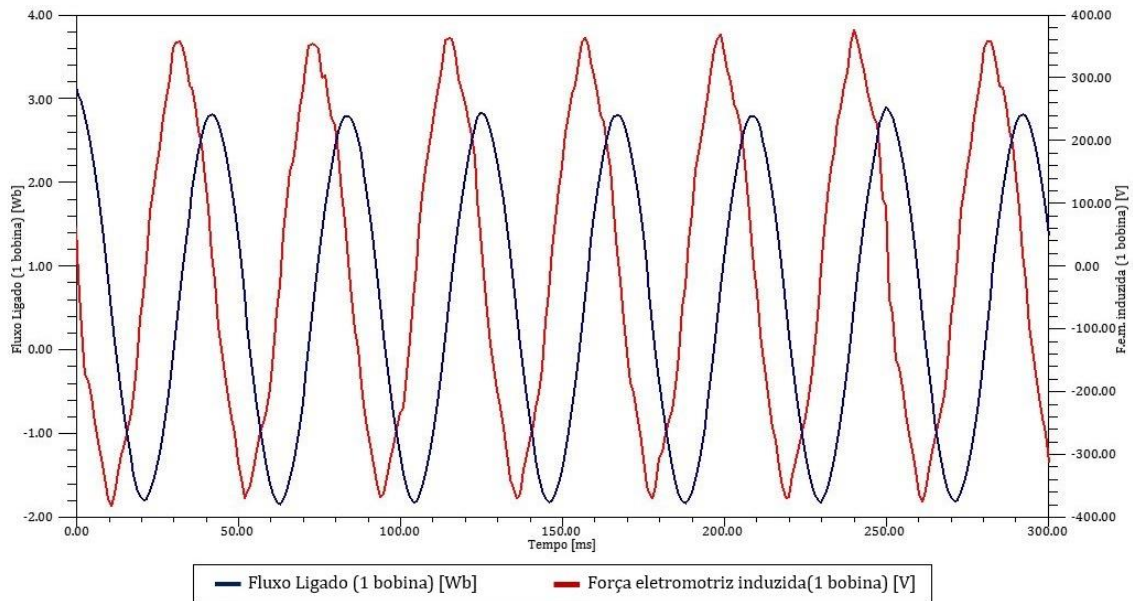
### 6.1.1.3 Funcionamento em carga indutiva

Para terminar a análise deste alternador realiza também uma simulação em carga indutiva para se verificar que tipos de perdas ocorrem quando alterada a carga. Assim sendo, altera-se o circuito da figura 6.4, sendo que a carga toma um novo valor complexo de  $14 \Omega \angle 41^\circ$ , a observar na figura 6.7.



**Figura 6. 7. Circuito elétrico do enrolamento, com uma carga indutiva de  $14 \Omega \angle 41^\circ$ .**

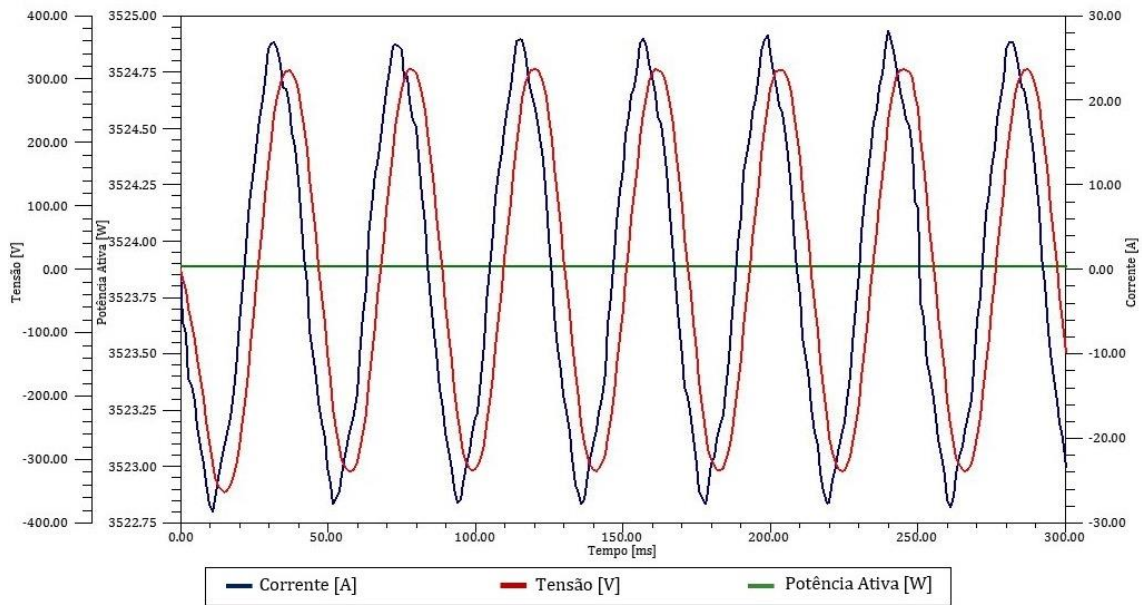
A próxima figura apresenta os resultados obtidos para o fluxo ligado e para a força eletromotriz obtidos nesta simulação.



**Figura 6. 8. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga indutiva de  $14 \Omega$  a  $41^\circ$ .**

Pela figura anterior observa-se que os valores voltam a diminuir ligeiramente, sendo isto causado pelo tipo de carga a utilizar, ou seja, neste caso para além da componente ativa, também existirá uma componente reativa, que influencia nas trocas de energia. Será necessário verificar os valores de potência ativa, tensão e corrente a obter nesta simulação para se poder concluir sobre a eficiência do alternador.

Na figura 6.9, estão expostas as curvas de tensão, corrente e potência ativa correspondentes ao funcionamento em carga indutiva do alternador de doze magnetos permanentes com base retangular em cada face do disco.



**Figura 6. 9. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga indutiva de  $14 \Omega$  a  $41^\circ$ .**

É de notar que as ondas de tensão e de corrente se encontram desfasadas, devido a neste ensaio se considerar um fator de potência de 0.75, correspondente a um ângulo de carga de  $41^\circ$ . Nota-se também que o valor da tensão desceu para 320 V, abaixo do esperado, o que terá efeito nos valores de potência.

Como já foi referido, estando a ser considerado um fator de potência diferente da unidade, a potência ativa a obter será diferente da aparente. Na figura 6.9, observa-se que este valor se aproxima dos 3.5 kW, sendo esperado 7 kW, mais uma vez existiu uma discrepância de cinquenta por cento nos valores.

### **6.1.2 Alternador síncrono em disco com 12 polos com base trapezoidal**

Alterando a geometria dos magnetos permanente utilizados no alternador anterior, prevê-se que encontrem valores mais favoráveis já que área dos ímanes é superior.

Nesta secção utiliza-se o mesmo número de magnetos, mas com a particularidade de se assemelharem a prismas trapezoidais. Na figura 6.10, observam-se as alterações feitas aos magnetos.

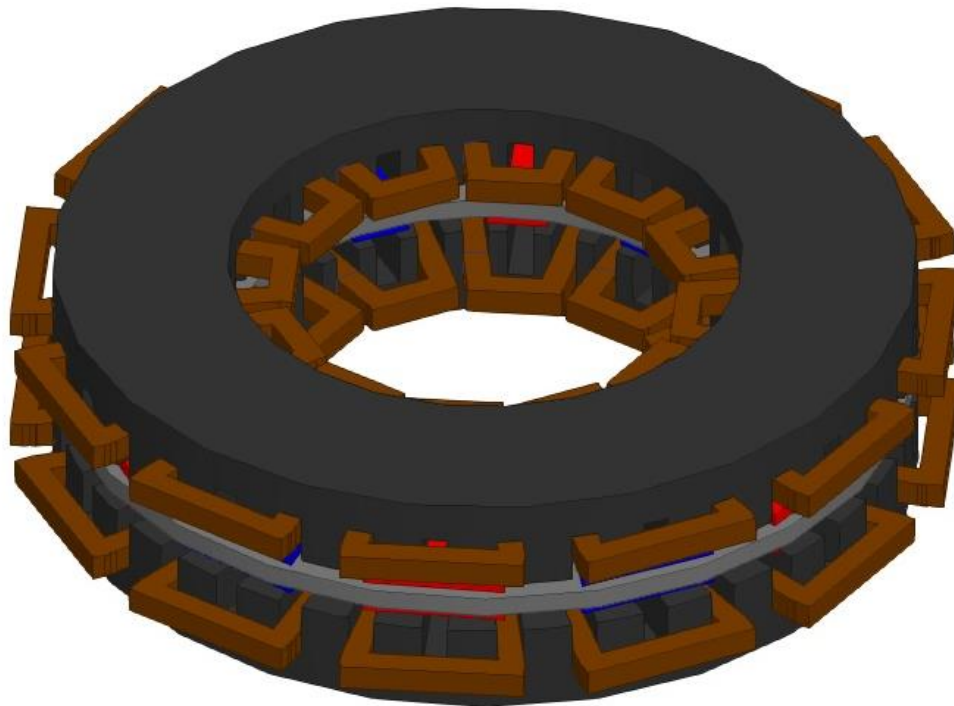


Figura 6. 10. Ilustração do alternador de 12 polos com formato trapezoidal.

### 6.1.2.1 Funcionamento em vazio

De forma análoga, encontram-se os valores da força eletromotriz induzida e do fluxo ligado para uma bobina, quando ensaiada a máquina em vazio. Estes encontram-se apresentados na figura 6.11.

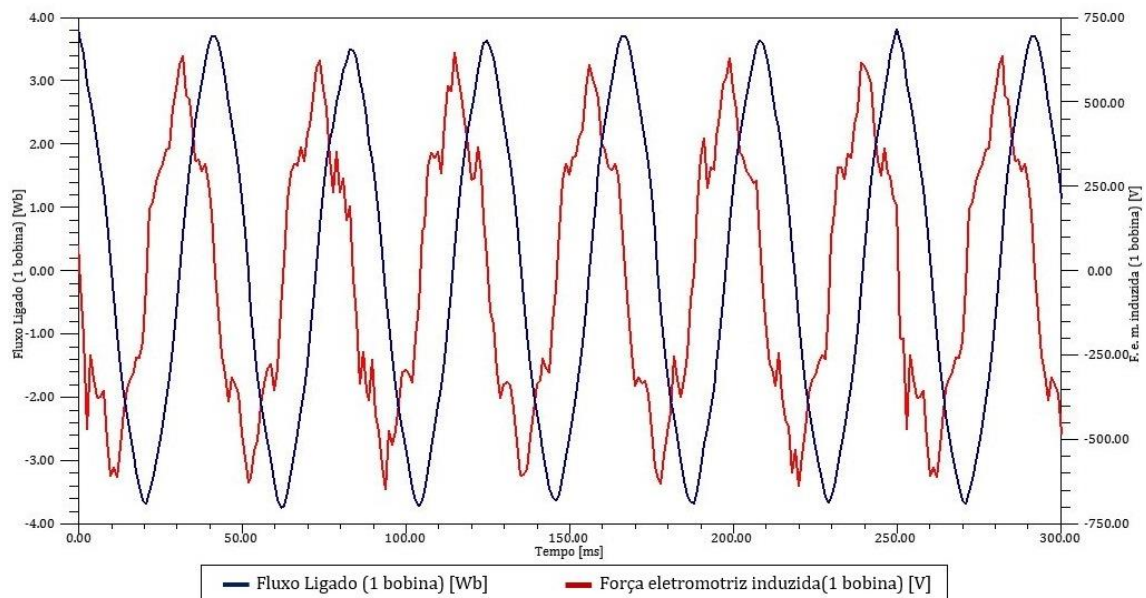


Figura 6. 11. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em vazio.

Analisando a curva da força eletromotriz induzida esta encontra-se superior ao valor máximo dimensionada, o que seria de esperar sendo o ensaio em vazio.

É de notar que a curva a vermelho possui algum ruído numérico, sendo este originado pelo facto da força eletromotriz induzida ser obtida derivando o fluxo ligado ponto a ponto, encontrando-se alguns desses pontos desalinhados. Este aspeto influencia os resultados seguintes, novamente devido às curvas obtidas não se aproximarem de sinusoides perfeitas.

O valor máximo para o fluxo ligado é agora de 3.8 Wb, superior ao obtido para o alternador anterior devido à área dos magnetos, mas inferior ao dimensionado, porque a densidade de fluxo magnético admitida não é a real, o que se pode constatar na figura 6.12.

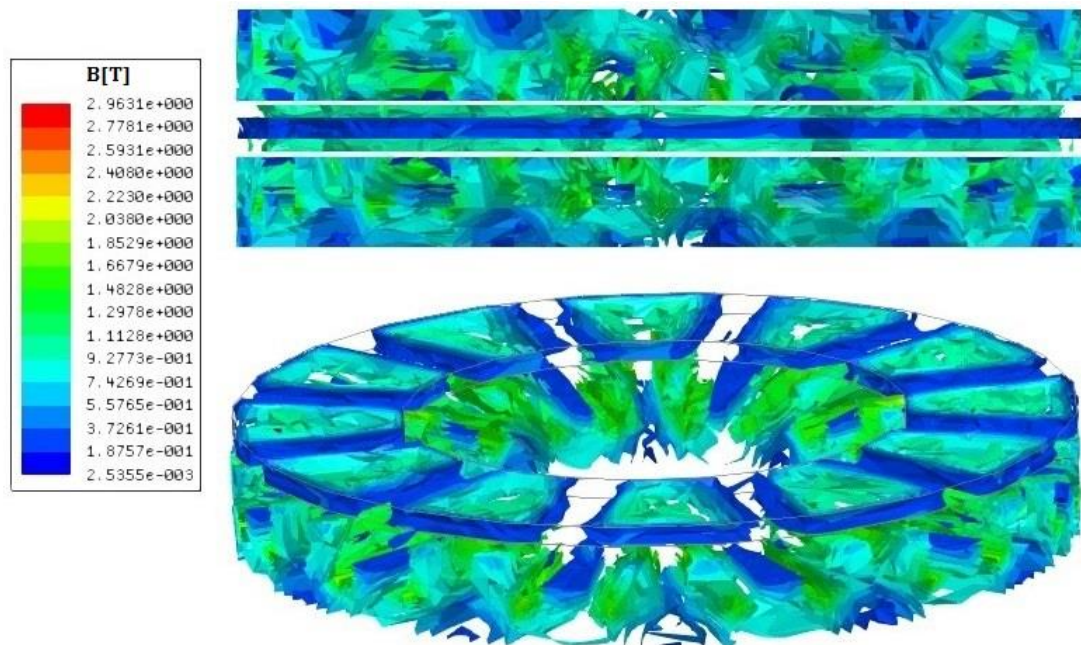
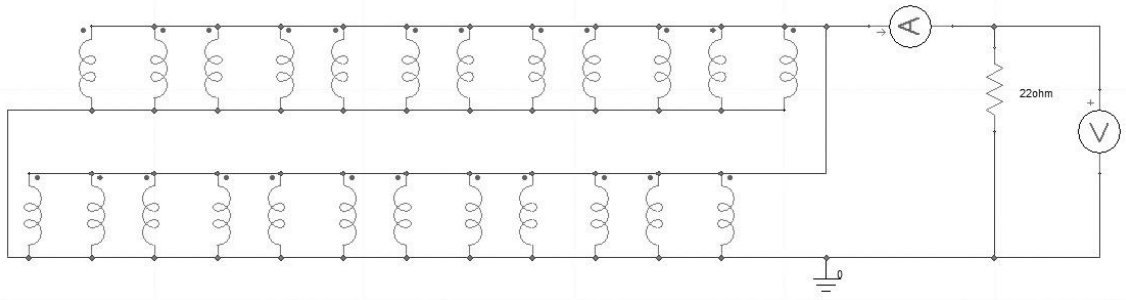


Figura 6. 12. Figura ilustrativa da densidade de fluxo magnético B.

Com base na figura anterior, afirma-se novamente que a densidade de fluxo magnético nos ímanes e nas bobinas é superior às restantes peças, devido ao fluxo os atravessar, rondando novamente os 0.8 T. Onde o disco é atravessado pelo campo magnético a densidade de fluxo é semelhante à dos magnetos.

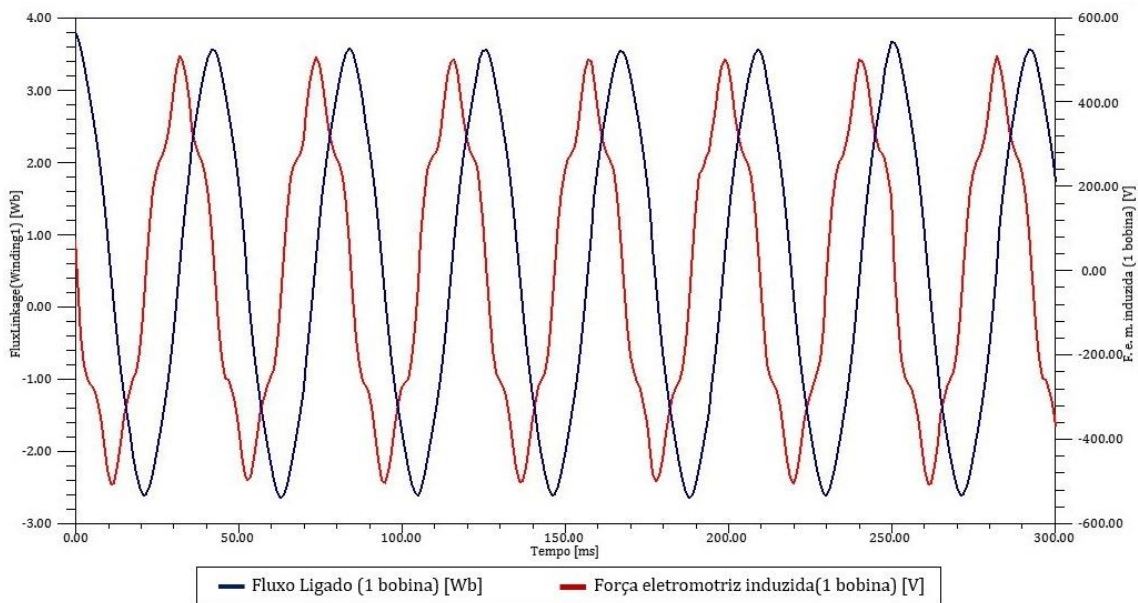
### 6.1.2.2 Funcionamento em carga resistiva pura

O número de enrolamentos a considerar para esta simulação é igual ao considerado no alternador anterior, sendo a carga resistiva diferente. Esta toma um valor superior, figura 6.13, uma vez que a tensão induzida aumentou e a corrente admissível se manteve igual.



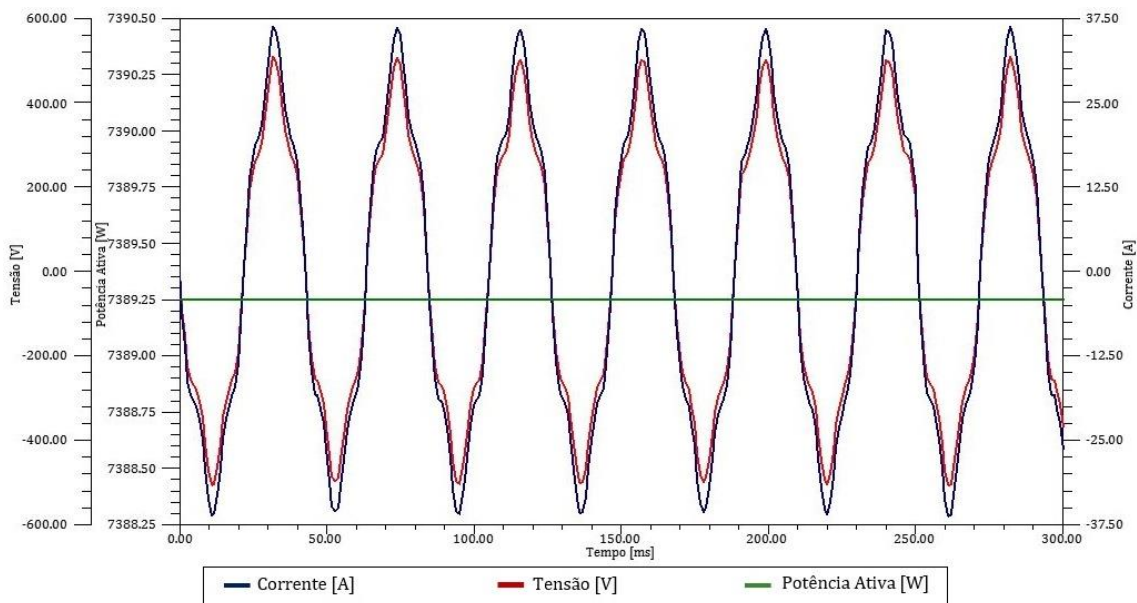
**Figura 6. 13. Circuito elétrico do enrolamento, com uma carga puramente resistiva de 22  $\Omega$ .**

Tendo como base os valores determinados teoricamente, espera-se que os valores de fluxo e de força eletromotriz induzida sejam superiores aos que foram obtidos para a máquina anterior, uma vez que estes dependem da secção dos magnetos a considerar. Valores apresentados na figura 6.14.



**Figura 6. 14. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga puramente resistiva de 22  $\Omega$ .**

De forma semelhante ao alternador anterior, os valores diminuem de ensaio para ensaio e pela análise da figura 6.14, verifica-se essa queda. A força eletromotriz encontra-se ligeiramente inferior ao valor dimensionado, 580 V, apresentando uns intensificados abalos nas arcadas. Sendo que a curva a vermelho é originada pela derivada da curva azul, esta última não sendo arredondada mas sim pontiaguda, causa efeitos na anterior.



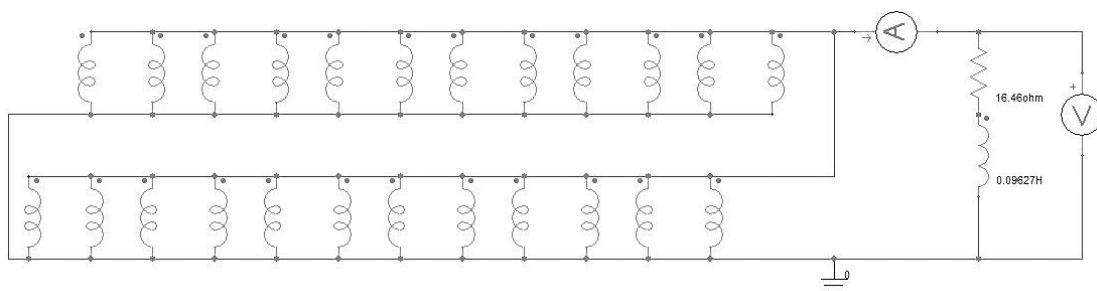
**Figura 6. 15. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga puramente resistiva de  $22 \Omega$ .**

A potência aumentou comparativamente à obtida na figura 6.6, mas encontra-se inferior à dimensionada devido a esta ser obtida pelos valores das curvas de tensão e corrente, as quais têm abalos significativos, que afetam os resultados.

Para se poderem comparar as eficiências dos alternadores, apresentam-se de seguida os valores obtidos para o ensaio em carga indutiva do alternador com doze magnetos permanentes com base trapezoidal.

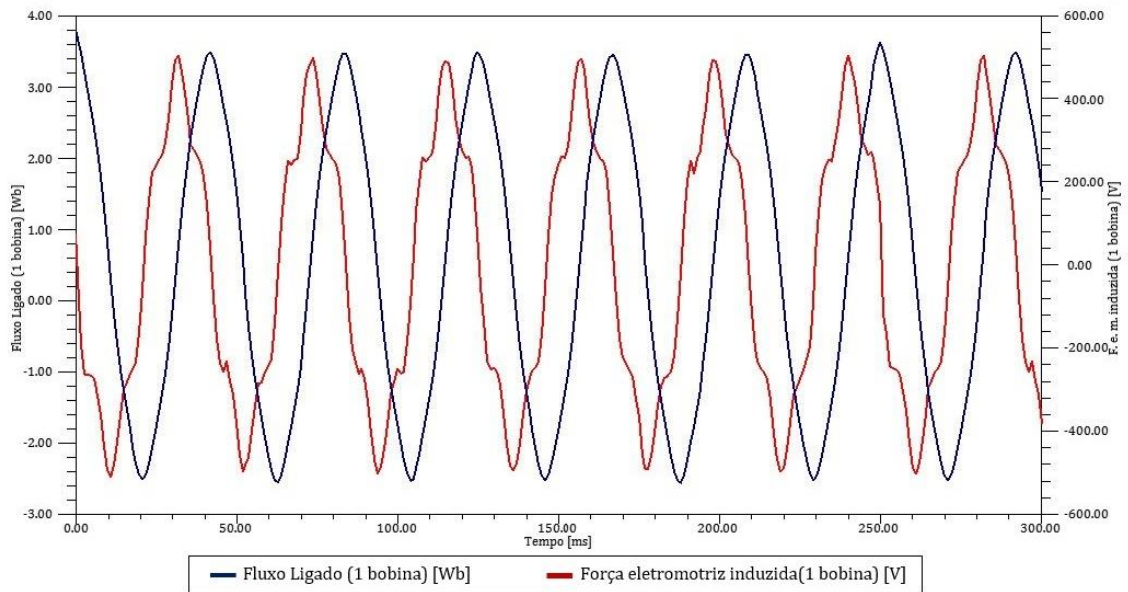
### 6.1.2.3 Funcionamento em carga indutiva

Esta simulação processa-se de força semelhante sendo alterada a carga, os parâmetros desta atingem valores superiores, previamente dimensionados, figura 6.16.



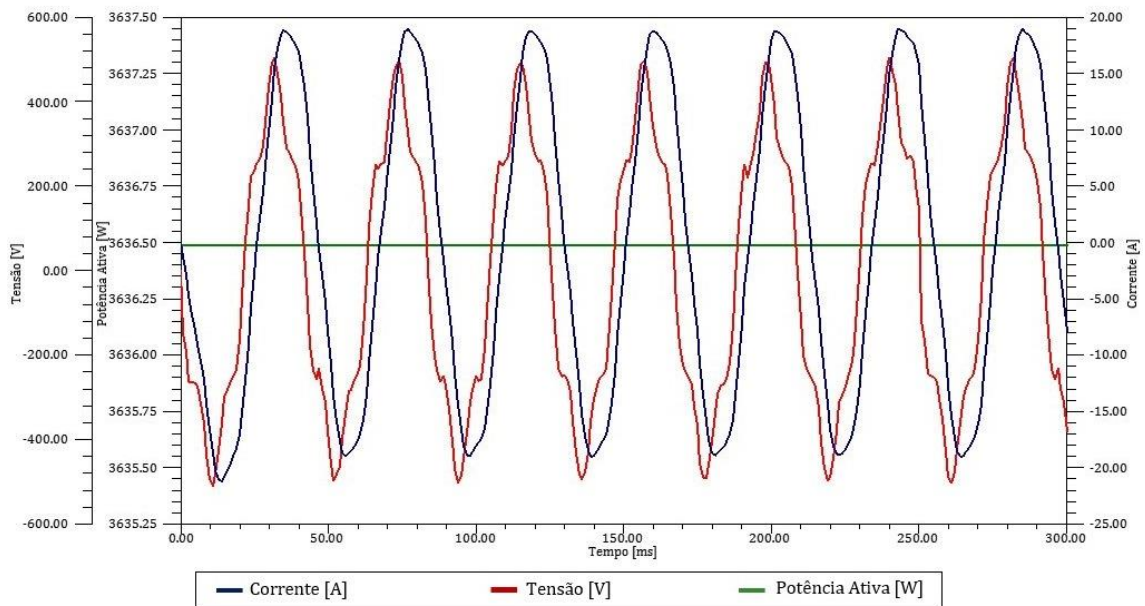
**Figura 6. 16. Circuito elétrico do enrolamento, com uma carga indutiva de  $22 \Omega$   $\angle 41^\circ$ .**

Espera-se uma queda nos valores de fluxo ligado e de força eletromotriz relativamente ao ensaio anterior, mas superiores quando comparados com a máquina de 12 polos com base retangular.



**Figura 6. 17. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após funcionamento em carga indutiva de  $22 \Omega$  a  $41^\circ$ .**

Os valores diminuem quando colocada a carga indutiva aos terminais do alternador não deixando de ser aceitáveis, já que se encontram próximos dos dimensionados.



**Figura 6. 18. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga indutiva de  $22 \Omega$  a  $41^\circ$ .**

É de salientar que em todos os gráficos obtidos anteriormente se verifica que os alternadores em estudo têm doze magnetos em cada face do disco, sendo visualizadas doze arcadas correspondentes aos passos polares.

As curvas de tensão e corrente encontram-se mais uma vez desfasadas de  $41^\circ$ , devido ao ângulo da carga a considerar, o que não acontece quando a carga é puramente resistiva, onde esse ângulo é nulo.

A tensão é inferior à encontrada teoricamente, o que pode ser justificado pela queda de tensão magnética que existe no entreferro, o qual será revisto posteriormente. É de notar que o fluxo ligado também diminuiu. O valor de potência ativa volta a ser bastante inferior ao dimensionado devido ao formato das curvas ou mesmo por causa das perdas existentes.

Nesta situação, pode-se concluir que este alternador é mais rentável que o simulado na secção anterior já que os valores de potência fornecidos pelo mesmo são superiores. É ainda de notar que em ambas as máquinas os valores se encontrem aquém dos esperados, o que será revisto quando o alternador selecionado for analisado pormenorizadamente.

Grosso modo, pode-se afirmar que conforme se aumenta a área de cada magneto, melhor rendimento tem máquina e mais potência será fornecida pelo alternador.

### **6.1.3 Alternador síncrono em disco com 14 polos com base trapezoidal**

Uma vez verificado que a mudança de geometria dos magnetos influencia positivamente na eficiência do alternador, nesta secção analisa-se quais as alterações provocadas pelo aumento do número de magnetos.

É de notar que as dimensões do entreferro e a espessura do disco se mantêm constantes para todas as geometrias, sendo apenas alteradas as dimensões dos semi-induzidos e os polos.

Consideram-se 14 magnetos de formato trapezoidal em cada face do disco, correspondendo agora a 14 bobinas em cada semi-induzido, para isso foi necessário aumentar o número de cavas de cada semi-induzido de trinta e seis para quarenta e duas, como se observa na figura 6.19.

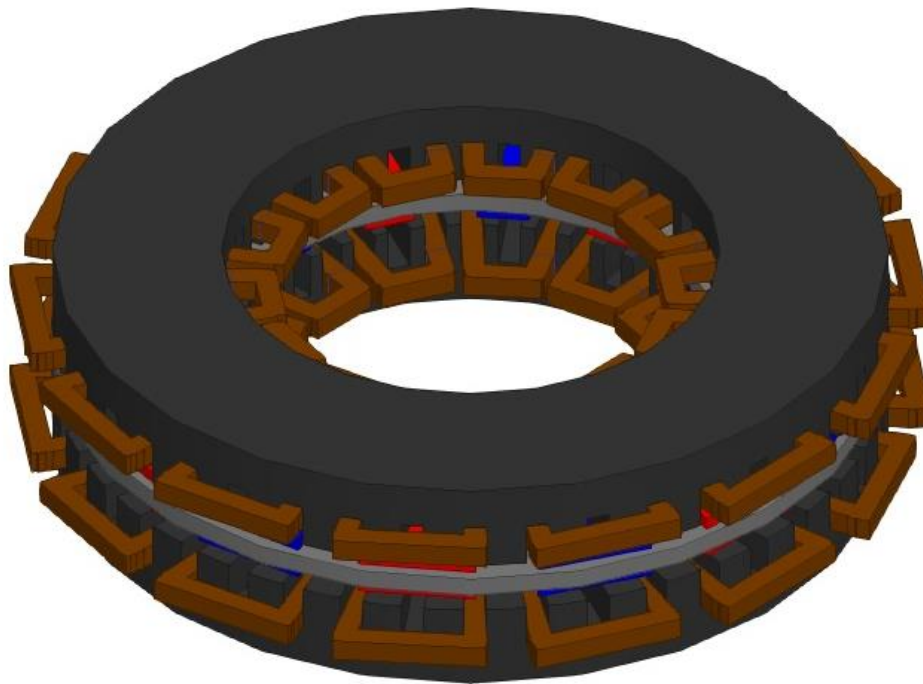


Figura 6. 19. Ilustração do alternador de 14 polos com formato trapezoidal.

### 6.1.3.1 Funcionamento em vazio

Na figura seguinte apresentam-se os valores obtidos na simulação em vazio deste alternador.

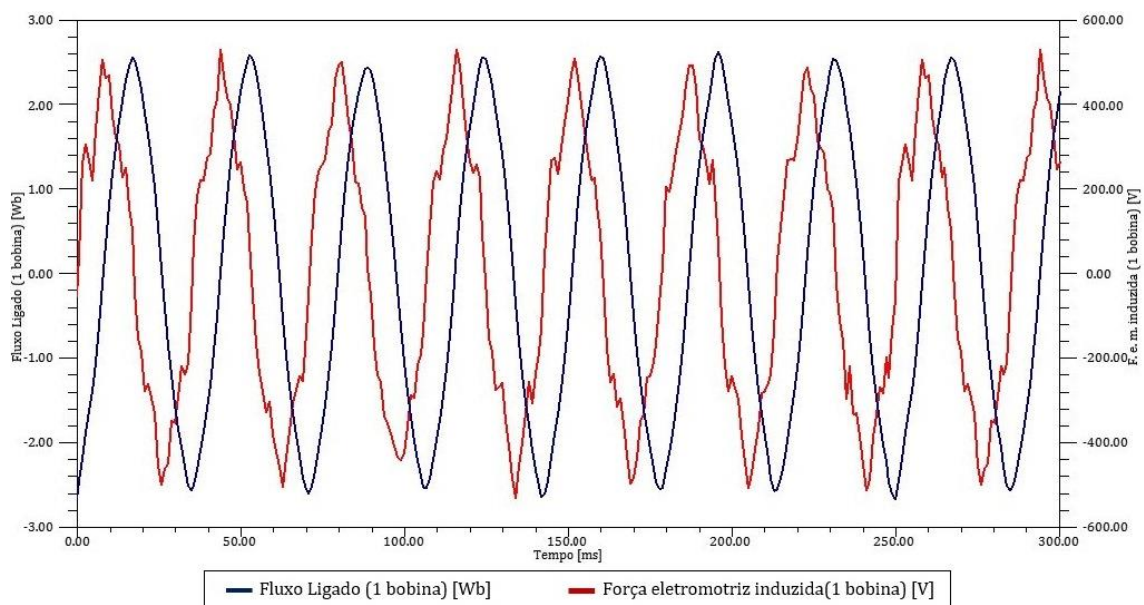


Figura 6. 20. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em vazio.

É importante verificar que o número de arcadas aumentou, ou seja, até aos 250 milissegundos observam-se catorze passos polares, sete negativos e sete positivos, que correspondem aos catorze magnetos permanentes de cada lado do disco que passam por uma bobina a cada rotação. A frequência de alternância magnética da máquina passou de 24 Hz para 28 Hz, devido ao aumento do número de pares de polos.

O fluxo ligado diminuiu quando comparado com o alternador anterior, para 2.6 Wb, uma vez que a secção dos magnetos também diminuiu, influenciando esta diretamente. Por sua vez, a força eletromotriz induzida, encontra-se inferior à obtida no ensaio em vazio do alternador de doze magnetos permanentes com formato de prisma trapezoidal.

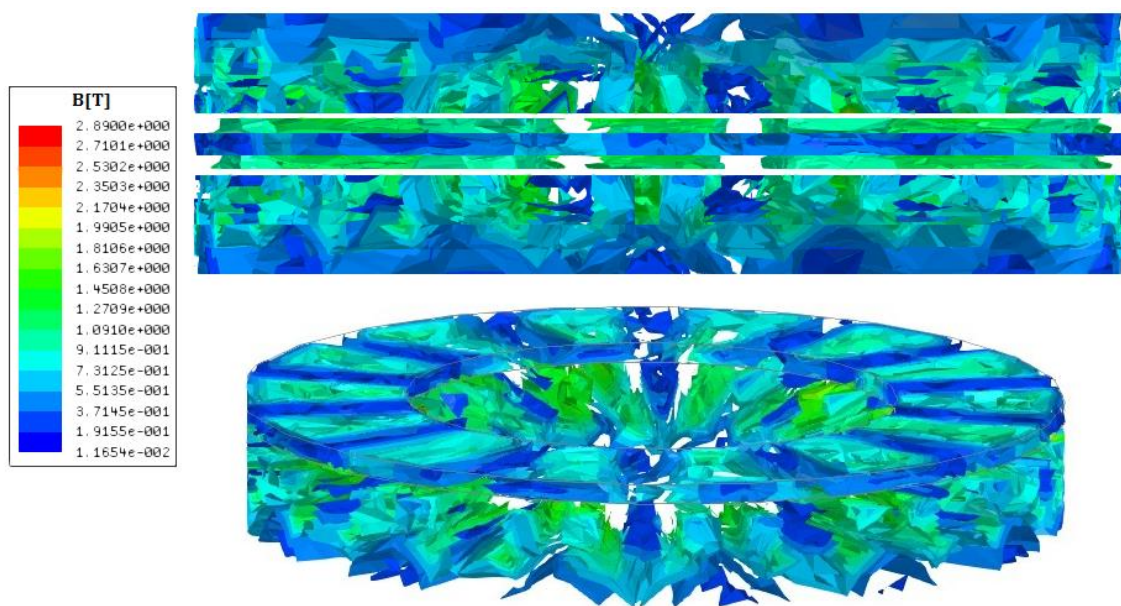
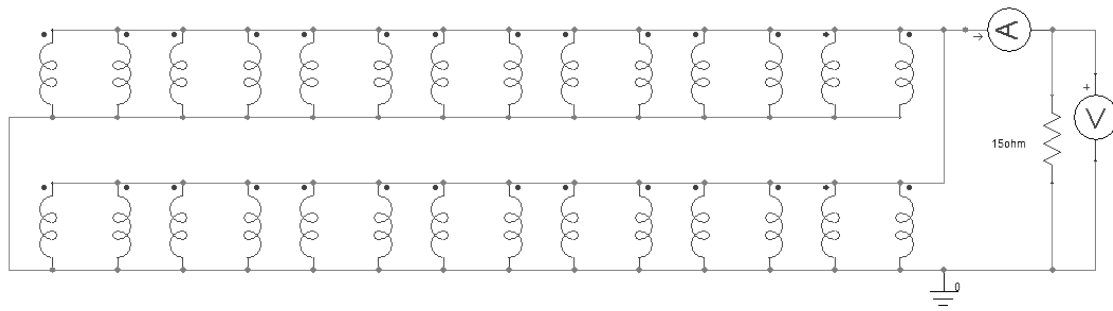


Figura 6. 21. Figura ilustrativa da densidade de fluxo magnético B.

No diagrama de densidade de fluxo anterior, volta-se a verificar que nos magnetos atinge-se valores superiores, mas menores que os da secção anterior. Embora o número de magnetos aumente e a secção diminua, a densidade de fluxo mantém-se constante devido a esta depender apenas do material a utilizar, que é o mesmo em todas as máquinas.

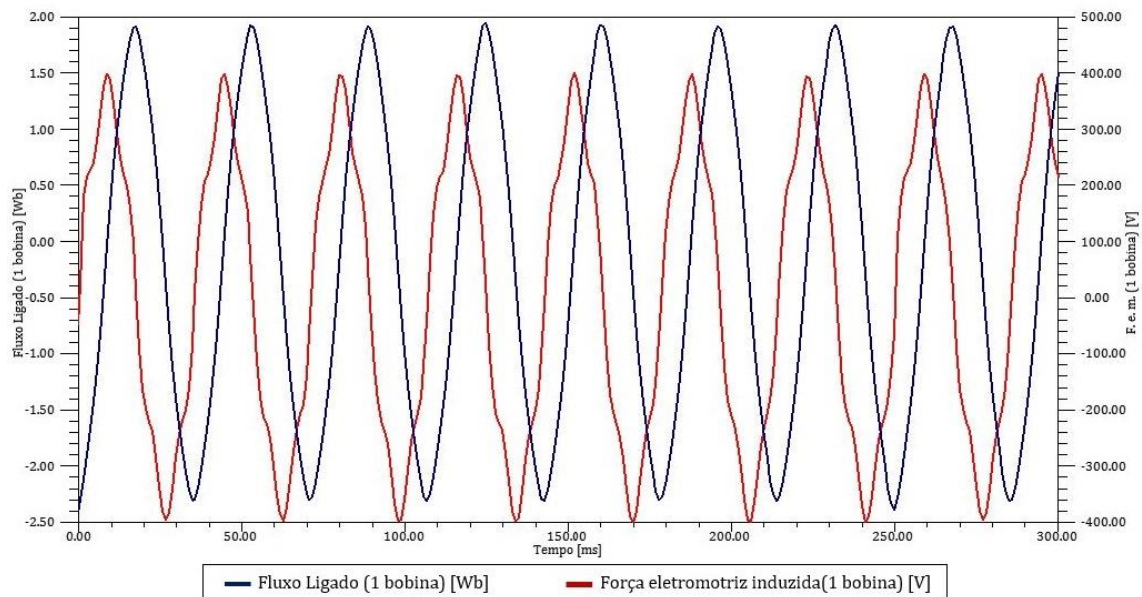
### 6.1.3.2 Funcionamento em carga resistiva pura

O circuito elétrico possui nesta fase vinte e oito bobinas ligadas em paralelo e aos seus terminais encontra-se uma resistência elétrica de 15  $\Omega$ , ver figura 6.22. Esta é superior à utilizada no primeiro alternador dimensionado, mas inferior à dimensionada na secção anterior, já que a tensão dimensionada diminuiu e a corrente admissível aumentou.



**Figura 6. 22. Circuito elétrico do enrolamento, com uma carga puramente resistiva de 15  $\Omega$ .**

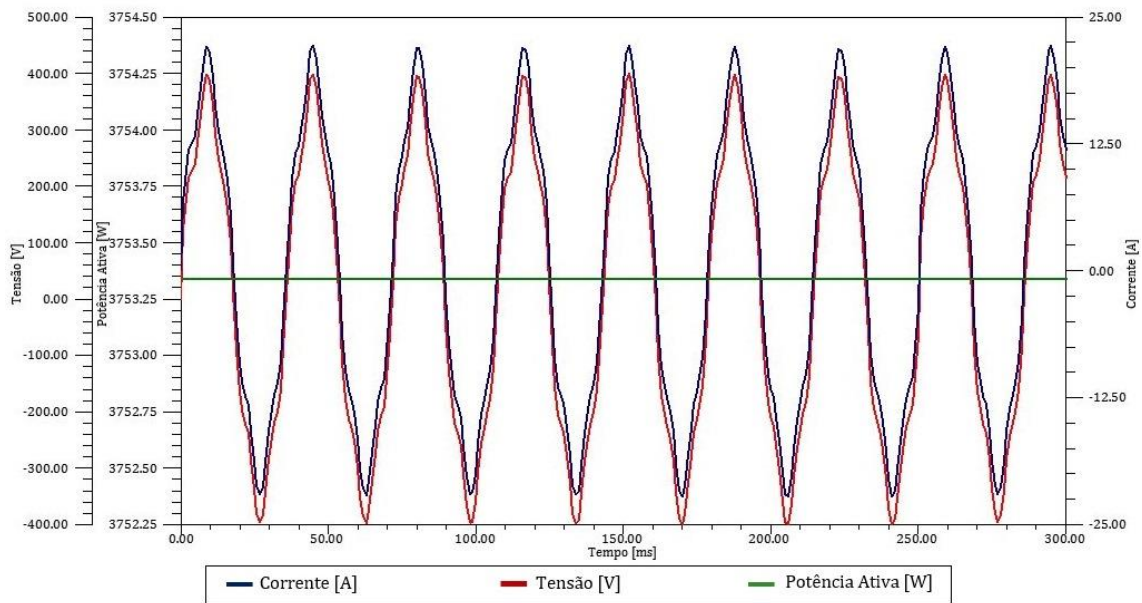
Nesta situação, esperam-se valores inferiores para o fluxo ligado e para a força eletromotriz induzida, como já foi referido no ensaio anterior. Estes podem ser observados através do gráfico da figura 6.23.



**Figura 6. 23. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga puramente resistiva de 15  $\Omega$ .**

A curva da força eletromotriz induzida volta a apresentar um estreitamento nas arcadas, mais uma vez devido à curva do fluxo tomar uma forma pontiaguda.

Apresentam-se na figura 6.24, os valores de potência, tensão e corrente obtidos neste ensaio, os quais podem ser comparados com os encontrados nos alternadores anteriores.

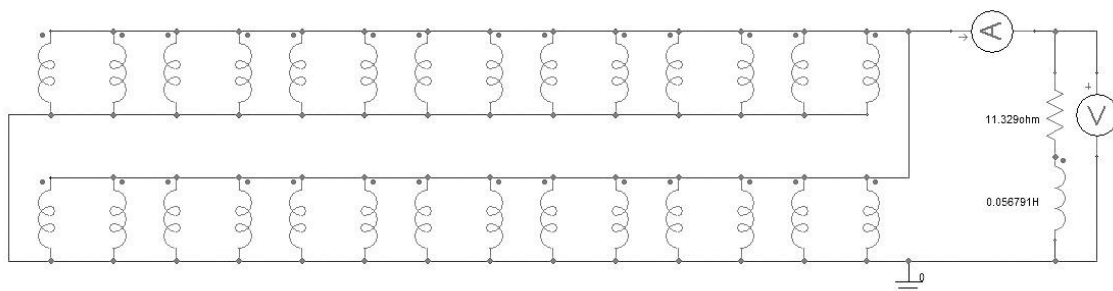


**Figura 6. 24. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga puramente resistiva de 15 Ω.**

Os valores da corrente e da tensão estão abaixo dos dimensionados teoricamente e o formato das suas curvas, que cada vez se desvia mais de uma senoide perfeita, influência de forma significativa o valor da potência ativa fornecida por este alternador. Tendo sido dimensionado para esta um valor próximo dos 14 kW e estando a ser obtido aproximadamente 4 kW, o que é bastante inferior.

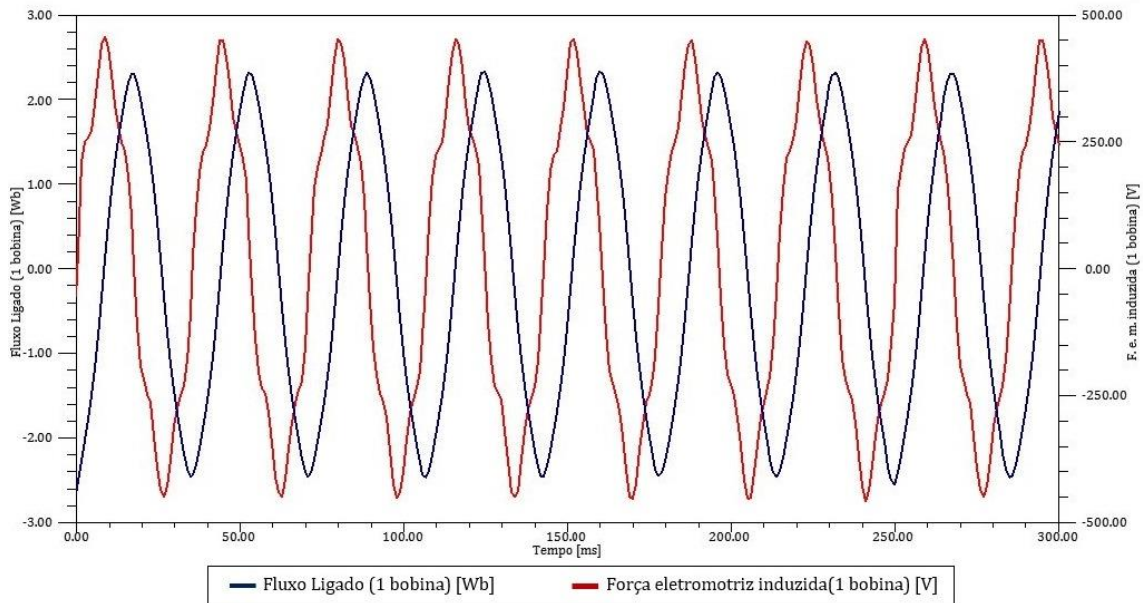
### 6.1.3.3 Funcionamento em carga indutiva

Considera-se um total de vinte e oito bobinas ligadas em paralelo como para o ensaio em carga resistiva pura, alterando os valores da carga colocada aos terminais, ver figura 6.25.



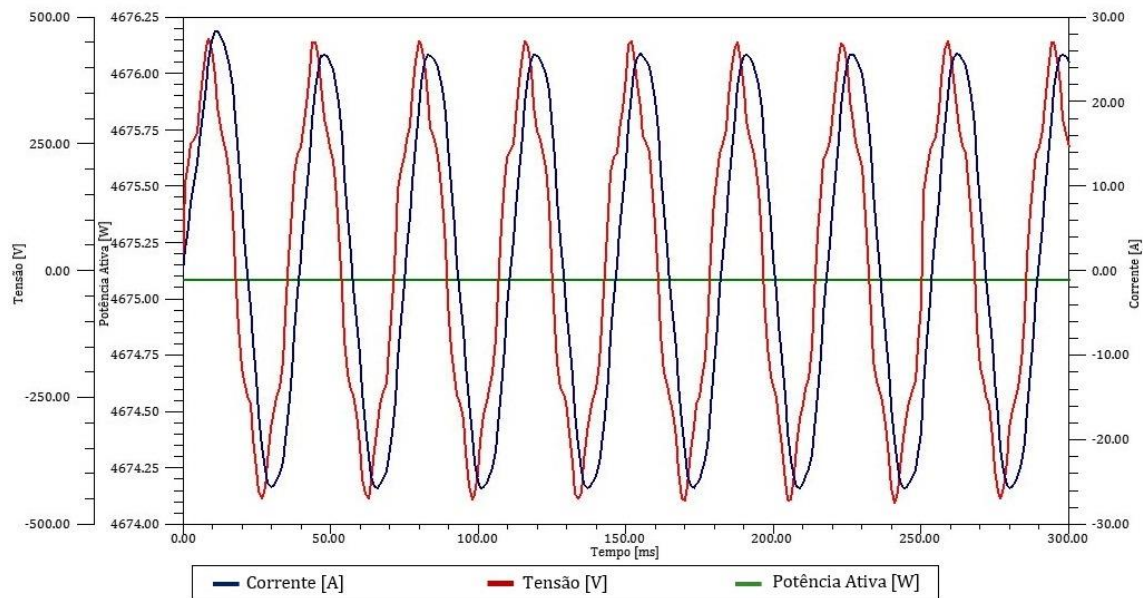
**Figura 6. 25. Circuito elétrico do enrolamento, com uma carga indutiva de 15 Ω  $\angle 41^\circ$ .**

Os novos valores encontrados são apresentados na figura 6.26, os quais sofrem uma descida, possivelmente causada pela alteração do tipo de carga colocada aos terminais.



**Figura 6. 26. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga indutiva de  $15 \Omega \angle 41^\circ$ .**

Como se observa na figura anterior, tanto o fluxo como a força eletromotriz induzida apresentam valores máximos inferiores aos dimensionados.



**Figura 6. 27. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga indutiva de  $15 \Omega \angle 41^\circ$ .**

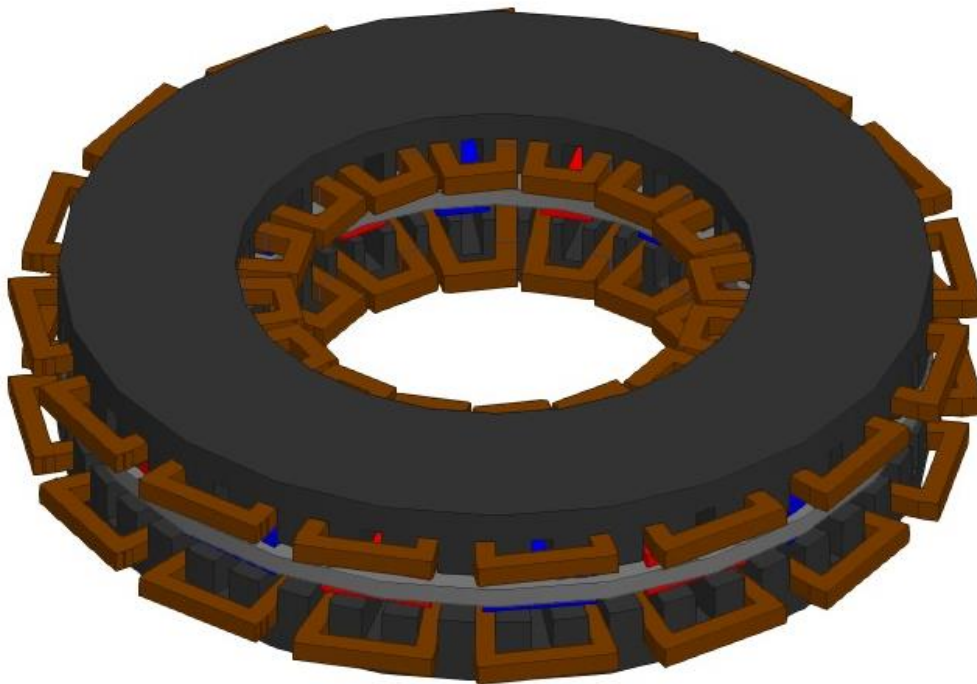
A corrente e a tensão obtidas na carga estão ligeiramente abaixo do esperado, fazendo com que a potência que é obtida a partir dos seus valores também se encontre inferior, ou seja,

para este alternador dimensionou-se uma potência ativa fornecida de aproximadamente 10 kW e pela análise gráfica obtém-se metade.

Comparando os alternadores estudados anteriormente, afirma-se que sendo maior a área dos magnetos permanentes melhores são os resultados obtidos, logo considerando magnetos com base trapezoidal estes têm maior área. Logo a máquina de catorze magnetos permanentes é melhor que o primeiro estudado e o de doze magnetos com formato trapezoidal é mais eficiente que os outros dois.

#### **6.1.4 Alternador síncrono em disco com 16 polos com base trapezoidal**

De modo a confirmar se o número de magnetos influencia negativamente os valores a obter, realiza-se uma última simulação considerando dezasseis magnetos trapezoidais em cada face do disco. Esta geometria pode ser visualizada na figura 6.28.



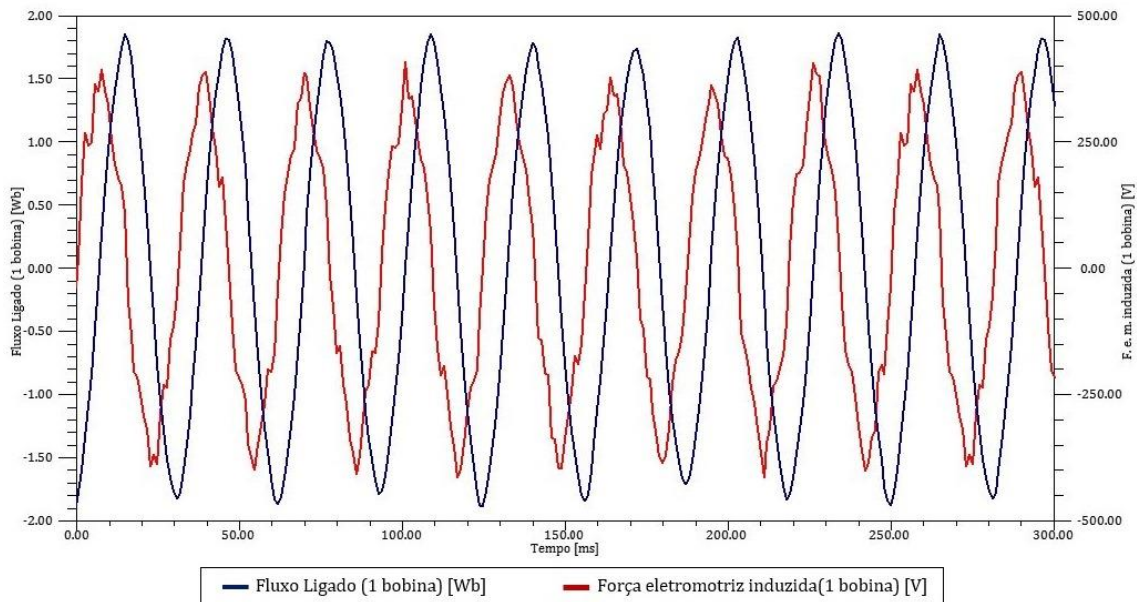
**Figura 6. 28. Ilustração do alternador de 16 polos com formato trapezoidal.**

##### **6.1.4.1 Funcionamento em vazio**

Coloca-se o alternador em funcionamento à mesma velocidade que os outros já estudados, de 240 RPM. Antes de se observarem os resultados da figura 6.29, sabe-se à partida que os valores a obter de fluxo ligado e de força eletromotriz induzida serão menores quando

comparados com os que já foram vistos, devido aos parâmetros que influenciam diretamente o fluxo magnético.

A frequência de alternância magnética do alternador é agora de 32 Hz, o que faz com que até 250 milissegundos, apareçam dezasseis arcadas nas curvas dos gráficos seguintes.



**Figura 6. 29. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em vazio.**

Verifica-se um decréscimo nos valores de fluxo ligado e de força eletromotriz induzida relativamente aos alternadores anteriores, mas quando comparados com os valores obtidos teoricamente, o fluxo ligado encontra-se ligeiramente abaixo do esperado, devido à densidade de fluxo magnético admitida não ser a realmente utilizada, e a força eletromotriz induzida é superior devido ao aumento da frequência.

Relativamente às curvas em si, o ruído numérico da curva a vermelho diminuiu, mas ainda se observa a sua existência, devido a curva do fluxo possuir um formato pontiagudo mas menos acentuado.

No diagrama da figura 6.30, volta a verificar-se que a densidade de fluxo,  $B$ , nos magnetos permanentes é superior, aproximando-se dos valores obtidos para as outras máquinas já estudadas, do que nas restantes peças. É de observar que no disco os valores não são uniformes, uma vez que o campo magnético dos magnetos o atravessa em determinadas zonas.

Os diagramas de densidade de fluxo são todos semelhantes, como já visto, já que os magnetos permanentes utilizados nos quatro alternadores têm todos o mesmo material.

As pequenas diferenças são causadas pelos diferentes valores de fluxo de cada máquina.

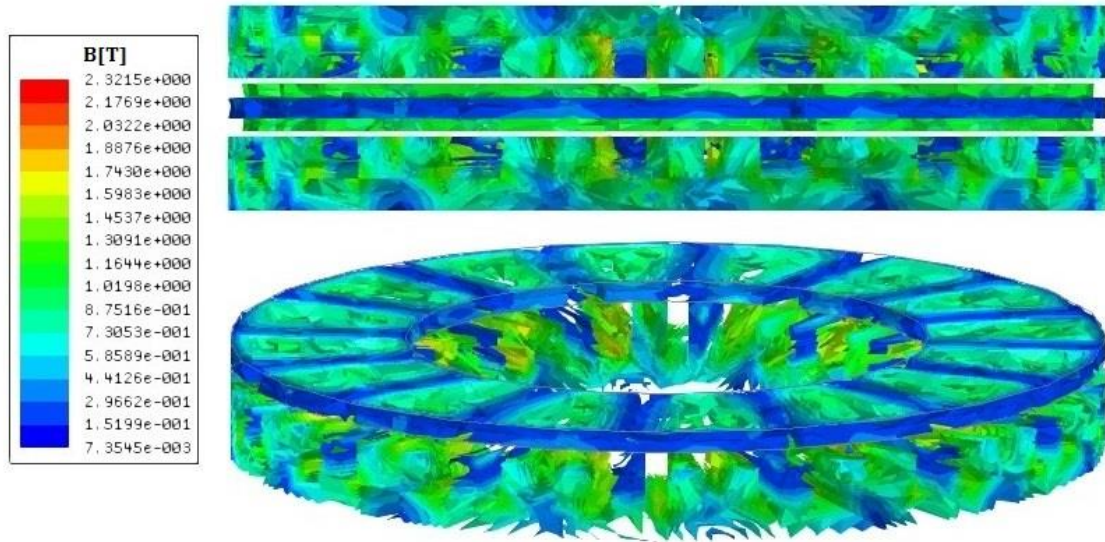


Figura 6. 30. Figura ilustrativa da densidade de fluxo magnético B.

#### 6.1.4.2 Funcionamento em carga resistiva pura

O circuito deste último alternador é composto por trinta e duas bobinas ligadas em paralelo com uma carga resistiva pura ligada aos terminais, de valor inferior a todos os circuitos já referidos, ver figura 6.31.

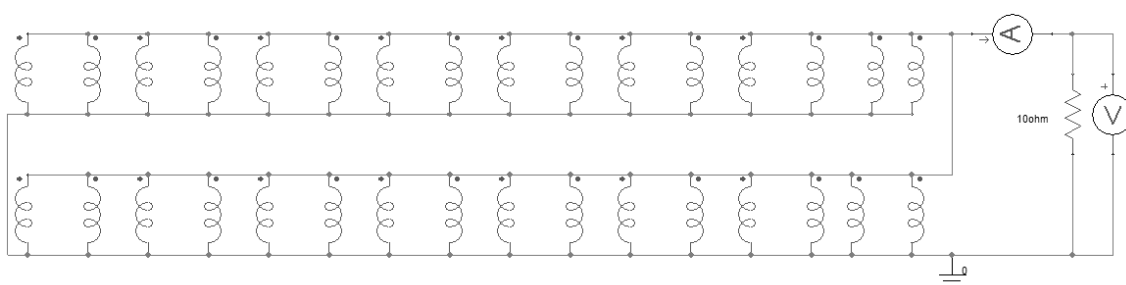
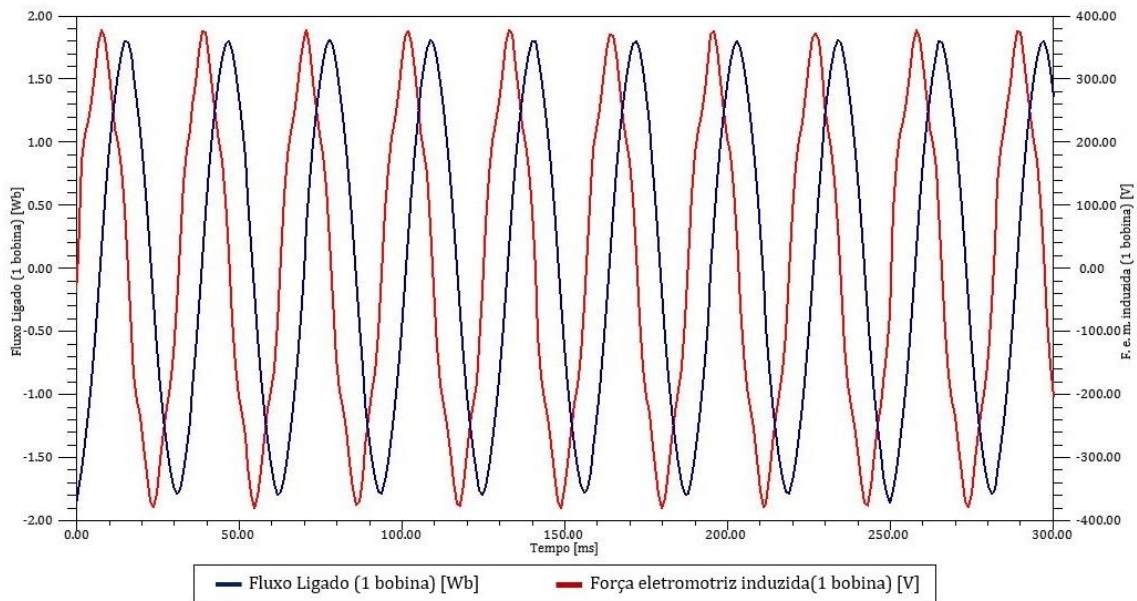


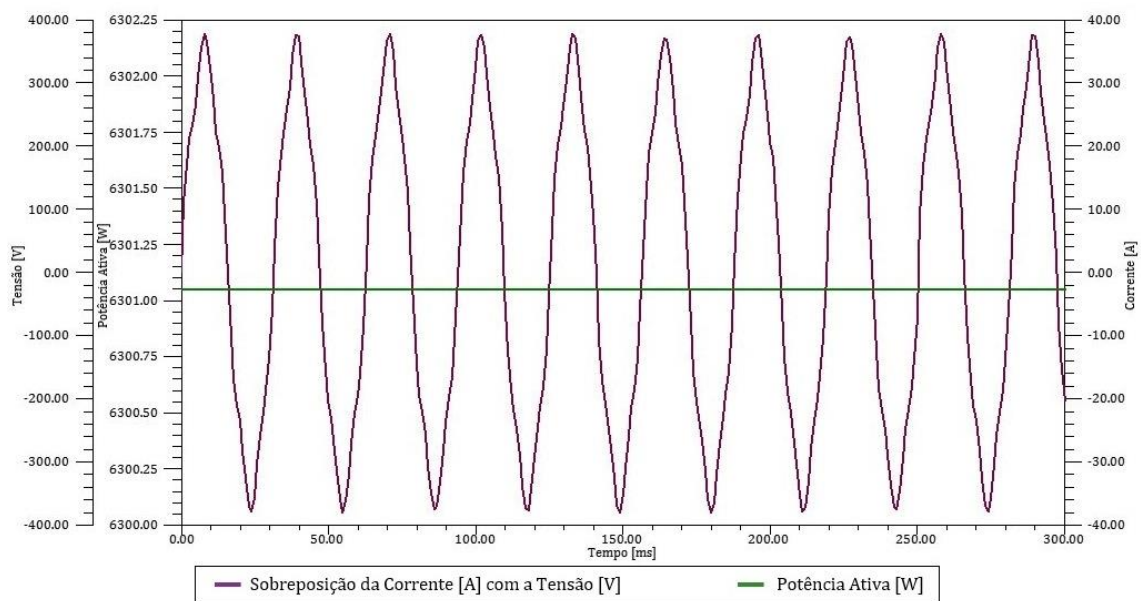
Figura 6. 31. Circuito elétrico do enrolamento, com uma carga puramente resistiva de 10 Ω.

Observa-se na figura seguinte valores inferiores para o fluxo ligado e por sua vez para a força eletromotriz induzida.



**Figura 6. 32. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga puramente resistiva de 10 Ω.**

Para verificar a eficiência deste alternador é necessário verificar quais os valores de potência ativa fornecidos pelo mesmo, quando colocada uma carga resistiva pura aos seus terminais.



**Figura 6. 33. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga puramente resistiva de 10 Ω.**

Na figura 6.33, as curvas de tensão e corrente encontram-se sobrepostas, mas como os seus valores são lidos em referenciais diferentes não tem qualquer relevância, apenas fazendo notar que a tensão e a corrente se encontram em fase.

Os valores de corrente e tensão encontram-se próximos dos dimensionados teoricamente e a potência ativa, mais uma vez, encontra-se bastante inferior sendo a espera de aproximadamente 13 kW. Este decréscimo pode ser causado por perdas tanto por efeito de Joule como de caráter magnético.

### 6.1.4.3 Funcionamento em carga indutiva

Neste circuito a carga terá um valor menor, figura 6.34, tendo sido esta dimensionada na secção 5.6.

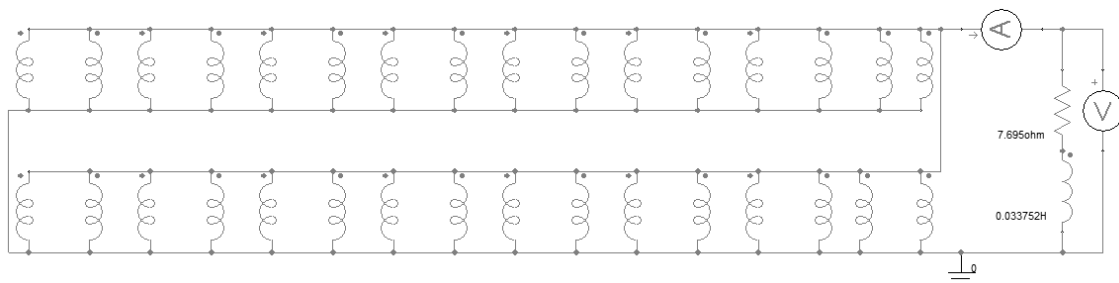


Figura 6. 34. Circuito elétrico do enrolamento, com uma carga indutiva de  $10 \Omega \angle 41^\circ$ .

Na próxima figura observam-se os novos valores de fluxo ligado e força eletromotriz obtidos para este ensaio.

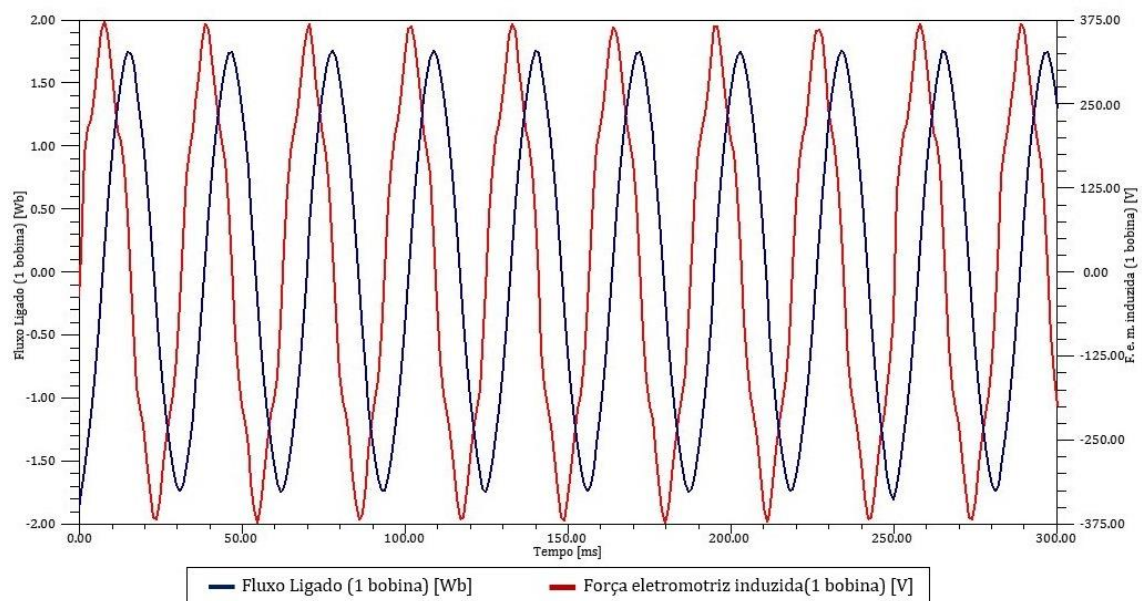
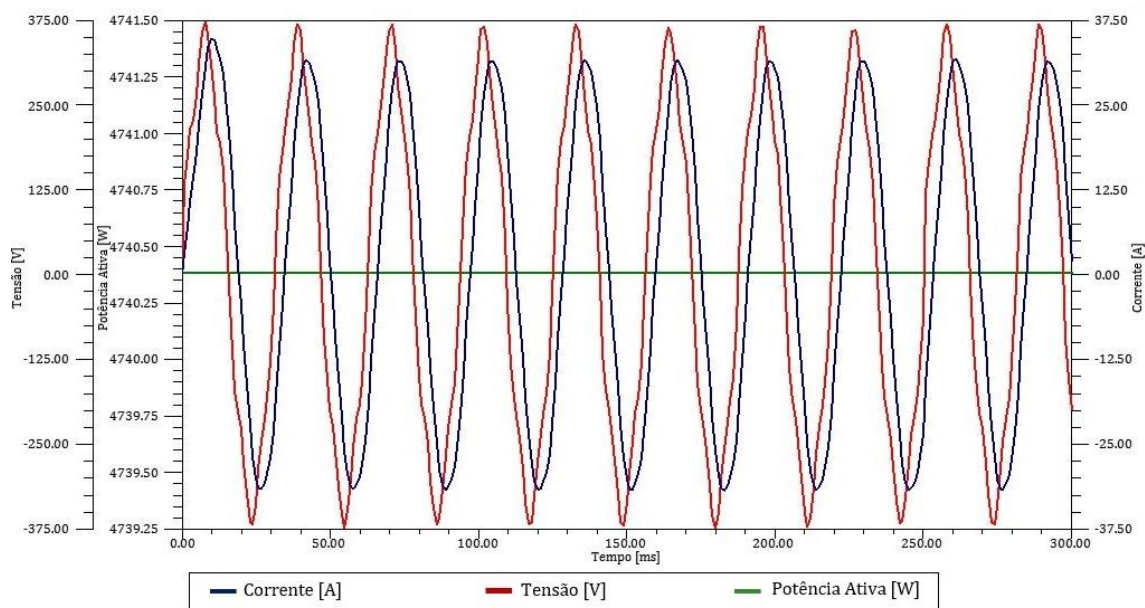


Figura 6. 35. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga indutiva de  $10 \Omega \angle 41^\circ$ .

É de observar que são inferiores aos obtidos para os restantes ensaios, mas esta diminuição tem sido constante ao longo de todos os alternadores e deve-se à alteração da carga colocada aos terminais da máquina.



**Figura 6. 36. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga indutiva de  $10 \Omega \angle 41^\circ$ .**

A potência ativa a esperar neste ensaio seria de 9 kW e verifica-se que graficamente apenas se aproxima dos 5 kW, o que se encontra longe do que se pretendia inicialmente.

Após se realizar uma análise inicial aos quatro alternadores e serem obtidos os resultados práticos para cada um, conclui-se que o alternador de 12 polos com forma de prisma trapezoidal será o mais eficiente. Sendo aquele onde os magnetos permanentes possuem uma maior secção, que conduz a um maior fluxo ligado o que resulta numa maior força eletromotriz. Como já referido, estes valores influenciam os valores de potência ativa fornecida, sendo neste caso a mais elevada. Ao longo deste capítulo verifica-se que os valores de potência ativa se encontram muito inferiores aos esperados teoricamente, o que faz com que o alternador não tenha a utilidade que se pretendia. Assim sendo após verificar qual seria a melhor geometria de todas as estudadas, podem ser ajustados parâmetros do alternador que afetam a sua eficiência, a observar na secção seguinte.

## 6.2 Análise espectral

Após serem feitas as simulações aos quatro alternadores, em todos se verificou que os valores obtidos estavam aquém dos esperados, como também algum ruído numérico nas curvas obtidas.

Assim sendo aplicou-se a transformada de Fourier às curvas de fluxo ligado e de força eletromotriz induzida, obtidas na simulação em vazio do alternador que teve melhores resultados, o de 12 polos com formato trapezoidal, para verificar se existiam harmônicas que pudessem influenciar os valores encontrados.

Nas figuras 6.37 e 6.38, encontram-se representados os espectros do fluxo ligado e força eletromotriz induzida.

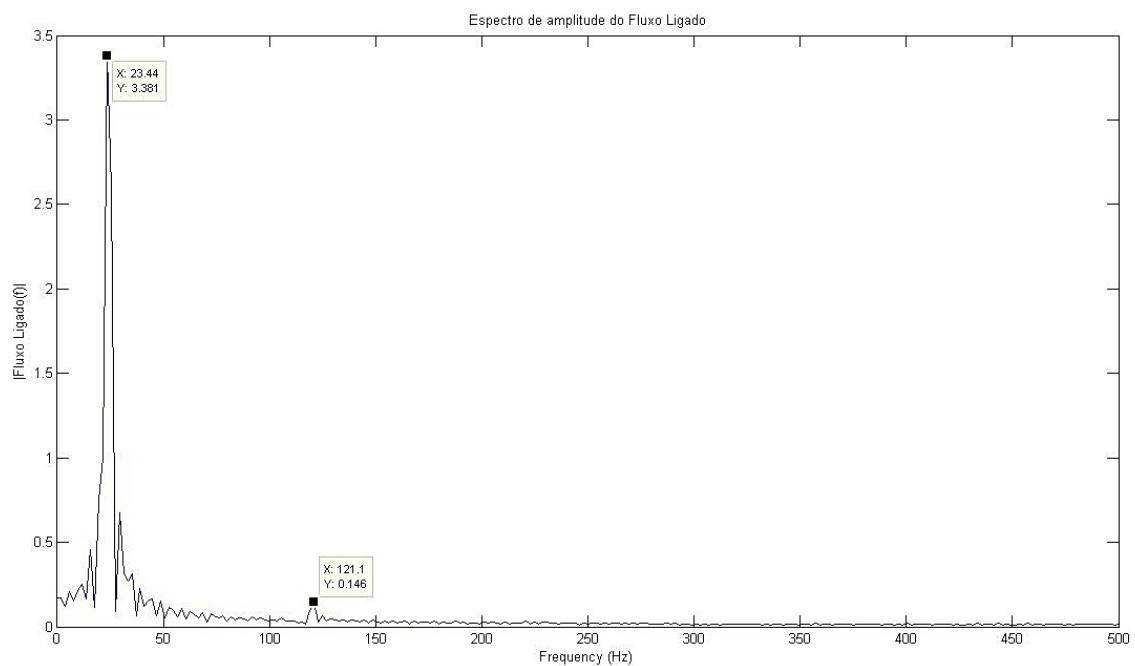
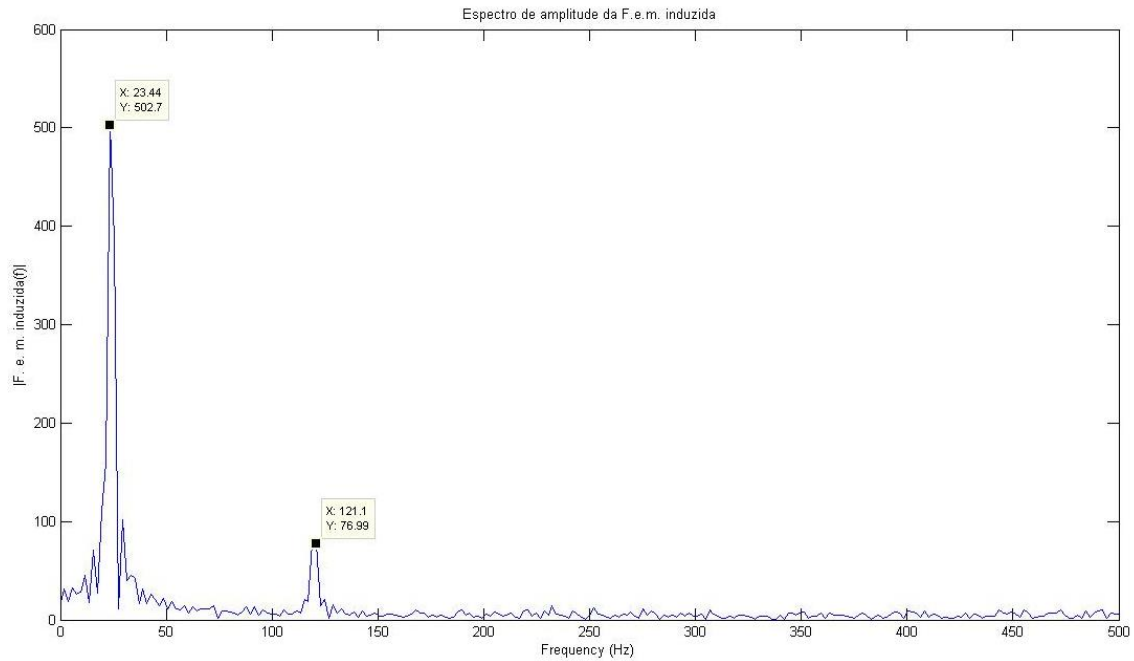


Figura 6. 37. Espectro de amplitude do fluxo ligado.

Pela análise gráfica verifica-se a existência de uma quinta harmônica, mas não sendo a sua amplitude muito elevada não causa muita distorção na curva do fluxo, apenas umas pequenas flutuações nas arcadas.



**Figura 6. 38. Espectro de amplitude da força eletromotriz induzida.**

Pela análise espectral da força eletromotriz induzida verifica-se que existe também uma quinta harmónica e nesta situação com amplitude mais elevada, o que faz com que a curva obtida apresente mais ruído que a do fluxo ligado.

De seguida encontram-se as relações entre as harmónicas obtidas e as fundamentais, mostrando os seus pesos. É de notar que as harmónicas fundamentais nos dois espectros se encontram aproximadamente à frequência de funcionamento do alternador, isto é a 24 Hz, logo, existindo uma quinta harmónica, esta encontra-se a uma frequência de cinco vezes superior, aproximadamente nos 120 Hz, como se observa nos dois espectros anteriores.

Considerando o espectro de amplitude do fluxo ligado, encontra-se a relação entre as amplitudes da quinta harmónica e da harmónica fundamental pela expressão:

$$\frac{|Fluxo\ ligado(24\ Hz)|}{|Fluxo\ ligado(120\ Hz)|} = \frac{0.146}{3.381} = 0.04318 \quad (6.1)$$

De forma análoga, a relação das amplitudes das harmónicas da força eletromotriz induzida traduz-se por:

$$\frac{|F.e.m.induzida(24\ Hz)|}{|F.e.m.induzida(120\ Hz)|} = \frac{76.99}{502.7} = 0.15315 \quad (6.2)$$

Como a força eletromotriz induzida se obtém derivando o fluxo ligado, admitindo que se trata de uma senoide, derivar o fluxo ligado é o mesmo que multiplicar pela frequência. Sendo a relação entre as frequências das harmônicas de 5, mostra-se que:

$$\frac{|F.e.m.induzida(24\text{ Hz})|}{|F.e.m.induzida(120\text{ Hz})|} = 5 \times \frac{|Fluxo\ ligado(24\text{ Hz})|}{|Fluxo\ ligado(120\text{ Hz})|} \Leftrightarrow 0.15315 \cong 5 \times 0.0431 \quad (6.3)$$

Pela equação anterior, afirma-se que os pesos relativos das harmônicas coincidem, o que justifica a maior distorção na curva da força eletromotriz induzida quando comparada com a do fluxo ligado.

Mais uma vez é de salientar que não sendo as curvas obtidas sinusoides perfeitas, o dimensionamento teórico toma apenas valores aproximados, o que faz com que existam discrepâncias quando comparados com os encontrados nas simulações.

### **6.3 Alteração do alternador de 12 polos com base trapezoidal**

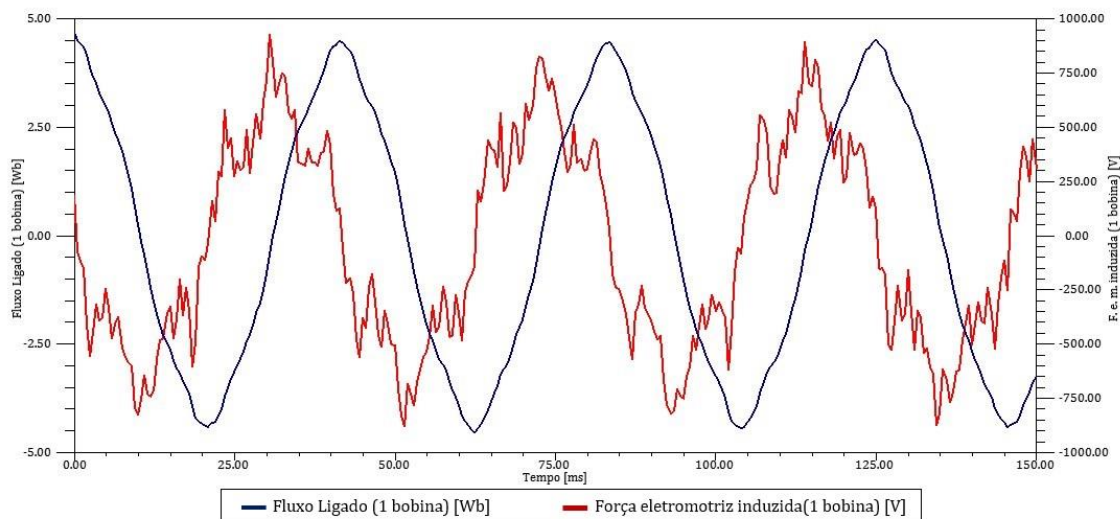
Como referido, o alternador não se encontra a fornecer a potência pretendida, uma vez que se previa que este gerasse cerca de 15 kW, quando colocada aos terminais uma carga puramente resistiva.

A fim de encontrar uma solução melhor, altera-se o tamanho do entreferro, o qual foi admitido inicialmente tendo o valor de cinco milímetros, tomando nesta fase o valor de dois milímetros.

De seguida apresentam-se os novos valores obtidos para os três ensaios, sendo considerada a nova medida de entreferro, mantendo as restantes constantes.

#### **6.3.1 Funcionamento em vazio**

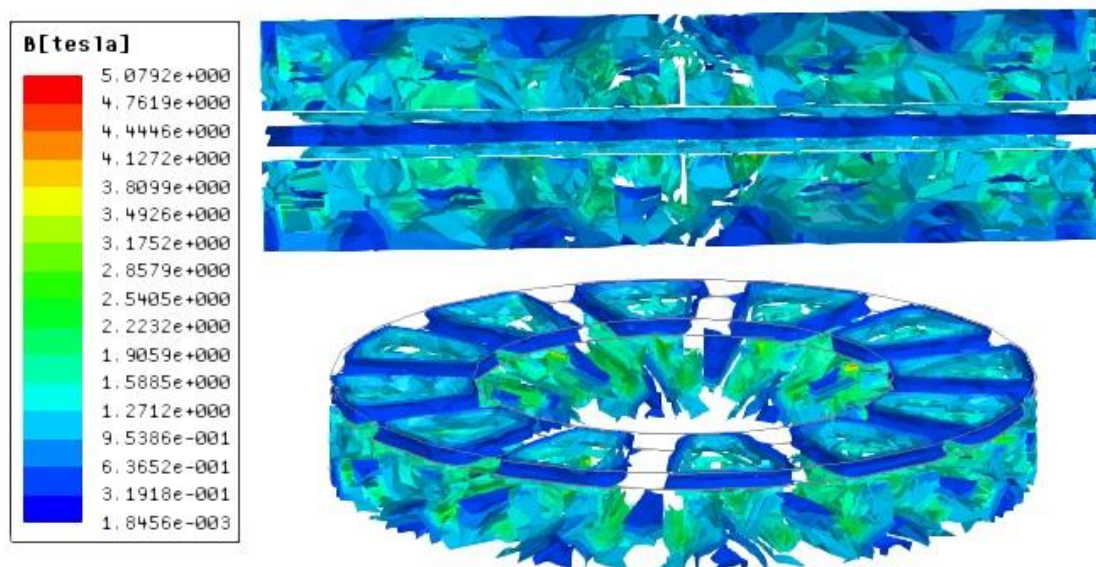
Ao longo desta secção e para todos os ensaios seguintes, reduz-se o tempo da análise gráfica, sendo representados por sua vez mais pontos, o que faz com que os resultados a obter sejam mais precisos.



**Figura 6. 39. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em vazio, sendo alterado o entreferro.**

Nesta primeira simulação, verifica-se logo uma grande alteração nos valores apresentados na figura anterior. A força eletromotriz induzida aumentou para um valor próximo dos 800 V, o qual não é preciso devido ao ruído numérico, causado pelas imperfeições da curva do fluxo ligado. Por sua vez este também aumentou, tomando o valor de aproximadamente 4.5 Wb, mais próximo dos 5.4 Wb dimensionados teoricamente.

Verifica-se na figura seguinte quais as alterações ocorridas na densidade de fluxo magnético, quando diminuído o entreferro.

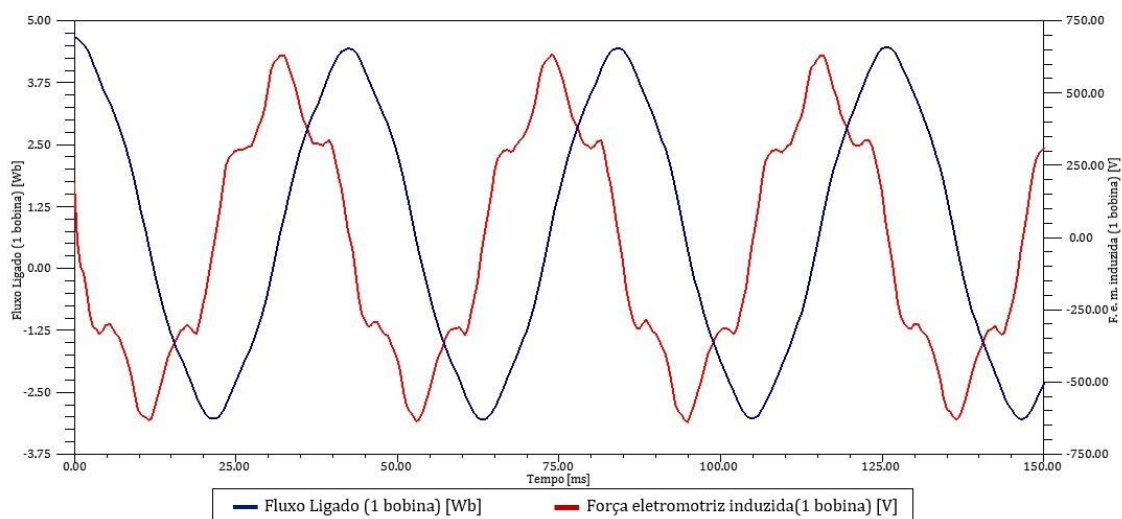


**Figura 6. 40. Densidade de fluxo obtida após a redução do entreferro.**

Embora pelo ensaio em vazio já se verifiquem alterações procede-se a realização dos ensaios em carga para obter os valores de potência ativa, tensão e corrente.

### 6.3.2 Funcionamento em carga resistiva pura

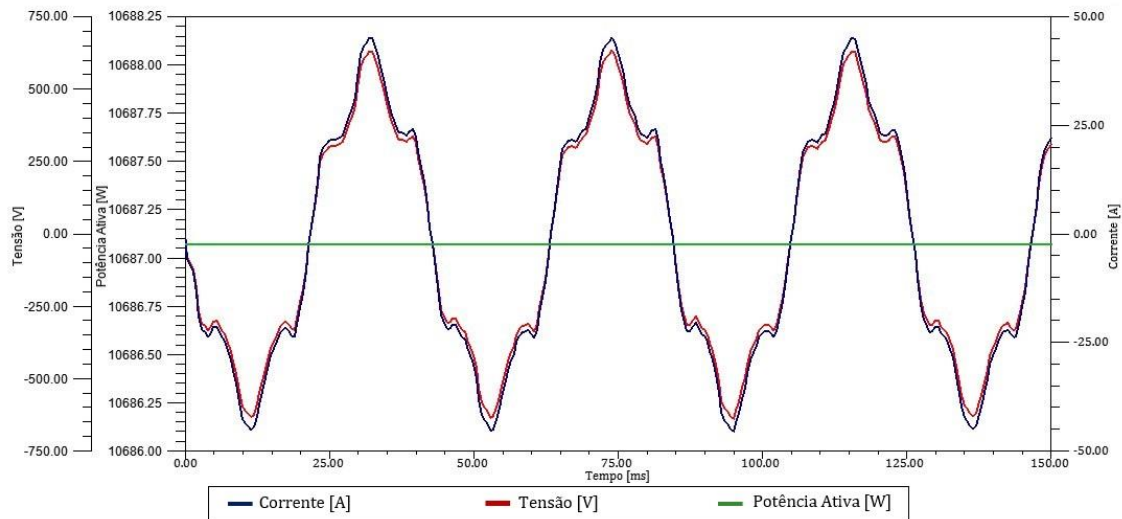
Os circuitos a utilizar para os ensaios que se seguem são os mesmos da secção 6.1.2, uma vez que apenas se alterou o entreferro e não o enrolamento. Na figura 6.41, apresentam-se os novos valores para o fluxo ligado e para a força eletromotriz induzida.



**Figura 6. 41.** Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga puramente resistiva de  $22 \Omega$ , sendo alterada a dimensão do entreferro.

Os valores de força eletromotriz induzida diminuíram quando comparados com os obtidos no ensaio anterior, mas ainda assim mantêm-se superiores aos esperados, o que influenciará positivamente os resultados futuros.

Relativamente ao fluxo ligado este diminuiu mas considera-se um valor bastante aceitável, uma vez que continua próximo do dimensionado.



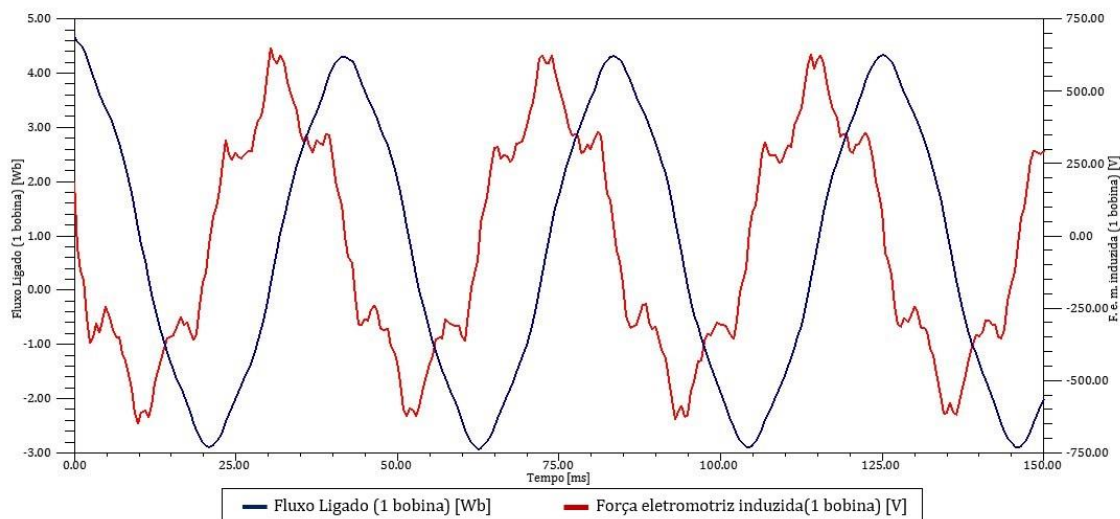
**Figura 6. 42. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga puramente resistiva de  $22 \Omega$ , sendo alterada a dimensão do entreferro.**

As alterações nos resultados observadas na figura anterior são bastante significativas, tendo a potência ativa sofrido um aumento de 4 kW, o que faz com que este valor fique mais próximo do dimensionado.

Os valores de tensão e corrente também são superiores, mas a defasagem das curvas mantém-se nula, porque a alteração do entreferro não influencia de qualquer forma a carga resistiva colocada aos terminais.

### 6.3.3 Funcionamento em carga indutiva

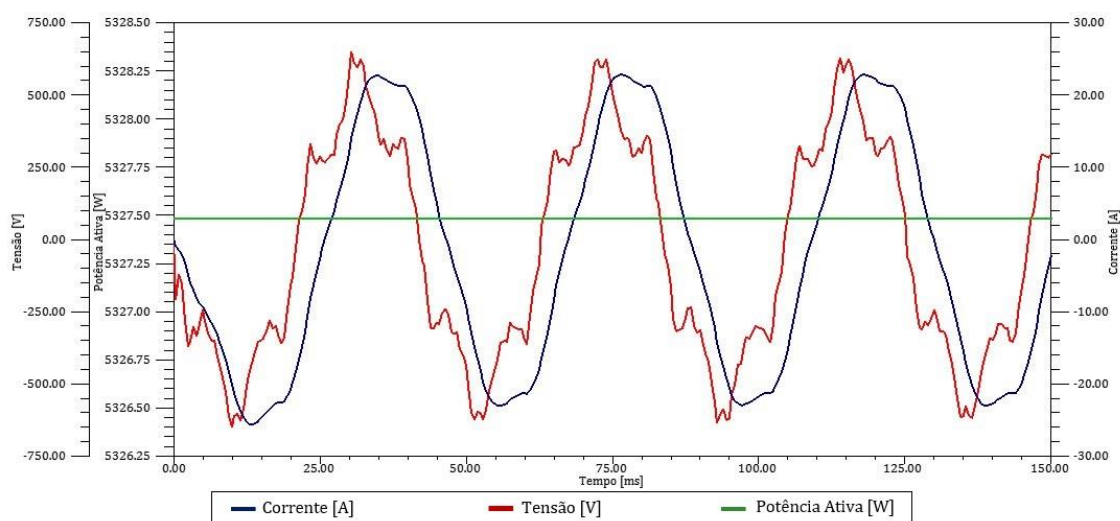
Seguidamente, encontram-se expostos os resultados obtidos quando se ensaia este alternador colocando aos terminais uma carga indutiva de  $22 \Omega \angle 41^\circ$ , os quais são fundamentais para encontrar a potência ativa que o alternador irá fornecer.



**Figura 6. 43. Gráfico das curvas correspondentes ao Fluxo Ligado e à Força Eletromotriz Induzida, após o funcionamento em carga indutiva de  $22 \Omega \angle 41^\circ$ , sendo alterada a dimensão do entreferro.**

Os valores de fluxo ligado e de força eletromotriz induzida desceram, como tem sucedido ao longo da simulação de todos os alternadores, com a particularidade dos resultados apresentados na figura 6.43 serem superiores aos encontrados nos outros ensaios em carga indutiva.

Para terminar observam-se na próxima figura os valores de potência ativa, corrente e tensão.



**Figura 6. 44. Gráfico dos valores de corrente, tensão e potência ativa, obtidos após o funcionamento em carga indutiva de  $22 \Omega \angle 41^\circ$ , sendo alterada a dimensão do entreferro.**

Pela figura 6.44, verifica-se que a potência ativa sofreu um decréscimo elevado, o que se deve ao facto de existirem perdas na carga. De certo modo, os valores obtidos nesta secção são superiores aos que foram obtidos anteriormente, o que faz com que este alternador seja o mais eficiente.

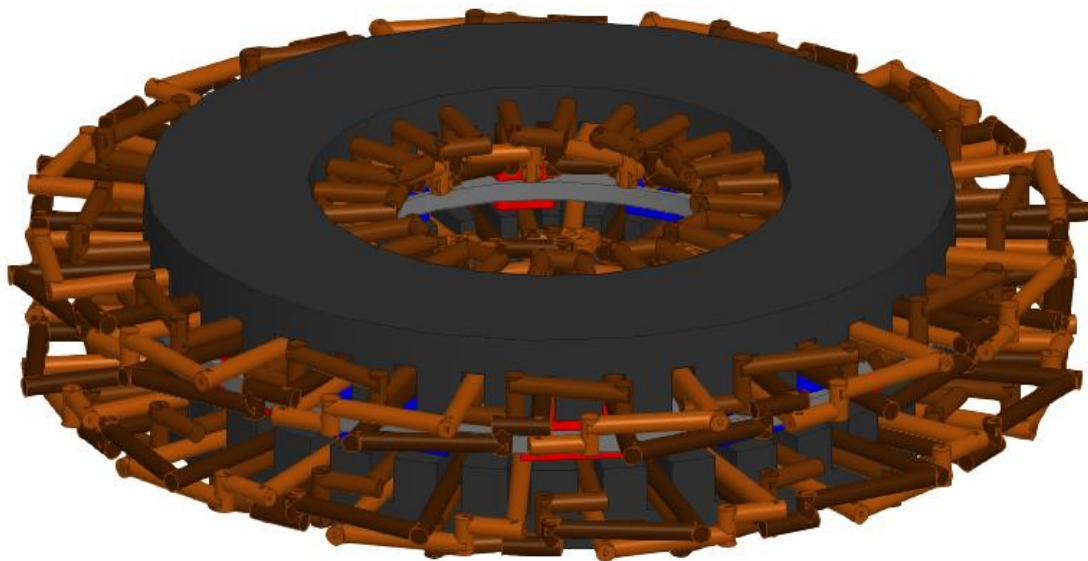
Existindo ruído na curva de tensão e um abalo na parte superior da curva de corrente, os valores obtidos para a potência ativa podem não ter total precisão, uma vez que são calculados a partir dos anteriores.

É de notar que sendo colocada outra carga aos terminais do alternador, estes valores sofreriam alterações, isto é os valores de potência que a máquina fornece dependem também da carga que este alimenta.

Conclui-se que a alteração ao entreferro proporcionou uma subida nos valores fornecidos pelo alternador, o que faz com que este possa ser tomado como solução ao problema exposto.

#### **6.4 Regime trifásico**

De forma a se tornar mais claro e preciso o funcionamento do alternador seria necessário realizar ensaios ao mesmo considerando este a operar em regime trifásico. Em cada semi-induzido passavam a existir 36 bobinas desfasadas segundo as três fases, como se pode observar na figura 6.45.



**Figura 6. 45. Alternador de 12 polos com formato trapezoidal, com enrolamento trifásico.**

O esquema ilustrativo dos enrolamentos pode ser visualizado na figura 6.46, tendo cada enrolamento uma cor distinta, estando simbolizado o sentido da corrente.

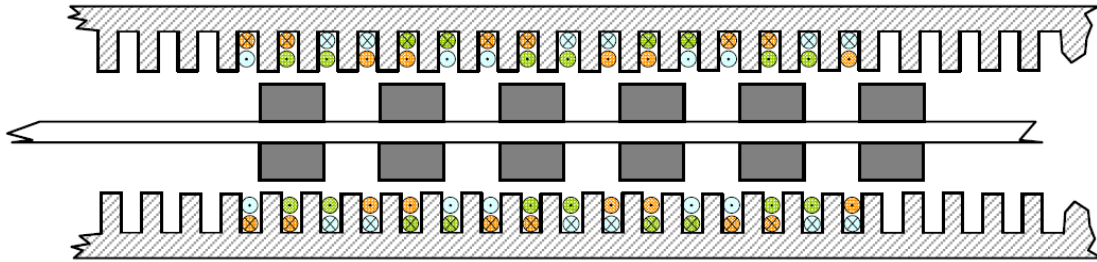


Figura 6. 46. Esquema da disposição dos enrolamentos em 2D. [25]

Os valores teóricos para a potência gerada pelo alternador foram dimensionados na secção 5.2, sendo obtidos valores bastante favoráveis. É de notar os valores reais se podem encontrar muito aquém destes, o que poderia ser verificado através de simulações ao alternador.

Estas não foram realizadas, uma vez que existiram problemas a nível de *software*. O programa a utilizar não permitiu efetuar a análise, sendo a causa o elevado número de enrolamentos.

# 7 Orçamento e Conclusões

## 7.1 Estimativa orçamental

Dados os resultados e sendo encontrado o alternador com melhor funcionamento, apresenta-se uma estimativa do custo da construção da máquina projetada. Como tal, foram consultados preços de alguns fornecedores, os quais podem ser uma aproximação devido às alterações do mercado.

Os magnetos permanentes podem ser adquiridos na CMS Magnetics [28], tendo um custo de 70 euros cada um. As dimensões e a forma pretendida não existem fabricadas, logo existe a necessidade de serem cortados, o que faz com que o preço acresça se não seriam mais económicos.

Relativamente ao fio de cobre esmaltado, consultou-se um fornecedor português Arménio Carreira [29], que estabelece um preço de 18 euros mais IVA por cada quilo de fio esmaltado com 1.1mm de diâmetro. Mas como a quantidade pretendida é elevada, consegue praticar o preço de revenda, isto é 11.25 euros mais IVA por quilo.

Para os semi-induzidos, a empresa contactada foi a Tiradentes, Comércio de Ferro e Aço, Lda [26], no Brasil, que fabrica os rolos de chapa pretendidos e com as cavas já cortadas. A empresa não estabeleceu um preço, mas de grosso modo disse que poderia rondar os 1300 euros.

O disco com as dimensões pretendidas não existe no mercado, assim sendo será necessário mandar fabricar. Estima-se o preço através do seu peso, uma vez que o quilo de ferro ronda os 0.998 euros, o preço estimado para o disco que pesa cerca de 30kg é de 29.94 euros.

Tendo em conta que para o gerador são precisos dois alternadores, o orçamento apresentado de seguida considera já o preço do conjunto.

Num total precisa-se de 48 magnetos permanentes, que tem um custo de 3360 euros.

São necessários 4 semi-induzidos para as duas máquinas, o que faz com que o preço seja de 5200 euros.

Tendo um custo de 11.25 euros mais IVA o quilo de fio de cobre esmaltado, necessita-se de aproximadamente 10000 metros para o enrolamento dos dois alternadores, o que ronda os 92 kg, o que faz um total aproximado de 1273.05 euros, considerando o IVA de 23%.

Não sendo considerado o preço da mão-de-obra, das escovas, do veio, da carcaça, etc., o preço estimado para o conjunto dos dois alternadores é de 9892.93 euros. De um modo geral, o custo da construção dos alternadores rondaria os 20000 euros.

## 7.2 Conclusões

Inicialmente dimensionaram-se seis alternadores com geometrias diferentes, fazendo variar o formato ou o número de magnetos permanentes que se encontram presos ao disco.

Após a análise teórica tornou-se perceptível que os alternadores constituídos por ímanes com base trapezoidal seriam mais eficientes, assim sendo procedeu-se à simulação de quatro alternadores para verificar as diferenças existentes.

Verificou-se que quanto maior a secção dos magnetos, maiores valores de potência ativa fornecidos pelo alternador se obtêm, o que contrapõe o aumento do número de polos. Embora este aumente, o que faz aumentar a frequência, o número de espiras dos enrolamentos diminui fazendo diminuir o fluxo ligado.

Concluiu-se que os valores obtidos nas simulações se encontravam muito aquém do esperado e do pretendido, assumindo como uma das causas a distorção das curvas da força eletromotriz induzida proveniente de uma quinta harmónica observada na análise espectral.

Selecionou-se o alternador de doze polos presos ao disco como a solução ótima e realizaram-se novos ensaios diminuindo o entreferro para se compreender de forma esta alteração afetava os resultados, uma vez que o objetivo inicial era verificar quais os parâmetros que influenciavam de forma significativa na potência fornecida pelo alternador.

Após esta mudança, os valores de potência ativa, ainda inferiores ficaram mais próximos dos dimensionados, logo quanto menor for o entreferro melhor é a solução proposta.

Conclui-se que o alternador mais eficiente é o alternador de doze polos com formato de prisma trapezoidal, mas com um entreferro de dois milímetros. Este irá fornecer no máximo uma potência ativa monofásica de aproximadamente 11 kW, esperando obter em regime trifásico 33 kW, sendo que esta triplica, mas para este regime o alternador não foi simulado.

Como o gerador de energia elétrica a partir da energia das ondas necessita de dois alternadores, a potência total fornecida pelo sistema aproxima-se de 22 kW em regime

monofásico, tendo aos terminais uma carga resistiva pura de  $22 \Omega$  e de 11 kW quando colocada uma carga indutiva de valor  $22 \Omega \angle 41^\circ$ .

Fazendo uma pesquisa de materiais no mercado, conseguiu-se obter uma estimativa do preço que custaria construir o alternador, rondando os 20000 euros, valor pouco preciso porque a mão-de-obra e a estrutura foram consideradas de uma forma superficial. Logo para o sistema em causa o custo total seria de aproximadamente 40000 euros, já que são necessários dois alternadores.

De um modo geral, pode se afirmar que a solução apresentada se pode tornar em uma solução totalmente viável após a realização de mais algumas simulações considerando que a máquina opera em regime trifásico.

Os valores de potência ativa a obter pelo sistema de geração de energia elétrica não são muito elevados, mas já são bastante aceitáveis. É de notar que os resultados obtidos são os limites máximos que o alternador consegue fornecer, os quais podem não ser atingidos.

É um alternador mais económico visto que o orçamento da sua construção é aceitável, como também, tendo uma forte estrutura em forma de disco, o torna mais estável podendo ser enquadrado e inserido em diversos sistemas sem dificuldade.



# Referências

- [1] K. Popper, “A filosofia política de Platão” - Física de Aristóteles: o movimento natural, Outubro 2011.
- [2] J. F. Gieras, R.-J. Wang e M. J. Kamper, Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, 2ª Edição 2008.
- [3] BrookCrompton, “Axial Airgap Motors,” 2007. [Online]. Available: [http://www.atb-motors.com/uploads/03\\_PRODUKTE\\_Axialspalmtmotoren\\_182\\_DE.pdf](http://www.atb-motors.com/uploads/03_PRODUKTE_Axialspalmtmotoren_182_DE.pdf).  
[Acedido em 19 02 2014].
- [4] Â. P. B. d. S. Ferreira, ““Projecto de uma Máquina de Ímanes Permanentes de Fluxo Axial Orientado para os Sistemas de Conversão de Energia Eólica”,” Dissertação de doutoramento, FEUP, Porto, Setembro 2011.
- [5] T. F. Chan e L. L. Lai, “An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous - Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, p. VOL 22, 01 03 2007.
- [6] A. P. Ferreira, A. M. Silva e A. F. Costa, *Prototype of an Axial Flux Permanent Magnet Generator for Wind Energy Systems Applications*, School of Technology and Management, Polytechnic Institute of Bragança: Department of Electrical and Computer Engineering - FEUP Porto, 2007.
- [7] D. M. Joseph e W. A. Cronje, “Design and Analysis of a Double - Sided Tubular Linear Synchronous Generator with Particular Application to Wave-Energy Conversion,” em *IEEE PES PowerAfrica 2007 - Conference and Exhibition*, Johannesburg, South Africa, 2007.
- [8] P. Wannakarn, T. Tanmaneeprasert e N. Rugthaicharoencheep, *Design and Construction of Axial Flux Permanent Magnet Generator for Wind Turbine Generated DC Voltage at Rated Power 1500W*, Bangkok, Thailand: Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering - Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, 2011.

- [9] N. Patel e M. N. Uddin, *Design and Performance Analysis of a Magnetically Levitated Vertical Axis Wind Turbine Based Axial Flux PM Generator*, Thunder Bay, Ontario, Canada: Department of Electrical Engineering, Lakehead University, 2012.
- [10] A. A. Pop, F. Jurca, C. Oprea, M. Chirca, S. Breban e M. M. Radulescu, *Axial-flux vs. radial-flux permanent-magnet synchronous generators for micro-wind turbine application*, Cluj-Napoca, Romania: Technical University of Cluj-Napoca, 2013.
- [11] E. Kurt, S. Aslan, H. Gör e M. Demirtaş, "Electromagnetic Analyses of two Axial-Flux Permanent Magnet Generators (PMGs)," em *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Hakkari University, Hakkari, Istanbul, Turkey, 2013.
- [12] H. Lesani e Z. Nasiri-Gheidari, "Optimal Design of Adjustable Air-Gap, Two- Speed, Capacitor-Run, Single-Phase Axial Flux Induction Motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, p. Vol 28, 03 09 2013.
- [13] G.-C. Lee e T.-U. Jung, "Design of Dual Structural Axial Flux Permanent Magnet Generator for Small Wind Turbine," *IEEE Tencon - Spring*, Department of Electrical Engineering Kyngnam University Chang-Won, Korea, 2013.
- [14] Instituto Nacional da Propriedade Industrial, "Energia Oceânica," [Online]. Available:  
[http://www.marcaspatentes.pt/files/collections/pt\\_PT/1/300/302/Energia%20Oce%C3%A2nica.pdf](http://www.marcaspatentes.pt/files/collections/pt_PT/1/300/302/Energia%20Oce%C3%A2nica.pdf). [Acedido em 27 09 2013].
- [15] Agência Portuguesa do Ambiente, "Energia das Ondas," [Online]. Available:  
[http://www.apambiente.pt/\\_zdata/Divulgacao/Publicacoes/Guias%20e%20Manuais/ondas\\_lowres.pdf](http://www.apambiente.pt/_zdata/Divulgacao/Publicacoes/Guias%20e%20Manuais/ondas_lowres.pdf). [Acedido em 27 09 2013].
- [16] S. D. Umans, A. E. Fitzgerald e J. Charles Kingsley, "Electric machinery", Mc Graw Hill, 6th edition .
- [17] J. Lima e A. V. N. M. Pronto, ""Transverse Flux Permanent Magnet Generator for Ocean Wave Energy Conversion"," 2010.

- [18] UPC ICMAB, "Capítulo 6: Motor de Flujo Axial," [Online].  
Available:  
<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6288/10CAPITOL6.pdf?sequence=10>. [Acedido em 15 10 2013].
- [19] A. Consoli, A. Raciti, O. B. .. Dobrucky e V. Hrabovcova, "'Static and Dynamic Behaviour of Disk Synchronous Motors'," Department of Electrical, Electronic, and Systems Engineering, University of Catania, Italy; Department of Electric Traction and Energetics, University of Transport and Communications, Zilina, Slovakia.
- [20] "Caracterización de un Motor Existente," protótipo Bosch 5, [Online].  
Available:  
<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6297/04jl04de15.pdf?sequence=4>. [Acedido em 15 10 2013].
- [21] S. Z. J. Jintao Liang, "'Design and Analysis of Flux Concentrating Permanent Magnet Disc Synchronous Motor for Direct Driving System Xie'," Department of Mechatronics Engineering Xi'an Jiaotong University Shaanxi, China, 2011.
- [22] T. R. N. M. a. J. M. D. Coey, "'Physical methods, instruments and measurements'," vol III Permanent magnets .
- [23] A. G. Pronto, *Material de apoio à unidade curricular Tecnologia dos Materiais para a Energia, (Não publicado, contactar autor)*, FCT -UNL, 2012/2013.
- [24] R. N. Faria e L. F. C. P. Lima, "Introdução ao magnetismo dos materiais", 2005.
- [25] M. Ventim Neves, "'Projeto de um alternador síncrono em disco com ímãs permanentes", (Não publicado, contactar autor)," 2012.
- [26] Tiradentes, Comércio de Ferro e Aço, Lda., [Online].  
Available: <http://www.tiradentesonline.com.br/servicos.html>.  
[Acedido em 10 11 2013].
- [27] "Tabela de Fios AWG," [Online].  
Available: <http://www.mcm.ind.br/download/Tabela-condutores-cobre-AWG-x->

MM.pdf. [Acedido em 18 06 2013].

[28] CMS Magnetics , Comerciante de magnetos permanentes, [Online].

Available: <http://www.magnet4sale.com/index.php>. [Acedido em 20 11 2013].

[29] A. Carreira. [Online].

Available: <http://aerogeradores.blogs.sapo.pt/tag/Contacto>. [Acedido em 14 01 2014].