



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# **Gerador Síncrono de Imanes Permanentes para Microgeração Eólica Dimensionamento, Construção e Ensaio**

**Jorge Filipe Pontífice Gaspar**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletromecânica**  
(2º ciclo de estudos)

Orientadores: Prof. Doutor Davide Sérgio Baptista da Fonseca  
Prof. Doutor António João Marques Cardoso

**Covilhã, Outubro de 2013**



Tese realizada sob orientação de:

Professor Doutor Davide Sérgio Baptista da Fonseca  
Professor Auxiliar

e

Professor Doutor António João Marques Cardoso  
Professor Catedrático

Departamento de Engenharia Eletromecânica  
Universidade da Beira Interior



À Ana Farias, à Ana Gaspar, à Apolinária e ao António



# Agradecimentos

Ao Professor Davide Sérgio Baptista da Fonseca, quero expressar a minha gratidão por todo o apoio, dedicação, e orientação que me disponibilizou ao longo desta etapa, mas também gostaria de referir um laço de amizade que se tem desenvolver ao longo deste período.

Ao Professor António João Marques Cardoso quero também agradecer toda a disponibilidade que me sempre disponibilizou e a orientação necessária, bem como uma amizade que marca sempre pela positiva.

Agradeço aos meus amigos da faculdade em especial ao Emanuel Bastos, Miguel Vicente, Serafim Pinto e João Amado, por todo o tempo que me dispensaram não só para a realização desta dissertação mas também por todo o encorajamento e colaboração.

Também gostaria de agradecer ao professor João Monteiro que dispensou algumas preciosas horas do seu tempo para me ajudar com a elaboração de uns moldes na CNC existente na faculdade.

Não poderia de deixar de agradecer ao Sr. João Correia toda a sua disponibilidade ajuda e encorajamento que me deu, também quero agradecer ao Sr. Alexandre Garcia pela sua ajuda que me deu na construção do meu projeto.

À minha família que sempre me apoiaram e alentaram para chegar a está etapa da minha vida, um especial agradecimento a minha namorada Ana Farias, que esteve sempre ao meu lado, ajudando a ultrapassar obstáculos que pareciam que não se conseguiam ultrapassar.

Sem o apoio dedicação e sacrifício de todos os anteriormente referido, e também a todos aquele que por razões obvias não foram citados mas nem por isso menos importantes, ficam os meus agradecimentos.

A todos com grande gratidão

*Jorge Filipe Pontífice Gaspar*



## **Resumo**

A presente dissertação versa sobre a modelação e construção de uma máquina elétrica de ímanes permanentes de fluxo axial, cuja sua aplicabilidade em sistemas de baixas velocidades, como é o caso de geradores eólicos.

## **Palavras-chave**

Gerador síncrono de fluxo axial, microgeração eólica.



# Índice

## Conteúdo

Capítulo 1.....	1
1.1 Enquadramento .....	1
Capítulo 2.....	3
2.1 Introdução .....	3
2.2 Princípios de funcionamento.....	4
2.3 Topologias Geométricas.....	5
2.4 Configurações de máquinas com núcleo ferromagnético .....	7
2.4.1 Estrutura com um entreferro .....	7
2.4.2 Estrutura com duplo entreferro e estator completo.....	7
2.4.3 Estrutura com duplo entreferro e rotor inteiro .....	8
2.5 Estator .....	8
2.5.1 Resina epóxi.....	9
2.6 Rotor.....	9
2.6.1 Imanes Permanentes .....	10
2.6.2 Montagem de um imane .....	11
2.6.3 Imane num circuito magnético .....	12
2.6.4 Terras raras .....	14
2.7 Conclusões .....	15
Capítulo 3.....	17
3.1 Introdução .....	17
3.2 Análise do Desempenho o GSIP de Fluxo Axial .....	17
3.3 Critérios de Dimensionamento do GSIP de Fluxo Axial .....	18
3.4 Dimensionamento do GSIP de Fluxo Axial.....	19
3.4.1 Definição das Variáveis de Entrada.....	21
3.4.2 Requisitos do Sistema de Microgeração Eólica.....	21
Capítulo 4.....	22
Capítulo 5.....	23



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

A crescente preocupação como desenvolvimento sustentável tem funcionado como estímulo na produção de novas fontes de energia. No cenário nacional e internacional a demanda por novas fontes de energia tem atraído cada vez mais a atenção de investidores, através de incentivos fiscais, em conjunto com iniciativas governamentais. O desenvolvimento na área da tecnologia de materiais também favorece com a redução de custos, promovendo a participação das energias alternativas nas principais matrizes energéticas mundiais.

A energia eólica tem tornado a fonte mais atraente devido ao seu elevado retorno financeiro. Esse comportamento pode ser exemplificado em função do seu crescimento, mesmo em cenário de crise mundial de 2008, pode ser observado na figura 1.

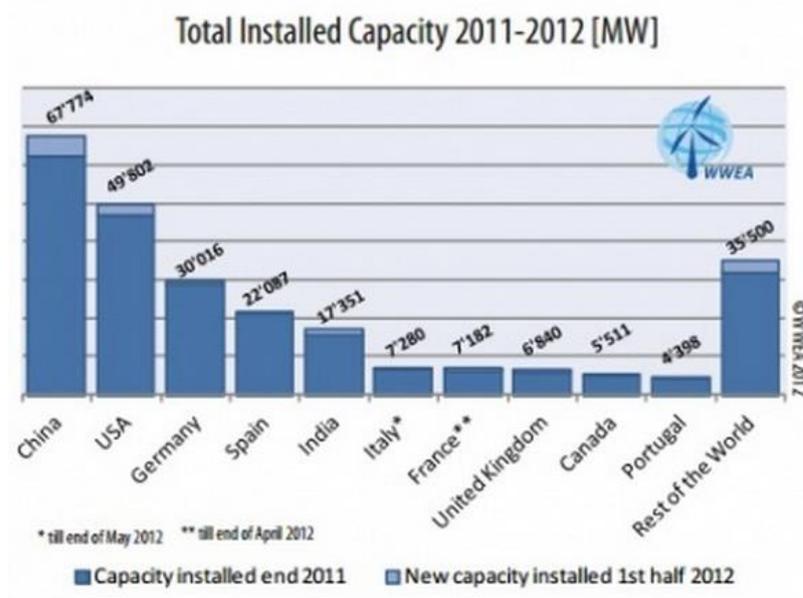


Fig. 1 - Capacidade eólica instalada a nível mundial até meados de 2012. [1]

O crescente consumo de energia, decorrente do modo de vida das sociedades moderna, e consequente pressão sobre os recursos fósseis e sobre os ecossistemas, levou a um incremento do interesse em formas de produção de energia elétrica baseada em fontes de energia renováveis. Em consequência, o paradigma dos sistemas eletrogeradores tem evoluído de uma base em que geração se encontra altamente concentrada em grandes unidades para uma situação em que a geração se encontra altamente disseminada em sistemas eletrogeradores de baixa potência, vulgarmente conhecidos por sistema de microgeração.

No caso de Portugal, é um país com poucas fontes de energia das fontes de energia não renováveis, uma vez que não possui nenhum poço de petróleo, minas de carvão ou depósito de gás. Em contrapartida é um país com um elevado potencial, que pode e deve ser explorado, não só na ótica ambiental, mas também para tornar o país menos dependente da importação de energia. Portugal apresenta uma rede hidrográfica relativamente densa, uma elevada exposição solar média anual, e uma vasta frente marítima que beneficia dos ventos atlânticos, o que possibilita o aproveitamento de potencial energético da água, luz, das ondas e do vento. [2] Assim Portugal está numa posição que pode tirar partido destas fontes e possibilita a compensação do défice energético.

No final de novembro de 2012, Portugal Continental tinha 10 778 MW de capacidade instalada para produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis. [3] A potência eólica instalada no final de novembro de 2012 totalizou 4 420 MW, distribuída por 222 parques com 2 394 aerogeradores, ao longo de todo o território Continental estando um aerogerador offshore. 36% da potência instalada está em parques com potência igual ou inferior a 25 MW.



Fig. 2 - Evolução da potência instalada em Portugal Continental (MW). [3]

Assim este estudo toda a análise que vai ser feita neste documento toma assim uma importância maior visto que este tipo de energia está em expansão não só em Portugal mas em todo o mundo.

## Capítulo 2

# Máquinas de Imanes Permanentes de Fluxo Axial

### 2.1 Introdução

O crescente consumo de energia, decorrente do modo de vida das sociedades moderna, e consequente pressão sobre os recursos fósseis e sobre os ecossistemas, levou a um incremento do interesse em formas de produção de energia elétrica baseada em fontes de energia renováveis. Em consequência, o paradigma dos sistemas electrogeradores tem evoluído de uma base em que geração se encontra altamente concentrada em grandes unidades para uma situação em que a geração se encontra altamente disseminada em sistemas electrogeradores de baixa potência, vulgarmente conhecidos por sistema de microgeração.

Graças a sua elevada fiabilidade e baixa manutibilidade, é usual, em aplicações de geração eólica de baixa potência, a utilização de geradores síncronos de ímanes permanentes (GSIPs), nomeadamente na sua configuração de fluxo axial

Este tipo de máquina apresenta, em relação a sua homóloga radial, algumas vantagens, onde se destaca o facto de estas máquinas serem, na generalidade, máquinas mais compactas, nomeadamente quando se pretendem máquinas com elevado número de pares de polos para aplicações de baixa velocidade.

Importa ainda referir que os GSIPs de fluxo axial permitem u no entanto referir Ímanes com melhores propriedades magnéticas (dopados de terras raras), menos manutenção, logo torna as máquinas com uma maior fiabilidade. Estas por sua vez são mais pequenas na sua volumetria, podem ser associados mais ímanes o que vai implicar um aumento do binário da própria máquina.

Graças a sua elevada fiabilidade e baixa manutibilidade, é usual, em aplicações de geração eólica de baixa potência, a utilização de geradores síncronos de ímanes permanentes (GSIPs), nomeadamente na sua configuração de fluxo axial.

O primeiro estudo sobre fiabilidade surge fiabilidade de equipamentos elétricos data de 1962 [4] este tipo de estudo tem cada vez mais importância não só nos GSIP, mas também em todos os equipamentos. Atualmente é um tema relevante não só para a indústria mas também para fabricante de motores e geradores elétricos. Existindo assim entidades como o caso IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) outras entidades como o EEI(Edison Electric

Institute) e o EPRI(Electric Power Research Institute) motivados por idênticas preocupações no âmbito da fiabilidade de equipamentos elétricos usados em instalações industriais [4].

Este tipo de máquina apresenta, em relação a sua homóloga radial, algumas vantagens, onde se destaca o facto de estas máquinas serem, na generalidade, máquinas mais compactas, nomeadamente quando se pretendem máquinas com elevado número de pares de polos para aplicações de baixa velocidade.

Importa ainda referir que os GSIPs de fluxo axial permitem no entanto referir Ímanes com melhores propriedades magnéticas (dopados de terras raras), menos manutenção, logo torna as máquinas com uma maior fiabilidade. Estas por sua vez são mais pequenas na sua volumetria, podem ser associados mais imanes o que vai implicar um aumento do binário da própria máquina.

## 2.2 Princípios de funcionamento

O gerador síncrono de ímanes permanentes é composta por um estator, neste estão alojados enrolamentos de bobinas que podem ser trifásicos ou monofásicos e onde será induzida tensão pelo movimento do rotor. No estator será induzida uma tensão alternada, a qual produzirá uma corrente igualmente alternada quando o mesmo se encontra sobre carga. O rotor é constituído por ímanes permanentes que vão gerar um campo magnético principal na máquina.

É no rotor que reside a principal diferença, na máquina síncrona de rotor bobinado, cada polo é constituído por um material ferromagnético onde está alojado a bobina. Essa bobina é alimentada com uma corrente continua produzindo um fluxo magnético que é conduzido, através do material ferromagnético do núcleo das bobinas, até as bobinas do estator.

Esses polos da máquina síncrona de rotor bobinado podem ser substituídos por ímanes permanentes. Os ímanes produzem fluxo naturalmente sem necessidade de excitação externa como no caso das bobinas do rotor bobinado, o fluxo produzido pelos ímanes não pode ser controlado como no caso do fluxo produzido pelas bobinas, este pode ser controlado através da corrente de excitação.

Este tipo de máquinas apresenta assim desvantagens em relação a máquina síncrona de rotor bobinado:

- Não permite controlo de fluxo de excitação;
- Não permite o controlo da potência reativa.

No entanto este tipo de máquinas apresenta vantagens nomeadamente:

- Ausência de sistemas de excitação e comutação;
- Menos perdas por efeito de Joule, pois não existe intensidades de corrente nem condutores no rotor;
- Menor necessidade de manutenção
- Melhor relação potência/volume, sendo mais compacta e robusta em relação a máquina síncrona de rotor bobinado.

Assim sendo as máquinas de ímãs permanentes apresentam uma série de vantagens em relação as máquinas de rotor bobinado.

## 2.3 Topologias Geométricas

As máquinas “tipo disco”, cuja orientação de fluxo é axial, onde a direção do fluxo é paralela ao sentido de rotação, está pouco disseminadas e existem poucos registros comerciais para esse tipo de topologia. Apesar do caráter inovador, essa máquina foi inventada anteriormente a máquina de fluxo radial, sendo datada de 1831 por M. Faraday [5].

Comparativamente, as máquinas de fluxo axial demonstram superioridade em densidade de potência e reduzido volume efetivo, o que favorece a utilização dessa topologia em sistemas eólicos [6]. Ao mesmo tempo, uma significativa redução da parcela de perdas no núcleo ferromagnético, proporciona um valor de eficiência superior nas máquinas de fluxo axial. A orientação do fluxo magnético no interior de uma máquina elétrica pode proporcionar diferenças entre tamanho, potência e eficiência considerando potências equivalentes com orientação de fluxo diferente. Para o caso de um gerador eólico, onde uma maior densidade de potência pode ser obtida para um

A primeira patente de uma máquina de Fluxo Axial data de 1837 foi registrada por T. Davenport, se bem que o físico britânico M. Faraday desenvolveu a primeira máquina data de 1831, a geometria em forma de disco com o fluxo magnético axial, este tipo de construção foi também adotada uns anos mais tarde pelo servo-croata Nicolas Tesla naturalizado como cidadão americano, engenheiro elétrico, engenheiro mecânico, físico e futurista, mais conhecido pela sua contribuição para a utilização da corrente alterada.

Este tipo de configuração não foi muito desenvolvida, à época, devido a dificuldades de construção e montagem de estatores laminados. As características disponíveis dos materiais magnéticos no início do desenvolvimento das máquinas de ímãs permanentes eram fracas por consequência inviabilizaram o desenvolvimento e a comercialização destes. Assim sendo, nas máquinas, os ímãs foram substituídos por enrolamentos geradores de fluxo magnético, usualmente designados por enrolamentos de excitação.

Nas últimas décadas, com o surgimento de Ímanes permanentes com melhores propriedades magnéticas (dopados de terras raras), permitiu impulsionar a sua utilização na construção de máquinas e, no caso das máquinas de fluxo axial, prescindir do núcleo ferromagnético do estator sem afetar de forma substancial a eficiência. Adicionalmente, em máquinas de fluxo radial, a introdução de ímanes permanentes conduziu a uma redução da volumetria das máquinas, bem como um incremento da fiabilidade conseguindo-se assim reduzir as necessidades de manutenção.

A evolução topológica das máquinas elétricas e também o conseqüente avanço dos sistemas eletrônicos de conversão de energia, que permitem dissociar o projeto da máquina da frequência e da tensão da rede e o orienta para aplicação de uma turbina eólica numa perspetiva de um produto elétrico.

No conceito de produto elétrico integrado, as máquinas elétricas são projetadas e otimizadas para reduzir materiais e dispositivos de interface, que permite a redução de custos. Este tipo de conceção não é só uma integração mecânica com o intuito de redução dos equipamentos intervenientes, peso e custo associados, mas também a solução mais adequada devido ao ambiente onde as mesmas se situam.

As máquinas de ímanes permanentes são caracterizadas pelo seu fluxo, que este é paralelo ao eixo da máquina, ao contrário das máquinas de fluxo radial. A excitação da máquina é conseguida a partir de ímanes permanentes dispostos na parte móvel da máquina.

A parte móvel da máquina, ou seja, o rotor em forma de disco onde estão dispostos os ímanes e a parte do estator onde se situam as bobinas, apresentam uma geometria em forma de anel.

O comprimento radial útil da máquina (GSIPs) desde o raio interno até ao raio externo do estator define a parte ativa da máquina, onde se verifica a transformação de energia mecânica para energia elétrica.

A geometria da máquina está dependente do comprimento axial da máquina depende da indução dos núcleos quer no estator quer no rotor.

A medida que o número de polos aumenta o comprimento radial útil mantém-se mas o comprimento axial pode diminuir, ou seja o material ferromagnético pode ser totalmente utilizado quer na diminuição radial quer na diminuição axial, ao contrário do que verifica nas máquinas de fluxo radial, torna-se mais evidente para um elevado número de polos, associado a aplicações de baixas velocidades. Existem três tipos diferente de configurações dos geradores de ímanes permanentes.

- Estruturas com um entreferro (I)
- Estruturas com duplo entreferro, estator interno (II)
- Estruturas com duplo entreferro, rotor interno (III)
- Estrutura com duplo rotor

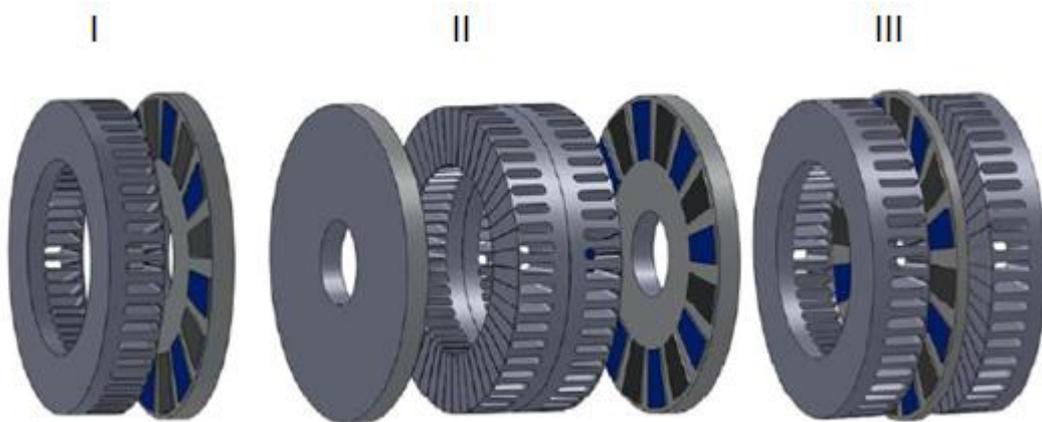


Fig. 1 - Configurações possíveis nos geradores de permanentes

A potência que estas debitam é dependente do seu diâmetro máximo admissível, que por sua vez é dependente de fatores como as forças axiais suportada pelos rolamentos, a ligação da parte mecânica entre o disco retórico e o veio e por sua vez do comprimento axial do entreferro.

## 2.4 Configurações de máquinas com núcleo ferromagnético

### 2.4.1 Estrutura com um entreferro

Neste tipo de configuração, os núcleos do estator e o rotor são constituídos por materiais ferromagnéticos de forma a contribuírem para a redução da relutância magnética. A principal desvantagem desta configuração reside na força axial desequilibrada que se estabelece entre o estator e os ímanes do rotor. Este facto deve ser previamente estudado ainda numa fase de projeto uma vez existe forças que vão existir forças que não são equilibradas podendo assim provocar um desalinhamento na máquina (GSIPs). Para evitar o desequilíbrio provocado pela força axial terá que se utilizar um tipo de rolamentos autocompensadores que evite as deflexões no disco.

### 2.4.2 Estrutura com duplo entreferro e estator completo

Esta estrutura também denominada de estrutura toroidal tem os enrolamentos distribuídos num estator completo, este pode ser com ou sem ranhuras. A desvantagem esta configuração é o acoplamento do estator a parte fixa da máquina, também é de salientar o fato relevante

da dissipação do calor, assim como as perdas por atrito, uma vez que se está na presença de dois discos em movimento. A topologia dos ímanes norte/norte ou sul/norte, vão influenciar diretamente o comprimento axial do estator e a disposição dos enrolamentos. Na estrutura norte/norte o volume do estator é superior, e embora o enrolamento esteja numa distribuição toroidal assim este tipo de máquina terá condutores não ativo, pode-se assim assumir como uma desvantagem. Na configuração norte\sul como o fluxo atravessa o estator na direção axial, assim o volume de ferro atravessado será menor, logo por consequência as perdas no ferro também serão menores bem como o comprimento axial da máquina.

### **2.4.3 Estrutura com duplo entreferro e rotor inteiro**

A topologia de duplo entreferro e rotor inteiro em termos de construção é relativamente fácil de conceber pela fixação dos estatores a carcaça da máquina. Os ímanes podem estar dispostos nas superfícies do mesmo ou embutidos na estrutura do mesmo, com as linhas de fluxo útil na direção axial.

A disposição dos ímanes na superfície do rotor possibilita a não utilização do material ferromagnético assim sendo o único disco utilizado é apenas de suporte para os ímanes, com esta disposição dos ímanes permite uma redução no comprimento axial da máquina podendo assim definir como uma vantagem comparativamente aos ímanes embutidos no rotor.

## **2.5 Estator**

Gerador sem núcleo ferromagnético este tipo de máquina de fluxo axial sem núcleo ferromagnético no estator, denominada “coreless”, o enrolamento do estator localizados num material não magnético, suporta toda a estrutura. Essa estrutura pode variar desde uma resina com propriedades estruturais satisfatórias, até o caso de plásticos, e náilons. Essa configuração garante que o estator não apresente perdas magnéticas, pelo fato de não existir circulação de correntes parasitas e histerese magnética. As perdas nos ímanes permanentes e nos discos do rotor são desprezíveis pela não variação do fluxo magnético no rotor, isso faz com que esta máquina opere com elevados valores de eficiência. Este tipo de tipologia nestas máquinas garante uma alta eficiência, porém um número significativo de ímanes no estator garante uma densidade de fluxo magnético no entreferro. Os ímanes são colocados em posição de magnetização inversa, o norte de um ímã virado para o sul do ímã colocado a sua frente como se pode observar.



ferromagnético, geralmente em aço macio quando existe a necessidade de um regime permanente sinusoidal, não são existem variações da componente fundamental do fluxo. Quando é dispensável a presença de um material ferromagnético para condução do fluxo recorre-se a uma estrutura em alumínio para sustentação dos ímanes, para além de ter um bom comportamento mecânico a sua densidade é menor que a do aço o que concede ao suporte um menor peso, ou pode-se sempre optar por um material equivalente. Os ímanes distribuídos na superfície rotórica conduzem a uma concentração de fluxo magnético, ou seja e indução do entreferro pode ser maior que a indução remanescente produzida pelos próprios ímanes.

A disposição dos ímanes numa estrutura ferromagnética e fluxo de fugas nas extremidades da mesma é elevado,

### **2.6.1 Imanes Permanentes**

A partir da década de 80 verificou-se um crescimento significativo da qualidade e eficácia dos ímanes produzidos, isto é, todos os ímanes que não eram naturais mas manipulados pelo ser humano. Este tipo de material tornou-se cada vez mais apelativo quer pelas suas vantagens que pelo seu preço competitivo, assim o mesmo é cada vez mais usado em várias aplicações. O principal interesse deste tipo de materiais é a capacidade de gerar um fluxo magnético sem existir qualquer tipo de energia elétrica associada e sem dissipação de energia, podendo assim resultar em menor consumo de energia, levando assim a um consumo de energia elétrico menor, levando à redução de perda e aumento de rendimento.

Pode-se enunciar vantagens e inconvenientes do uso de ímanes permanentes nos dispositivos eletromecânicos:

Vantagens:

- Máquinas mais compactas;
- Melhores rendimentos;

Inconvenientes:

- Custo inicial de construção mais elevado (nomeadamente os ímanes de terras raras)
- Risco de desmagnetização irreversível (pode ocorrer por temperaturas elevadas)
- Impossibilidade de controlar o fluxo magnético.

A temperatura de Curie é a temperatura a partir da qual o material perde as suas propriedades ferromagnéticas. Quanto mais alto for esse ponto, menor o risco de ocorrer defeito no dispositivo eletromecânico, nos ímãs denominados por ímãs de terras raras (neodímio ferro e boro  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ) esse valor é de  $120^\circ\text{C}$ .

## 2.6.2 Montagem de um ímã

O comportamento de um ímã pode ser descrito pela curva de histerese  $B(H)$ . Para a maioria dos ímãs, a região de trabalho é linear (a indução (densidade de fluxo magnético)  $B$  dentro do material varia linearmente em função do campo magnético  $H$  externo aplicado). Os ímãs são materiais magnéticos denominados duros, isto é, é um material ferromagnético com um largo ciclo de histerese.

- Indução (densidade de fluxo magnético) de saturação  $B_{\text{sat}}$  (é também o campo de saturação  $H_{\text{sat}}$ ); é o ponto do ciclo de histerese onde todos os dipolos estão alinhados segundo o campo magnético externo. A partir desse ponto, a indução  $B$  do ímã não aumenta com o aumento do campo aplicado.
- Indução remanescente  $B_r$ ; é o valor da indução (densidade do fluxo magnético) quando o campo magnético externo ( $H$ ) é nulo. Quanto mais alto esse valor, melhor o ímã, pois assim ele é capaz de fornecer um alto valor de fluxo magnético.
- Campo coercivo  $H_c$ ; é o valor do campo magnético externo ( $H$ ) capaz de anular a indução ( $B$ ) no ímã. Quanto mais alto esse valor, mais difícil é de desmagnetizar o ímã logo por consequência melhor é o ímã.
- Permeabilidade magnética relativa  $\mu_a$ ; o produto desse parâmetro com a permeabilidade magnética do vácuo indica o declive da região linear da reta  $B(H)$ :  $\mu_r \mu_0 = \Delta B / \Delta H$ .
- Densidade de energia máxima; corresponde ao máximo do produto da indução pelo campo magnético  $W_{\text{max}} = (BH)_{\text{max}} / 2 [\text{Joule}/\text{m}^3]$ .

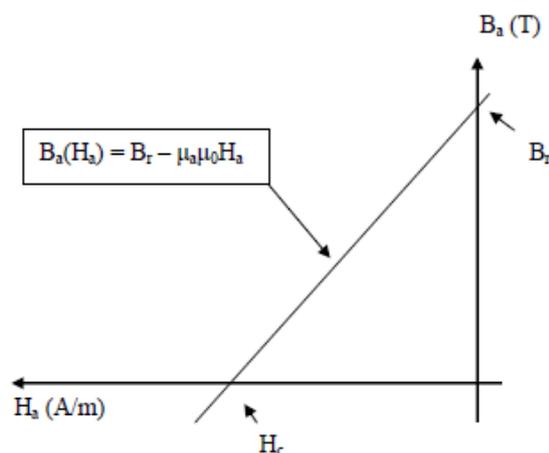


Fig. 3 - Representação da desmagnetização  $B(H)$  de um ímã.

### 2.6.3 Ímã num circuito magnético

A figura a seguir apresentada representa de uma forma muito sucinta o comportamento de um ímã permanente num circuito magnético. Serão feitas as seguintes considerações:

- Não existem perdas de fluxo ao longo do circuito, sendo que todo o fluxo produzido pelo ímã é canalizado pelo ferro e entreferro;
- O campo magnético  $H$  dentro do ferro é desprezável em relação aos campos do entreferro e do ímã, ou seja, a permeabilidade do ferro é considerada infinita e seu comportamento é linear não saturado. [8]

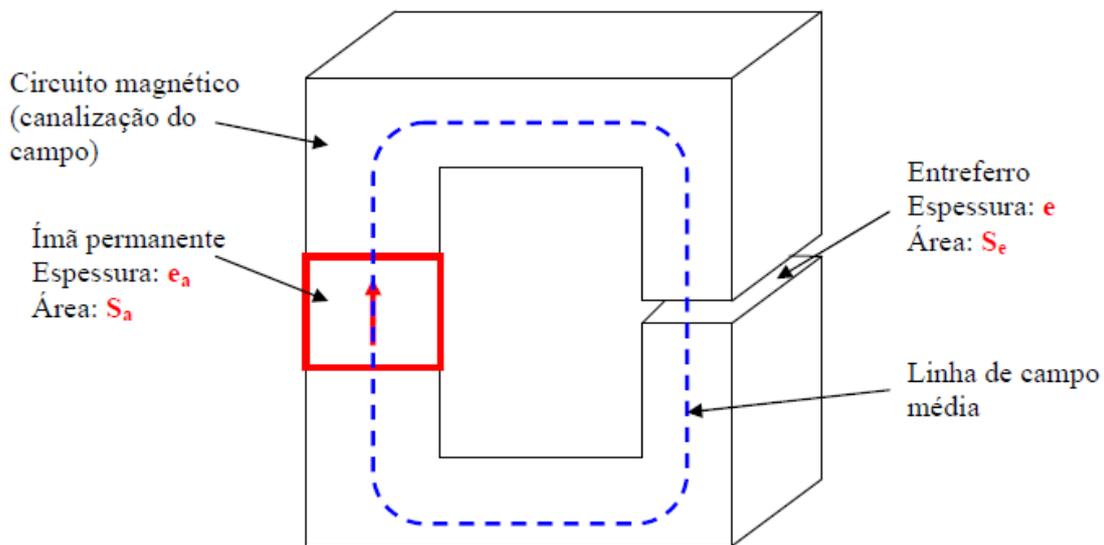


Fig. 4 - Circuito magnético contendo um ímã, um núcleo de ferro e um entreferro.

Seja  $H_a$  e  $B_a$  o campo e a indução magnética, respetivamente, dentro do ímã. Seja  $H_e$  e  $B_e$  o campo e a indução magnética, respetivamente, dentro do entreferro.

Do teorema de Ampere, temos:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = i_{\text{env}} \quad (2.1)$$

$$H_a \cdot e_a + H_e \cdot e = 0 \quad (2.2)$$

Uma vez que  $H_{fe}=0$

Sabe-se que:

$$B_e = \mu_0 H_e \quad (2.3)$$

Pela conservação do fluxo vêm:

$$\varphi_a = B_a \cdot S_a = \varphi_e = B_e \cdot S_e \varphi_a = B_a \cdot \quad (2.4)$$

O que resulta em:

$$B_a = B_e = B \frac{S_e}{S_a S_a} = \frac{H_e}{\mu_0} \cdot \frac{S_e}{S_a} = -\frac{H_a \cdot e_a}{\mu_0} \cdot \frac{S_e}{S_a} \quad (5)$$

A equação 5  $B_a(H_a)$  denomina-se curva de carga. A sua interseção com a curva de magnetização dada pela equação (1), dita o ponto de funcionamento.

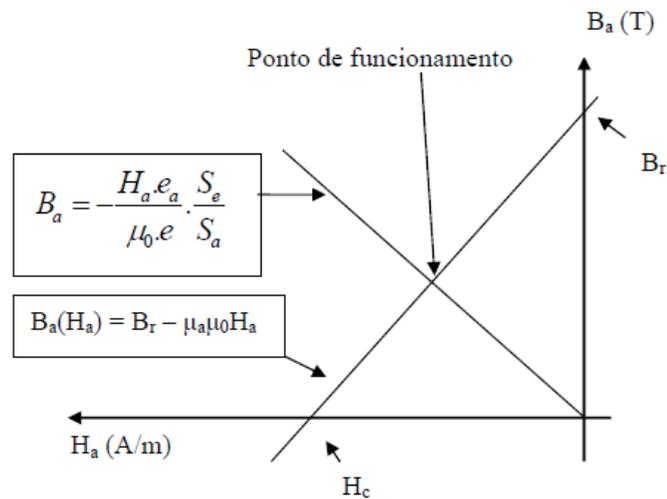


Fig. 5 - Ponto de funcionamento do imane e a curva do entreferro.

A presença de um entreferro no circuito magnético contribui com a redução da indução  $B_a$  dentro do imane em relação a sua indução remanescente, daí o nome de curva de carga. Se o entreferro varia (como se tem o caso das máquinas com ranhuras no estator) o ponto de funcionamento que pode resultar em perdas magnéticas. [8]

Se o entreferro for nulo diz-se que existe um curto-circuito magnético, e a indução dentro do imane é igual a sua indução remanescente ( $B_a=B_r$ ).

Ao contrario de um circuito aberto (entreferro infinito), a linha de carga é coincidente com o eixo das abscissas de forma a indução  $B_a$  dentro do imane é parcialmente nula. Pode originar a desmagnetização de alguns imanes. [9]

## 2.6.4 Terras raras

São os ímanes com menor comportamento. O seu campo coercitivo  $H_c$  é superior ao dos ferrites. Possuem assim um largo ciclo de histerese, além disso apresenta grande densidade de energia, assim sendo são os ímanes recomendados para máquinas de altas performances. [5] [8] [10]

Neodímio - Ferro - Boro (NdFeB)

É o tipo de imane mais recente (década de 80) [10]. São menos caros que os Samário-Cobalto(SmCo) ocupando assim o segundo lugar dos ímanes de maior custo. Apresentão a maior indução remanescente  $B_r$  e o campo coercitivo  $H_c$  equiparável aos anteriormente citados. O grande inconveniente desse material é que apresenta baixa temperatura de Curie (da ordem de 140°C) e oxidam com facilidade. Estes mesmos ímanes encontram-se em estudo a fim de minimizar essas desvantagens. As diferenças entre os tipos de ímanes citados a tabelam 1 e o gráfico 3. Na tabela 1 são apresentadas duas variedades de Smco e duas variedades de ferrites. Observa-se que os ímanes de terra-rara são os mais caros.

O NdFeB apresenta maior densidade de energia  $(BH)_{max}$ , assim como os maiores valores de indução remanescente  $B_r$ . O campo coercitivo  $H_c$  é próximo ao do SmCo. Vê-se que a sua indução varia fortemente com a temperatura (coef B %K), mas essa variação é ainda mais forte nos ferrites. Observe-se que o grande inconveniente é a sua baixa temperatura máxima de operação, em relação aos outros tipos.

Tipo	$(BH)_{max}$ kJ/m <sup>3</sup>	$B_r$ à 25°C (T)	$H_c$ kA/m	coef B %/K	Temperatura máxima	Preço
NdFeB	200 a 380	1,2 a 1,5	900 a 2000	-0,1	140 a 210	3º mais alto
SmCo <sub>5</sub>	140 a 200	1	2000	-0,04	250	2º mais alto
Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	180 a 240	1,05	2000	- 0,03	350	1º mais alto
Alnico	50 a 85	1,1 a 1,3	130	-0,02	500	3º mais baixo
Ferrites strontium	27 a 35	0,3 a 0,4	250	-0,2	250	2º mais baixo
Ferrites barium	8 a 30	0,2 a 0,4	170	-0,2	-	1º mais baixo

Tabela 1. Comparação de alguns ímanes existentes no mercado.

O gráfico apresentado a abaixo mostra as curvas de desmagnetização de diferentes tipos de ímanes. Os NdFeB e os SmCo apresentam os maiores valores de campo coercitivo  $H_c$  e indução remanescente  $B_r$ .

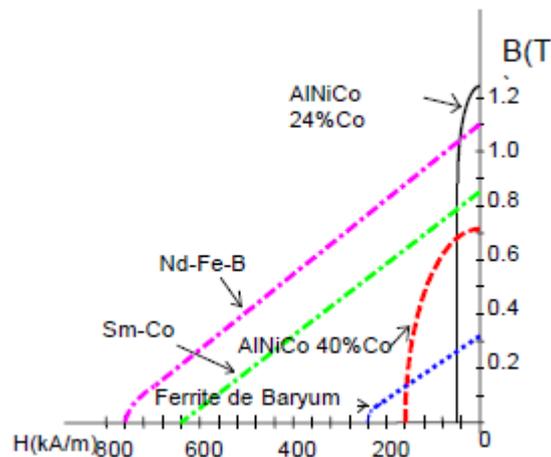


Fig. 6 - Curva de desmagnetização  $B(H)$  de alguns tipos de ímanes.

## 2.7 Conclusões

Neste capítulo foram abordados algumas temáticas como por exemplo o princípio de funcionamento das máquinas síncronas no geral, dentro deste item foram apontados as vantagens e desvantagens mais relevantes.

Topologias existentes foi também um ponto onde incidiu este capítulo, uma breve introdução para que permitiu fundamentar a origem e todo o funcionamento das mesmas. Configuração de máquinas com núcleo ferromagnético, estrutura com um entreferro é constituída por um disco de bobinas e um outro disco de ímanes existindo assim entre eles apenas um entreferro.

Existe também com duplo entreferro e estator completo, este tipo de configuração é constituído por um disco duplo onde estão situado duas camadas de bobinas e outros dois onde estão os ímanes onde existe dois entreferros nesta configuração. Ainda foi referido uma outra configuração que é denominada de estrutura com duplo entreferro e rotor inteiro. Esta com uma particularidade em relação a que anteriormente citada que é o fato de ter três discos cujos quais os discos das extremidades são os discos que suportam as bobinas e um disco central que suporta os ímanes.

Neste mesmo capítulo também foi abordado o rotor e o estator e as suas funções neste tipo de máquinas e como são constituídos. Breve introdução aos ímanes permanentes, citação de

vantagens e desvantagens dos mesmos, as suas montagens e os respectivos comportamentos e ainda os elementos que os constituem.

Assim no desenvolver deste capítulo permitiu direcionar o projeto para uma estrutura de duplo entreferro e rotor inteiro, mas com ligeiras alterações em relação ao estator. Este é constituído pelas tradicionais bobinas, mas estas em vez de estarem numa estrutura laminada estarão embebidas numa estrutura de resina epóxi. Esta construção do estator permite de grande parte das perdas existentes, quando estas estão embebidas numa estrutura lâminas em chapa.

A configuração escolhida para o desenvolvimento do projeto GSIP foi a configuração de duplo rotor. Esta configuração foi adotada por causa da constituição do estator. O GSIP tem um estator diferente dos tipos apresentados anteriormente, é o estator que contém as suas bobinas envolvidas em material não magnético e não condutor. Atualmente são ainda poucos os casos deste tipo de configuração (micro geração na ordem dos KWs), mas os geradores irão evoluir neste sentido uma vez que tem uma maior eficiência.

## Capítulo 3

# Dimensionamento de um Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes de Fluxo Axial

### 3.1 Introdução

Os geradores de ímanes permanentes de fluxo axial têm uma geometria diferente em relação aos geradores radiais, esta diferença reside sobretudo na diferença de geometria mas também no princípio que as rege as equações eletromagnéticas. As equações de binário e potência vão ser apresentadas no decorrer do capítulo.

Os GSIP, também como as máquinas de fluxo radial tem dois modos de funcionamento, dependendo da forma de onda e das intensidades de corrente nos enrolamentos como efeito da onda da força eletromotriz, pode ser quadrada ou sinusoidal. Quando estas formas de onda se apresentam quadradas o modo de funcionamento da máquina é semelhante a uma máquina DC sem escovas. [11] [12]

Os GSIP são considerados máquinas da alta eficiência devido a ausência de perdas no núcleo estático. O enrolamento do estator sem núcleo é constituído por bobinas ligadas em série de forma trapezoidal. [13]

No entanto as suas aplicações têm sido limitadas e algumas dificuldades têm sido sentidas, uma delas é a força centrífuga a que os ímanes estão sujeitos, que tende a move-los dos discos onde estão fixos, assim sendo as gamas de velocidades (200 rpm e 1900rpm) a que estes GSIP são baixas denominando-os como geradores de baixa velocidade. [13] [14]

### 3.2 Análise do Desempenho o GSIP de Fluxo Axial

Analisando o desempenho do GSIP de fluxo axial comparativamente as topologias das outras máquinas é uma tarefa difícil, uma vez que existem várias estruturas, e consegue-se minimizar através de uma escolha adequada das topologias face as necessidades.

Este tipo de máquinas denominadas como “coreless” possui os enrolamentos do estator envolvidos em material não magnético e não condutivo que suporta as bobinas. O estator não apresenta perdas magnéticas, e as perdas nos ímanes permanentes e nos discos do rotor são desprezáveis pela inexistência de harmónicos espaciais devido ao espaçamento entre eles.

Este tipo de estrutura oferece alta eficiência e cogging torque nulo (binário devido a interação dos ímãs permanentes do rotor e as bobinas do estator), porém um grande volume de ímãs é necessário para desenvolver um fluxo no entreferro. [15]

O enrolamento do estator é localizado no entreferro entre os ímãs permanentes montados nos discos do rotor e em posição de magnetização invertida, isto é, com o Norte de um ímã virado para o Sul do outro. Essa configuração denomina-se NS, e o caso contrário em que os ímãs possuem o mesmo polo magnético virado um para o outro é denominado NN.

### 3.3 Critérios de Dimensionamento do GSIP de Fluxo Axial

Para o dimensionamento de um GSIP é essencial recorrer ao circuito equivalente por fase da máquina da máquina como é mostrado na Fig.7. Neste circuito,  $R_s$ ,  $L_s$ ,  $e_m$ ,  $v_a$ , e  $i_a$  são as resistências que dizem respeito ao estator, indutância do estator a força eletromotriz induzida devido ao fluxo a tensão de fase instantânea fundamental e atual, respectivamente. A resistência equivalente das perdas por correntes parasitas do estator é representado por  $R_e$ . O  $L_s$  indutância síncrona consiste na reação do rotor e o  $L_a$  indutância de fuga total  $L_l$  indutância apresentados como:

$$L_l = L_{tr} + L_{ld} + L_{le} \quad (3.1)$$

Onde  $L_{ld}$ ,  $L_{ld}$  e  $L_{le}$  são as indutâncias de dispersão radial, o diferencial de indutância em torno da porção radial de condutores, e no final do enrolamento indutância de dispersão respectivamente. Ao contrário das máquinas convencionais de ranhuras, não existe uma definição clara para a fuga de indutância no sistema coreless, assim não é possível expressar  $L_{ld}$ ,  $L_{ld}$  e  $L_{le}$  com formulas exatas.

Tendo por base várias análises de elementos finitos em 2D para se poder calcular o efeito das indutâncias de fugas, vários métodos têm sido apresentados na literatura [16] [17] e [18]. Assim sendo pode ser calculado com o auxílio do programa de elementos finitos, os parâmetros do circuito equivalente limitado pelo tracejado da Fig. 7.

O fluxo do estator total dos enrolamentos de fase  $\Psi_{ABC}$  fluxo de fuga, é calculada usando o teorema de Stokes.

$$\psi_{ABC} = \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_s \vec{\nabla} \times \vec{A} \cdot d\vec{s} = \oint_c \vec{A} \cdot d\vec{l} \quad (3.2)$$

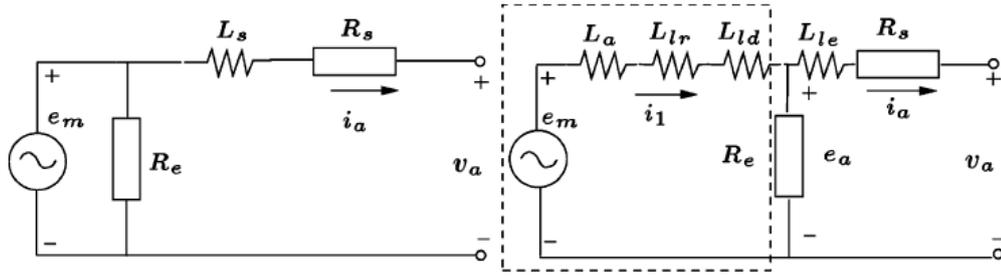


Fig. 7 Esquema equivalente de um GSIP representativo de uma só fase.

Nesta equação  $B$ ,  $A$ ,  $s$  e  $l$  são; a densidade do fluxo, o potencial do vetor magnético, área da superfície do enrolamento, e o comprimento da zona exterior, respetivamente.

### 3.4 Dimensionamento do GSIP de Fluxo Axial

A ligação de fluxo de uma bobina de fase pode ser calculada, calculando a diferença entre os valores do potencial vetor magnéticos máximos de cada lado da bobina. No caso em que a bobina não é muito fina, o potencial vetor magnético varia na área de seção transversal da bobina. Por conseguinte, a média magnético valores de potencial vetor deve ser usado. [19] Para os elementos triangulares de primeira ordem, a ligação de fluxo de uma bobina com  $N$  espiras, a área  $S$  e comprimento  $L$  é dada por:

$$\psi = N \sum_{j=1}^n \frac{\Delta_j}{S} \left[ \frac{\zeta}{3} \sum_{i=1}^3 A_{ij} \right] l \quad (3.3)$$

Onde  $A_{ij}$  é o valor do vetor potencial magnético do elemento  $j$  triangular,  $\zeta=+1$  ou  $\zeta=-1$  indica a direção de integração para dentro ou fora do plano,  $\Delta_j$  é a área do elemento triangular  $j$  e  $N$  é o número total de elementos das áreas em curso ou entrada/saída da bobina. Para um GSIP máquina que é modelado com um único polo devido à simetria, a ligação de fluxo total dos enrolamentos de fase é:

$$\psi_{ABC} = \frac{2pNL}{a_p S} \sum_{j=1}^u \left[ \frac{\Delta_j \zeta}{3} \sum_{i=1}^3 A_{ij} \right] \quad (3.4)$$

Sendo  $u$  o número total de elementos da área da bobina da fase na região do polo e  $a_p$  o número de circuitos paralelos ao enrolamentos do estator. Para calcular as perdas de fluxo com a FEM, é necessário especificar a atual fase  $I = \hat{I}e^{j\theta}$  da máquina. A amplitude desta corrente pode ser determinada a partir de uma perda no cobre, que foi determinada com a análise térmica da máquina, usando:

$$\hat{I} = \sqrt{\frac{2P_{cu}}{3R_s}} = I_q; (I_d = 0) \quad (3.5)$$

Em que o angulo em estudo é  $\theta = 90^\circ$  assume-se como uma carga resistiva equilibrada. Com a componente de amplitudes  $I_d$  e  $I_q$  as correntes trifásicas  $i_{abc}$ , as quais necessitam de ser colocadas num programa de elementos finitos, de acordo com a posição do rotor, podem ser calculadas através da transformação inversa de Park, isto é:

$$[i_{abc}] = [K_p]^{-1}[i_{dqo}] \quad (3.6)$$

onde

$$K_p = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

onde,  $\theta = \omega t$ , e  $\omega$  é a velocidade angular da máquina expressa em rad/seg.

Através da implementação das seguintes relações as indutâncias obtêm-se a partir das seguintes expressões:

$$L_{sd} = \frac{\psi_d - \psi_f}{i_d}; L_{sq} = \frac{\psi_q}{i_q} \quad (3.8)$$

Em que  $\psi_f$  é o fluxo produzido pelos imanes. [20]

Os ímanes produzem as duas componentes, axial e tangencial dos campos magnéticos na região do entreferro. O movimento circular dos ímanes vai produzir um campo alternado nas bobinas do estator nas direções axiais e tangenciais. Estes dois campos individualmente induzem correntes de Foucault nos enrolamentos do estator, estas correntes de Foucault são proporcionais aa velocidade a que a máquina opera, quanto maior a velocidade maior são as perdas, aumentando assim a temperatura nos enrolamentos e por consequência baixa a eficiência da máquina.

Pode também ser calculado da indução pelo método clássico, assim é apresentado a seguinte formula:

$$L_{le} = 2\mu_0 \frac{N^0 l_{le} \psi_{le}}{pq} \quad (3.9)$$

Onde  $p, q, e l_{le}$  são o número de pares de polos, o número de bobinas por polo por fase e o comprimento da ligação de fase, respetivamente e pode  $\psi_{le}$  ser obtido a partir da seguinte expressão

$$\psi_{le} \approx 0.3q \quad (3.10)$$

### 3.4.1 Definição das Variáveis de Entrada

Também faz todo o sentido falar da eficiência do GSIP assim sendo, ao serem ignoradas as perdas mecânicas de todos os elementos mecânicos a potência de entrada pode ser calculada de seguinte forma:

$$P_{in} = P_{elm} + \Delta P_{rot} \quad (3.11)$$

Onde  $P_{elm}$  é a energia eletromagnética, e  $\Delta P_{rot}$  são as perdas de rotação (atritos, desvios laterais) isto é:

$$\Delta P_{rot} = \Delta P_{fr} + \Delta P_{dl} \quad (3.12)$$

Para o cálculo das perdas por atrito pode-se utilizar a relação empírica [16], isto é,

$$\Delta P_{dl} = \frac{1}{2} c_f \rho (\pi n)^3 (D_{out}^5 - D_{in}^5) \quad (3.13)$$

Quando,  $c_f, \rho, D_{out}$  e  $D_{in}$  o coeficiente de atrito, a densidade (tanto para o meio de arrefecimento), a exterior, e os diâmetros internos dos discos de rotor em metros, respetivamente. A potência de saída é igual:

$$P_{out} = P_{elm} - \Delta P_R - \Delta P_e \quad (3.14)$$

Onde  $\Delta P_R$  e  $\Delta P_e$  são perdas ohmicas e perdas parasitas no enrolamento do estator, respetivamente, então a eficiência é dada por  $\eta = P_{out}/P_{in}$

### 3.4.2 Requisitos do Sistema de Microgeração Eólica

Condicionamento de ordem mecânica e modo de avarias com grau de severidade regulável.

Velocidade a que vai operar

## Capítulo 4

### Considerações Finais

Nesta dissertação de mestrado foi possível a aplicação de conhecimentos teóricos adquiridos ao longo de todo o percurso académico foi adquirindo. Este projeto devido a toda a sua componente prática, facultou-me uma aproximação a indústria, de onde adquirei experiências e conhecimentos importantes para o futuro.

A construção deste projeto possibilitou a construção de um protótipo já a muito ambicionado pelo Professor Davide Fonseca, onde se conseguiram adquirir resultados muito positivos.

## Capítulo 5

### Bibliografia

- [1] W. W. E. Association, “www.wwindea.org,” 2012. [Online]. Available: [http://www.wwindea.org/webimages/Half-year\\_report\\_2012.pdf](http://www.wwindea.org/webimages/Half-year_report_2012.pdf). [Acedido em 01/08/2013 08 2013].
- [2] Flipa Alves, “Energias renováveis: um potencial desaproveitado,” Naturlink, 29 05 2009. [Online]. Available: <http://naturlink.sapo.pt/Natureza-e-Ambiente/Energia/content/As-Energias-Renovaveis-em-Portugal--Ponto-da-situacao/section/1?bl=1>. [Acedido em 02 01 2013].
- [3] Direção Geral de Energia e Geologia, “Estatísticas rápidas,” *Renovaveis*, vol. 93, 2012.
- [4] A. J. M. Cardoso, Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos, Coimbra, Portugal: Coimbra, 1995.
- [5] R.-J. W. M. J. K. Jacek F Gieras, Axial flux permanent magnet brushless machines, Springer, 2008.
- [6] K. Sitapati e R. Krishnam, “Performance comparisons of radial and axial field, permanent-magnet, brushless machines,” *Industry Applications, IEEE Transactions on* (Volume:37 , Issue: 5 ), pp. 1219-1226, 07 Agosto 2002.
- [7] G. M. Santandea “Estágio curricular obrigatório na WEG TINTAS S.A NO,” Universidade Regioanl de Blumenau - FURB, BLUMENAU, 2009.
- [8] B. MULTON, *Application des aimants aux machines électriques*, Bretagne : Antenne de Bretagne , 2005.
- [9] W. Figueiredo, “MAGNETIZAÇÃO NOS MATERIAIS FERRO-MAGNÉTICOS,” Departamento de Física UFSC, Florianópolis, 1987.
- [10] L. Chédot, *Contribution à l'étude des machines*, Créteil, 2004.
- [11] B. S. Guru e H. R. Hiziroglu, “Electric Machinery and Transformers,” New York, Oxford, Oxford University Press, 2001, p. 402.
- [12] A. E. Fitzgerald, J. Charles Kingsley e S. D. Umans, “Máquinas Eléctricas,” Artmed, p. 239.
- [13] M. J. K. K. V. d. W. J. F. F. Rong-Jie Wang, “Optimal Design of a Coreless Stator Axial Flux,” *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, vol. 41, p. 55, 2005.
- [14] M. A.-M. ., M. M. S.M. HOSSEINI, “DESIGN, PROTOTYPING AND ANALYSIS OF A LOW-COST DISK PERMANENT,” *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering,*, vol. 32, p. 203, 2008.
- [15] R. K. M. J. W. K. V. G. J. F. Wang, “Optimal Design of a Coreless Stator Axial Flux Permanent-Magnet Genera-tor,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, 2005.
- [16] J. F. W. R. & K. M. J. Gieras, Axial flux permanent magnet brushless machines, The Netherlands: Kluwer, 2004.
- [17] J. F. & W. M. Gieras, Permanent magnet motor technology: design and applications., New York: Marcel Dekker, 2002.

- [18] B. & S. R. Mellara, "FEM computation and optimization of  $L_d$  and  $L_q$  in disc PM machines," em *2nd Int. Workshop on Elect. & Mag. Fields, Leuven, Belgium*, 1994.
- [19] C. P. Cabrita, "Dimensionamento de motores síncronos trifásicos com magnetos permanentes para tração elétrica.," *Departamento de Engenharia Eletromecânica Universidade da Beira Interior*.
- [20] A. E. & K. C. Fitzgerald, *Electric machinery.*, New York: McGraw-Hill, 1996.
- [21] Â. P. B. d. S. Ferreira, *Projeto de uma Máquina de Ímanes Permanentes de Fluxo Axial Orientado para Sistemas de Conversão de Energia Eólica*, Porto: Tese de Doutoramento, FEUP, 2011.