

**Análise em Regime Permanente de uma Máquina de Indução Duplamente  
Alimentada Sem Escovas**

Fellipe Lessa Neves

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

---

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.  
(Orientador)

---

Prof. Antônio Carlos Ferreira, Ph. D.

---

Prof. Edson H. Watanabe, Dr. Eng.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JULHO DE 2009

Dedico este trabalho a todos aqueles que sempre acreditaram e acreditam em mim.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente quero agradecer Deus por todas as oportunidades que tive experiência, e por todas as novas experiências pelas quais irei ainda passar. Sem Ele, não seria possível continuar nas horas mais difíceis, que nos fazem pensar em desistir, porém arranjamos força através Dele.

Quero expressar toda minha gratidão a minha família, pela crença de um trabalho que desejo concluir com grande felicidade. Pelas horas de apoio incondicional, fica aqui meu obrigado. Não só para os presentes, mas também para os que não estão mais entre nós.

Agradeço aos amigos, sem nenhuma exceção, sejam os da faculdade com os quais convivemos situações engraçadas e difíceis, principalmente no laboratório de pesquisa; sejam os amigos de infância e adquiridos com o tempo, com quem vivi inúmeras felicidades. Não importando onde estejam, agradeço de coração pelo incentivo e pela amizade.

Gostaria de demonstrar a minha fabulosa companheira Diana, minha gratidão pelas horas de carinho e dedicação. Por compreender as situações que passei e por sempre estar ao meu lado me apoiando. Agradeço por ser essa pessoa que tanto me faz feliz, e espero continuar retribuindo com meu amor e carinho, por muitos e muitos anos.

Por fim, quero agradecer ao meu mestre e mentor Richard Magdalena Stephan, por todos os ensinamentos e pela dedicação com um esforçado aprendiz. Fica aqui minha gratidão por me mostrar um caminho para alcançar os objetivos, com muita dedicação e comprometimento.

Resumo do Trabalho apresentado à Escola Politécnica como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Análise em Regime Permanente de uma Máquina de Indução Duplamente Alimentada Sem Escovas

Fellipe Lessa Neves

Julho/2009

Orientador: Richard Magdalena Stephan.

Departamento de Engenharia Elétrica

Este trabalho tem como objetivo principal realizar o estudo em regime permanente de uma máquina de indução de dupla alimentação sem escovas (MIDAS) a partir de uma conexão em cascata de duas máquinas de indução de rotor bobinado. Com isso foi possível analisar o comportamento da MIDAS e obter conhecimento quanto aos fluxos das potências presentes. O estudo visa aplicações em energia eólica onde esta máquina mostra-se promissora. Para a comprovação da teoria é utilizado o programa Simulink/MATLAB®, e resultados de simulação são apresentados.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	1
1.2 OBJETIVO.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	2
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>3</b>
<b>2 INTRODUÇÃO A ENERGIA EÓLICA.....</b>	<b>3</b>
2.1 A HISTÓRIA DA ENERGIA EÓLICA.....	3
2.2 O VENTO PELO MUNDO .....	4
2.2.1 <i>Aspectos gerais</i> .....	4
2.2.2 <i>Estados Unidos</i> .....	7
2.2.3 <i>Europa</i> .....	8
2.2.4 <i>Ásia</i> .....	9
2.2.5 <i>América Latina e Brasil</i> .....	10
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>12</b>
<b>3 FUNDAMENTOS DOS AEROGERADORES .....</b>	<b>12</b>
3.1 CUSTOS E VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA.....	12
3.1.1 <i>Estudos Preliminares</i> .....	12
3.1.2 <i>Custos</i> .....	13
3.1.3 <i>Aspectos Externos</i> .....	13
3.2 AEROGERADORES .....	14
3.2.1 <i>Componentes Existentes</i> .....	14
3.2.2 <i>Aerodinâmica do aerogerador</i> .....	16
3.2.3 <i>Energia e Potência de um Aerogerador</i> .....	17
3.2.4 <i>Controle da Velocidade e Potência Mecânica da Turbina</i> .....	20
3.2.5 <i>Sistemas de Geração</i> .....	21
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>25</b>
<b>4 MÁQUINAS DE DUPLA ALIMENTAÇÃO .....</b>	<b>25</b>
4.1 MÁQUINA DE INDUÇÃO DE DUPLA ALIMENTAÇÃO (MIDA).....	25
4.2 MÁQUINAS DE INDUÇÃO DE DUPLA ALIMENTAÇÃO SEM ESCOVAS (MIDAS & MICDAS).....	27
4.2.1 <i>Análise da MICDAS</i> .....	29
4.2.2 <i>Círculo Equivalente da MICDAS</i> .....	32
4.2.3 <i>Análise da MICDAS: Fluxo de Potência</i> .....	34
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>38</b>
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>38</b>
5.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES .....	38

5.2	SIMULAÇÃO DE PONTOS DE OPERAÇÃO .....	43
5.2.1	<i>Circuitos do rotor não transpostos</i> .....	43
5.2.2	<i>Circuitos do rotor transpostos</i> .....	46
5.3	SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA .....	50
5.4	SIMULAÇÃO DO ÂNGULO DE CARGA .....	54
<b>CAPÍTULO 6.....</b>		<b>56</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>57</b>

# **Capítulo 1**

## **1 Introdução**

A quantidade e diversidade de energia produzida e consumida por um país pode ser um indicador do quanto este é rico e desenvolvido economicamente. Dentre esses tipos de energia que compõe a matriz energética de uma nação, uma de grande destaque é a energia elétrica. Entretanto esta energia elétrica precisa cada vez mais respeitar padrões de qualidade.

As novas diretrizes ambientais buscam melhorar a qualidade do meio ambiente, com leis e normas que evitem a poluição. Neste espírito surge o interesse pelo aproveitamento de fontes de energia para geração de energia elétrica que não agridam o meio ambiente. Vista como uma das mais promissoras da atualidade, a energia eólica tem apresentado grande crescimento pelo mundo.

### **1.1 Motivação**

Com o aumento do interesse pela energia eólica, novos projetos de fazendas eólicas devem surgir rapidamente nos próximos anos.

O mercado tem mostrado que aerogeradores que possam acomodar as variações do vento obtiveram maior receptividade nos últimos anos. Embora existam diversos tipos de geradores elétricos para aproveitamento da energia dos ventos, são as máquinas de indução de dupla alimentação que têm aparecido com maior destaque. Isto porque as máquinas de dupla alimentação apresentam grandes vantagens em relação a outros tipos. No entanto, estes geradores ainda dependem de intervenções mais frequentes de manutenção com relação a outros geradores, em função das escovas.

O presente trabalho estuda a proposta de utilização de um equipamento que apresenta as vantagens da máquina duplamente alimentada já difundida atualmente, porém sem a necessidade de escovas.

## **1.2 *Objetivo***

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento em regime permanente da Máquina de Indução de Dupla Alimentação Sem escovas (MIDAS) e suas vantagens para o aproveitamento da energia eólica. Os conceitos e resultados simulados serão obtidos através da conexão de duas máquinas de indução de rotor bobinado, com seus eixos interligados mecanicamente e eletricamente pelo rotor. Esta configuração também é conhecida como CDFIM (Cascaded Doubly-Fed Induction Machine – Máquina de Indução em Cascata de Duplamente A-limentada) ou Twin-stator Induction Machine (Máquina de Indução de Estator Duplo). Os principais objetivos são:

1. Apresentar a história e as principais características da MIDAS;
2. Apresentar o modo de funcionamento da MIDAS;
3. Apresentar a modelagem utilizada para a MIDAS;
4. Apresentar resultados simulados para comparação.

## **1.3 *Organização do Trabalho***

O trabalho a ser apresentado foi dividido em 6 capítulos.

O primeiro capítulo apresenta uma introdução sobre o tema a ser abordado, assim como a motivação e os objetivos deste trabalho.

O segundo capítulo trata sobre o tema de energia eólica, sua história e seu aproveitamento pelo mundo na geração de energia elétrica.

O terceiro capítulo foca nas turbinas eólicas, seu funcionamento e principais tecnologias utilizadas.

O quarto capítulo aborda as máquinas de indução de dupla alimentação, e em especial a máquina de indução de dupla alimentação sem escovas.

O quinto capítulo tem como função mostrar e discutir os resultados encontrados em simulações.

Por fim, o sexto capítulo expõe as conclusões finais obtidas com o trabalho e sugestões de futuros trabalhos.

## **Capítulo 2**

### **2 Introdução a Energia Eólica**

Neste capítulo, será abordado o histórico da utilização da energia dos ventos pela humanidade desde os primeiros geradores eólicos e o contexto de seu surgimento, além de apresentar o panorama da energia eólica pelos principais locais do mundo.

#### **2.1 A História da Energia Eólica**

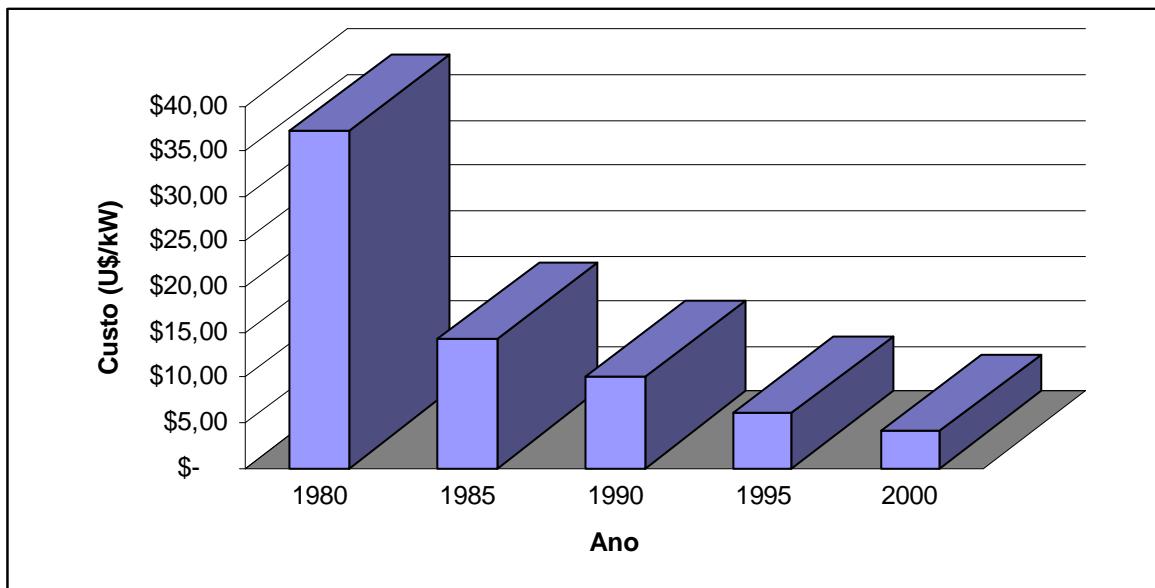
O primeiro registro histórico conhecido de utilização da energia proveniente dos ventos pelo homem remete a alguns milhares de anos atrás, em embarcações utilizadas no Rio Nilo.

Desde então a energia eólica, assim como a energia hidráulica, vinha sendo usada principalmente para fins puramente mecânicos como bombeamento de água ou moagem de grãos [1], além da aplicação mais clássica de impulsão de embarcações. Seu primeiro sinal de utilização para geração de energia elétrica surgiu no final do século XIX, mas sua real repercussão se iniciou a partir da década de 70 do século XX devido à grande crise petrolífera mundial. Em 1973, o preço dos barris de petróleo (até então a maior fonte de energia mundial) elevou-se drasticamente, ultrapassando a 300% de aumento no preço da época [2]. Isso fez com que a busca por novas fontes de energia recebesse incentivos para desenvolvimento em maior escala.

O primeiro equipamento comercial conhecido para conversão da energia eólica em energia elétrica surgiu na Dinamarca, em 1891. Foi também na Dinamarca, em 1976, que o primeiro gerador eólico comercial foi instalado diretamente na rede pública.

Com a atual preocupação pela proteção do meio ambiente, com a busca de fontes de energia que não causem danos ecológicos e/ou socio-econômicos, as fontes de energia renováveis e que não degradam o ambiente, como o vento, ganharam ainda mais incentivos para pesquisa e desenvolvimento para escala industrial e comercial. Entre as fontes renováveis menos usuais, a energia eólica tem sido visto como a mais promissora entre todas, principalmente por apresentar uma tecnologia mais desenvolvida para o mercado, devido aos principais fatores apresentados em [3] e mostrados a seguir:

- ⇒ Compósitos de fibra reforçados, para a fabricação de pás de baixo custo;
- ⇒ Preços mais acessíveis de equipamentos de eletrônica de potência;
- ⇒ Operação de geradores elétricos em velocidade variável, maximizando a conversão de energia;
- ⇒ Economia de escala, aumentando a produção de projetos e turbinas;
- ⇒ Maior experiência acumulada, melhorando cada vez mais a capacitação de profissionais qualificados.



**Figura 2.1: Custo dos geradores eólicos desde 1980 [3].**

## 2.2 *O vento pelo mundo*

Este tópico irá mostrar as condições de aproveitamento eólico nas principais áreas do mundo. Por fim, serão mostradas as características eólicas da América Latina e do território brasileiro, suas instalações de geradores eólicos e as perspectivas desta fonte de energia.

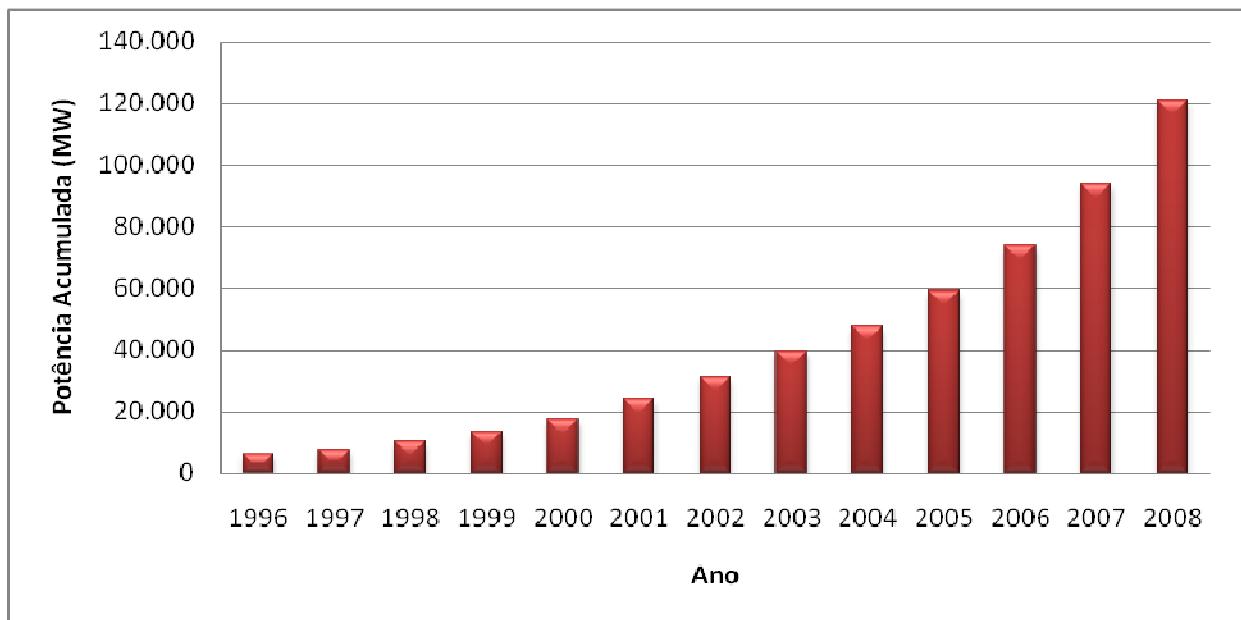
### 2.2.1 **Aspectos gerais**

A energia eólica tem aparecido cada vez mais como fonte de energia útil, principalmente nos países europeus, devido ao seu escasso recurso hídrico para geração de energia e predominância de geração de energia elétrica a partir de termoelétricas.

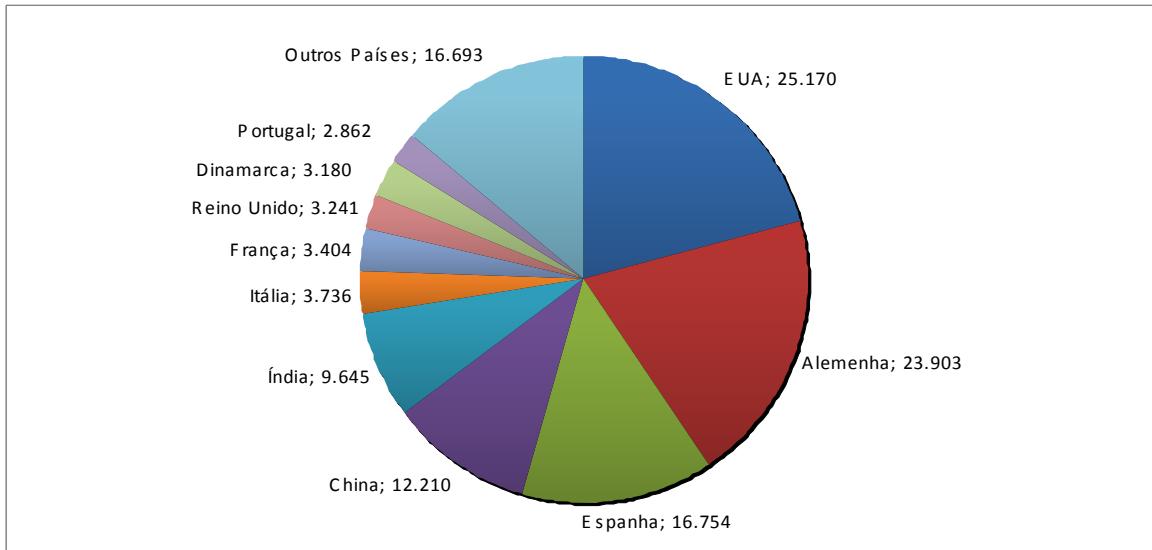
Com as novas diretrizes de preservação do ambiente, fontes de energia que causassem o mínimo de impacto aos ecossistemas do planeta voltaram a ser o foco dos países mais desenvolvidos economicamente, em especial a energia eólica, que apresentou uma elevada taxa de crescimento de instalações de parques eólicas.

De acordo com dados da *Global Wind Energy Council* (GWEC) [4], de Dezembro de 2008, o mundo evoluiu rapidamente no quesito de aproveitamento do potencial eólico. A Figura 2.2 mostra o crescimento das instalações eólicas em todo mundo, e a Figura 2.3 mostra os dez maiores países de capacidade eólica instalada. Atualmente, EUA lidera como país com maior capacidade instalada de aerogeradores. A Figura 2.4 ilustra o desenvolvimento do mercado de energia eólica em cada continente, e a Tabela 2.1 apresenta os principais projetos existentes até fevereiro de 2009 para instalação de geradores eólicos.

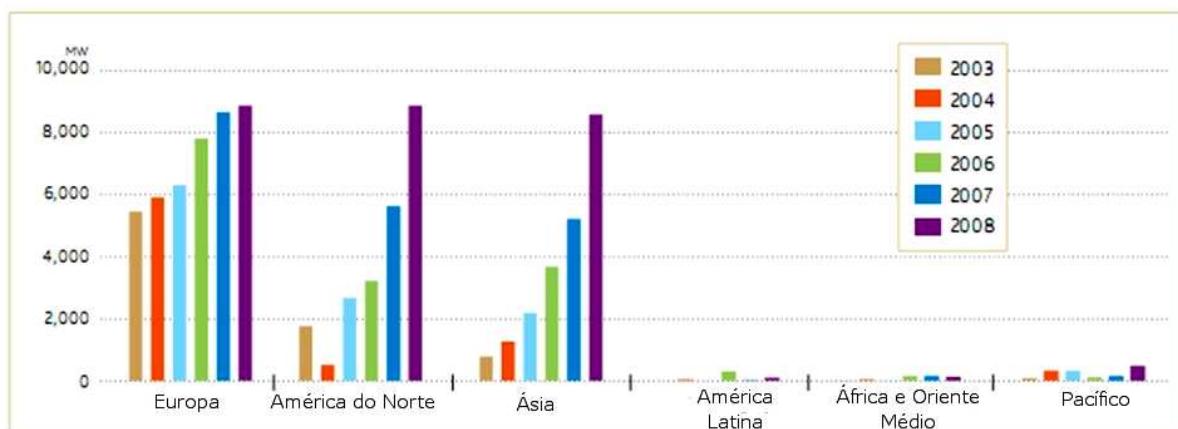
A Associação Européia de Energia Eólica (EWEA) [5] prevê que até 2020, 10% de toda energia consumida no mundo venha de geradores eólicos.



**Figura 2.2: Potencial eólico mundial acumulado do período 1996-2008 [4].**



**Figura 2.3: Panorama atual dos principais países produtores de energia elétrica a partir do vento (em MW instalados) [4].**



**Figura 2.4: Comparação entre o crescimento do mercado da energia eólica pelo mundo [4].**

**Tabela 2.1: Projetos de aerogeradores pelo mundo em fevereiro de 2009 [4].**

PAÍS	PROJETOS	POTÊNCIA (MW)
Argentina	1	11
Brasil	11	687
Chile	3	73
China	314	16.977
Chipre	4	207
Colômbia	1	20
Coréia do Sul	11	317
Costa Rica	2	69
Egito	3	285
Equador	1	2
Filipinas	2	73
Índia	270	5.072

Israel	1	12
Jamaica	1	21
Marrocos	2	70
México	12	1.272
Mongólia	1	50
Nicarágua	2	60
Panamá	1	81
República Dominicana	3	173
Vietnã	1	30
<b>TOTAL</b>	<b>647</b>	<b>25.562</b>

## 2.2.2 Estados Unidos

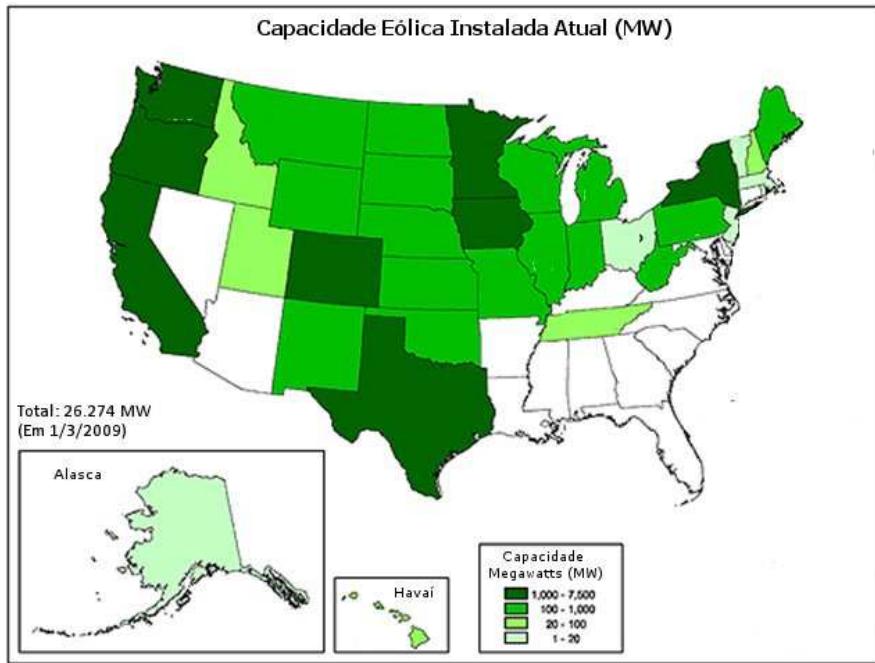
O desenvolvimento da geração de energia elétrica a partir da energia eólica em larga escala nos EUA é datado da década de 70. Seu início foi em 1979, com uma turbina experimental de 2 MW instalada em uma das bases da NASA na Carolina do Norte. Projetada pela *General Electric Company*, a turbina possuía 2 pás de 61 metros de diâmetros, com a proposta de interligação direta com a rede local.

Com isso, a geração de energia a partir do vento aumentou rapidamente, mas notadamente no início de 1984. A grande parte dos geradores eólicos era de empresas ou cooperativas privadas, localizados na Califórnia com mais de 1.500 MW instalados até 1991.

Os preços cada vez menores causados pelo desenvolvimento da tecnologia dos aerogeradores fizeram com que empresas de energia elétrica de fora da Califórnia se interessassem pela energia proveniente dos ventos. Novos projetos e instalações surgiram em diversos locais do continente como Alaska, Iowa, Minnesota, Texas, Vermont, Washington e Wyoming. A Figura 2.5 mostra a distribuição do potencial eólico utilizado nos EUA.

A grande parte do potencial eólico norte-americano se encontra próximo à região dos Grandes Planícies<sup>1</sup>. Um exemplo disto se encontra em Minnesota, onde a companhia de energia elétrica dos estados do norte – a *Northern States Power Company* – começou com 100 MW instalados de capacidade de geração eólica, com estimativas de expansão para 425 MW até 2002.

<sup>1</sup> Região a leste das Montanhas Rochosas que se estende até o Canadá. Compreende os estados de Novo México, Texas, Oklahoma, Colorado, Kansas, Nebraska, Wyoming, Montana, Dakota do Sul e Dakota do Norte, nos Estados Unidos, e as províncias canadenses de Saskatchewan e Alberta.



**Figura 2.5: Panorama atual da energia eólica nos EUA**

Os planejadores de energia norte-americanos estimaram no fim do século XX, uma capacidade eólica de 12.000 MW até 2015. Com isso, investidores, companhias de energia e pesquisadores de aerogeradores anunciaram uma grande expansão, com baixo custo para os consumidores: geração de 4.200 MW, a 1,5 cents/ kWh. De acordo com os dados mais atuais [5], existem 26.274 MW em geradores eólicos instalados no território norte-americano.

### 2.2.3 Europa

Os países europeus foram os maiores precursores da energia eólica, além de serem os mais reconhecidos nesta área mundialmente, tanto em tecnologia quanto em participação na produção de energia em comparação com outras fontes. Um dado que comprova este fato é que a projeção da capacidade eólica européia para 2000, realizada em 1995, foi atingida em 1997. A Tabela 2.2 mostra como está dividido o potencial eólico europeu nos dias de hoje.

A Alemanha lidera os países em relação ao potencial eólico instalado, sendo o principal desde seu início na década de 60. Atualmente, a Dinamarca perdeu seu posto de grande produtor de energia elétrica a partir da eólica para outros países como Itália, França e Espanha. Este último apresentou grande crescimento no panorama europeu, sendo juntamente com a Alemanha, responsável por 61% do potencial eólico europeu. As perspectivas anteriores eram de que, até 2010, existissem 40.000 MW instalados e até 2020; 100.000 MW. Atualmen-

te, estão instalados 65.933 MW em toda a Europa sendo 64.935 MW estão na União Europeia<sup>2</sup>.

**Tabela 2.2: Potência total dos principais países da Europa no fim de 2008 [6].**

PAÍS	POTÊNCIA (MW)
Alemanha	23.903
Áustria	995
Bélgica	384
Bulgária	158
Chipre	0
Dinamarca	3.180
Eslováquia	3
Espanha	16.740
Estônia	78
Finlândia	143
França	3.404
Grécia	985
Holanda	2.225
Hungria	127
Irlanda	1.002
Itália	3.736
Letônia	27
Lituânia	54
Luxemburgo	35
Malta	0
Noruega	428
Polônia	472
Portugal	2.862
Reino Unido	3.241
República Tcheca	150
Romênia	10
Rússia	11
Suécia	1.021
Suíça	14
Ucrânia	90
<b>TOTAL</b>	<b>65.478</b>

## 2.2.4 Ásia

O principal país asiático em aproveitamento eólico é a China. Este país tem aumentado consideravelmente o número de geradores eólicos presentes no continente asiático, tanto que ocupa os primeiros lugares no ranking de geradores eólicos instalados. Atualmente, a China

<sup>2</sup> Bloco econômico, político e social de 27 países europeus.

dobrou a sua capacidade instalada de energia eólica para 12,2 GW, que até 2008, não passava dos 6 GW.

Outro país com grande destaque no panorama mundial é a Índia. Um país extenso (9 milhões de km<sup>2</sup> de área) e muito populoso (900 milhões de pessoas), com 75% da população localizada no meio rural.

Devido ao seu intenso crescimento a partir da década de 50, e pelo fato da principal fonte de energia vir da queima de carvão mineral, a expansão do setor elétrico não é simples ou até mesmo aplicável, devido às concentrações das minas em locais distantes e de difícil acesso. Outro problema são as perdas de transmissão da energia para os locais mais afastados.

A melhor solução foi a geração distribuída, com geradores eólicos próximos das cargas consumidoras. Isso elimina não só os problemas de transmissão e geração da energia, mas também diminuem a taxa de gases poluentes produzidos, um fator muito importante em um país de grande população.

O resultado deste empreendimento foi o surgimento de um dos maiores produtores mundiais de energia através dos ventos. Com um início de 565 MW em 1995, a Índia chegou aos 1.000 MW instalados em 1997 com planos futuros de uma capacidade eólica de 20.000 MW. Até o final de 2008, de acordo com [4], encontram-se 9.645 MW instalados em geradores eólicos.

## 2.2.5 América Latina e Brasil

Na América Latina, as experiências com energia eólica são menos destacáveis que nos Estados Unidos, na Europa ou na Ásia; talvez devido ao caráter de países menos desenvolvidos desta região.

O México ainda tem maior experiência com sistemas de potência de energia renovável. Embora mais de 90% da população receba energia elétrica de uma das duas grandes distribuidoras nacionais, ainda existe uma grande parte da população que não recebe este bem da era moderna devido a seu difícil acesso. Para tais localidades, são utilizados sistemas de energia renovável e baterias para o armazenamento da energia.

No Brasil, a utilização da energia proveniente dos ventos foi um tanto quanto tardia. Um exemplo disto é que, até 2005, o Brasil só possuía 29 MW de potencial eólico aproveitado, localizado principalmente na região nordeste do país.

O principal fator que contribuiu para o desenvolvimento não só da energia eólica, mas para diversas fontes de energia renovável, foi a criação do PROINFA – Programa Nacional de Incentivos às Fontes Alternativas. Criado em 2002, tem o objetivo de diversificação das fon-

tes de energia elétrica, assegurando a compra da energia advinda destas fontes nos leilões de energia. Este projeto previa mais de 30 empreendimentos eólicos de mais de 3.000 MW no território brasileiro, sendo grande parte localizada no litoral nordestino.

Resultado disso foi instalado mais 208 MW de capacidade eólica, colocando o Brasil como um dos líderes de produção de energia elétrica a partir dos ventos na América Latina.

Atualmente o Brasil apresenta 430 MW instalados de energia eólica sobre seu território, quantidade bem abaixo do razoável para um país que apresenta um potencial eólico tão extenso. A Tabela 2.3 ilustra a grande quantidade de energia disponível, e a Tabela 2.4 as principais usinas eólicas instaladas até hoje. Atualmente, são previstos leilões anuais de fazendas eólicas com centenas de MW.

**Tabela 2.3: Potencial Eólico brasileiro [7].**

Região	Potência Disponível (GW)	Energia Anual (T-Wh/ano)
S	22,8	41,1
SE	29,7	54,9
CO	3,1	5,4
NE	75,0	144,3
N	12,8	26,4
<b>TOTAL</b>	<b>143,4</b>	<b>272,1</b>

**Tabela 2.4: Principais instalações brasileiras [7].**

Estado	Usina Eólica	Data de Instalação	Capacidade (MW)
Ceará	Taíba	Dez/1998	5
Ceará	Prainha	Jan/1999	10
Ceará	Mucuripe	Jan/2002	2,4
Ceará	Beberibe	Mar/2008	25,6
Paraíba	Millennium	Out/2007	10,4
Paraíba	Vale dos Ventos	Dez/2008	48
Paraná	Palmas	Jan/1999	2,5
Santa Catarina	Bom Jardim da Serra	Mai/2002	0,6
Santa Catarina	Horizonte	Dez/2003	4,8
Santa Catarina	Água Doce	Out/2005	9
Rio Grande do Norte	Macau	Dez/2003	1,8
Rio Grande do Norte	Rio do Fogo	Jul/2006	49,6
Rio Grande do Sul	Osório, Sangeladouro e índios	Dez/2006	150
Piauí	Pedra de Sal	Dez/2008	18

## **Capítulo 3**

### **3 Fundamentos dos Aerogeradores**

Neste capítulo serão mostrados os principais assuntos relacionados ao estudo da energia eólica, partindo das etapas necessárias para um projeto de aproveitamento da energia eólica, revisando os aspectos que caracterizam os aerogeradores e seu funcionamento, tendo por fim os tipos de tecnologias utilizadas atualmente.

#### **3.1 *Custos e Viabilidade Técnico-Econômica***

O primeiro passo a ser tomado no projeto de um ou mais geradores eólicos é a análise técnica e econômica do local a ser instalados os aerogeradores. Esses estudos irão mostrar qual o melhor equipamento e se há benefícios sobre outras soluções possíveis.

Esta seção irá tratar dos parâmetros utilizados para um bom empreendimento de energia eólica, além de analisar a viabilidade técnica e econômica necessárias.

##### **3.1.1 *Estudos Preliminares***

Os três principais dados necessários para um projeto de energia eólica são: velocidade, direção e frequência dos ventos do local.

Para tal, é necessário que sejam realizadas medições em pontos distintos da zona onde se deseja montar os aerogeradores. Para um melhor resultado, essas medições devem ser realizadas durante longos períodos de tempo. Porém por motivos financeiros, os estudos são realizados para um ano de medição. Essas medições são feitas através de anemômetros e sensores de direção, para medir as frequências, velocidades e também as direções do vento ao longo do período registrado, tipicamente em intervalos de 10 minutos. Vale ressaltar que estas medições devem ser feitas na mesma altura esperada do aerogerador a ser instalado. Caso a altura de instalação seja diferente, pode-se fazer uma aproximação para a velocidade do vento para a nova altura com métodos que levam em consideração fatores externos e uma altura base (Lei de Prandtl). Com estes dados, criam-se distribuições da frequência, intensidade (ou velocidade) e direção dos ventos, com as quais serão escolhidos os equipamentos adequados.

Outro fator importante é o local físico da instalação eólica. Isto porque efeitos externos como relevo, rugosidade do solo e altitude influenciam na capacidade eólica de um local. Em

geral, locais mais altos como montanhas ou planícies elevadas são bons lugares para instalação, enquanto vales não apresentam boas características.

Uma solução para os casos em que não há boas condições ou grandes áreas para alocação dos geradores são as instalações *off-shore* (fora da costa). Esse tipo de instalação apresenta vantagens como ventos mais constantes e intensos, além de não provocar poluição visual e sonora. Entretanto, os equipamentos deste tipo devem ser mais resistentes e apresentar uma maior infra-estrutura para o transporte da energia, o que encarece este tipo de aplicação.

### **3.1.2 Custos**

O custo de aerogeradores está ligado principalmente aos custos pertinentes da instalação propriamente dita que leva em consideração a parte de construção, acesso, transporte, quantidade e fatores mais técnicos como tipo de gerador, transmissão, conexão com a rede entre outros.

Os custos de um projeto podem ser divididos em duas partes: custos iniciais e custos de operação e manutenção. Os custos iniciais são aqueles empregados no projeto e na infraestrutura, ou seja, os custos para o inicio da instalação e que são únicos e singulares. Os custos de operação e manutenção são os custos referentes a gastos periódicos com manutenção e operação de todo o sistema de geração e transmissão, sendo valores dependentes das condições em cada ano.

Uma maneira de se realizar os cálculos do custo médio é apresentada em [8], em que se leva em consideração uma instalação de vida útil de 20 anos, podendo variar o preço do investimento total médio entre 1000 e 1500 €/kW. Outro exemplo onde é utilizado o método do fator de recuperação do capital para o cálculo do custo médio anual de um empreendimento de energia eólica é apresentado em [9].

### **3.1.3 Aspectos Externos**

Os principais aspectos externos a serem levados em consideração são a poluição sonora e visual causadas pelo aerogerador e eventuais interferências causadas durante a geração e transmissão.

Em relação à poluição sonora, o aerogerador pode ser considerado como um equipamento não-poluentes, se levarmos em consideração o nível de ruídos de uma cidade populosa. Para exemplificar este fato, encontra-se em [3] uma curva em Decibéis x metro de uma turbina típica de 600 kW. Pela curva, esta turbina produz 55 dBA a uma distância de 50 metros, que chega a apenas 40 dBA a 250 metros. Para medir o significado destes números, a Tabela

3.1 mostra uma relação de nível de ruído de diferentes situações, a 50 metros de distância. Podemos observar que mesmo bem próximo a uma turbina deste tipo, o nível de ruído ainda é menor que o de uma cidade comum.

**Tabela 3.1: Nível de ruído de locais comuns, a 50 m.**

Fonte	Nível de Ruído
Trem Elevado	100 dB
Fábrica de Grande Porte	90 dB
Rua (movimento normal)	70 dB
Fábrica	60 dB
Escritório	50 dB
Conversa	30 dB

Outro fator externo que se deve ressaltar é a interferência eletromagnética. Pelo porte da estrutura de uma turbina eólica, esta pode se tornar uma interferência para ondas eletromagnéticas próximas. Isso pode ser ainda causado pelas pás do rotor, que com o giro constante a uma determinada frequência e afeta sinais mais próximos da turbina.

O impacto visual de uma usina formada por grande número de turbinas pode afetar alguns locais, além do fato de se considerar o local a serem instalados os aerogeradores, para que não colidam com rotas de aves migratórias ou apresente problemas para utilização do terreno.

Em [10] encontram-se dois exemplos de dimensionamento de turbinas eólicas, caso seja de maior interesse do leitor.

## **3.2 Aerogeradores**

Para a conversão da energia cinética proveniente dos ventos, são utilizados equipamentos chamados de geradores eólicos ou aerogeradores. Esta seção irá tratar de todos os aspectos relacionados aos aerogeradores, desde os principais componentes até os tipos e tecnologias existentes.

### **3.2.1 Componentes Existentes**

Primeiramente deve-se definir qual o tipo de turbina. Existem as turbinas de eixo vertical e as de eixo horizontal.

As turbinas de eixo vertical apresentam algumas vantagens como funcionamento independente da direção do vento e maior facilidade de instalação e manutenção dos equipamentos.

Entretanto as principais desvantagens deste tipo de turbina estão no controle da potência do gerador, causando problemas mecânicos e de estabilidade para ventos superiores aos da potência nominal do gerador.

Os aerogeradores de eixo horizontal são formados por três partes principais: torre, rotor e cabine. Estas partes são compostas por outras partes que compõe todo o sistema. Este tipo de turbina não apresenta a vantagem de funcionamento independente da direção do vento, porém apresenta um controle mais sofisticado da potência além de um controle da posição do gerador para aproveitamento dos ventos em outras direções, conhecido como “yaw”. A Figura 3.1 apresenta o modelo esquemático de uma turbina da empresa Nordex.



**Figura 3.1: Modelo de uma turbina eólica da Nordex**

Os principais componentes existentes em uma turbina eólica são [1]:

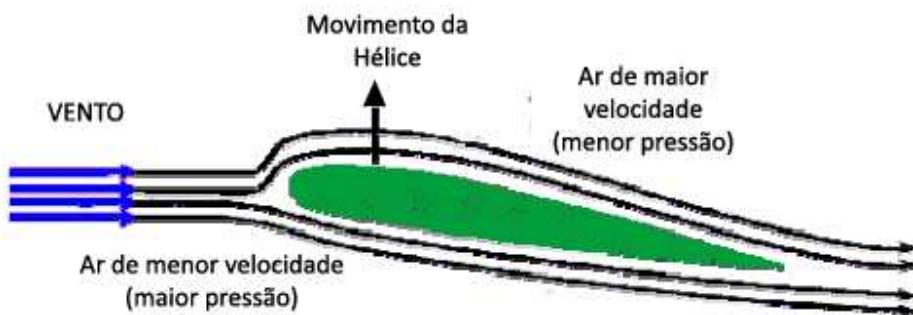
- ⇒ **Nacelle:** Nome da cabine que contém os componentes existentes no aerogerador, entre eles o próprio gerador.
- ⇒ **Pás do rotor:** Responsáveis pela absorção da energia cinética dos ventos e transferi-lo para o eixo do rotor.
- ⇒ **Cubo ou Hub:** Fixa as pás no eixo do rotor.
- ⇒ **Caixa de engrenagens ou Gearbox:** acopla o eixo da turbina com o eixo do gerador, aumentando a velocidade de rotação no lado do gerador.
- ⇒ **Gerador elétrico:** Converte a energia cinética rotacional em energia elétrica.
- ⇒ **Mecanismo de orientação (yaw mechanism):** mecanismo que ajusta a nacelle e o rotor para a direção do vento.
- ⇒ **Controle Eletrônico:** Controlador eletrônico, em geral microprocessadores, que monitoram constantemente as condições do gerador, fazendo controles de proteção e dos parâmetros do gerador como potências ativas e reativas.
- ⇒ **Torre:** Sustentador da cabine do gerador e rotor das pás na altura do vento com melhores condições.

- ⇒ **Sensores:** Sensores que medem a velocidade e direção de vento, que são utilizados nos controles internos do gerador.
- ⇒ **Sistema hidráulico:** Sistema responsável pelo giro da nacelle para a direção do vento.

### 3.2.2 Aerodinâmica do aerogerador

Com o passar dos anos, a tecnologia das turbinas cresceu de forma impressionante, apresentando maior aerodinâmica em relação às pás utilizadas nos moinhos de séculos passados.

A principal mudança foi a utilização de pás que apresentam o mesmo formato e funcionamento de uma asa de avião convencional. Neste esquema, o vento atinge a pá frontalmente e devido a diferença de velocidade dos ventos nas laterais da pá, surge uma diferença de pressão que cria a força que impulsiona o giro da pá (Efeito Bernoulli). A Figura 3.2 mostra um desenho esquemático de uma pá sobre ação do vento.

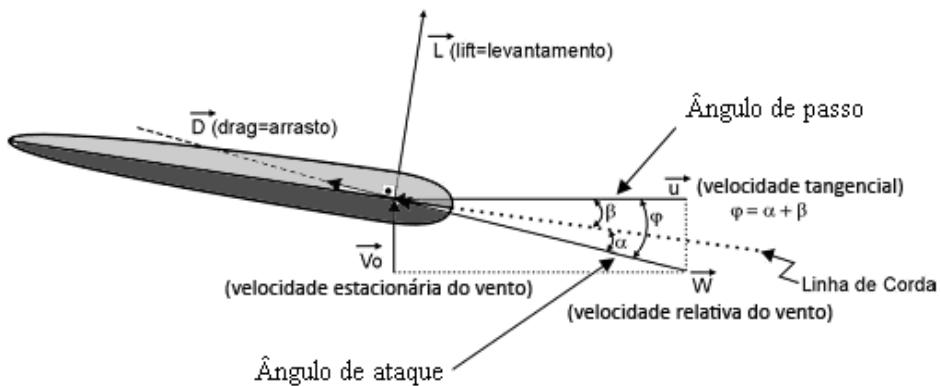


**Figura 3.2: Funcionamento aerodinâmico da hélice**

A aceleração do vento em uma lateral da pá em relação a outra é função de como a hélice está orientada em relação ao vento. Sendo assim, são definidos dois parâmetros:

- ⇒ **Ângulo de ataque ( $\alpha$ ):** Ângulo formado entre a direção relativa do vento e a linha de corda (linha imaginária que liga as pontas da seção transversal da hélice).
- ⇒ **Ângulo de passo ( $\beta$ ):** Ângulo formado entre o plano de rotação e a linha de corda.

Além destes, existe o ângulo de velocidade relativa ( $\phi$ ), ou o ângulo formado entre o vetor velocidade tangencial e o vetor velocidade relativa.



**Figura 3.3: Componentes envolvidos na hélice do aerogerador**

A Figura 3.3 mostra o comportamento e forças atuantes do sistema pá-vento. O vento que atinge a hélice é chamado vento incidente ou vento estacionário ( $V_0$ ). Esta velocidade vetorial pode ser decomposta em duas componentes: a velocidade relativa do vento ( $W$ ), na referência da pá e a velocidade tangencial da pá ( $u$ ).

Cada uma destas componentes cria uma força que causa a rotação das pás. Esta força é dividida em duas componentes:

- ⇒ **Força de arrasto (Drag):** Força na direção da velocidade relativa do vento. Este é o tipo de força mais comum achado na natureza, utilizado na antiguidade para impulsionar os barcos à vela.
- ⇒ **Força de sustentação ou levantamento (Lift):** Força devido ao efeito de diferença de pressão. Perpendicular a força de arrasto, é a componente responsável pelo giro das hélices. Força aproveitada em pipas e aviões.

Quanto maior a força de sustentação da pá, maior a eficiência da turbina. A força de sustentação é maior para pequenos ângulos de ataque, chegando a seu máximo de 15°. Para valores maiores que esse, a força de sustentação cai drasticamente e entra na região de estol (do inglês *stall*). Esta característica é utilizada para o controle da potência do aerogerador, como mostrado a seguir.

### 3.2.3 Energia e Potência de um Aerogerador

O principal insumo utilizado pelo aerogerador é a energia cinética contida nos ventos, dado pela equação:

$$E = \frac{1}{2} m \vec{v}^2 \quad (3.1)$$

$m$  = massa de ar deslocado;

$v$  = velocidade do vento;

A massa do ar deslocado pode ser expressa em termos de sua densidade, ou seja,  $m_{ar} = \rho_{ar} V$  (onde  $\rho_{ar}$  denota a densidade específica do ar e  $V$  o volume de ar). As turbinas atuais operam em sua máxima potência para velocidades do vento entre 36 e 54 km/h.

Utilizando o conceito de densidade em (3.1), a energia e potência disponível em um aerogerador podem ser dadas por:

$$E = \frac{1}{2} \rho V^2 = \frac{1}{2} \rho A l V^2, \quad (3.2)$$

$$P = \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho A l V^3, \quad (3.3)$$

onde  $l$  indica o comprimento do tubo de ar considerado e  $A$  indica a área circular formada pelas pás.

A Figura 3.4 ilustra a energia disponível no vento.

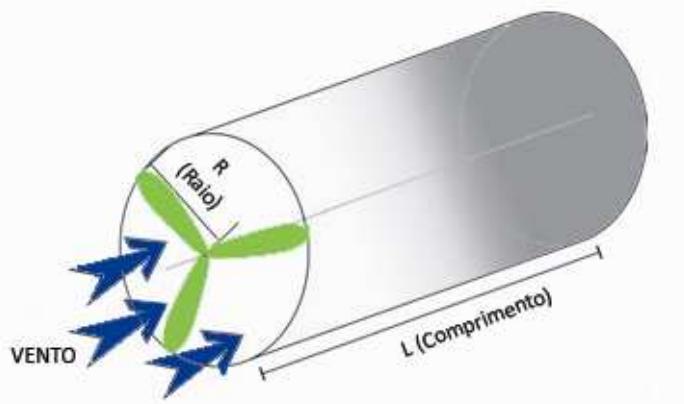


Figura 3.4: Energia disponível em um aerogerador.

Com estes dados podemos perceber que a potência aumenta com a área efetiva das pás e com o cubo da velocidade do vento. Além disso, pode concluir-se que a velocidade é o principal fator que determina a eficiência da turbina, sendo muito importante na escolha do local com velocidades altas e constantes do vento. A Tabela 3.2 mostra a relação entre diâmetro das pás e a potência nominal para uma dada velocidade do vento, de um aerogerador típico.

Nem toda a energia cinética presente em uma massa que atravessa as pás de uma turbina é de fato aproveitada, uma vez que a velocidade final do vento após a passagem pelas hélices não é nula. Isto significa que apenas parte da energia cinética contida no vento é convertida em energia rotacional no eixo do aerogerador. A demonstração da quantidade convertida de energia é demonstrada pela Lei de Betz, que possui um limite teórico de 59,3%. Este fator de conversão é conhecido como fator de capacidade  $C_p$ . Com isso, podemos chegar a uma equação final (3.4) que nos dá a potência total disponível no eixo da turbina.

**Tabela 3.2: Relação Diâmetro x Potência de um aerogerador [3]**

Diâmetro médio do rotor (m)	Potência Média da Turbina (kW)
60	1500
50	750
43	600
40	500
31	300
27	225

$$P = \frac{1}{2} \rho A \vec{v}^3 = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 \vec{v}^3. \quad (3.4)$$

R: raio da turbina;

$\rho$ : densidade do ar = 1,225 kg/m<sup>3</sup>, a 1 atm (760 mmHg) e 0 °C;

$C_p$ : fator de capacidade da turbina;

$\vec{v}$  : velocidade do vento que chega a turbina.

O fator de capacidade de uma turbina é uma função não-linear de duas grandezas: o ângulo de passo  $\beta$  e de um fator que relaciona a velocidade tangencial na ponta da pá com a velocidade do vento. Este fator conhecido como razão de velocidade é dado por (3.5).

$$\lambda = \frac{R \omega_R}{\vec{v}}, \quad (3.5)$$

onde,  $\omega_R$ : velocidade angular do eixo da turbina.

Pelo fato da potência variar basicamente com o cubo da velocidade do vento incidente, para velocidades muitas baixas, não é de interesse extraer potência da turbina eólica. Em geral esta velocidade – chamada de *cut-in speed* – está na faixa dos 5m/s, mas pode variar entre fabricantes.

Este mesmo detalhe ocasiona problemas para velocidades mais elevadas. Para que fosse possível a operação em velocidades mais altas, a estrutura da turbina deveria ser mais robusta, obrigando a um investimento maior para pouco aproveitamento, não sendo economicamente viável. Para velocidades superiores a nominal que podem causar danos mecânicos e elétricos à turbina, esta é desligada. A velocidade em que isto ocorre é chamada *cut-off speed*.

Em [12] é apresentada a característica típica de duas turbinas eólicas da GE. As curvas em apresentam turbinas com *cut-off speed* de 20 m/s e 25 m/s, respectivamente. Ambas apresentam um *cut-in speed* de 3.5 m/s.

### 3.2.4 Controle da Velocidade e Potência Mecânica da Turbina

Como foi dito na subseção anterior, a turbina eólica não apresenta geração de energia para todas as velocidades do vento. Em especial, a turbina deve ser protegida para ventos superiores a nominal, que podem causar danos a turbina e ao gerador elétrico.

Para fazer esse controle de velocidade da turbina, e por consequência a potência mecânica absorvida, existem métodos passivos e ativos.

O método de controle passivo consiste na característica das pás apresentada anteriormente, em que um aumento muito grande do ângulo de ataque faz com que a turbina entre na região de estol, desperdiçando a energia extra do vento. Quando o vento aumenta sua velocidade, seu ângulo de velocidade relativo  $\phi$  aumenta. Se o ângulo de passo  $\beta$  é fixo, o ângulo de ataque  $\alpha$  aumenta até a região de estol, ou região de perda de energia. Estas turbinas apresentam suas pás fixas, com o projeto para que estas entrem nesta faixa de perda de energia na velocidade desejada.

O método de controle ativo pode ser realizado de duas maneiras. A maneira menos utilizada é usando o controle de direção da turbina (em inglês, *yaw*) para girar a turbina para direções diferentes da direção do vento, aproveitando apenas parte de sua velocidade. Entretanto este método não é utilizado pelo fato deste causar cargas aerodinâmicas muito elevadas, diminuindo o tempo de vida da turbina.

A alternativa mais utilizada é o método de controle de passo [8]. Neste modo, as pás da turbina não são fixas e podem se mover longitudinalmente sobre seu eixo de fixação. Com o movimento das pás, é possível causar o mesmo efeito no método de controle passivo, mas com mais eficiência e confiabilidade. Outro fator interessante deste método é o controle da eficiência da turbina para velocidades abaixo da nominal, com o controle do ângulo de ataque que extrai a maior potência para a velocidade de vento disponível. As turbinas de pá móvel apresentam várias curvas que relacionam  $C_p$  e  $\beta$ , onde se pode obter a melhor curva para aproveitamento da energia disponível. A Figura 3.6 mostra exemplos destas curvas.

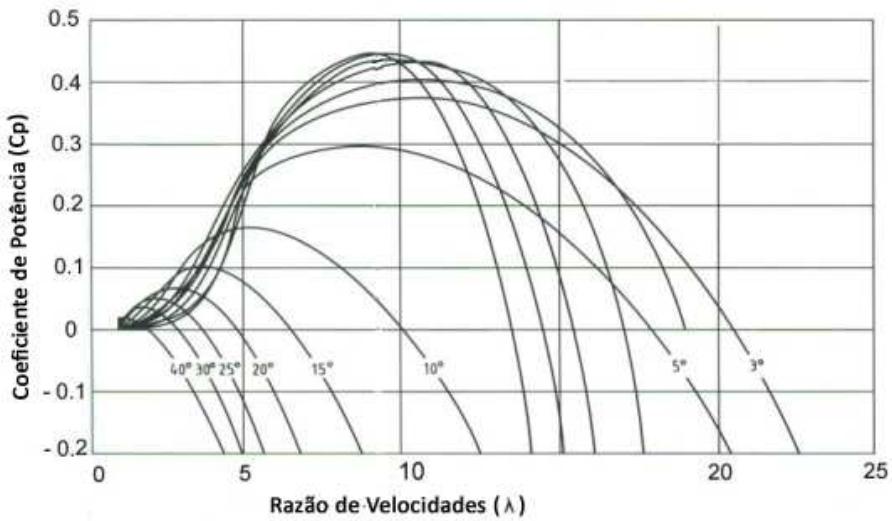


Figura 3.5: Gráfico de  $C_p \times \lambda$  para diversos valores de ângulo de passo.

### 3.2.5 Sistemas de Geração

Para a conversão da energia mecânica em energia elétrica é necessário um gerador e outros equipamentos auxiliares como conversores de potência e transformadores. Os tipos de geradores utilizados definem o tipo de sistema de geração da turbina, que são divididos em dois grupos: as turbinas de velocidade fixa e as turbinas de velocidade variável. Atualmente esses dois grupos de turbinas apresentam quatro modelos principais de turbinas eólicas.

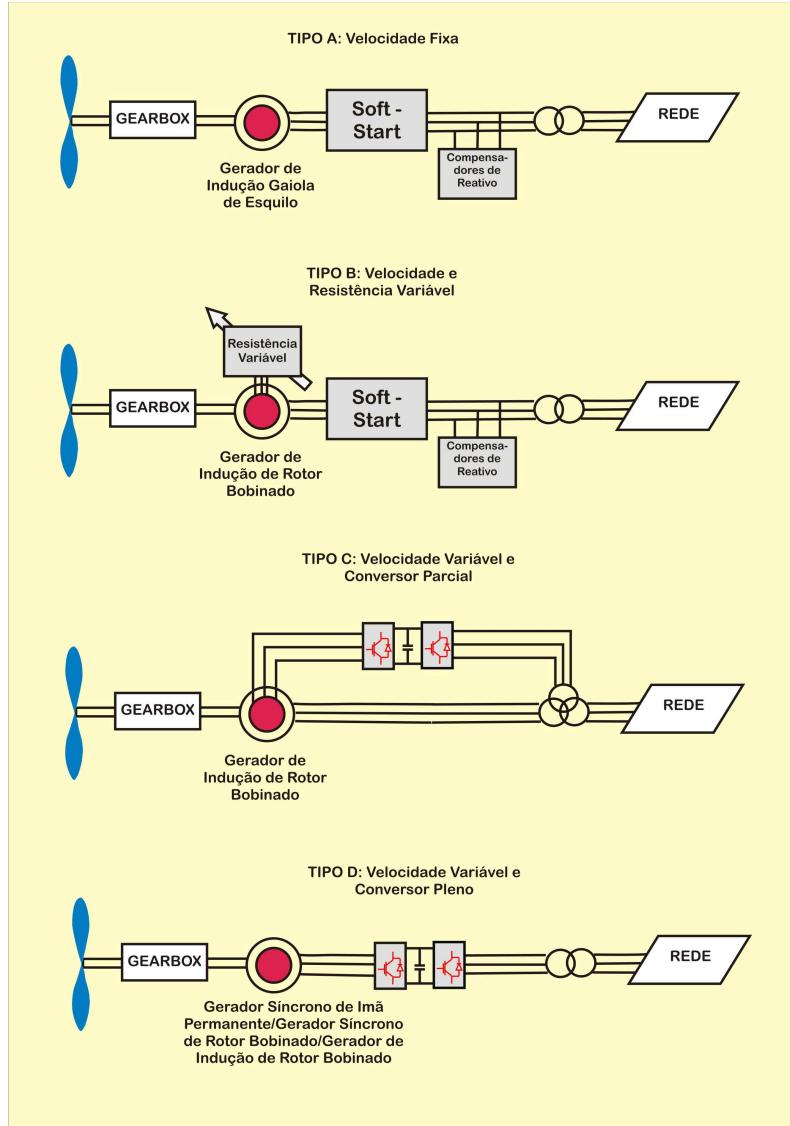
Além desses tipos de divisão, existem ainda mais duas classificações das turbinas quanto à carga a ser conectada: sistemas autônomos e sistemas conectados à rede [13].

Os sistemas autônomos são sistemas que funcionam isoladamente, sem nenhuma conexão com a rede elétrica do local. Neste tipo de conexão, o controle das principais variáveis de qualidade da energia elétrica – nível de tensão e frequência – deve apresentar um controle otimizado e robusto. Estes tipos de geradores são muito utilizados em locais distantes da rede elétrica, onde não há disponibilidade de energia elétrica através de concessionárias locais. Os maiores problemas deste tipo de geração são:

- ⇒ O dimensionamento da turbina deve ser compatível com a carga, para que não haja falta de energia disponível, causando o desligamento da turbina ou de parte da carga.
- ⇒ Devem-se considerar os momentos em que a carga é menor que a energia gerada, devendo então ser armazenada por algum equipamento caso deseje aproveitar toda a energia do gerador. Caso contrário, deve-se gerar menos energia.

Nos sistemas ligados à rede, existem outras fontes de energia na qual a turbina é interligada. Neste caso, a regulação das variáveis de qualidade da energia pode ser regulada pela própria rede, no caso de uma rede forte<sup>3</sup>.

Serão comparadas a seguir as tecnologias referentes aos quatro modelos principais de conexão de aerogeradores com a rede [14].



**Figura 3.6: Tipos de conexões de aerogeradores à rede.**

### 3.2.5.1 *Turbinas de velocidade fixa*

Esta foi a configuração mais utilizada para as turbinas eólicas nos primeiros projetos. Também conhecido como “conceito dinamarquês”, este modelo de turbina consiste em um gerador que deve operar em uma velocidade praticamente fixa. Em geral, é utilizado um motor de indução do tipo rotor gaiola de esquilo, para acomodação de pequenos distúrbios do

<sup>3</sup> Sistemas de potência nos quais a relação de curto-círcuito são superiores a 20.

vento afetando minimamente o desempenho da turbina, conectado diretamente à rede por um transformador. Devido ao fato deste tipo de máquina somente consumir potência reativa, é necessário um equipamento auxiliar para correção do fator de potência e um *soft-starter* para suavização do transitório de conexão à rede.

#### *3.2.5.2 Tipo B: Turbinas de velocidade e resistência rotórica variável*

Nesse modelo a turbina apresenta certa faixa limitada de variação da velocidade de operação. Neste caso, utilizando um motor de indução de rotor bobinado, são inseridas resistências externas no rotor. O controle da resistência varia a faixa de operação entre valores de 0-10% da velocidade síncrona. Este tipo de turbina também exige equipamentos para partida e correção do fator de potência.

#### *3.2.5.3 Tipo C: Turbinas de velocidade variável e conversor parcial*

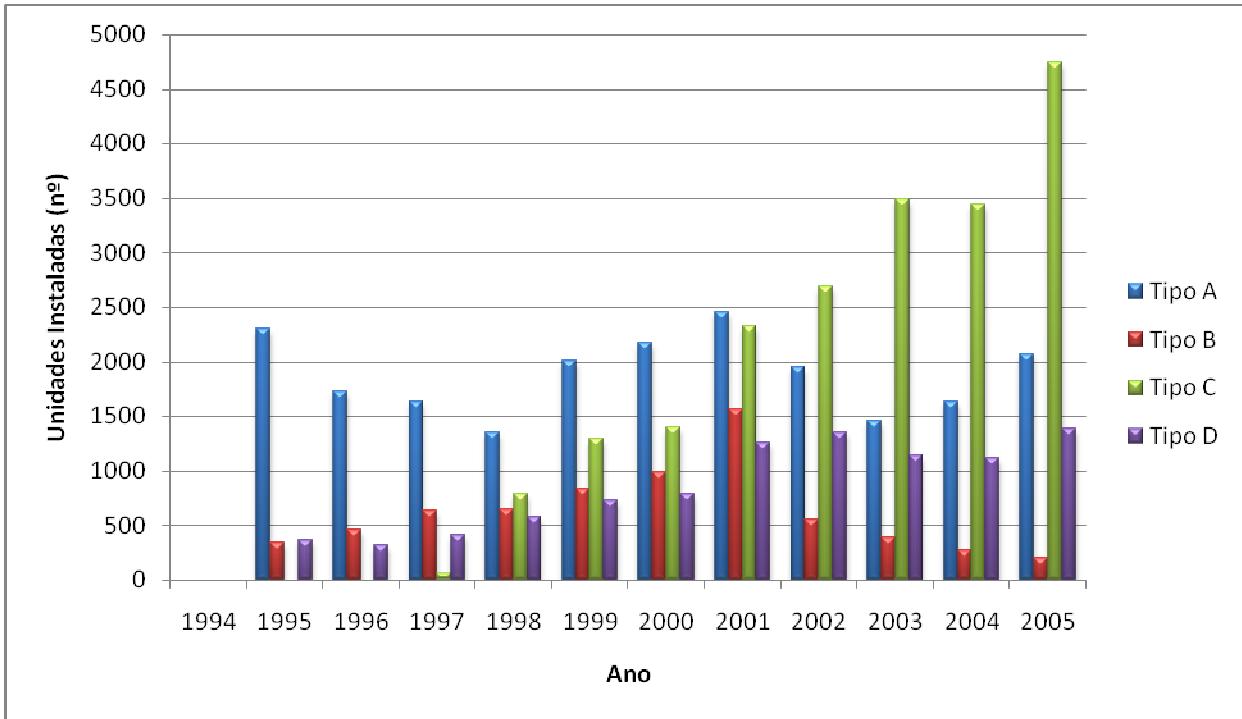
Este modelo consiste em uma máquina de indução de rotor bobinado com dupla alimentação (DFIG - *Doubly Fed Induction Generator*). O estator do gerador é ligado à rede através de um transformador, enquanto o rotor da máquina é alimentado por um conversor de potência. Como a potência passante pelo rotor se encontra entre 25-30% da potência total do gerador, o conversor a ser utilizado se torna mais econômico. Sua faixa de variação de velocidade está entre  $\pm 30\%$  da velocidade síncrona, além de possuir a facilidade de compensação de potência reativa.

#### *3.2.5.4 Tipo D: Turbinas de velocidade variável e conversor pleno*

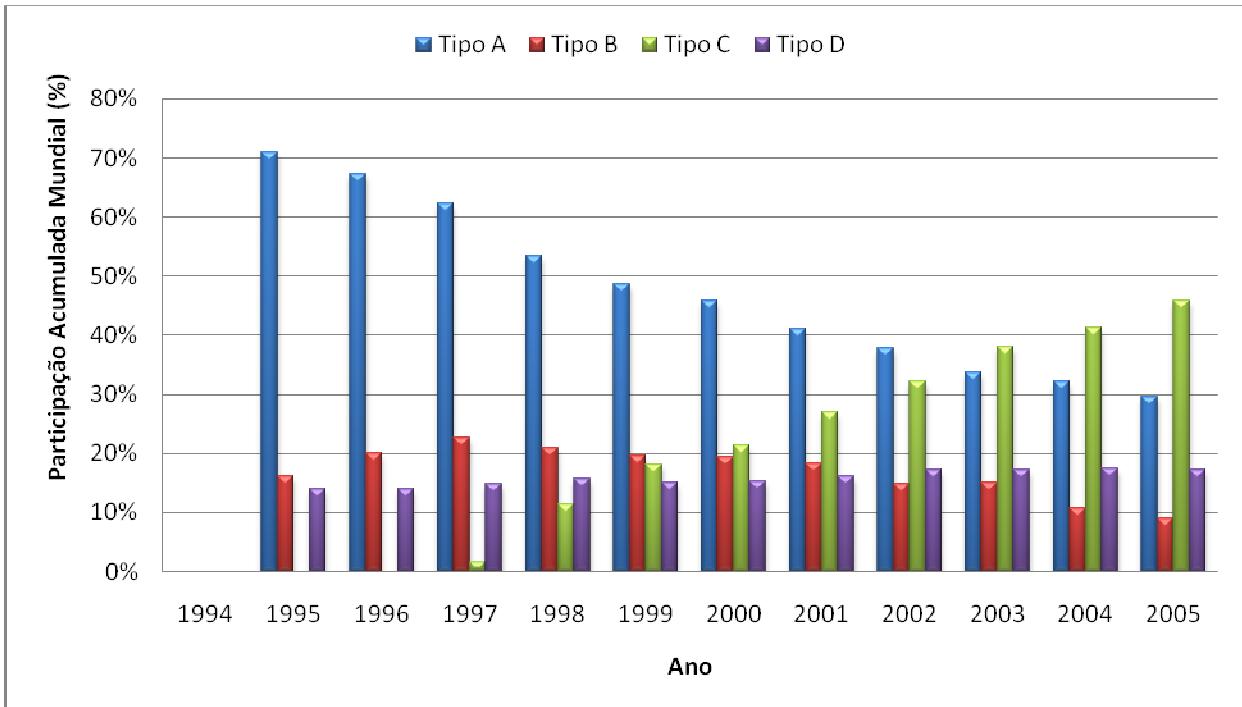
Este último modelo consiste em uma turbina de velocidade variável com uma faixa de operação teórica de  $\pm 100\%$  da velocidade síncrona, limitada pelas condições operacionais do aerogerador. A conexão entre o gerador e a rede é feita por meio de um conversor, que deve ser capaz de suportar a potência total do gerador eólico. O próprio conversor é utilizado para a compensação de potência reativa. A vantagem deste modelo está no número de geradores que podem ser utilizados: geradores síncronos - de imã permanente ou rotor bobinado – e geradores de indução - de rotor bobinado ou de gaiola de esquilo. A desvantagem está nas perdas do conversor de potência, que aumentam com a potência da turbina.

Como a capacidade da turbina também está relacionada com a tecnologia, as turbinas de velocidade variável têm ganhado vantagem sobre as de velocidade fixa, que devido ao advento da eletrônica de potência, atende melhor aos requisitos de conexão com a rede e ocasiona menos desligamentos. Estudos recentes mostram o grande crescimento no mercado deste

tipo de turbina eólica, principalmente as turbinas com conversores de potência. As Figuras 3.8 e 3.9 ilustram estes dados.



**Figura 3.7: Unidades Instaladas dos tipos de turbinas [14].**



**Figura 3.8: Participação de cada tecnologia no decorrer dos anos [14].**

## **Capítulo 4**

### **4 Máquinas de Dupla Alimentação**

Este capítulo tratará das máquinas de indução que apresentam duas alimentações. Será apresentada com mais detalhes a máquina de indução de dupla alimentação (MIDA) e sua evolução, a máquina de indução de dupla alimentação sem escovas (MIDAS). Será também apresentada a análise da MIDAS em regime permanente através do estudo de duas máquinas interconectadas (CDFIM).

#### **4.1 Máquina de Indução de Dupla Alimentação (MIDA)**

Como mostrado nos capítulos anteriores, o mercado de energia eólica tem se apresentado como uma grande oportunidade para utilização das máquinas de indução de rotor bobinado alimentado por conversores. Este crescimento também ocorreu devido aos custos mais baixos dos equipamentos de eletrônica de potência, que permitiram a aplicação desta máquina em novos horizontes, entre eles a própria geração de energia elétrica a partir da energia eólica.

Esta máquina apresenta a grande versatilidade no fato de que utilizando a configuração apresentada na Figura 3.7, é capaz de extrair potência da turbina para uma faixa considerável de velocidade de operação da turbina (em geral até  $\pm 30\%$  da velocidade nominal de operação), aliado ao fato de utilizar um conversor de potência fracionária com relação à potência do gerador da turbina. Outra grande vantagem desta configuração é o controle de potência reativa de geradores ligados diretamente à rede, podendo auxiliar o sistema na compensação de potência reativa e controle da tensão.

Utilizando os conceitos apresentados em [15,16] é possível descobrir a velocidade de operação de uma MIDA. Levando em consideração uma referência posicionada no estator máquina, só existe torque médio não nulo quando os campos de estator e rotor estão na mesma velocidade, podendo ocorrer duas situações. Para essa análise são usadas duas referências – uma no estator para observar o campo girante do estator e a velocidade mecânica do eixo, e uma no rotor, para observar o campo girante aplicado no rotor.

1. *Alimentação de estator e rotor no mesmo sentido:* Sendo a velocidade síncrona de uma máquina dada pela sua frequência de alimentação e número de polos, temos que:

$$\omega_s = \omega_m + \omega_r \quad (4.1)$$

$$\omega_m = \frac{2\pi(f_s - f_r)}{P} \quad (4.2)$$

onde  $\omega_s$ ,  $\omega_r$  e  $\omega_m$  denotam a velocidade angular do fluxo magnético no estator, do fluxo magnético no rotor e a velocidade angular mecânica, respectivamente. E  $f_s$  e  $f_r$  denotam as frequências de alimentação de estator e do rotor e  $P$  o nº de pares de polos da máquina.

2. *Alimentação de estator e rotor em sentidos opostos*: Assim como no caso anterior, a velocidade mecânica final é dada pelas frequências de alimentação da máquina. Porém, como os campos giram em direções opostas:

$$\omega_s = \omega_m - \omega_r \quad (4.3)$$

$$\omega_m = \frac{2\pi(f_s + f_r)}{P} \quad (4.4)$$

O caso nº 1 é chamado de operação subsíncrona da máquina, enquanto o caso nº 2 é conhecido como operação supersíncrona.

Para o um estudo qualitativo do fluxo de potência desta máquina, podemos considerar três fluxos de potência: o fluxo de potência elétrica do estator, o fluxo de potência elétrica do rotor e o fluxo de potência mecânica no eixo da máquina. Cada um pode estar entrando ou saindo da máquina, levando a um total de oito possibilidades. Abolido os casos que contrariam o princípio de conservação de energia, restam seis possibilidades. Estes modos de funcionamento são mais detalhados em [17,18], não sendo o objetivo deste trabalho.

Dentre as possibilidades restantes, podemos ainda encontrar duas que apresentam resultados desfavoráveis que não aproveitam a vantagem da redução da potência do conversor de controle da máquina. São os casos em que a soma das potências mecânica e elétrica do estator são resultado da potência que flui pelo circuito do rotor. O resultado final são os quatro modos de operação apresentados em [17]. O equacionamento dos fluxos de potência pode ser encontrado em [18,19]

Como dito anteriormente, uma vantagem a mais desta máquina está no controle da potência reativa, e por consequência, na regulação da tensão no ponto de conexão. Uma modelagem matemática detalhada é apresentada em [20], onde são observadas as equações que definem as potências ativas e reativas em uma máquina de indução duplamente alimentada com relação aos parâmetros de alimentação do estator e do rotor, e dos parâmetros da máquina. Além disso, neste mesmo artigo são apresentados dois métodos de controle: através da tensão do rotor e controle vetorial. Este último tem sido o mais utilizado para controle de máquinas de indução em geral.

## 4.2 Máquinas de Indução de Dupla Alimentação Sem escovas (MIDAS & MICDAS)

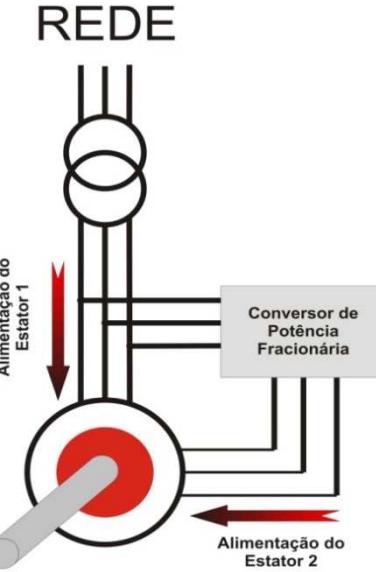
Embora a máquina anterior tenha apresentado muitas vantagens sobre os outros tipos de tecnologia, resultando no crescimento de sua utilização no setor de energia eólica, esta configuração ainda apresenta uma desvantagem que em alguns casos pode se tornar muito onerosa e de grande preocupação, principalmente nas instalações *off-shore*.

O maior problema encontrado na MIDA é a necessidade de escovas para a transferência de potência entre os circuitos interno e externo do rotor da máquina. Em geral, as escovas são responsáveis por problemas de contato e acúmulo de carbono nos anéis do rotor. Em certas aplicações, o custo envolvido na manutenção deste componente pode representar uma grande dificuldade e um maior peso no orçamento [22]. Para isso, uma das opções é a utilização de uma máquina que apresente comportamento semelhante e resolva este problema anterior.

A história da máquina de indução duplamente alimentada sem escovas teve seu início em 1902, com a patente de Siemens Brothers e F. Lydall em 1902, com a máquina em casca-ta. Em sua proposta, Lydall propunha utilizar duas máquinas de diferente número de polos em uma única disposição com o eixo acoplado e o rotor da máquina principal ligada ao estator da máquina secundária. Em 1907, Hunt sugeriu uma interconexão de rotores que removia a necessidade de anéis de contato. Em 1967, Smith apresentou o modo síncrono de operação desta máquina, além de descrever a necessidade de conversores de baixa potência, analisar seu funcionamento e propor uma máquina única. Em 1970, aconteceu uma das maiores contribuições da história de MIDAS: Broadway e Burbridge realizaram projetos com o rotor da máquina de Hunt para transformá-lo em um rotor equivalente tipo gaiola de esquilo, propondo o desenho final da máquina de indução duplamente alimentada sem escovas modernas. Este rotor ficou conhecido como “*nested loop rotor*”.

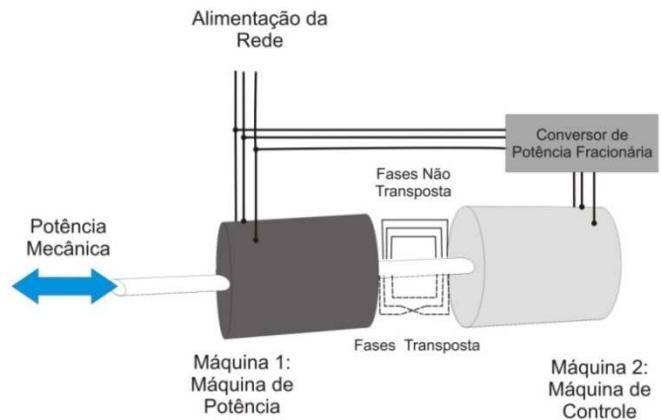
Este tipo de máquina apresentou uma boa opção em aplicações de bombas e ventiladores de grande potência.

O conceito final da máquina de indução de dupla alimentação sem escovas (MIDAS) é apresentado na Figura 4.1.



**Figura 4.1: Configuração da MIDAS**

Para a realização dos estudos sobre a MIDAS, assim como proposto, será utilizado o modelo da Máquina de Indução em Cascata de Dupla Alimentação (MICDAS), também conhecida como *Cascaded Doubly-Fed Induction Machine* (CDFIM) ou *Twin-Stator Induction Machine*. Como seus circuitos do rotor são interligados, a potência de escorregamento alimenta a outra máquina da conexão, e como seu eixo mecânico também está conectado, não há mais a necessidade de escovas. As alimentações são feitas através dos estatores das duas máquinas, e os circuitos dos rotores são excitados por indução. Sua representação gráfica é apresentada na Figura 4.2.



**Figura 4.2: Configuração da MICDAS, levando em consideração as ligações do rotor**

Embora não sejam conhecidos muitos usos das máquinas em cascata, alguns sugerem aplicações como micro-geradoras de energia elétrica, principalmente as hidroelétricas [24] e automóveis elétricos [25].

#### 4.2.1 Análise da MICDAS

Para a análise da MICDAS, assim como foi proposto, será utilizada a configuração apresentada na Figura 4.2. A vantagem deste tipo de ligação é a análise de dois tipos diferentes de conexões, definidas pelas ligações das fases do circuito do rotor que podem ser fases equivalentes (não-transpostas) ou fases distintas (transpostas). Embora parte dos autores [22,25] empregue duas máquinas idênticas ou muito semelhantes para a conexão em cascata, isto não chega a ser necessariamente uma regra, bastando levar em consideração os limites de operação desejados. Para o estudo presente, serão utilizadas duas máquinas semelhantes construtivamente, com número de polos diferentes, com o intuito de realizar uma análise mais completa.

Para compreender o princípio de funcionamento, primeiramente é necessário definir algumas variáveis. Sendo  $(f_1, p)$  e  $(f_2, q)$  a frequência de alimentação e o número de pares de polos da máquina 1 e da máquina 2, respectivamente. As velocidades síncronas dos campos do estator  $\omega_1$  e  $\omega_2$  são:

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (4.5)$$

$$\omega_2 = \frac{2\pi f_2}{q} \quad (4.6)$$

Como seus eixos estão interligados, suas velocidades mecânicas são iguais. Temos que as velocidades dos campos magnéticos do rotor são dadas por:

$$\omega_{1r} = |2\pi f_1 - p\omega_m| \quad (4.7)$$

$$\omega_{2r} = |2\pi f_2 - q\omega_m| \quad (4.8)$$

Se considerarmos que ambas as máquinas são alimentadas com mesma sequência de fase, seus campos magnéticos do estator giram em sentidos contrários quando as máquinas são ligadas frente a frente. Para a análise do comportamento dos campos dos rotores, podemos remeter aos três modos básicos de funcionamento de uma máquina de indução, sendo as referências adotadas como na MIDA:

- i. *Motor:* Os campos de estator e rotor giram em mesmo sentido, assim como sua velocidade mecânica ( $\omega_s > \omega_m, \omega_r$ ).
- ii. *Gerador:* Os campos de estator e rotor giram em sentido contrário, sendo a velocidade mecânica no mesmo sentido do estator ( $\omega_m > \omega_s, \omega_r$ ).

- iii. *Plugging*: Esta condição transitória ocorre para uma mudança de sentido ou frenagem. Ambos os campos de estator e rotor giram em sentidos opostos à rotação mecânica ( $\omega_r > \omega_s, \omega_m$ ).

Analizando o caso de não transposição das fases do rotor, temos o seguinte esquema:

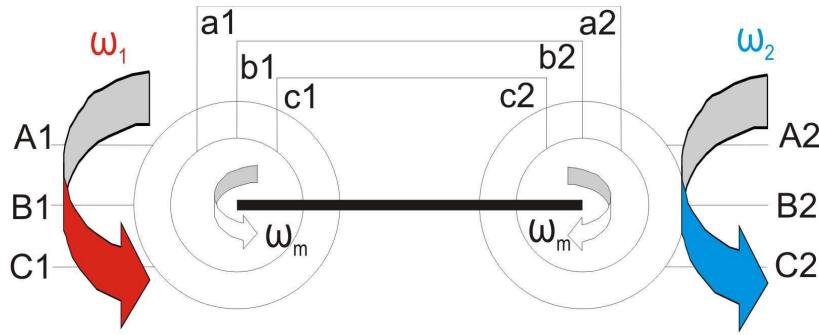


Figura 4.3: Caso analisado da MICDAS

Se  $p\omega_m < \omega_1$  temos que  $\omega_r$  terá sentido igual ao do estator. Como as sequências de fases do rotor são iguais, o sentido de rotação do campo do rotor para máquina 2 deve seguir o mesmo padrão. Com isso, se analisarmos as máquinas isoladamente, temos que a máquina 1 se comporta semelhante ao modo de operação de motor, e a máquina 2 opera como em plugging. Sabendo que as relações que definem as velocidades de campos magnéticos e mecânica da máquina são dadas por:

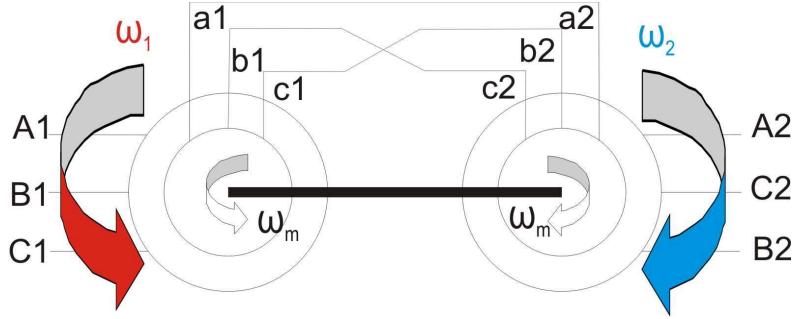
$$\omega_1 = \omega_{1r} + p\omega_m \text{ (motor)}, \quad (4.9)$$

$$\omega_{2r} = \omega_2 + q\omega_m \text{ (plugging)}. \quad (4.10)$$

Como os rotores estão interligados, temos que  $\omega_{1r} = \omega_{2r}$ . Utilizando essa igualdade juntamente com (4.9) e (4.10) temos que:

$$\omega_m = \frac{2\pi(f_1 - f_2)}{p + q}. \quad (4.11)$$

Para o caso de fases do rotor transpostas, pode ser feita a mesma análise. Supondo desta vez que a alimentação da máquina 2 é feita em sequência negativa, temos os seguintes sentidos de rotação dos campos:



**Figura 4.4: Outra realização possível da MICDAS**

Como no primeiro caso, analisando as máquinas isoladamente, a máquina 1 estaria operando como motor. Porém desta vez a máquina 2 também teria o ponto de operação de motor. Com isso, as relações ficam:

$$\omega_1 = \omega_{1r} + p\omega_m(\text{motor}), \quad (4.12)$$

$$\omega_2 = \omega_{2r} + q\omega_m(\text{motor}). \quad (4.13)$$

Assim como no caso anterior, as frequências do rotor devem ser iguais, logo temos que:

$$\omega_m = \frac{2\pi(f_1 - f_2)}{p - q}. \quad (4.14)$$

Se considerarmos as outras possibilidades possíveis para cada caso, é possível encontrar as velocidades finais de equilíbrio através do conhecimento das frequências de alimentação das máquinas, os números de polos, os tipos de conexões e os modos de operação de uma máquina de indução. Esses pontos são apresentados em [17], e na Figura 4.5 são mostrados apenas os pontos de operações desejáveis em uma implementação real. Sendo  $\omega_{s1} = 2\pi f_1$  e  $\omega_{s2} = 2\pi f_2$ :

	$\omega_m = \frac{\omega_{s1} - \omega_{s2}}{(p - q)}$ <p>Rotor Transposto</p>	$\omega_m = \frac{\omega_{s1} + \omega_{s2}}{(p + q)}$ <p>Rotor Não Transposto</p>
	$\omega_m = \frac{\omega_{s1} + \omega_{s2}}{(p + q)}$ <p>Rotor Não Transposto</p>	$\omega_m = \frac{\omega_{s1} - \omega_{s2}}{(p - q)}$ <p>Rotor Transposto</p>
	$\omega_m = \frac{\omega_{s1} - \omega_{s2}}{(p + q)}$ <p>Rotor Não Transposto</p>	$\omega_m = \frac{\omega_{s1} + \omega_{s2}}{(p - q)}$ <p>Rotor Transposto</p>

Figura 4.5: Velocidades em pontos de operação desejáveis [17].

Assim como no caso da MIDA, na Figura 4.5, o sentido dos campos dos rotores  $\omega_{1r}$  e  $\omega_{2r}$  são dados a partir de um referencial solidário ao rotor.

#### 4.2.2 Circuito Equivalente da MICDAS

Para a realização do circuito equivalente por fase desta configuração de duas máquinas em cascata deve ser levado em conta o tipo de conexão utilizada nos rotores. No presente trabalho, será apresentada a análise para o caso não-transposto. Além disso, será considerado que ambas as máquinas são alimentadas com mesma sequência de fase, operando apenas abaixo da velocidade natural. Caso queira operar acima desta velocidade, a sequência de fases de alimentação da máquina 2 deve ser diferente da máquina 1.

Considerando que ambas as máquinas sejam alimentadas em seus terminais do estator com a mesma sequência de fase como mostrado da Figura 4.3, podemos definir:

$$s_1 = \frac{\omega_1 - \omega_m}{\omega_1} \quad (4.15)$$

$$s_2 = \frac{\omega_2 + \omega_m}{\omega_2} \quad (4.16)$$

Assim como as máquinas apresentam sua velocidade síncrona que depende da frequência de alimentação, do número de polos da máquina e da carga; temos que este arranjo apresenta um conceito semelhante. Em geral, a máquina 1 é ligada diretamente à rede, sendo então denominada máquina de potência. A outra máquina, ligada ao conversor de potência, pelo fato de ser utilizada para o controle do grupo, é chamada de máquina de controle.

Na MICDAS, a velocidade síncrona também recebe o nome de velocidade natural [25] é dada para alimentação em corrente contínua no segundo estator, ou seja:

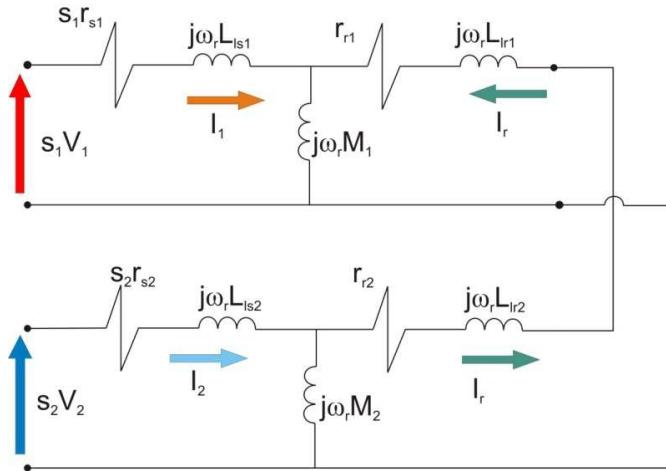
$$\omega_{nat} = \frac{2\pi f_1}{p + q}. \quad (4.17)$$

Considerando a máquina 1 como a principal, podemos definir um novo escorregamento, baseado na velocidade natural do sistema:

$$s_n = \frac{\omega_1 - p\omega_{nat}}{\omega_1}. \quad (4.18)$$

Este novo parâmetro irá auxiliar no fluxo de potência deste método de ligação, que será analisado com mais detalhes posteriormente.

Para que possamos analisar a máquina em cascata em seu regime permanente (e por sua vez a MIDAS) podemos utilizar o modelo equivalente de uma máquina de indução e conectá-la com outra. Para que isso seja possível, é necessário que os circuitos estejam na mesma frequência. Sendo assim, as máquinas 1 e 2 têm seus circuitos equivalentes na frequência do rotor, simplesmente multiplicando-se o escorregamento de cada máquina pelo circuito apresentado. Considerando que a relação efetiva de espiras entre estator e rotor é unitária, temos:



**Figura 4.6: Circuito Equivalente por fase da MIDAS, referido ao rotor.**

Outra abordagem, com o circuito equivalente referido ao estator da máquina 1 (ou máquina de potência) é apresentada em [24].

Através do modelo de regime permanente do conjunto formado pelas duas máquinas será possível analisar o comportamento do sistema como um todo.

#### 4.2.3 Análise da MIDAS: Fluxo de Potência

Para projetar o melhor controle para um determinado sistema, quanto mais informações conhecermos, melhor será o resultado final. Com o modelo equivalente em regime permanente, será possível estudar os fluxos de potência em ambas as máquinas, e obter o melhor controle do fluxo de potência com a finalidade de atingir os objetivos determinados.

Para esta análise, será considerado apenas o caso em que as fases do rotor não são transpostas. Isso porque esta configuração se assemelhar mais com o modelo original da MIDAS. Este modo de ligação é dito em [26] que possuem torques co-ativos ou cooperativos. As considerações para o estudo dos fluxos de potência são [27]:

1. Máquinas sem perdas (sem perdas por efeito Joule  $\Rightarrow R_s = R_r = 0$ );
2. Enrolamentos Ideais (somente componentes fundamentais de fluxo magnético);
3. Enrolamentos de estator e rotor de ambas as máquinas com relação unitária de espiras;
4. Desprezados efeitos de saturação e perdas no ferro;

Tomando a tensão da máquina 1 como referência e a tensão da máquina 2 como uma defasagem com relação à referência dada por  $\theta_v$ , define-se:

$$\overline{V_1} = V_1; \overline{V_2} = V_2 e^{j\theta_v} \quad (4.19)$$

Com o circuito equivalente apresentado na Figura 4.6, podemos obter as relações [27]:

$$s_1 \bar{V}_1 = j\omega_r (L_{ls1} + M_1) \bar{I}_1 + j\omega_r M_1 \bar{I}_r \quad (4.20)$$

$$s_2 \bar{V}_2 = j\omega_r (L_{ls2} + M_2) \bar{I}_2 + j\omega_r M_2 \bar{I}_r \quad (4.21)$$

$$0 = j\omega_r (L_{lr1} + M_1) \bar{I}_r + j\omega_r (L_{lr2} + M_2) \bar{I}_r + j\omega_r M_1 \bar{I}_1 - j\omega_r M_2 \bar{I}_2 \quad (4.22)$$

É possível definir  $(L_{ls1} + M_1)$  e  $(L_{ls2} + M_2)$  como as indutâncias estatóricas totais das máquinas 1 e 2, respectivamente, representadas por  $L_{s1}$  e  $L_{s2}$ ; assim como as indutâncias rotóricas das máquinas  $L_{r1}$  e  $L_{r2}$  são definidas por  $(L_{lr1} + M_1)$  e  $(L_{lr2} + M_2)$ . Levando em consideração as aproximações propostas, temos que as resistências são nulas e as equações (4.20), (4.21) e (4.22) podem ser rearranjadas para relacionar os valores de tensões e correntes.

$$s_1 \bar{V}_1 = j\omega_r \left( L_{s1} - \frac{M_1^2}{L_{r1} + L_{r2}} \right) \bar{I}_1 + j\omega_r \left( \frac{M_1 M_2}{L_{r1} + L_{r2}} \right) \bar{I}_2, \quad (4.23)$$

$$s_2 \bar{V}_2 = j\omega_r \left( L_{s2} - \frac{M_2^2}{L_{r1} + L_{r2}} \right) \bar{I}_2 + j\omega_r \left( \frac{M_1 M_2}{L_{r1} + L_{r2}} \right) \bar{I}_1. \quad (4.24)$$

Para um melhor entendimento, denomina-se o primeiro termo entre parênteses de (4.23) como  $L_1$ , repetindo a mesma definição para (4.24) e definindo  $L_2$ . O termo em comum de (4.23) e (4.24) serão chamados de  $M$ .

Com essas simplificações, os valores das correntes em relação às tensões são:

$$\bar{I}_1 = -\frac{s_1 V_1}{\omega_r \left( \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_2} \right)} e^{-j\frac{\pi}{2}} - \frac{s_2 V_2}{\omega_r \left( \frac{L_1 L_2 - M^2}{M} \right)} e^{j\left(\theta_v + \frac{\pi}{2}\right)} \quad (4.25)$$

e

$$\bar{I}_2 = -\frac{s_1 V_1}{\omega_r \left( \frac{L_1 L_2 - M^2}{M} \right)} e^{-j\frac{\pi}{2}} + \frac{s_2 V_2}{\omega_r \left( \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1} \right)} e^{j\left(\theta_v - \frac{\pi}{2}\right)}. \quad (4.26)$$

Como a potência ativa total é dada pela soma das potências ativas em cada uma das fases, podemos dizer que a potência ativa total em um caso equilibrado é igual a três vezes o valor da potência calculada para uma fase. Esta por sua vez é determinada como a parcela real do produto entre tensão e corrente. Sendo assim as potências que fluem em cada estator são dadas por:

$$P_1 = 3 \frac{s_2 V_1 V_2}{\omega_r \left( \frac{L_1 L_2 - M^2}{M} \right)} \operatorname{sen} \theta_v \quad (4.27)$$

e

$$P_2 = -3 \frac{s_1 V_1 V_2}{\omega_r \left( \frac{L_1 L_2 - M^2}{M} \right)} \operatorname{sen} \theta_v. \quad (4.28)$$

A partir do modelo utilizado no circuito equivalente adotado, ambas as máquinas absorvem potência para valores positivos. Através da relação acima é observado que as potências estão relacionadas com a velocidade da máquina. Comparando (4.27) e (4.28); e relembrando que  $s_1 \omega_1 = s_2 \omega_2$ :

$$\frac{P_1}{P_2} = -\frac{s_2}{s_1} = -\frac{\omega_1}{\omega_2}. \quad (4.29)$$

Com estas relações podemos obter uma análise preliminar do sistema formado pelas máquinas. Assim como nas máquinas de indução simples, a potência circulante no estator das máquinas é, em módulo, proporcional à velocidade angular do campo do estator. Outra característica importante é o comportamento síncrono do conjunto. As equações (4.27) e (4.28) mostram certa semelhança com a relação dada em [20], e por sua vez com o comportamento de uma máquina síncrona.

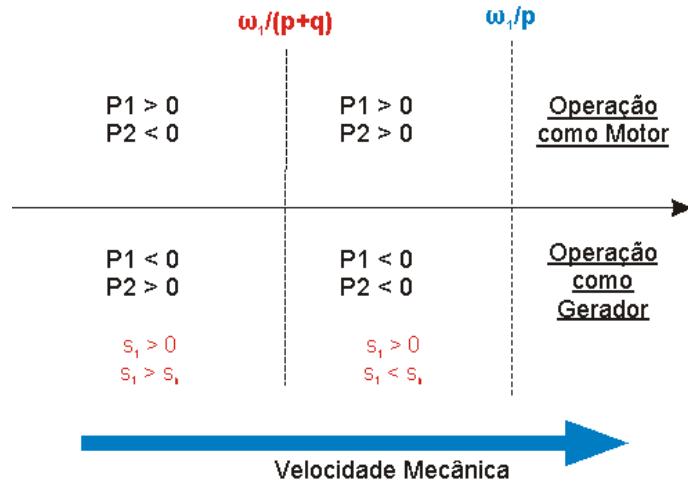
Como a máquina 1 é escolhida como a principal, a análise principal será feita em relação a esta máquina. Avaliando o caso apresentado na Figura 4.3, considerando operação como motor, temos que:

$$\omega_1 = \omega_r + p \omega_m; \quad \omega_2 = \omega_r - q \omega_m \quad (4.30)$$

Utilizando (4.17), (4.18) e (4.30) chega-se a:

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = -\left( \frac{(p+q)}{p} (s_1 - s_n) \right) \quad (4.31)$$

Para velocidades abaixo da velocidade natural, temos que  $s_1 > s_n$ , e com isso temos que  $P_1 > 0$  e  $P_2 < 0$  no caso de motor e  $P_1 < 0$  e  $P_2 > 0$  o caso de gerador. Para velocidades acima da velocidade natural,  $s_1 < s_n$ . Logo  $P_1 > 0$  e  $P_2 > 0$  para funcionamento como motor e  $P_1 < 0$  e  $P_2 < 0$  para funcionamento como gerador. Estes pontos de operação estão em conformidade com os fluxos apresentados em [17] para uma MIDA. Para o caso da MICDAS, o fluxo é apresentado na Figura 4.7.



#### 4.7: Análise do Fluxo de Potência.

Em [25] encontra-se uma citação que diz respeito ao conversor a ser utilizado na máquina de controle. Este afirma que a potência que flui pelo conversor ao estator da segunda máquina é uma fração da potência da máquina principal. Entretanto essa fração é dada a partir da velocidade natural do conjunto [25]. Além disso, neste mesmo trabalho, é observada a faixa de velocidades para operação da configuração em cascata varia da velocidade natural a velocidade síncrona da máquina 1, podendo ser estendido ao caso da máquina de dupla alimentação sem escovas.

# **Capítulo 5**

## **5 Resultados**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir de simulação com o programa Simulink/MATLAB. Este programa foi escolhido devido a sua maior liberdade em relação aos dados das máquinas e pela maior experiência de utilização.

Além disso, serão discutidos os resultados encontrados em cada simulação obtida.

### **5.1 Considerações Preliminares**

Para a simulação do funcionamento da configuração proposta, foram utilizadas duas máquinas de parâmetros elétricos iguais e diferente número de polos. As máquinas de potência e de controle foram escolhidas com 6 polos e 4 polos, respectivamente.

As máquinas utilizadas na simulação são exemplos pré-estabelecidos do próprio programa, mostrado na Figura 5.1. Nesta mesma configuração, são escolhidas os referenciais das variáveis para transformação d-q utilizada internamente, que neste trabalho será utilizado o referencial síncrono. Esta escolha se deve ao fato das tensões serem balanceadas e contínuas, sendo esse tipo de referência sugerido por [30]. Outra característica é o tipo de controle que pode ser realizado. Os controles podem ser de velocidade ou de torque. Ambos serão utilizados. Uma representação esquemática da simulação é mostrada na Figura 5.2.

O circuito utilizado na simulação é apresentado na Figura 5.3. Neste mesmo modelo são medidas as potências ativas e reativas das máquinas, suas velocidades e torques eletromagnéticos produzidos. A Figura 5.4 mostra o bloco “MICDAS” onde se encontram as duas máquinas conectadas. As fontes são consideradas ideais, podendo alterar livremente tensão, fase e frequência. Entretanto, a máquina principal sempre será alimentada com tensão, frequência nominal e sequência positiva, para efeito de simulação de ligação a uma rede de potência. Podem ser observados dois pontos aqui.

O primeiro é a simulação da conexão mecânica das máquinas. Para isso, a velocidade de saída da máquina principal é a entrada da máquina de controle com sentido inverso. Isso porque como as máquinas têm a mesma referência de sentido de rotação dada pelo programa, a velocidade da segunda máquina deve ser corrigida para simular o efeito de acoplamento frontal. Pode-se perceber também nas Figuras 5.3 e 5.4 que as velocidades sofrem um ajuste com

relação a suas velocidades síncronas de alimentação. Isso porque a versão do programa utilizada usa o sistema por unidade (p.u.) para entrada de velocidade.

O segundo ponto é a presença de resistências no circuito do rotor. Esta ligação é necessária para a realização dos cálculos pelo programa, já que as máquinas são modelos do tipo fonte de corrente. As resistências foram escolhidas com valores elevados (na ordem de 100  $k\Omega$ ), com a finalidade de não causar efeitos significativos nos resultados.

Considerando aplicações para uso em energia eólica, os dados finais, onde existem erros causados por medições, serão considerados variações ou erros máximos de 2%, para que não comprometa um sistema formado pela MICDAS e uma turbina eólica.

Por fim, o passo de integração dos cálculos foi escolhido variável, com passo máximo de  $1 \times 10^{-4}$  s e tolerância de  $1 \times 10^{-5}$  s e modelo trapezoidal. O objetivo desta escolha é buscar a melhor simulação, limitando apenas o passo de integração para melhores resultados.

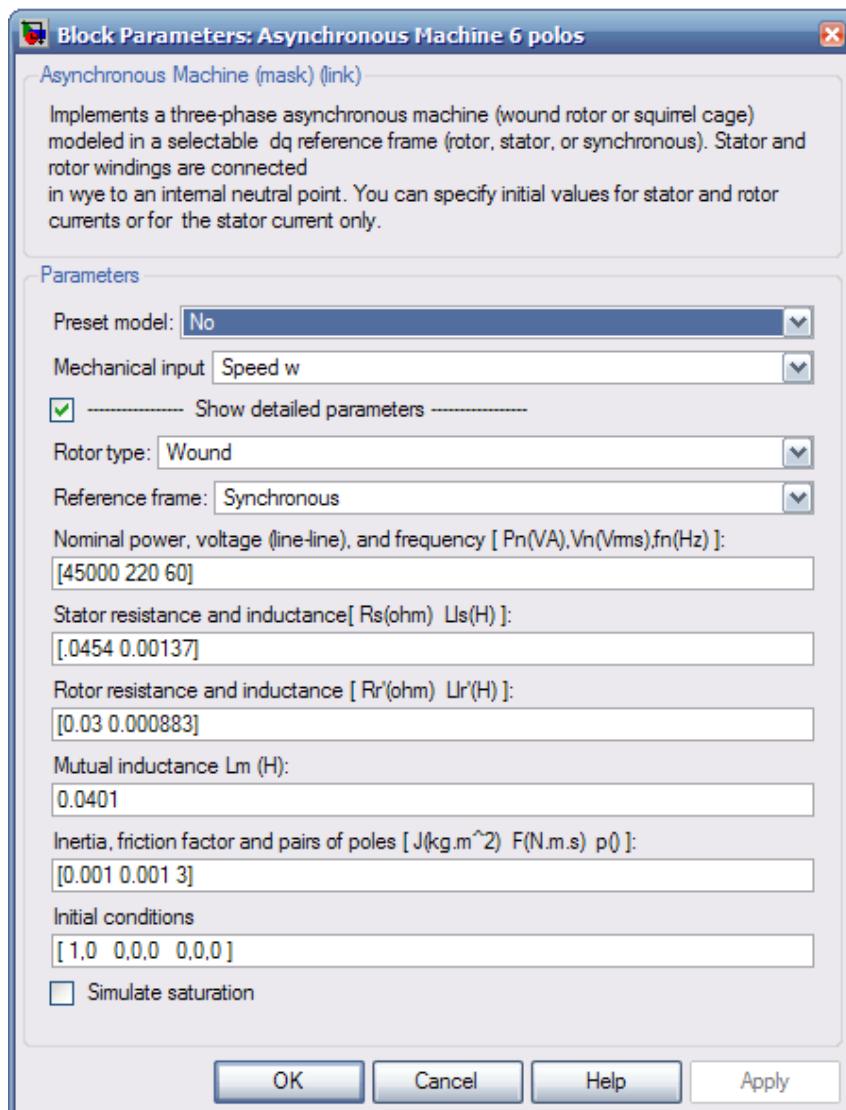


Figura 5.1: Parâmetros das máquinas utilizadas nas simulações.

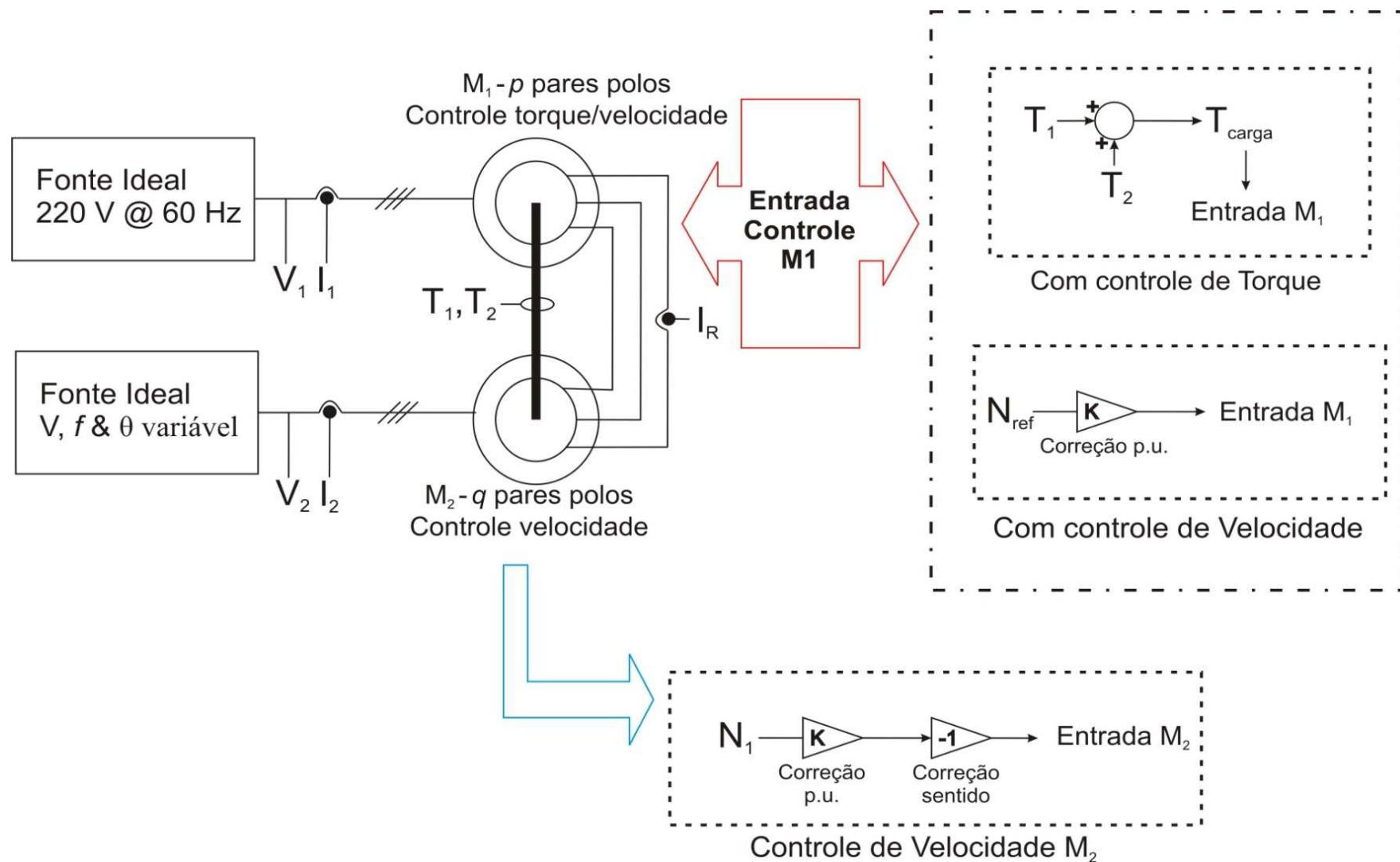


Figura 5.2: Esquema utilizado na simulação.

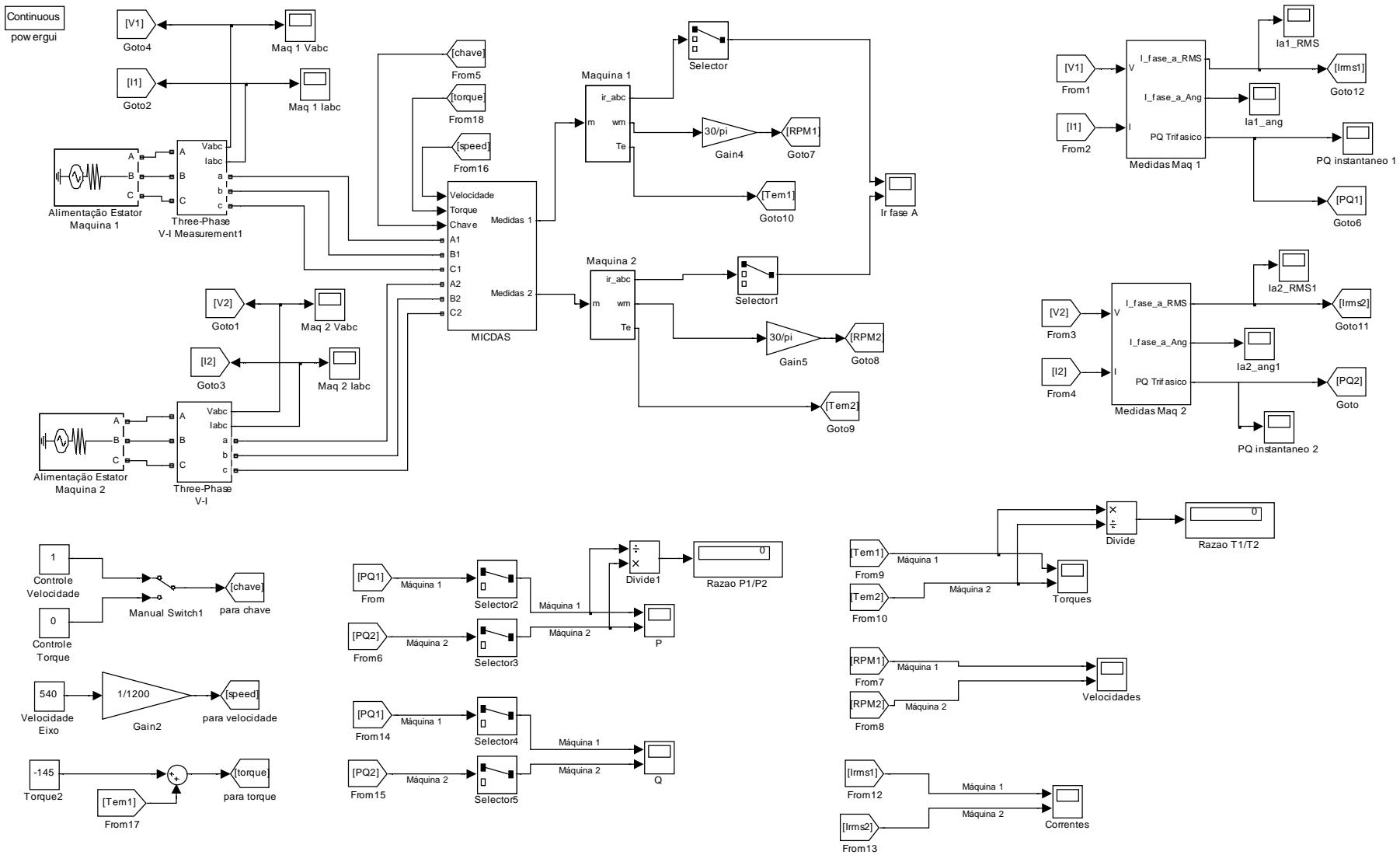


Figura 5.3: Circuito completo a ser simulado.

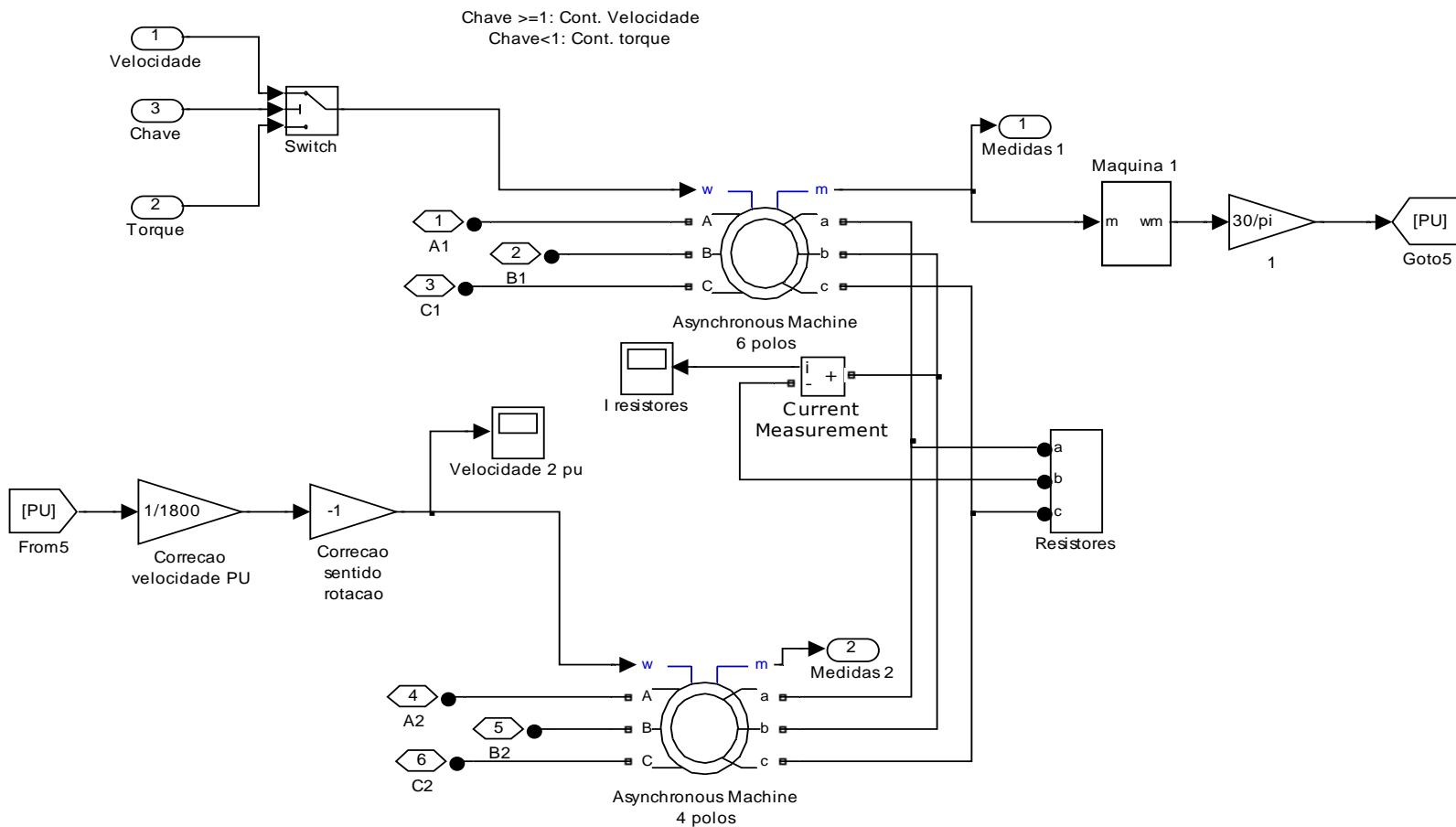


Figura 5.4: Conexão das máquinas em cascata.

## 5.2 Simulação de pontos de operação

A primeira simulação consiste em testar pontos de operação das velocidades apresentadas na Figura 4.5. Para isso, será utilizado o controle de velocidade na máquina principal. Vale ressaltar, que o controle de velocidade é sempre utilizado na máquina de controle com a finalidade de simular o acoplamento mecânico frontal. Sendo assim, deste ponto em diante quando for dito o tipo de controle a ser utilizado, este se refere à máquina 1, ou máquina de potência.

### 5.2.1 Circuitos do rotor não transpostos

De acordo com a Figura 4.3, onde as fases do rotor não são transpostas, a velocidade mecânica de regime permanente é dada por:

$$\omega_m = \frac{2\pi(f_1 \pm f_2)}{p + q} \quad (5.1)$$

O sinal do numerador irá depender da sequência de fases de alimentação da máquina de controle, negativo para mesma sequência de fases e positivo para sequência de fases distintas.

A primeira velocidade de teste será com as máquinas alimentadas com mesma sequência de fases. Isso nos leva ao caso em que o sinal do numerador será negativo. Se a velocidade de rotação for de 540 rpm, temos que a frequência deve ser de 15 Hz. A Figura 5.5 mostra as velocidades das máquinas 1 e 2, quando imposto 540 rpm à máquina 1:

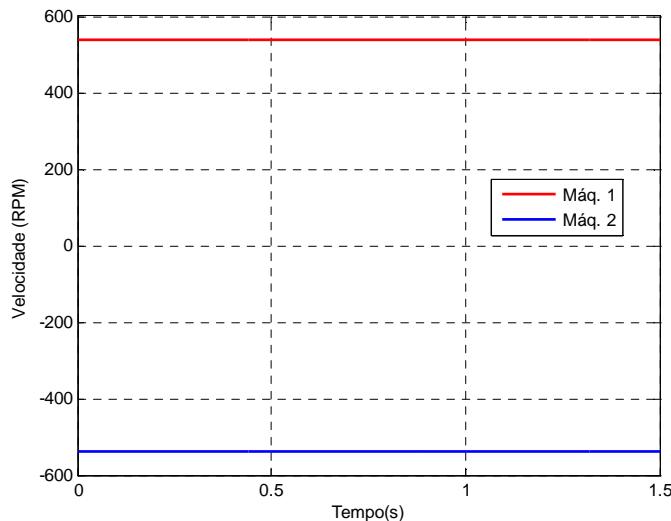
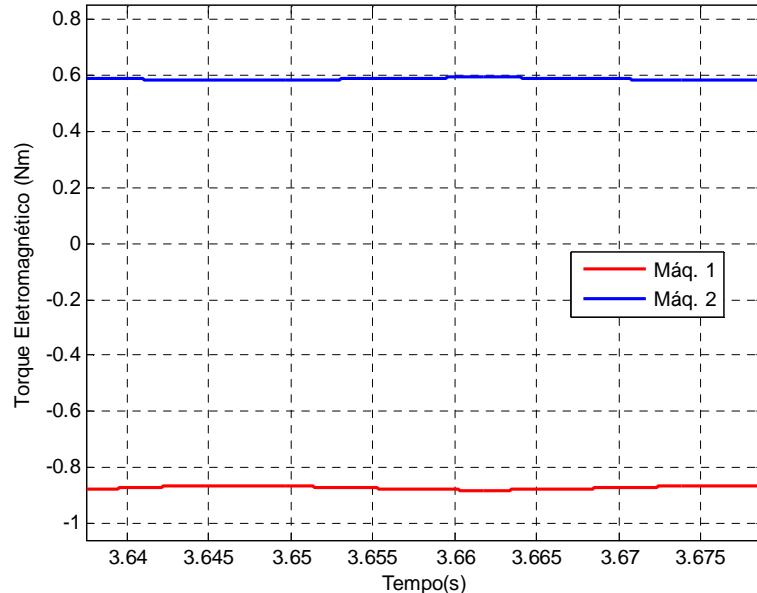
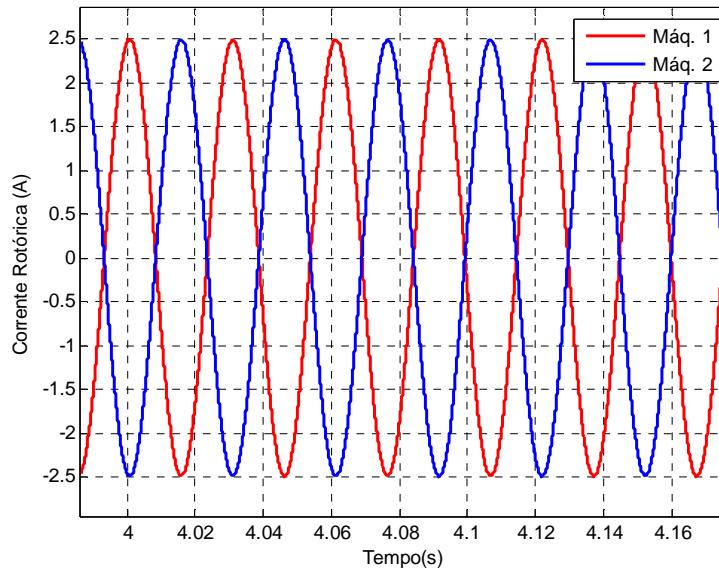


Figura 5.5: Velocidade x tempo, a 540 rpm.

Como as máquinas se encontram conectadas frontalmente, a velocidade da máquina 2 tem sinal inverso para manter a referência utilizada pelo programa. Para comprovar que o conjunto atingiu o regime permanente, basta analisar os torques produzidos pelas máquinas, ou então as correntes do rotor.



**Figura 5.6: Torque x tempo, a 540 rpm.**



**Figura 5.7: Correntes rotóricas x tempo, a 540 rpm.**

Analizando os gráficos das Figuras 5.6 e 5.7 podemos perceber que a máquina encontrou um ponto de operação, produzindo um torque médio não nulo. As correntes equilibradas e senoidais nos mostram que o conjunto está operando em sincronismo. Pela referência do

programa, torques positivos indicam produção de energia mecânica e torques negativos indicam que a máquina recebe energia mecânica. Os valores das correntes aparecem contrários pelo fato da referência das máquinas utilizada pelo programa para o sentido das correntes.

A próxima simulação terá a mesma frequência de alimentação, porém as fases de alimentação da máquina 2 serão trocadas. Com isso, temos que o sinal do numerador de (5.1) passa a ser positivo. A velocidade esperada passa a ser então de 900 rpm.

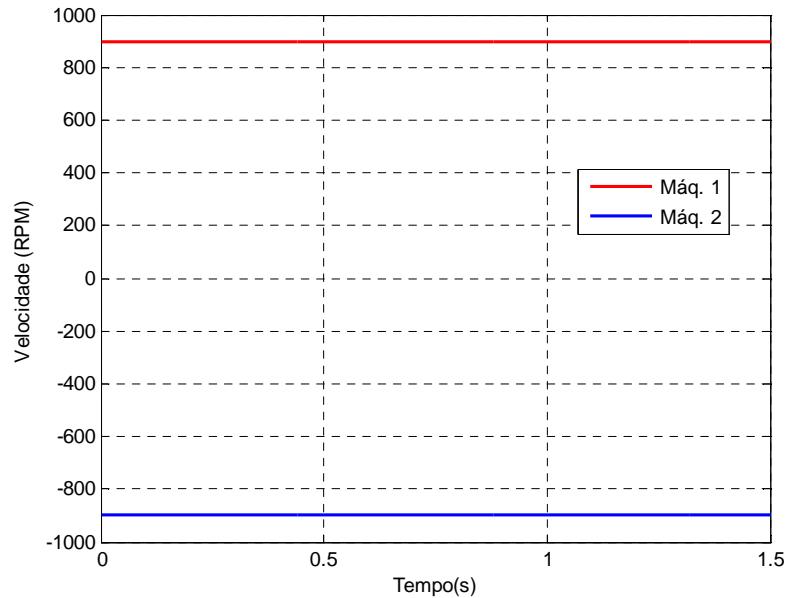


Figura 5.8: Velocidade x tempo, a 900 rpm.

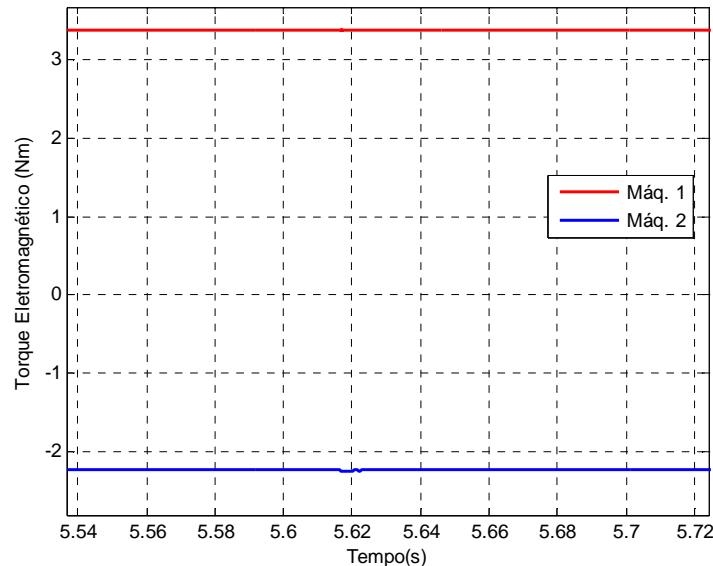
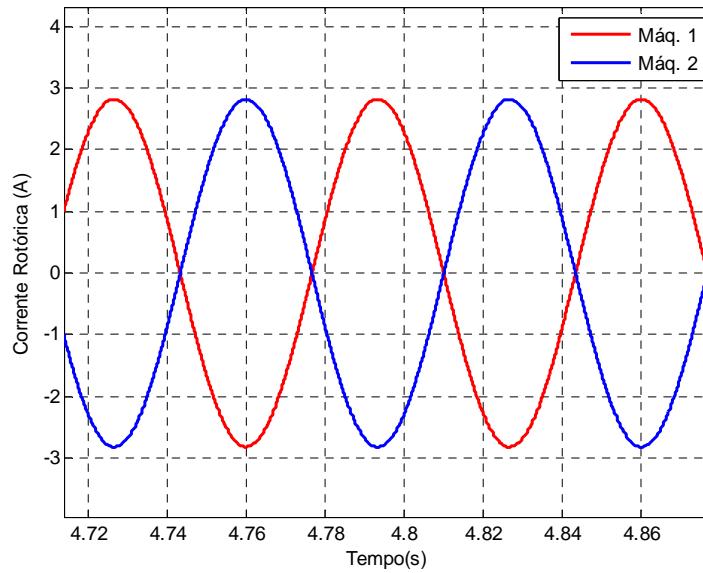


Figura 5.9: Torques x tempo, a 900 rpm.



**Figura 5.10: Correntes rotóricas x tempo, a 900 rpm.**

Mais uma vez, os torques e correntes demonstram que a alimentação utilizada na máquina 2 está com frequência correta.

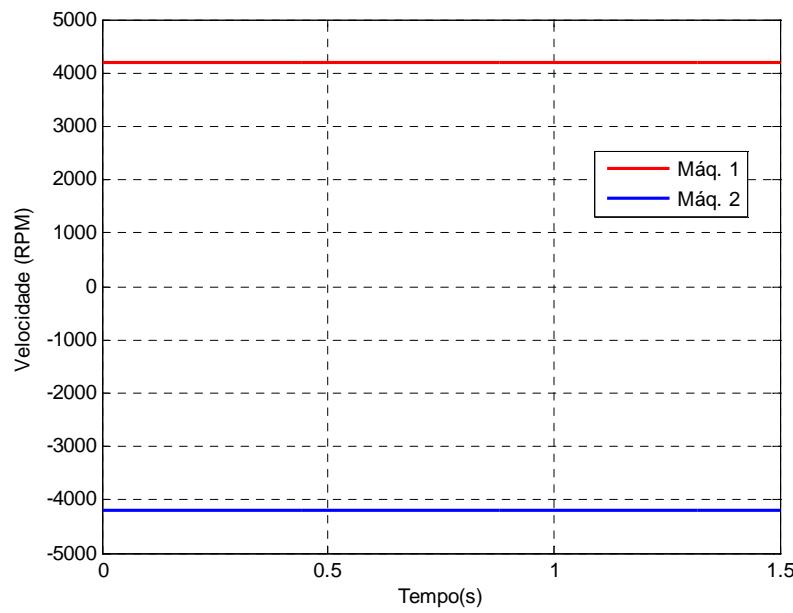
### 5.2.2 Circuitos do rotor transpostos

De acordo com a Figura 5.4, em que as fases do rotor são transpostas, a velocidade mecânica de regime permanente é dada por:

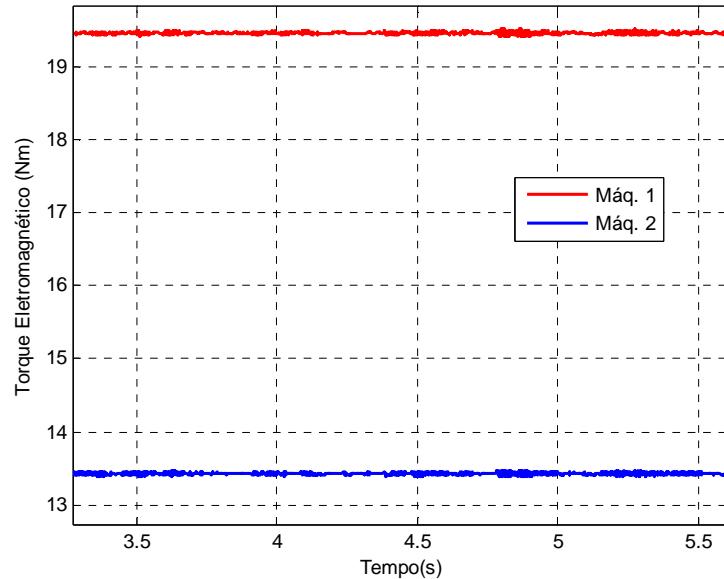
$$\omega_m = \frac{2\pi(f_1 \pm f_2)}{p - q} \quad (5.2)$$

Neste caso, o sinal negativo é dado para sequência de fases distintas e o sinal positivo para sequência de fases iguais.

O método a ser utilizado será o mesmo apresentado anteriormente. Realizando o primeiro caso, com a mesma sequência de alimentação e frequência em 10 Hz, temos que o sinal do numerador é positivo. Isso leva a uma velocidade de regime permanente de 4200 rpm. Este tipo de conexão pode ser utilizado em aplicações de velocidades elevadas. Vale ressaltar que para este tipo de realização da MICDAS, a velocidade natural agora é dada pela subtração dos polos das duas máquinas em (5.2).

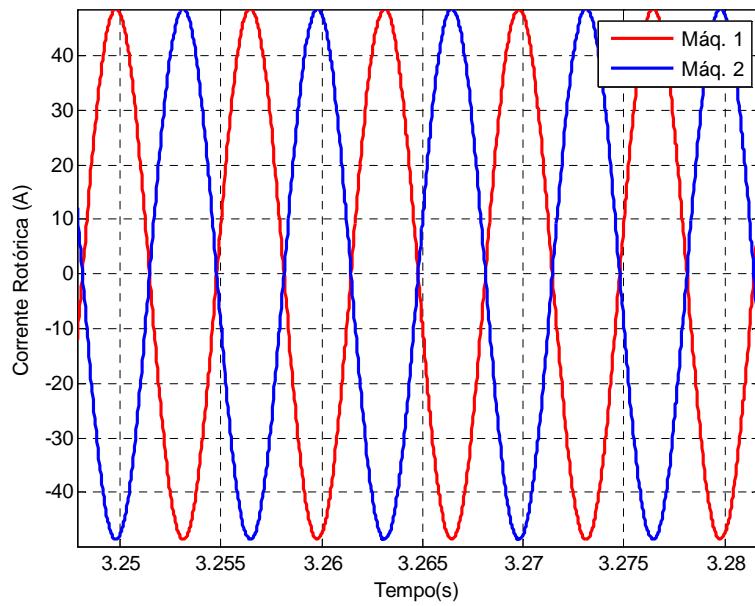


**Figura 5.11: Velocidade x tempo, a 4200 rpm.**



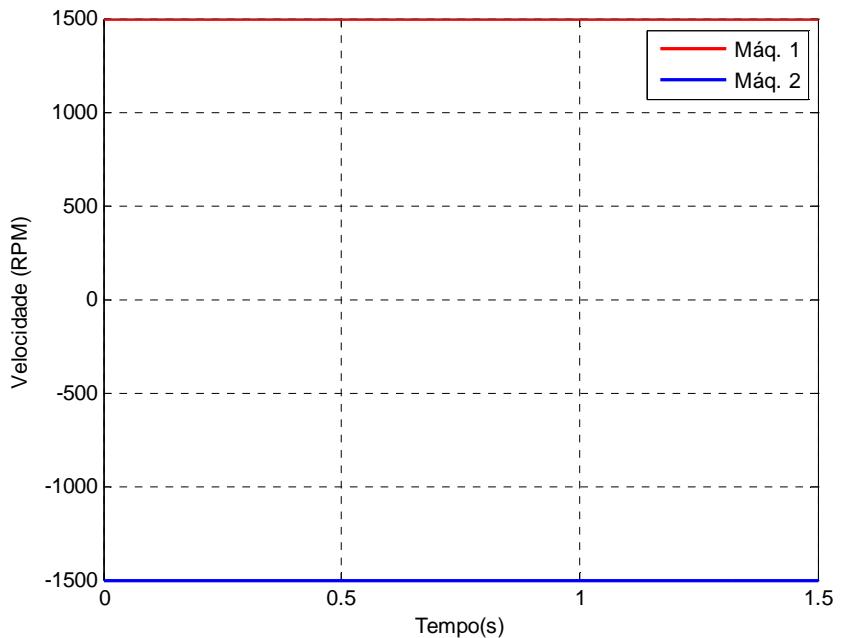
**Figura 5.12: Torques x tempo x tempo, a 4200 rpm.**

A Figura 5.12 mostra que os torques eletromagnéticos produzidos apresentam uma levea variação com relação a um valor médio, porém essa variação também é menor que 1%, podendo ser desconsiderada neste trabalho de acordo com o critério estabelecido.

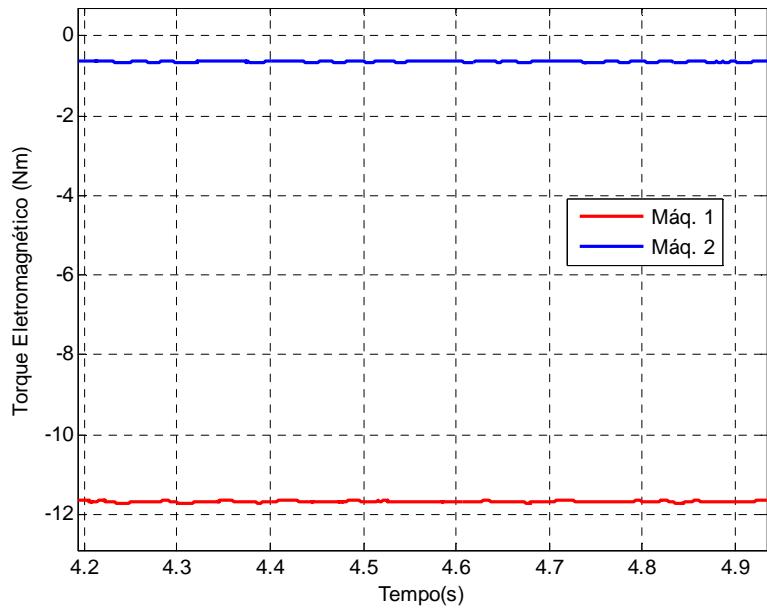


**Figura 5.13: Correntes Rotóricas x tempo, a 4200 rpm.**

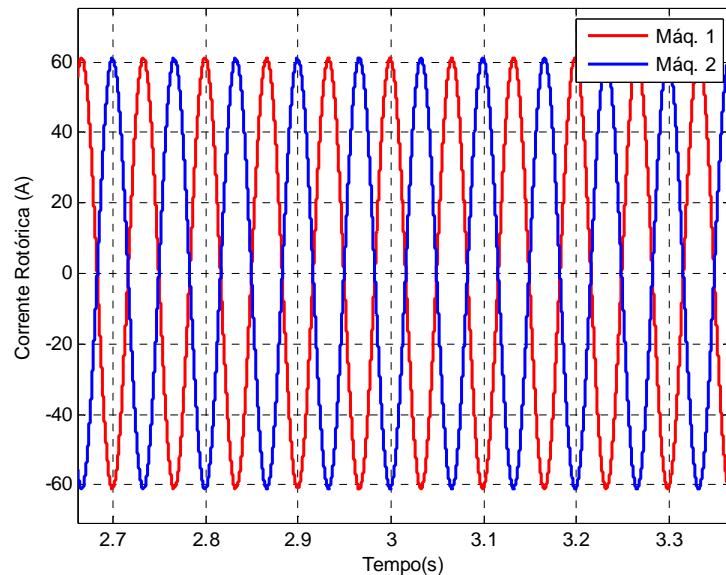
Para o caso em que as fases do estator da máquina de controle também são transpostas, o numerador de (5.2) tem seu sinal negativo. Utilizando então uma frequência de alimentação de 35 Hz, temos que a velocidade final será de 1500 rpm.



**Figura 5.14: Velocidade x tempo, a 1500 rpm.**



**Figura 5.15: Torques x tempo, a 1500 rpm.**



**Figura 5.16: Correntes Rotóricas x tempo, a 1500 rpm.**

Estes primeiros resultados confirmaram a teoria apresentada para previsão da velocidade final de rotação da MICDAS, podendo ser utilizada para o caso da máquina de indução de dupla alimentação sem escovas.

### 5.3 Simulação para análise do fluxo de potência

Como foram mostradas anteriormente, as relações obtidas para os fluxos de potência foram encontradas para o caso não-transposto. De acordo com (4.27) e (4.28), seria possível presumir os valores de potência que irão fluir pelos estatores das duas máquinas, porém a análise foi realizada para o caso de uma máquina ideal, sem perdas. Sendo assim, serão analisados somente o sentido do fluxo de potência e sua concordância com a teoria exposta.

Uma primeira análise das Figuras 4.5 e 4.7 indicam que a cascata só irá girar em velocidades abaixo da velocidade natural se a alimentação da máquina de controle for de mesma sequência de fase da máquina de potência, e terá velocidade superior à velocidade natural caso contrário.

Para esta nova simulação, será utilizado o mesmo procedimento apresentado anteriormente. A alimentação da máquina 1 será fixada em seus valores nominais, enquanto a máquina 2 poderá sofrer alterações de fase, amplitude, frequência e sequência. As fases do rotor serão conectadas em fases não transpostas. Nestas novas simulações, a máquina 2 ainda apresenta controle de velocidade, porém a máquina 1 passa a ter controle de torque.

A primeira simulação apresentará o caso em que a sequência de fases do estator da máquina 2 é igual a da máquina 1. A máquina 2 será alimentada com frequência de 15 Hz e 53 V entre fases. É imposto um torque positivo à máquina 1 de 20 Nm, indicando um torque motor.

O primeiro passo é verificar a sincronismo do conjunto.

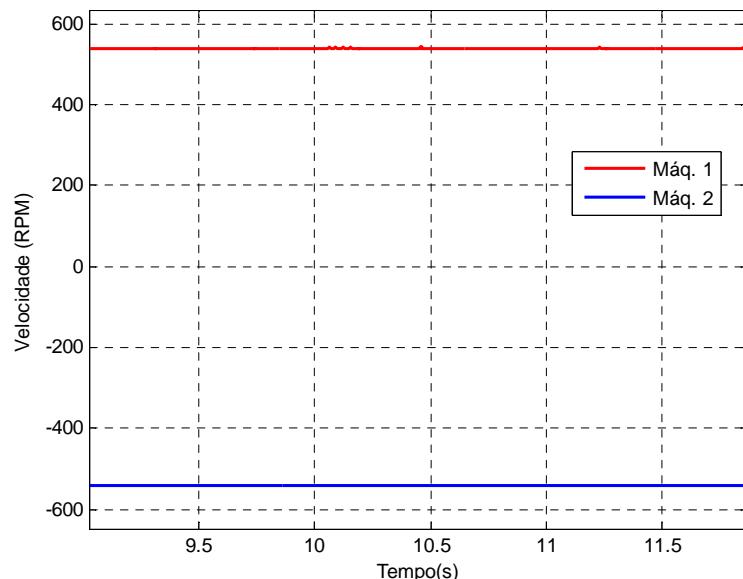
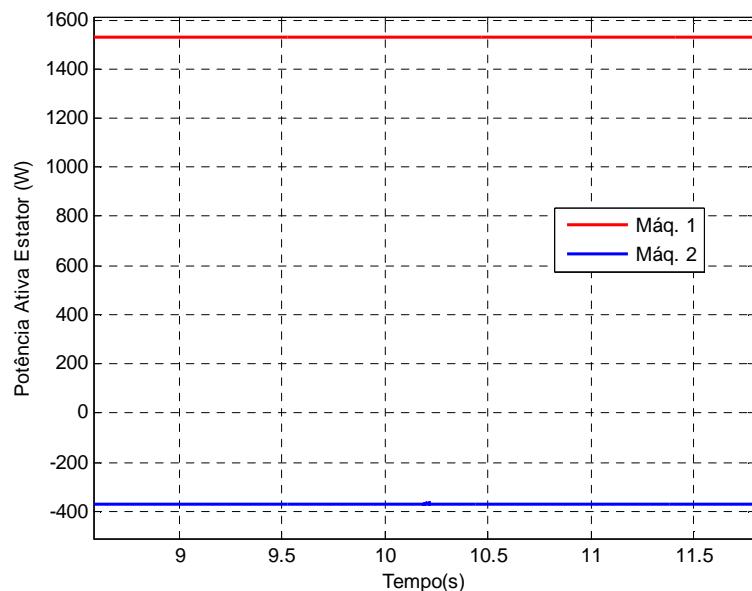


Figura 5.17: Velocidade x tempo, caso 1.

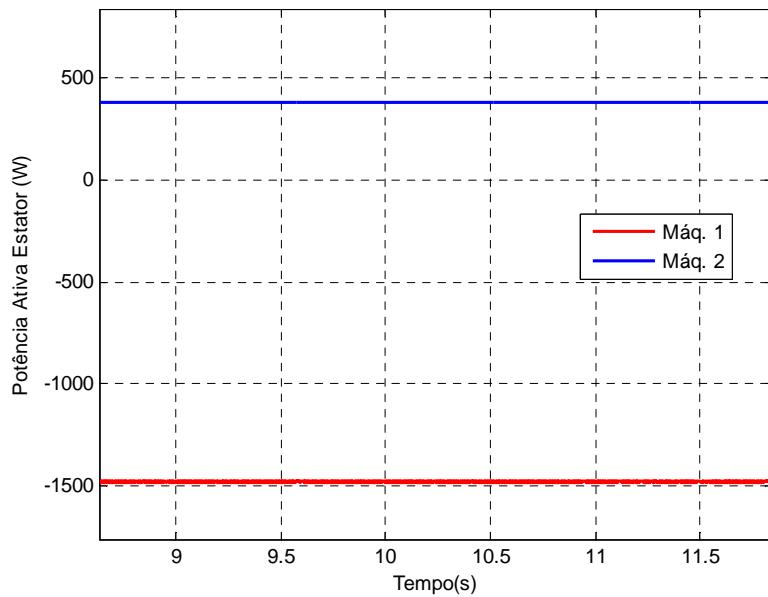
A máquina apresenta pequenas oscilações no valor da velocidade das máquinas. Isso porque como a velocidade não é mais imposta, o rotor tem liberdade para alterar sua velocidade de rotação de acordo com a necessidade mecânica das máquinas. Entretanto essas variações são muito baixas (menores que 1%), podendo ser desprezadas. Com isso a velocidade tem seu valor médio em torno dos 540 rpm esperados, que indicam que o conjunto alcançou o regime permanente na velocidade prevista.

Então o próximo passo será analisar o fluxo de potência das máquinas e observar se estão em concordância com a teoria proposta.



**Figura 5.18: Potência no estator x tempo, caso 1 - Motor.**

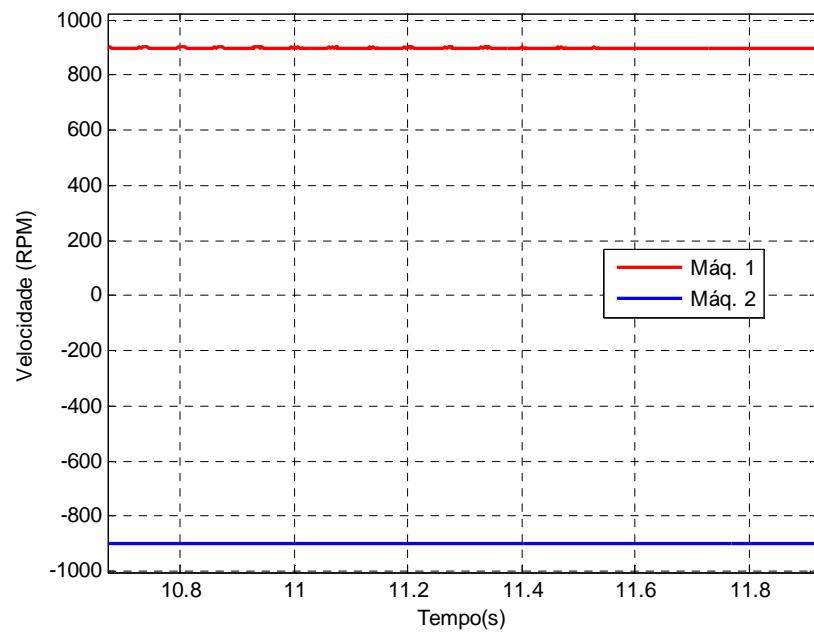
Analizando o gráfico da Figura 5.15, é possível perceber que a energia está fluindo no sentido da rede para a máquina, na máquina principal; e fluindo no sentido da máquina para a rede (em um caso real, conversor), na máquina de controle. Realizando o mesmo teste para um torque gerador de -20 Nm (o sinal negativo indica torque gerador):



**Figura 5.19: Potência no estator x tempo, caso 1 - Gerador.**

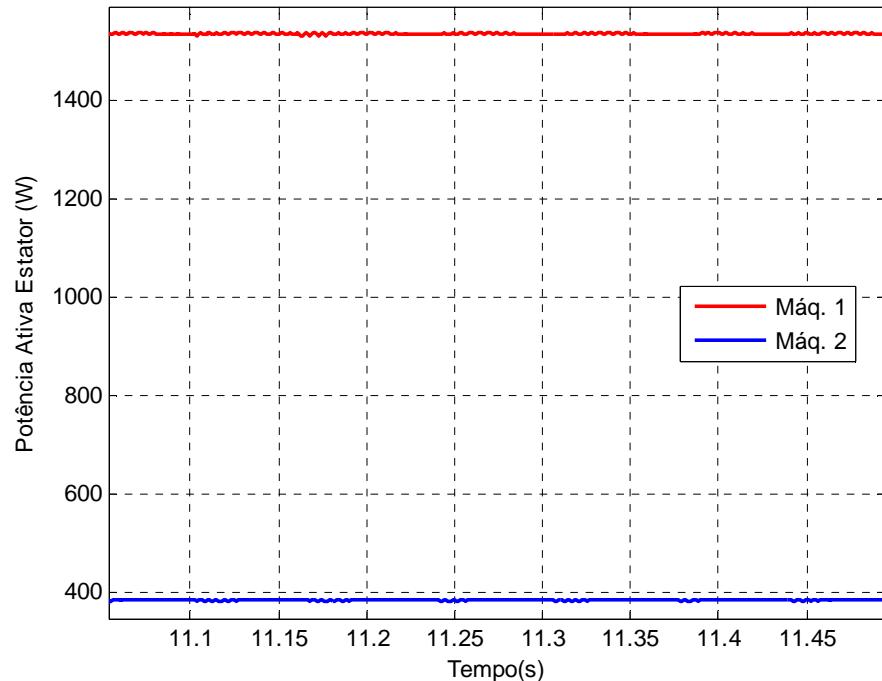
Como esperado, os sentidos de potência inverteram. Estes resultados comprovam a teoria apresentada na Figura 4.7.

O próximo caso será simulado com as fases do estator da segunda máquina com sequência de fases distinta da máquina principal. Os valores de tensão e corrente serão mantidos, assim como os valores de torque aplicados.

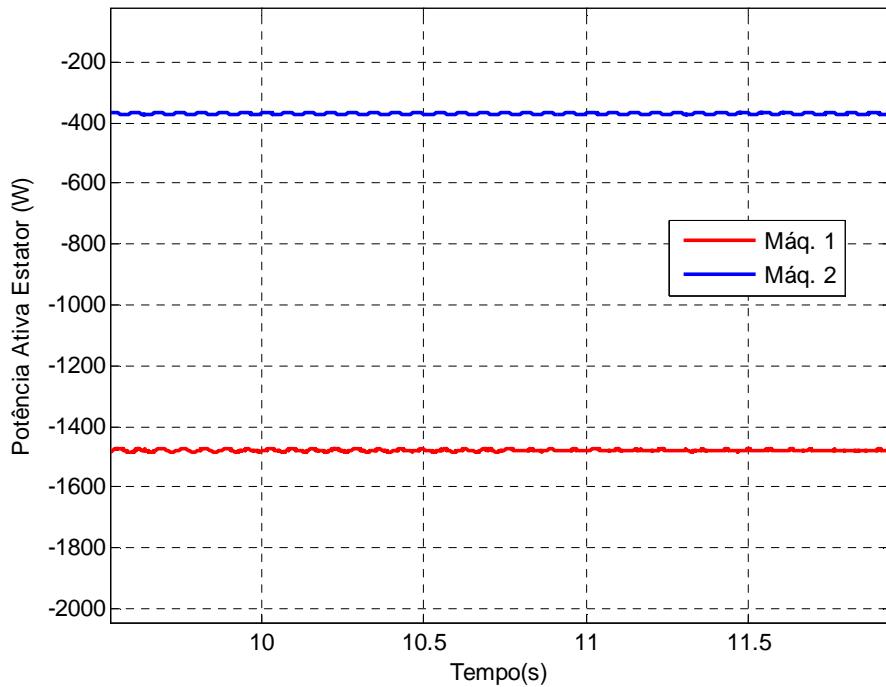


**Figura 5.20: Velocidade x tempo, caso 2.**

Como o previsto por (5.1), a velocidade final está em torno de 900 rpm. Existe ainda uma pequena oscilação, porém esta é menor que 1 rpm podendo ser desprezada.



**Figura 5.21: Potência no estator x tempo, caso 2 – Motor.**



**Figura 5.22: Potência no estator x tempo, caso 2 – Gerador.**

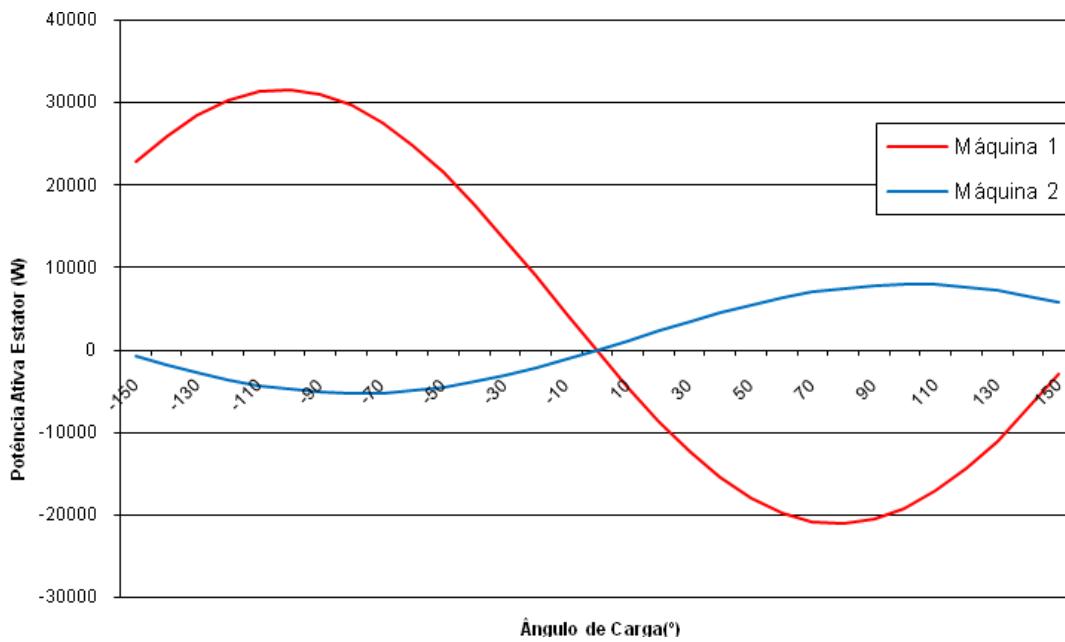
Pelos gráficos das Figuras 5.23 e 5.24, é possível observar que os sentidos de potência são iguais, como foi descrito na Figura 4.7. Novamente os resultados apresentaram pequenas oscilações. Porém em ambos os casos as variações são menores que 1%, considera-se a potência constante.

Estas análises comprovam a validade do modelo apresentado para a MICDAS, podendo servir como base para análise da MIDAS. O importante neste trabalho são as relações entre potência - velocidade das máquinas e direção do fluxo de potência que confirmam o modelo das máquinas de dupla alimentação.

#### 5.4 Simulação do ângulo de carga

Nesta seção será apresentado algum dado para simples comprovação funcionamento síncrono do sistema formado pelas máquinas em cascata. As máquinas de indução de dupla alimentação sem escovas apresentam um comportamento semelhante às máquinas síncronas, onde o fluxo de potência depende do ângulo de carga.

Considerando o caso em que as fases não são transpostas tanto no estator quanto no rotor, e com uma alimentação de tensão a 15 Hz e tensão fixa. Utilizando o controle de velocidade e variando-se o ângulo da fase da máquina 2, pode-se obter o gráfico da potência ativa em função da defasagem entre as tensões de alimentação, como mostrado na Figura 5.24:



**Figura 5.23: Potência ativa x Ângulo de carga.**

A Figura 5.24 serve para comprovar a mudança do ângulo de carga afeta as potências do conjunto formado pelas máquinas. Somente variando o ângulo de defasagem entre as tensões de alimentação do estator das máquinas principal e de controle, podemos observar como as potências se dividem entre as máquinas para uma dada condição de alimentação do conjunto.

## **Capítulo 6**

### **6 Conclusões e Trabalhos Futuros**

Este trabalho desenvolveu o modelo básico da máquina de indução de dupla alimentação sem escovas em regime permanente. Foram mostrados os passos necessários para o entendimento de seu funcionamento, assim como sua história e principais vantagens como operações de motor ou gerador com velocidade ajustável. Através de simulações foi possível comprovar a teoria apresentada, podendo esta servir de base para análises mais completas deste tipo de máquina.

Paralelamente foi exibido um resumo didático da energia eólica, suas tecnologias e modos de aproveitamento. Nesta mesma linha, foram apresentados os principais tipos de aerogeradores e como o mercado os tem absorvido. A partir da observação dos dados coletados, concluiu-se o quanto a energia eólica tem a evoluir, principalmente com as máquinas de dupla alimentação. E é neste ideal que se pode afirmar que as máquinas de dupla alimentação sem escovas podem ter uma grande participação, devido à sua versatilidade semelhante aos motores de indução de dupla alimentação, porém com a grande vantagem de não necessitarem de escovas e anéis de contato.

O custo deste tipo de máquina é mais elevado que o modelo tradicional da MIDA devido ao desenho especial do rotor e maior número de enrolamentos no caso da MIDAS, ou o custo maior pela utilização de outra máquina no caso da MICDAS. Entretanto, a ambas as máquinas reduzem parte dos gastos de manutenção devido à ausência das escovas, além de minimizar a ocorrência de defeitos. No caso da MICDAS, para reduzir os custos, é possível utilizar uma máquina de potência menor em relação à máquina principal, devido a menor potência a que esta será submetida.

Futuramente, sugere-se como tema o estabelecimento de um modelo dinâmico que leve em conta também fatores que aqui foram desprezados. Outro ponto a ser buscado será o estudo de um controle robusto que atenda os requisitos necessários para aplicações em energia eólica. Por fim, a montagem de uma bancada experimental vem sendo implementada para obtenção de novos dados úteis ao estudo deste tipo de máquina.

## 7 Bibliografia

- [1] Monticelli, M. P. *Um Estudo do Aerogerador de Velocidade Variável e sua Aplicação para Fornecimento de Potência Elétrica Constante*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil, 2004;
- [2] *Crise do Petróleo*. Fonte: Wikipedia:  
[http://pt.wikipedia.org/wiki/Crise\\_do\\_petr%C3%B3leo](http://pt.wikipedia.org/wiki/Crise_do_petr%C3%B3leo), 2009;
- [3] Patel, M. R. *Wind and Solar Power Systems*. Florida: CRC Press, 1999;
- [4] *GWEC - Global World Energy Council*. Fonte: Global World Energy Council:  
<http://www.gwec.net/index.php?id=92>, 2009;
- [5] *U.S. Department of Energy*. Fonte: U.S. Department of Energy:  
<http://www.energy.gov/>, 2009;
- [6] *EWEA - European Wind Energy Association*. Fonte: European Wind Energy Association: <http://www.ewea.org/>, 2009;
- [7] Cunha, L. *Sob fortes ventos*. Revista O Setor Elétrico – Maio/2009, pp. 104-112.
- [8] Castro, R. M. *Energias Renováveis e Produção Descentralizada - Introdução à Energia Eólica* (1<sup>a</sup> Ed.). Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2003;
- [9] Mônica M. Reis, Oliveira, D. S, & Carvalho, P.C.M. *Estudo de Viabilidade Econômica de Geradores de Pequeno Porte no Modo Autônomo*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande, 2006;
- [10] Galizia, F. R. *Geração de Energia a partir de Fonte Eólica com Gerador Assíncrono Conectado a Conversor Estático Duplo*. Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, Brasil, 2004;
- [11] Nordex. Fonte: Nordex AG: <http://www.nordex-online.com>, 2009;
- [12] General Electric Energy. Fonte: General Electric:  
[http://www.gepower.com/prod\\_serv/products/wind\\_turbines/en/15mw/index.htm](http://www.gepower.com/prod_serv/products/wind_turbines/en/15mw/index.htm), 2009;
- [13] Ferreira, J. C. *Aplicação do Controle Vetorial e Teoria p-q no controle de Aerogeradores Conectados a rede elétrica*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Brasil, 2005;
- [14] Hansen, A. D., & Hansen, L. H. *Turbinas eólicas: As principais tecnologias e sua participação no mercado*. Revista Eletricidade Moderna - Março/2009, pp. 112-123.
- [15] A. E. Fitzgerald, C. K. *Electric Machinery* (6<sup>a</sup> Ed.). McGraw- Hill, Inc, 2002;
- [16] Chapman, S. *Electric Machinery Fundamentals* (2<sup>a</sup> Ed.). McGraw-Hill, Inc, 1989;
- [17] Stephan, R. M. *Acionamento, Comando e Controle de Máquinas Elétricas*. WEG, 2008;

- [18] Ferreira, J. d., & Castro, R. M. *Energias Renováveis e Produção Descentralizada - Máquina de Indução Duplamente Alimentada (MIDA) em Aproveitamentos de Energia Eólica*. Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2007;
- [19] Vicatos, M., & Tegopoulos, J. A. *Steady State Analysis of a Doubly-Fed Induction Generator Under Synchronous Operation*. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 4, nº 3, pp. 495-501, 1989;
- [20] Ferreira, A. C., Moraes, L. d., & Watanabe, E. H. *Variable Speed Synchronous Condenser Using Doubly-Fed Induction Machine*. Revista Sba Controle & Automação, vol. 15, nº 2, pp. 172-180, 2004;
- [21] Runcos, F. *Gerador Eólico*. WEG, 2000;
- [22] Adamowicz, M., & Strzelecki, R. *Cascaded Doubly-Fed Induction Generator for Mini and Micro Power Plants Connected to Grid*. 13<sup>th</sup> Power Electronics and Motion Control Conference, pp 1729-1733, 2008;
- [23] Roberts, P. C. *A Study of Brushless Doubly-Fed (Induction) Machines*. Tese de D.Sc., Universidade de Cambridge, Reino Unido, 2004;
- [24] Kato, S., Hoshi, N., & Oguchi, K. *Proposed Adjustable-Speed Cascaded Induction Generators that Will Meet Industrial and Environmental Needs*. IEEE Industry Application Magazine – Jul-Ago/2003, pp. 32-38;
- [25] Vicatos, M., & Tegopoulos, J. A. *Doubly-Fed Induction Motor Differential Cascade Part I - Configuration and Analysis in the Steady State*. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.14, nº 3, pp. 361-366, 1999;
- [26] Hopfensperger, B., Atkinson, D. J., & Lakin, R. A. *Stator Flux Oriented Control of a Cascaded Doubly-fed Induction Machine*. IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 146, nº 6, pp. 597-605, 1999;
- [27] Ferreira, A.C., Stephan, R.M., Lima, D.B., & Lessa, F. *Operation Points of a Doubly-fed Cascaded Induction Machine*. Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, 2009;
- [28] Chilakapati, N., Ramsden, V. S., Ramaswamy, V., & Zhu, J. *Investigation of Doubly-Fed Twin Stator Induction Motor as a Variable Speed Drive*. International Conference on Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth, vol. 1, pp. 160-165, 1998;

[29] Smith, B. H. *Synchronous Behavior of Doubly-Fed Twin Stator Induction Machine*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-86, n° 10, pp. 1227-1236, 1967;

[30] Manual de Utilização MATLAB;