

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA  
POTÊNCIA DE TURBINAS MAGNUS ACIONANDO  
GERADORES ELÉTRICOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Cláudia Garrastazu Ribeiro**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2014**

# **RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE TURBINAS MAGNUS ACIONANDO GERADORES ELÉTRICOS**

**Cláudia Garrastazu Ribeiro**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau **Mestre em Engenharia Elétrica.**

**Orientador: Prof. Felix Alberto Farret, PhD**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2014**

**Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

Garrastazu Ribeiro, Cláudia  
Rastreamento do Ponto de Máxima Potência de Turbinas  
Magnus Acionando Geradores Elétricos / Cláudia  
Garrastazu Ribeiro. – 2014.  
74 f. ; 30 cm

Orientador: Felix Alberto Farret  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, RS, 2014

1 . Geração eólica 2 . Rastreamento do ponto de máxima  
potência 3 . Turbina Magnus I . Alberto Farret, Felix II . Título.

---

© 2014

Todos os direitos autorais reservados a Cláudia Garrastazu Ribeiro. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Marcílio Dias, n. 2545, Bairro Laranjeiras, Bagé, RS, CEP: 96408-850

Celular: +55 (53) 81088318; E-mail: claudiagarrastazu@hotmail.com

---

**Universidade Federal de Santa Maria**  
**Centro de Tecnologia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE  
TURBINAS MAGNUS ACIONANDO GERADORES ELÉTRICOS**

elaborada por  
**Cláudia Garrastazu Ribeiro**


como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Elétrica**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

  
**Felix Alberto Farret, PhD**  
(Presidente/Orientador)

  
**Jocemar Biasi Parizzi, Dr. (Unipampa)**

  
**Ály Ferreira Flores Filho, Dr. (UFRGS)**

  
**Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UFSM)**  
(Suplente)

Santa Maria, 24 de Janeiro de 2014.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço Deus por me dar a vida e a minha família pelo suporte nas horas difíceis, incentivo, sempre apoiando minhas decisões e por me proporcionar condições de estudo.

Agradeço ao meu professor e orientador Felix A. Farret por acreditar no meu potencial, pelo auxílio intenso e por sempre incentivar o conhecimento.

Agradeço também ao meu namorado Pedro que esteve presente em todos os momentos, mesmo que de longe, pelo apoio e paciência.

Um agradecimento especial ao pessoal do CEESP, principalmente pela amizade e convivência diária, pelas horas de trabalho e pelas de descontração. Com certeza esse trabalho não sairia sem vocês: Leandro, Frank, Fredi e Jordan, em especial ao Leo e ao João que foram a minha família durante a estada em Santa Maria.

Agradeço também a minha amiga Aline, que além de um teto para morar, me deu todo o apoio e amizade nas horas mais complicadas.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

(Arthur Schopenhauer)

## **RESUMO**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Energia Elétrica  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### **RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA DE TURBINAS MAGNUS ACIONANDO GERADORES ELÉTRICOS**

**AUTORA:** Cláudia Garrastazu Ribeiro  
**ORIENTADOR:** Felix Alberto Farret, PhD.

Local e Data da defesa: Santa Maria, 24 de janeiro de 2014.

A constante necessidade de energia elétrica, assim como o aumento de demanda, implica no uso de fontes de energia que são finitas, como o petróleo e o carvão. A busca por fontes alternativas de energia como a eólica é a motivação para este trabalho, também por a energia eólica ser uma tecnologia já consolidada, utilizando principalmente turbinas de três pás para a geração de energia. Esta dissertação trata da análise de uma turbina eólica não convencional, conhecida como turbina eólica Magnus para acionamento de geradores elétricos. A operação desta turbina é baseada no efeito Magnus e seu grande diferencial é que ao invés de pás fixas possui cilindros giratórios que ajudam no incremento de potência, já que a turbina pode produzir potência mesmo com baixas velocidades de vento. Um método de rastreamento de máxima potência é proposto baseando no controle da velocidade de rotação dos cilindros, já que na literatura são considerados apenas valores fixos para esta variável. A turbina Magnus é acoplada a um gerador síncrono a imã permanente, como forma de demonstração da precisão do método proposto na determinação do seu ponto de máxima potência. Paralelo a isto, o gerador também utiliza um método de rastreamento de máxima potência para que o conjunto inteiro trabalhe no ponto de máxima potência. Os resultados de simulação e práticos são apresentados para demonstrar o desempenho da turbina Magnus acoplada a um gerador síncrono a imã permanente.

**Palavras-chave:** Turbinas eólicas. Turbina Magnus. Rastreamento do ponto de máxima potência.

## **ABSTRACT**

Master Thesis  
Post-Graduation Program in Electrical Engineering  
Federal University of Santa Maria

### **MAXIMUM POWER POINT TRACKING OF MAGNUS WIND TURBINES DRIVING ELECTRICAL GENERATORS**

**AUTHOR:** Cláudia Garrastazu Ribeiro  
**ADVISOR:** Felix Alberto Farret, PhD

Place and Date of the Presentation: Santa Maria, January 24<sup>th</sup> , 2014.

The constant human need for electricity, as well as the increasing demand for energy causes the use of finite sources, as oil and coal. The search for alternative energy sources as wind harvesting is the motivation for this master dissertation. Wind energy is a consolidated technology, mostly based on three blades wind turbine. This master thesis constitutes an analysis of a non-conventional wind machine, named Magnus wind turbine. The turbine's operation is based on the Magnus effect and its difference with respect to the traditional type is that it has rotating cylinders instead of fixed blades, which benefits an increase of generated power, since this turbine can produce power from low wind speeds. A method to track the maximum power point based on the control of the cylinders rotation is proposed, whereas in literature only fixed values were found for this variable. This Magnus turbine is used to drive a permanent magnet synchronous generator as a way to prove the theoretical predictions. The electrical generator also uses a specific method to track the maximum power point for the whole set. Simulated and practical results are demonstrating the performance of the Magnus wind turbine driving a permanent magnet synchronous generator.

**Keywords:** Wind Turbines. Magnus wind Turbine. Maximum Power Point Tracking.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa do potencial eólico brasileiro.(AMARANTE et al., 2001).....	20
Figura 2.1 - Turbina eólica convencional de eixo horizontal.....	24
Figura 2.2 - Turbina eólica de eixo vertical do tipo Darrieus.....	24
Figura 2.3 - Turbina eólica de eixo vertical do tipo Giromil. (SYRKIN; SHALAEV; DRANITSIN, 2009) .....	25
Figura 2.4 - Turbina eólica de eixo vertical do tipo Savonius. (ZINGMAN, 2007) .....	26
Figura 2.5 - Efeito Magnus.....	27
Figura 2.6 - Navio de Flettner.(MATOS, 2009).....	28
Figura 2.7 - Modelo de turbina Magnus proposto por Thomas Hanson. (HANSON, 1982) ...	28
Figura 2.8 - Espirais em volta dos cilindros patenteados.(MURAKANI; JUN ITO, 2007) ....	29
Figura 2.9 - Testes realizados pela empresa japonesa. <a href="http://www.mecaro.jp/eng/introduction.html">www.mecaro.jp/eng/introduction.html</a> .....	30
Figura 3.1 - Turbina Magnus.....	35
Figura 3.2 - Vista frontal da Turbina Magnus.....	37
Figura 3.3 - Diagrama de forças da vista A da figura 3.2.....	37
Figura 3.4 - Coeficiente de potência da turbina Magnus em relação a rotação dos cilindros e <i>tip speed ratio</i> .....	41
Figura 3.5 - Curva P x TSR para turbina Magnus com cilindro fixo em 100 rad/s. ....	41
Figura 4.1 - HCS para turbina Magnus.....	44
Figura 4.2 - HCS para o gerador.....	45
Figura 4.3 - Fluxograma para o MPPT da turbina Magnus.....	46
Figura 4.4 - Fluxograma para o MPPT do Gerador.....	47
Figura 4.5 - Topologia proposta para o MPPT do gerador síncrono a imã permanente. ....	48
Figura 5.1 - Esquemático para obtenção dos resultados práticos.....	50
Figura 5.2 - Resultados de simulação para vento de 3 m/s e cilindros fixos. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC e (c) Tensão na carga CC. ....	52
Figura 5.3 - Resultados para vento de 3 m/s e cilindro fixo. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga, CH4 – corrente do motor CC.....	52
Figura 5.4 - Resultados de simulação para vento de 3,5 m/s e cilindros fixos. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC e (c) Tensão na carga CC. ....	53

Figura 5.5 - Resultados para vento de 3,5 m/s e cilindro fixo. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga, CH4 – corrente do motor CC. ....	53
Figura 5.6 - Resultados de simulação para vento de 4 m/s e cilindros fixos. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC e (c) Tensão na carga CC. ....	54
Figura 5.7 - Resultados para vento de 4 m/s e cilindro fixo. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga, CH4 – corrente do motor CC. ....	54
Figura 5.8 - Resultados de simulação para vento de 4,5 m/s e cilindros fixos. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC e (c) Tensão na carga CC. ....	55
Figura 5.9 - Resultados para vento de 4,5 m/s e cilindro fixo. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga, CH4 – corrente do motor CC. ....	55
Figura 5.10 - Resultados de simulação para vento de 5 m/s e cilindros fixos. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC e (c) Tensão na carga CC. ....	56
Figura 5.11 - Resultados para vento de 5 m/s e cilindro fixo. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga, CH4 – corrente do motor CC. ....	56
Figura 5.12 - Resultados de simulação para vento de 3 m/s e cilindros com MPPT. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC, (c) Tensão na carga CC e (d) Rotação dos cilindros. ....	57
Figura 5.13 - Resultados para vento de 3 m/s e cilindros com MPPT. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga. ....	58
Figura 5.14 - Resultados de simulação para vento de 3,5 m/s e cilindros com MPPT. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC, (c) Tensão na carga CC e (d) Rotação dos cilindros. ....	59
Figura 5.15 - Resultados para vento de 3,5 m/s e cilindros com MPPT. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga. ....	59
Figura 5.16 - Resultados de simulação para vento de 4 m/s e cilindros com MPPT. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC, (c) Tensão na carga CC e (d) Rotação dos cilindros. ....	60
Figura 5.17 - Resultados para vento de 4 m/s e cilindros com MPPT. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga. ....	61
Figura 5.18 - Resultados de simulação para vento de 4,5 m/s e cilindros com MPPT. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC, (c) Tensão na carga CC e (d) Rotação dos cilindros. ....	61
Figura 5.19 - Resultados para vento de 4,5 m/s e cilindros com MPPT. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga. ....	62

Figura 5.20 - Resultados de simulação para vento de 5 m/s e cilindros com MPPT. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC, (c) Tensão na carga CC e (d) Rotação dos cilindros. ....	63
Figura 5.21 - Resultados para vento de 5 m/s e cilindros com MPPT. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga. ....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS

PMSG	Gerador Síncrono a Imã Permanente
CC	Corrente contínua
MPPT	Rastreamento do ponto de máxima potência
MPP	Ponto de máxima potência
VAWT	Turbina eólica de eixo vertical
HAWT	Turbina eólica de eixo horizontal
RPM	Rotação por minuto
TSR	Velocidade de Ponta - <i>Tip Speed Ratio</i>
PSF	Realimentação do Sinal de Potência - <i>Power Signal Feedback</i>
HCS	Busca Subindo a Montanha - <i>Hill Climbing Search</i>
HCC	Controle Subindo a Montanha - <i>Hill Climbing Control</i>
MGP	Ponto de máxima potência gerada
CA	Corrente alternada

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P_e$	Potência elétrica da turbina eólica
$T$	Torque
$\omega$	Velocidade angular da turbina
$P_v$	Potência do vento
$\rho$	Densidade do ar
$A$	Área varrida pelo rotor da turbina eólica
$V$	Velocidade do vento
$C_p$	Coefficiente de potência
$P_t$	Potência da turbina eólica
$\psi$	Velocidade do cilindro
$R$	Resistência da máquina por fase
$L_d$	Indutância de eixo direto
$L_q$	Indutância de eixo de quadratura
$v_d$	Tensão de eixo direto
$v_q$	Tensão de eixo de quadratura
$i_d$	Corrente de eixo direto
$i_q$	Corrente de eixo de quadratura
$\lambda_m$	Amplitude dos fluxos estabelecidos pelos ímãs permanentes
$T_e$	Torque elétrico do gerador
$P$	Número de polos
$\omega_r$	Frequência angular do estator
$\omega_m$	Velocidade mecânica angular do rotor

$L$	Força de sustentação ( <i>Lift</i> )
$\Gamma$	Circulação do fluido
$r_c$	Raio do cilindro
$\theta$	Velocidade relativa dos cilindros
$R$	Raio da ponta da pá da turbina
$\alpha$	Ângulo entre as forças de sustentação e arraste e o eixo de giro da turbina
$d$	Diâmetro do cilindro
$dL$	Diferencial da força de sustentação ( <i>Lift</i> )
$dD$	Diferencial da força de arrasto ( <i>Drag</i> )
$C_l$	Coefficiente da força de sustentação ( <i>Lift</i> )
$C_d$	Coefficiente da força de arrasto ( <i>Drag</i> )
$v$	Velocidade do vento em relação a velocidade do cilindro
$\varphi$	Variável que relaciona velocidade do cilindro e a velocidade do vento em relação a velocidade do cilindro
$dT_L$	Diferencial de torque da força de sustentação ( <i>Lift</i> )
$dT_D$	Diferencial de torque da força de arrasto ( <i>Drag</i> )
$R_0$	Raio externo do eixo do aerogerador
$T_L$	Componente de sustentação do torque
$T_D$	Componente de arrasto do torque
$T_t$	Torque total
$n$	Número de cilindros
$P_{mec}$	Potência Mecânica
$P_{aci}$	Perdas de acionamento dos cilindros

$P_{perd}$	Potência de perdas
$Re$	Número de Reynolds
$P_M$	Potência total da turbina Magnus
$C_p$	Coefficiente de potência da turbina Magnus
$\lambda$	Tip speed ratio
$V_c$	Tensão da carga
$i_c$	Corrente da carga
$P_c$	Potência da carga
$d$	Razão cíclica
$P_{n-1}$	Potência do passo anterior
$C_f$	Capacitor de filtro
$C_B$	Capacitor do conversor Buck
$D_B$	Diodo do conversor Buck
$D_{L.6}$	Diodos do retificador
$R_c$	Carga
$C_{LL.7}$	Constantes de coeficientes de sustentação
$C_{DL.7}$	Constante de coeficientes de arrasto

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE ABREVIATURAS.....	12
LISTA DE SÍMBOLOS .....	13
SUMÁRIO.....	16
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO .....	18
1.2 Objetivos .....	20
1.3 Organização do trabalho.....	21
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	22
2.1 Revisão sobre turbinas eólicas convencionais .....	22
2.2 Revisão sobre turbinas Magnus.....	26
2.3 Revisão sobre o Gerador Síncrono a Imã Permanente .....	31
2.4 Revisão sobre rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT ).....	33
2.5 Resumo do Capítulo.....	34
CAPÍTULO 3 TURBINA EÓLICA MAGNUS .....	35
3.1 Modelo da turbina Magnus.....	37
3.2 Resumo do capítulo.....	42
CAPÍTULO 4 RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA .....	43
4.1 Método <i>Hill Climbing Search</i> (HCS) .....	43
4.2 MPPT proposto para Turbina Magnus .....	45
4.3 MPPT para o Gerador Elétrico .....	46
4.4 Topologia do conversor de potência para implementação do MPPT do PMSG	48
4.5 Resumo do capítulo.....	49
CAPÍTULO 5 Resultados de simulação e experimentais.....	50
5.1 Resultados de simulação e experimentais .....	51



5.1.1 Resultados de simulação e experimentais da turbina Magnus operando com cilindros fixos .....	51
5.1.2 Resultados de simulação e experimentais para turbina Magnus e gerador síncrono a imã permanente com MPPT.....	57
<b>5.2 Resumo do capítulo.....</b>	<b>64</b>
<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>65</b>
<b>6.1 Objetivos atingidos nesta dissertação .....</b>	<b>66</b>
<b>6.2 Trabalhos futuros .....</b>	<b>66</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>71</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, o tópico energia se tornou um assunto global que, se mal gerenciado, pode vir a restringir o desenvolvimento sócio - econômico dos países em todo o mundo. Reduzir o consumo de energia tradicional e aumentar o uso de energias renováveis parece ser a chave para um desenvolvimento sustentável. Recursos e meio ambientes limpos e saudáveis são condições básicas para o ser humano sobreviver e se desenvolver. Nas últimas décadas, o crescimento da população mundial, assim como o uso das fontes tradicionais de energia (carvão, petróleo, urânio, etc.) gera grande quantidade de poluentes e gases de efeito estufa advindos da geração de eletricidade. Este tem sido o principal problema de poluição ambiental e de deterioração do meio ambiente. (ZUO; LIU, 2012)

Em relação a novas tecnologias disponíveis para geração de potência elétrica, a energia eólica é relativamente madura; e teve seu desenvolvimento muito rápido dado a premência atual por novas fontes de energia. Ela é uma energia limpa e disponível na natureza. É derivada da energia solar, originada pelas diferentes concentrações de temperatura em áreas distintas do planeta. (DAI; SONG; SHU, 2011)(FARRET, 2010)

As variações da velocidade do vento influenciam fortemente a potência de saída da turbina. Pela intermitência do vento pode haver diferença entre a potência demandada e a potência gerada, causando variações não desejáveis na tensão suprida ao usuário, entre outros efeitos. (FARRET, 2010)(BAPU; KARTHIKEYAN; REDDY, 2010) Devido a esta intermitência característica do vento, torna-se necessário o uso de armazenamento de energia como bancos de baterias, ou o uso de um gerador diesel para compor o sistema híbrido caso o sistema gerador for isolado da rede elétrica.

Dentre os geradores disponíveis para uso em aplicações de energia eólica, o Gerador Síncrono a Imã Permanente (PMSG) oferece, comparando o mesmo nível de potência e tamanho de máquina, a melhor eficiência entre as os tipos de máquinas com alta robustez e fácil manutenção devido à inexistência de anéis coletores e excitação externa. Além disso, evita a dissipação de calor nos enrolamentos do rotor e provendo então alta eficiência da máquina. (HWAG; CHEN; YEH, 2007)(SINGH; CHANDRA, 2009)

Esta construção simples sem excitação externa é importante, principalmente em sistemas eólicos isolados da rede e também em áreas remotas onde a rede não pode facilmente suprir a potência reativa requerida para a magnetização de um gerador de indução. (NAYAR et al., 2006)

Além da possibilidade do uso do PMSG em baixas velocidades, quando existe uma grande quantidade de número de pólos, fazendo com que em alguns casos seja possível o acoplamento direto da turbina com o gerador (sem necessitar caixa de engrenagens). (SINGH; CHANDRA, 2009)(DE FREITAS; MENEGAZ; SIMONETTI, 2011)

Estas são as razões para esta dissertação usar o gerador síncrono a imã permanente para ilustrar a obtenção da máxima potência para geradores elétricos em geral.

Com relação ao acionamento dos geradores elétricos, o tipo de turbina eólica mais utilizada são as turbinas de eixo horizontal com três pás. Porém existe uma turbina equipada com cilindros giratórios ao invés de pás fixas, chamada turbina Magnus, a qual utiliza o efeito Magnus cujo princípio de funcionamento é discutido em detalhes nesta dissertação.

Segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro de 2001, as turbinas convencionais produzem valores razoáveis de potência em velocidades de vento acima de 5 m/s. Abaixo desse valor, a turbina não deve mais produzir potência útil por sofrer desgastes desnecessários em relação ao que produz. Quando o vento atinge velocidades superiores a aproximadamente 12 m/s a 15 m/s é ativado o seu sistema automático de limitação de potência gerada. Em ventos muito fortes, deve atuar o sistema automático de proteção e a turbina é desligada para não sofrer danos. (AMARANTE et al., 2001)

As velocidades de maior ocorrência no Brasil estão ilustradas na Figura 1.1, e estão ao redor entre 4 e 5 m/s. Nesta faixa de funcionamento a turbina Magnus produz potências úteis mesmo a partir de 3,5 m/s.

A inovação tecnológica e a possibilidade do uso de aerogeradores em baixas velocidades de vento, os quais, disponíveis em maior quantidade no globo terrestre, são os incentivos para se usar a operação da Turbina Magnus como foco desta dissertação.

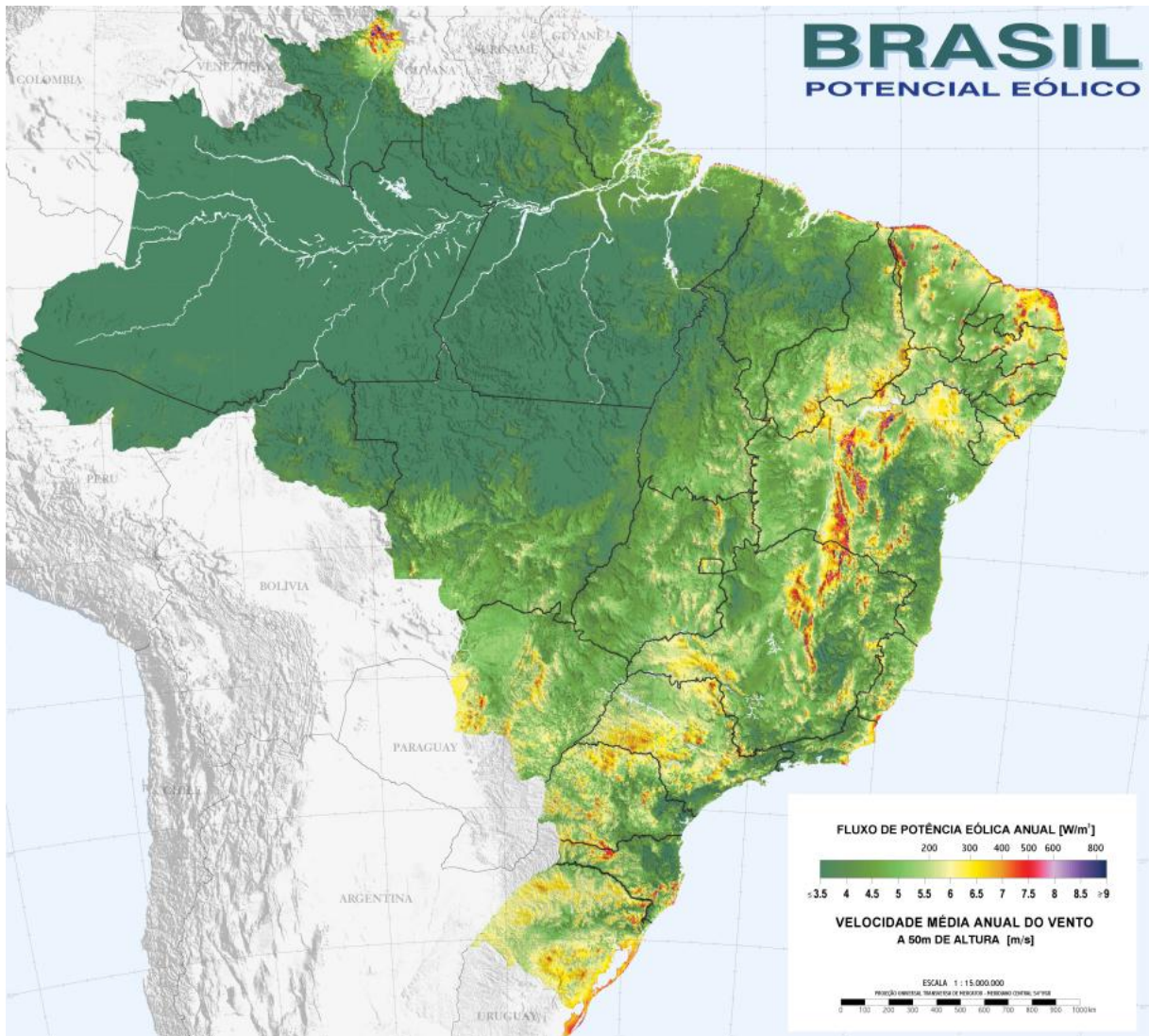


Figura 1.1 - Mapa do potencial eólico brasileiro.(AMARANTE et al., 2001)

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é observar e analisar o comportamento da turbina Magnus acoplada a um gerador síncrono a imã permanente.

Como objetivo específico propõe-se um método de rastreamento do ponto de máxima potência para a turbina Magnus baseado no controle da velocidade de rotação dos cilindros, associado ao rastreamento da máxima potência do gerador.

### 1.3 Organização do trabalho

O capítulo 1 traz uma breve introdução sobre o uso de turbinas eólicas para relacioná-las a turbina Magnus assim estabelecendo os objetivos desta dissertação. No capítulo 2 é apresentado um referencial bibliográfico a respeito das turbinas eólicas enfatizando a Turbina Magnus, o gerador elétrico escolhido e uma revisão sobre os métodos de obtenção do ponto de máxima potência.

No capítulo 3 apresentam-se a teoria relacionada à Turbina Magnus, princípio de funcionamento, operação, problemas e soluções adotadas. O capítulo 4 mostra uma breve introdução sobre a obtenção do ponto de máxima potência (MPPT) e a proposta desta dissertação, tanto para a turbina quanto para o gerador.

O capítulo 5 apresenta os resultados de simulação e experimentais e o capítulo 6 traz as conclusões, as contribuições desta dissertação e sugestões para continuidade em trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Revisão sobre turbinas eólicas convencionais

Turbinas eólicas produzem eletricidade usando a potência do vento para movimentar um gerador elétrico. O vento atravessa o espaço entre as pás, gerando uma força de sustentação e, portanto uma força de rotação. A rotação das pás faz girar um eixo, o qual aciona uma caixa de engrenagens (para turbinas de grande porte) que aumenta a velocidade de rotação até um valor apropriado para o gerador compatível com os campos magnéticos para converter a energia da rotação em energia elétrica. (ANAYA-LARA et al., 2009)

As pás móveis da turbina eólica convertem parte da potência do vento em potência eletromecânica dada por:

$$P_e = T.\omega \quad (2.1)$$

onde  $T$  é o torque (N-m) e  $\omega$  (rad/s) é a velocidade angular.

Uma mesma potência pode ser alcançada com alto torque,  $T$  e baixo  $\omega$  ou  $T$  baixo e alto  $\omega$ . A característica torque- $\omega$  do rotor deve ser compatível com a característica torque- $\omega$  da carga mais as perdas. (NELSON, 2009) A potência do vento é dada por

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.2)$$

onde,  $\rho$  é a densidade do ar ( $\text{kg/m}^3$ ),  $A$  é a área varrida pelo rotor ( $\text{m}^2$ ) e  $V$  é a velocidade do vento (m/s).

A potência transferida para o rotor da turbina é dada pelo coeficiente de potência  $C_p$  (ou rendimento mecânico), cujo máximo valor é definido pelo limite de Betz, que estabelece que a turbina nunca pode extrair mais que 59,3% da potência do vento. Na realidade, as turbinas eólicas convencionais têm valores de  $C_p$  na faixa de 25-45%. (ANAYA-LARA et al., 2009)

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} \quad (2.3)$$

Então a potência da turbina é dada por

$$P_t = \frac{1}{2} C_p A \rho V^3 \quad (2.4)$$

Existem vários tipos de turbinas eólicas que são classificadas de acordo com a interação das pás com a orientação do vento (aerodinâmica), orientação do eixo em relação ao chão e outros tipos de máquinas não usuais, como Savonius, Darrieus e Magnus. A interação aerodinâmica das pás com o vento acontece pela força de arrasto (*Drag*) ou de sustentação (*Lift*), ou uma combinação de ambas. (NELSON, 2009)

Em relação à orientação do eixo do rotor em relação ao plano do solo, a classificação das turbinas pode ser: turbinas de eixo vertical (VAWT) e turbinas de eixo horizontal (HAWT). As turbinas de eixo horizontal têm o rotor perpendicular ao fluxo de vento para capturar o máximo de energia. Já as turbinas de eixo vertical possuem a vantagem de atuarem com ventos de qualquer direção, (NELSON, 2009) e a desvantagem de aproveitarem apenas ventos não lamelares de baixas alturas em relação ao solo. A Figura 2.1 mostra a turbina eólica de eixo horizontal

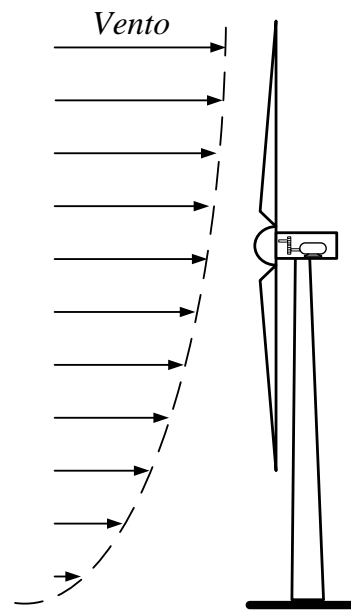


Figura 2.1 - Turbina eólica convencional de eixo horizontal.

A Figura 2.2 mostra a uma turbina eólica de eixo vertical (tipo Darrieus). As turbinas Darrieus não conseguem gerar potência sem que sejam acopladas a um motor/gerador de indução ou outro motor que dê a partida nas pás para que elas possam atingir uma velocidade maior que o vento e assim serem mantidas por ele.

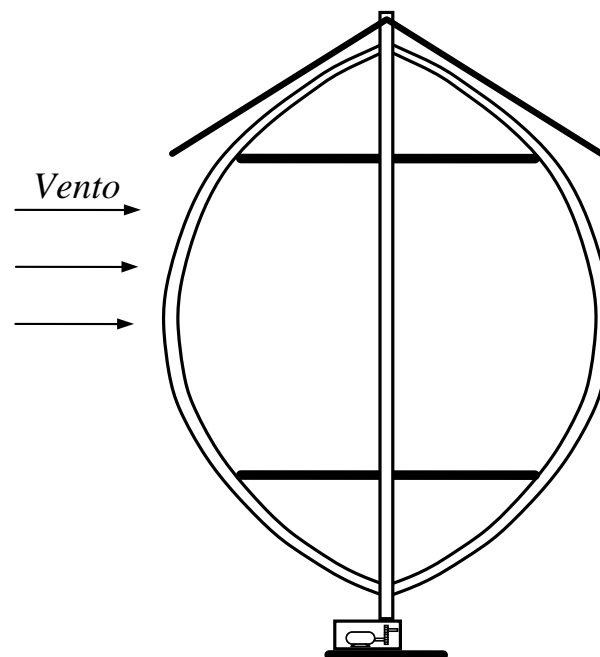


Figura 2.2 - Turbina eólica de eixo vertical do tipo Darrieus.



A turbina do tipo giromil, mostrada na Figura 2.3 consegue ter uma partida independente, pois possui pás articuladas que podem mudar o ângulo no ciclo de rotação. Outra vantagem da VAWT é que a caixa de engrenagens e o gerador podem ficar no nível do chão, mas possuem duas desvantagens: o rotor como um todo fica perto do chão sofrendo os efeitos dos ventos turbulentos. (NELSON, 2009).

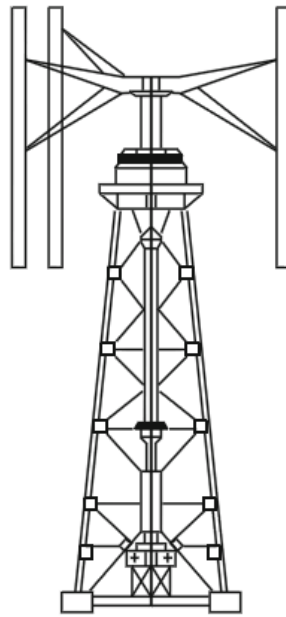


Figura 2.3 - Turbina eólica de eixo vertical do tipo Giromil. (SYRKIN; SHALAEV; DRANITSIN, 2009)

Além destas duas turbinas ainda existe a turbina Savonius, conhecida como a turbina eólica mais silenciosa de todas porque trabalha apenas para baixas velocidades de vento. Esta turbina começa a girar facilmente em baixas velocidades de ventos vindos de qualquer direção devido a diferencial de arrasto (*drag*) e está ilustrada na Figura 2.4. Isto permite que a turbina funcione não só em grandes alturas, mas também no nível da rua, por exemplo, em uma cidade. Devido aos mecanismos da força de sustentação, o coeficiente de potência da turbina Savonius ( $C_p$ ) é tipicamente na faixa de 15-20% sendo menos da metade da eficiência das turbinas convencionais, o que corresponde a um terço do limite de Betz. (SHIGETOMI et al., 2011)

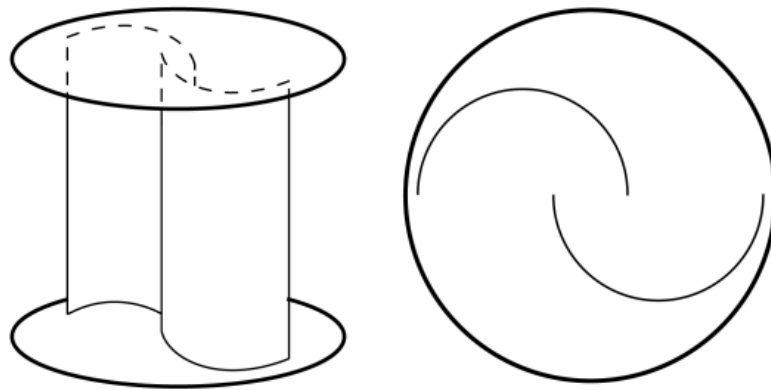


Figura 2.4 - Turbina eólica de eixo vertical do tipo Savonius. (ZINGMAN, 2007)

As turbinas de eixo horizontal são as mais usadas para produção de eletricidade, onde a potência nominal é a potência máxima permitida para o gerador instalado. O controle de carga e rotação deve garantir que esta potência não seja excedida durante altas velocidades de vento. O número de pás usualmente é de dois ou três. As turbinas de duas pás são mais baratas, pois tem uma pá a menos, mas a rotação é maior e são fortemente oscilantes pela passagem das hélices em frente às torres, além de aumentar o barulho e as perdas da força de arrasto, ao contrário das turbinas de três pás que provocam menos distúrbios na paisagem. Também a eficiência aerodinâmica é menor em turbinas de duas pás do que em turbinas de três pás. (HANSEN, 2008)(ANAYA-LARA et al., 2009)

## 2.2 Revisão sobre turbinas Magnus

A turbina Magnus é baseada no efeito Magnus descoberto e descrito pelo físico alemão Heinrich Magnus em 1853. Porém conforme Goño, et al (2007), Isaac Newton já havia descrito e teorizado corretamente 180 anos antes enquanto observava jogadores de tênis na Universidade de Cambridge.

O efeito Magnus é um fenômeno onde um corpo, uma esfera ou um cilindro circular, girando em um fluido cria uma camada limite de ar ao redor dele mesmo. A camada limite induz um movimento circular generalizado do fluido. O efeito Magnus é um caso particular do princípio de Bernoulli, que estabelece que quando a velocidade é maior, a pressão do fluido é menor; e quando a velocidade é menor a pressão do fluido é maior. Este gradiente de pressão resulta em uma força líquida no corpo e conseqüentemente a rotação na direção

perpendicular ao vetor velocidade relativa (velocidade do corpo relativo ao fluxo do fluido), como mostra a Figura 2.5.

Se o corpo se move através do fluido com uma velocidade  $\psi$ , a velocidade do fluido perto do corpo torna-se um pouco maior que  $\psi$  em um lado e menor que  $\psi$  no outro. Isto ocorre porque a velocidade induzida devido à camada limite circundando o corpo girante é adicionada a  $\psi$  em um lado e subtraída de  $\psi$  de outro. (GOÑO; RUSEK; HRABČÍK, 2007)(ZHAO et al., 2012)

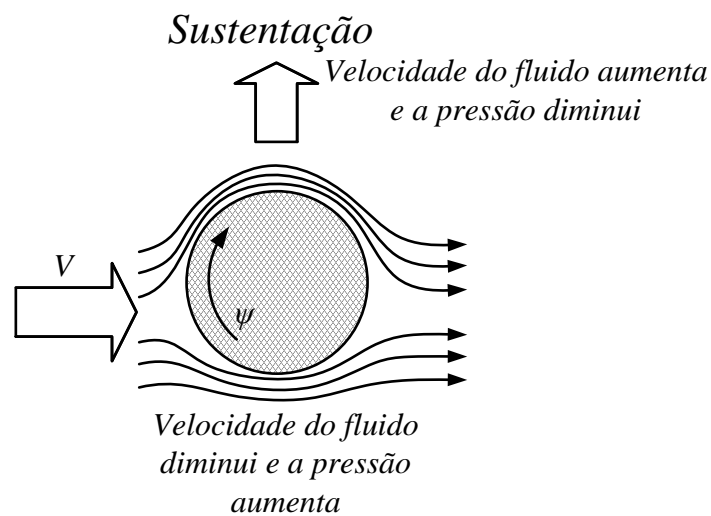


Figura 2.5 - Efeito Magnus.

O conceito do efeito Magnus foi aplicado em 1920, quando o engenheiro alemão Flettner, patenteou o que ficou conhecido como o rotor de Flettner, que consistia em um grande cilindro vertical, que girava na presença de vento e agia com um impulso horizontal. Flettner usou os rotores para propulsão em navios e em 1924 fez um protótipo, o *Buckau*. O mastro foi substituído por duas torres cilíndricas e ocas (eixo vertical) feitos de uma chapa de ferro que girava a 120 RPM. E em 1926, Flettner renomeou seu navio de *Baden-Baden* (mostrado na Figura 2.6) e com sucesso cruzou o Atlântico.

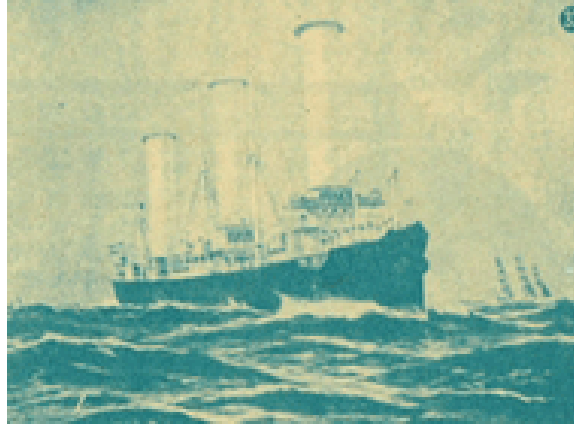


Figura 2.6 - Navio de Flettner.(MATOS, 2009)

Flettner, também propôs uma turbina de eixo horizontal de quatro pás, com as pás convencionais substituídas por rotores de Flettner. (FLEMING; PROBEN, 1984) (BARBERO, A. ; GARCIA MATOS, J.A. ; CANTIZANO, A. ; ARENAS, 2010)

Em 1982 Thomas Hanson, obteve uma patente de uma turbina eólica baseada no efeito Magnus. Ele propôs e desenhou o modelo da turbina, que está disponível em Hanson (1982) descrevendo o uso e as vantagens da turbina Magnus para a produção de energia elétrica. Segundo descrito por Matos (2009) o aerogerador foi construído e submetido a ensaios, porém não há muitos dados sobre os resultados encontrados. O único encontrado na patente é uma curva de potência versus velocidade do vento, a Figura 2.7 ilustra o modelo proposto disponível na patente de Hanson.

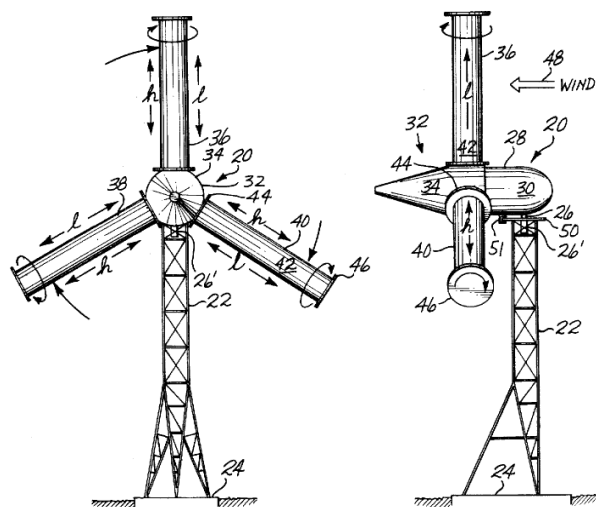


Figura 2.7 - Modelo de turbina Magnus proposto por Thomas Hanson. (HANSON, 1982)

Atualmente a empresa japonesa MECARO<sup>®</sup> é a única fabricante que disponibiliza a turbina Magnus comercialmente no mundo e, conforme encontrado em Goño, et al (2007), tornou possível transformar a teoria do efeito Magnus em uma turbina eólica comercial. Em abril de 2007 a empresa lançou a primeira turbina eólica baseada no efeito Magnus, permitindo que a turbina girasse usando a força de sustentação (*Lift*) gerada por cilindros giratórios com espirais em sua volta ao invés de pás.

O diferencial da empresa japonesa o qual gerou a patente Murakani; Jun Ito (2007) foi o uso de espirais na volta dos cilindros no lugar de cilindros lisos (ilustrados na Figura 2.8), pois segundo a empresa, a superfície lisa dos cilindros requeria uma velocidade muito alta de rotação dos mesmos, o que acabava redundando em maior consumo de potência do que a turbina gerava.

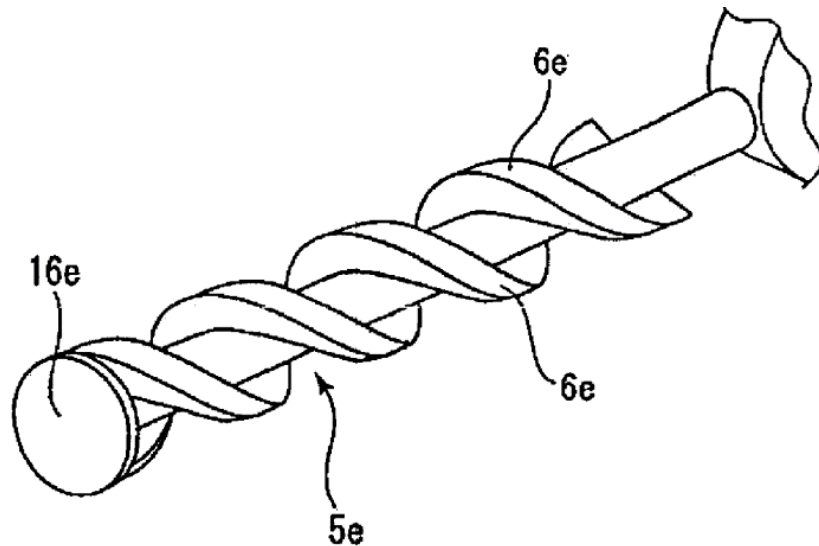


Figura 2.8 - Espirais em volta dos cilindros patenteados.(MURAKANI; JUN ITO, 2007)

Com os testes realizados pela MECARO<sup>®</sup> conclui-se que a força de sustentação (*Lift*) aumenta consideravelmente em comparação com cilindros lisos, como mostra a figura disponível no site da empresa e reproduzida na Figura 2.9.

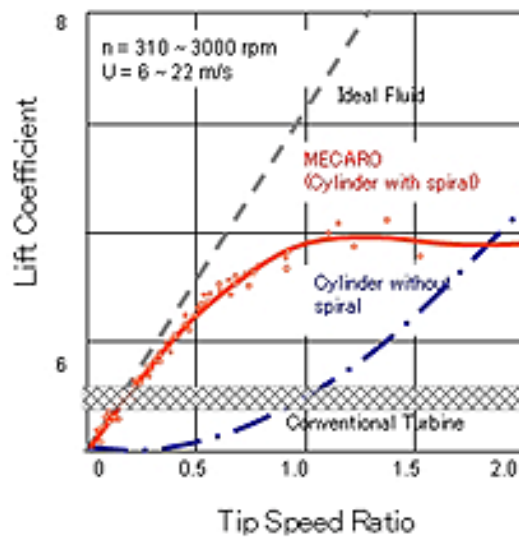


Figura 2.9 - Testes realizados pela empresa japonesa. [www.mecaro.jp/eng/introduction.html](http://www.mecaro.jp/eng/introduction.html)

No trabalho descrito por Barbero, et al (2010) foi apresentado um modelo matemático da turbina Magnus baseado na turbina disponível pela empresa MECARO<sup>®</sup> que é mostrado em mais detalhes no capítulo 3. Porém no modelo sugerido por Barbero, et al (2010) a rotação dos cilindros é mantida fixa em  $100 \text{ rad/s}$  em toda a sua modelagem e simulações. Quando o protótipo foi executado na parte prática, como descrito por Matos (2009), o autor percebeu que o torque gerado não era capaz de vencer os torques de sustentação e de arrasto, contrários ao torque total. O baixo desempenho durante os testes foi creditado a excessiva fricção entre as partes móveis do modelo e também a uma estimativa errada da relação entre as dimensões de largura e altura do cilindro.

Bychkov, et al (2008), descreve que a melhora na potência da turbina Magnus passa por uma melhor relação de dimensões (relação entre a largura e a altura do cilindro), formato do cilindro e controle da turbina. Após os testes, os autores concluem que baixos valores de velocidade da turbina podem gerar dificuldades técnicas no torque transferido da turbina que está girando em baixa velocidade para um gerador de alta velocidade. Também seus parâmetros só são válidos para cilindros com diâmetro uniforme ao longo de seu comprimento.

### 2.3 Revisão sobre o Gerador Síncrono a Imã Permanente

Uma máquina síncrona, em condições de regime permanente, é uma máquina CA cuja velocidade é proporcional à frequência da corrente de sua armadura. O rotor, juntamente com o campo magnético criado pela corrente CC do campo do rotor, gira na mesma velocidade ou em sincronismo com o campo magnético girante, produzido pelas correntes de armadura, resultando um conjugado constante. (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 1975)

Geradores síncronos comerciais são construídos com campo magnético CC estacionário ou rotativo. A frequência da tensão depende da velocidade e do número de pólos no campo. (WILDI, 1997)(KIM; KIM; KO, 2010) Imãs permanentes são usados para substituir os enrolamentos de excitação de máquinas síncronas devido à redução de preço dos imãs e as melhoras em suas características magnéticas.

O gerador síncrono a imã permanente (Permanent Magnet Synchronous Generator - PMSG) pode ser diretamente acoplado a uma turbina eólica ou possuir pequenas caixas de engrenagens e conectados a uma rede AC por um conversor de potência.

Vantagens como uma melhor eficiência, redução de peso do aerogerador, níveis de ruído e de custos associados à manutenção regular deste componente são atribuídas à operação sem caixa de engrenagens e com baixa velocidade. (CHINCHILLA; ARNALTES; BURGOS, 2006)(KIM; KIM; KO, 2010).

No caso deste gerador, o conversor/inversor pode ser utilizado para controlar a tensão variável e a frequência que muda com a variação da velocidade do vento. O conversor converte este sinal variável em sinal CC e converte em sinal CA com amplitude e frequência desejada. (NAYAR et al., 2006)

As equações dinâmicas do PMSG são descritas através de coordenadas  $d-q$ , onde o eixo direto é definido como um eixo coincidente com o eixo magnético do campo de excitação do rotor o eixo de quadratura é definido formando um ângulo de  $90^\circ$  com o eixo direto (ALTINO, 1984). A variável do eixo 0 é nula se for considerado um sistema trifásico equilibrado, podendo assim, ser omitida.

O modelo da dinâmica elétrica em termos de tensão e corrente (TAN; ISLAM, 2004) (BOROWY; SALAMEH, 1997) são dados pelas Equações 2.5 e 2.6

$$v_q = - (R + \rho L_q) i_q - \omega_r L_d i_d + \omega_r \lambda_m \quad (2.5)$$

$$v_d = - (R + \rho L_d) i_d - \omega_r L_q i_q \quad (2.6)$$

onde  $R$  e  $L$  são a resistência e indutância da máquina por fase,  $v_d$  e  $v_q$  são as tensões e  $i_d$  e  $i_q$  são as correntes da máquina.  $\lambda_m$  é a amplitude dos fluxos estabelecidos pelos ímãs permanentes e  $\rho = d/dt$ .

As equações acima são derivadas assumindo que a variável  $q$  é alinhada com o terminal do estator, portanto  $v_d = 0$ . A expressão para o torque eletromagnético no rotor é dada pela Equação 2.7

$$T_e = 1,5P[-\lambda_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2.7)$$

onde  $P$  é o número de pares de pólos do PMSG e  $T_e$  é o torque elétrico do gerador. A relação entre a frequência angular do estator ( $\omega_r$ ) e a velocidade mecânica angular do rotor ( $\omega_m$ ) é expressa pela Equação 2.8.

$$\omega_r = P(\omega_m) \quad (2.8)$$

As máquinas a ímãs permanentes podem ser classificadas de acordo com a direção do fluxo magnético em relação ao seu eixo, em: radial (convencional), axial e transversal. No modelo de fluxo radial, o estator tem distribuição senoidal, similar ao da máquina de indução. O conjunto a ímãs permanentes é montado na superfície laminada do rotor, sendo este interno e com simetria radial bidimensional. A maioria dos estudos encontrados na literatura é relacionado com esta máquina. (SALLES, 2009)



## 2.4 Revisão sobre rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT)

Devido à variação da velocidade do vento durante o dia, a máxima potência de saída do gerador eólico depende da precisão com que o ponto de máxima potência é rastreado pelo controle MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) do gerador. Os métodos MPPT incluem basicamente três estratégias: velocidade do vento; potência de saída medida e calculada; e curva característica de potência. A maioria dos controles faz o uso da medida da velocidade do vento, o que implica em um custo adicional dos sensores e maior complexidade. (YU ZOU; ELBULUK; SOZER, 2013)

Os algoritmos de extração da máxima potência podem ser classificados em três principais métodos de controle, conhecidos por *Tip Speed Ratio (TSR)*, *Power Signal Feedback (PSF)* e *Hill-Climbing Search ou Control (HCS/HCC)*. (THONGAM; OUHROUCHE, 2011)

O algoritmo usando o conceito *Tip Speed Ratio* (velocidade de ponta), regula a velocidade de rotação do gerador a fim de manter a TSR em seu valor ótimo onde a máxima potência é extraída. Porém é necessária a medição da velocidade do vento e da velocidade da turbina para obtenção do TSR ótimo.

O controle *Power Signal Feedback* (realimentação do sinal de potência) utiliza a informação da curva de máxima potência da turbina para ser capaz de rastrear o ponto de máxima potência. Entretanto este valor pode variar com o tempo de uso da máquina e das condições de vento.

O *Hill Climbing Search* (busca subindo a montanha) é um algoritmo que procura continuamente a máxima potência da turbina eólica. O rastreamento depende da localização do ponto de operação na curva característica  $P \times I$  e da relação entre a variação da potência de saída e a velocidade do rotor. Este método computa o sinal ótimo a fim de levar esta operação até o ponto de máxima potência. (WANG; CHANG, 2004)

O algoritmo HCS irá adaptar a corrente de carga para a energia primária disponível. Existem alguns métodos HCS para uso com o gerador de indução. As técnicas mais comuns para atingir o ponto de máxima potência gerada são: passo fixo, passo dividido, passo adaptativo e passo exponencial. Neste trabalho será utilizada a técnica de passo fixo para o MPPT da turbina Magnus e o MPPT do gerador. Essa técnica está descrita em mais detalhes

no capítulo 5, as outras três (passo dividido, passo adaptativo e passo exponencial) estão disponíveis em (SIMÕES; FARRET, 2008).

## 2.5 Resumo do Capítulo

Este capítulo apresentou uma revisão bibliográfica sobre os principais tópicos abordados nesta dissertação. Iniciando com uma revisão sobre as turbinas eólicas convencionais de eixo horizontal, mais utilizada atualmente para geração de energia elétrica a partir da energia disponível no vento. Seguindo de outros tipos de turbinas, chamadas de não convencionais, como a Savonius, Darrieus (ambas as turbinas de eixo vertical) e a turbina Magnus que é o foco do estudo deste trabalho.

A turbina Magnus é uma turbina de eixo vertical que no lugar de pás fixas, possui cilindros giratórios que ajudam no aumento de potência de saída turbina. Esta turbina é baseada no efeito Magnus e passou por vários modelos de construção, existe uma empresa que, patenteando os espirais nos cilindros, produz comercialmente uma turbina Magnus.

Também é abordado neste capítulo o gerador síncrono a imã permanente, suas vantagens sobre outros tipos de geradores, e seu equacionamento em coordenadas  $d-q$ .

Por fim, o capítulo traz uma revisão sobre os principais métodos de rastreamento do ponto de máxima potência. Dando ênfase ao método HCS (*Hill Climbing Search*) que tem como principal vantagem não necessitar o conhecimento de informações sobre a turbina, pois o rastreamento observa a variação da potência de saída.

## CAPÍTULO 3

### TURBINA EÓLICA MAGNUS

A turbina Magnus é uma turbina de eixo horizontal que ao invés de utilizar as pás convencionais, utiliza cilindros giratórios em torno do próprio eixo de acordo com o efeito Magnus e é mostrada na Figura 3.1.

Conforme Bychkov (2008) as características das turbinas eólicas com cilindros giratórios dependem de parâmetros geométricos, cinemáticos e energéticos. A melhora do desempenho da turbina passa pela forma do cilindro ou pelo controle de rotação da turbina. Nesta dissertação será utilizada a variação da rotação do cilindro para analisar a melhora do desempenho da turbina Magnus.

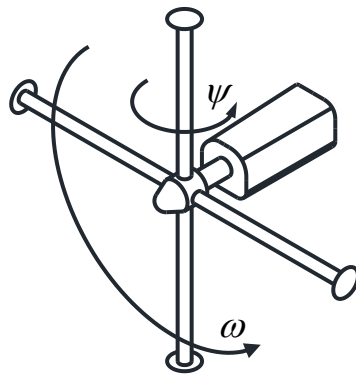


Figura 3.1 - Turbina Magnus.

Conforme descrito por Luo et al (2011), a força de sustentação (*Lift*) obtida pelo giro do cilindro em um fluido, mostrada na Figura 2.5, é obtida pelo teorema de Kutta-Joukowski e pode ser calculada pela Equação 3.1.

$$L = \rho(\Gamma \times V) \quad (3.1)$$

onde  $\rho$  é a densidade do fluido,  $V$  é a velocidade de fluido e  $\Gamma$  é a circulação do fluido, dada por

$$\Gamma = \oint V ds = 2\pi\psi r_c^2 \quad (3.2)$$

onde  $\psi$  é a rotação do cilindro (rad/s) e  $r_c$  é o raio do cilindro (m). A expressão final para força de sustentação por unidade de comprimento é dada por

$$L = 2\pi\rho V\psi r_c^2 \quad (3.3)$$

A rotação dos cilindros considerada nesta dissertação é o valor adimensional da velocidade e será chamada de  $\theta$  e é dada pela Equação 3.4, onde  $R$  é o raio da turbina (m).

$$\theta = \frac{\psi R}{V} \quad (3.4)$$

A Figura 3.2 mostra a vista frontal da turbina Magnus, onde  $\omega$  é a rotação da turbina,  $\psi$  é a rotação dos cilindros e  $r$  é mostrado como uma distância do eixo da turbina até um ponto no cilindro, esta variável é um elemento de raio e serve para a descrição do modelo da turbina na próxima sessão.

A vista  $A$  está mostrada na Figura 3.3 que é um diagrama de forças que irá auxiliar no entendimento do comportamento das forças descritas no modelo deste capítulo.

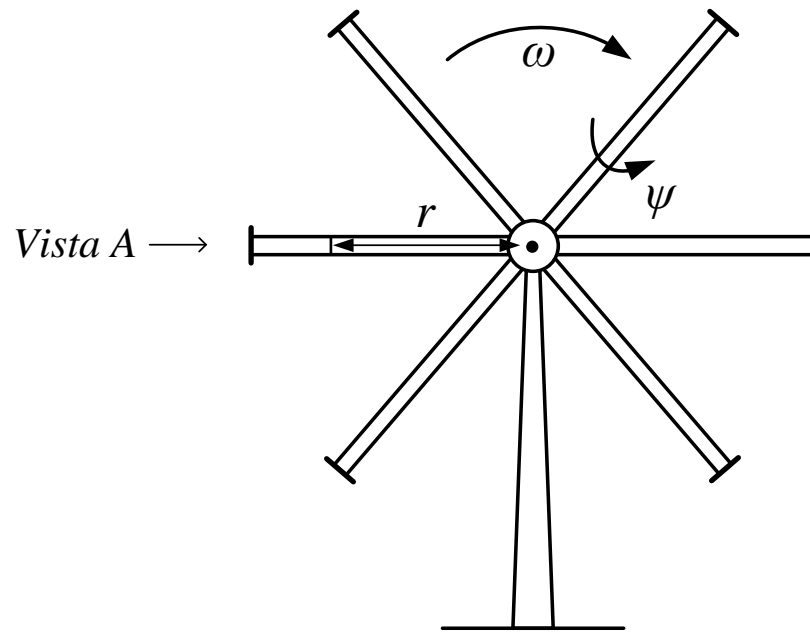


Figura 3.2 - Vista frontal da Turbina Magnus.

### 3.1 Modelo da turbina Magnus

O modelo da turbina eólica Magnus apresentado por Barbero et al (2010) foi tomado como base para esta dissertação. Os diagramas da Figura 3.3 auxiliam na compreensão das equações do modelo.

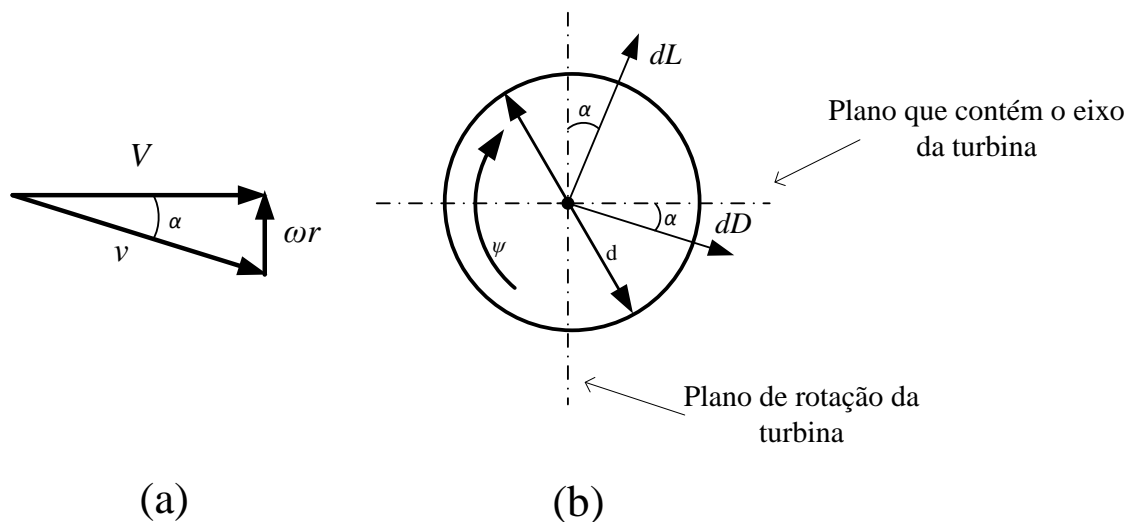


Figura 3.3 - Diagrama de forças da vista A da figura 3.2.

Para estudar o comportamento da turbina Magnus é necessário avaliar o torque gerado em cada cilindro pelo vento, assumindo que não haja interação entre os cilindros. Então conforme descrito acima, pode-se obter as diferenciais das forças de sustentação e de arrasto.

$$dL = \frac{1}{2} C_l d \rho v^2 dr \quad (3.5)$$

$$dD = \frac{1}{2} C_d d \rho v^2 dr \quad (3.6)$$

onde  $C_l$  é o coeficiente da força de sustentação (*Lift*),  $C_d$  é o coeficiente da força de arrasto (*Drag*),  $d$  é o diâmetro do cilindro e  $v$  é a velocidade do vento em relação à velocidade do cilindro dada pela equação 3.7.

$$v = \sqrt{V^2 + \omega^2 r^2} \quad (3.7)$$

O modelo utilizado descrito por é baseado em curvas experimentais para força de sustentação e de arrasto para cilindros giratórios imersos em uma corrente de fluido disponíveis na literatura. (BYCHKOV; DOVGAL; KOZLOV, 2007) Foram obtidas equações de polinômios de sétima ordem em função da variável  $\varphi$  da equação 3.8, onde  $\psi$  é a velocidade de rotação dos cilindros giratórios e  $d$  é o diâmetro do cilindro.

$$\varphi = \frac{\psi d}{2v} = \frac{\psi d}{2\sqrt{V^2 + \omega^2 r^2}} \quad (3.8)$$

As forças diferenciais apresentadas nas equações 3.9 e 3.10 exercem diferenciais de torque sobre o eixo do aerogerador através do eixo da pá. Estes valores diferenciais de torque são projetados na direção da rotação.

$$dT_L = dL \cos \alpha r = dL \frac{V}{v} r = \frac{1}{2} \rho V d C_l v r dr \quad (3.9)$$

$$dT_D = dD \sin \alpha r = dL \frac{\omega r^2}{v} = \frac{1}{2} \rho d \omega C_d v r^2 dr \quad (3.10)$$

Quando estas duas equações são integradas em todo comprimento da pá desde o raio externo do eixo do aerogerador ( $R_0$ ) até o raio da ponta da pá ( $R$ ), se obtêm o torque gerado pela força de sustentação (*Lift*) e pela força de arrasto (*Drag*). As equações por completo da integral são apresentadas no anexo A.

Para força de sustentação o torque é apresentado na Equação 3.11. Para o valor da componente de sustentação do torque, a Equação 3.12.

$$T_L = \int_0^{T_L} dT_L = \frac{1}{2} \rho v d \int_{R_0}^R C_l \sqrt{V^2 + \omega^2 r^2} r dr \quad (3.11)$$

$$T_D = \int_0^{T_D} dT_D = \frac{1}{2} \rho \omega d \int_{R_0}^R C_d \sqrt{\omega^2 r^2 + V^2} r^2 dr \quad (3.12)$$

As equações finais de torque e da potência para a turbina Magnus são mostradas nas Equações 3.13 e 3.14

$$T_t = n(T_L - T_D) \quad (3.13)$$

$$P_{mec} = n(T_L - T_D) \omega \quad (3.14)$$

onde  $n$  é o número dos cilindros.

A partir do modelo disponível, foi considerada uma variável a mais nesta dissertação, que considera as perdas pelo acionamento dos cilindros ( $P_{aci}$ ). O cálculo feito foi de que as perdas de acionamento dos cilindros não podem ultrapassar 10% da potência nominal total da turbina (12 kW), isto é 1200 W.

Foi colocado então um limitante para a rotação dos cilindros, de 2500 RPM. Portanto para calcularmos as perdas de acionamento em Watt/RPM, foram utilizados os dois valores descritos acima. Então para 1200/2500 são 0.48 W/RPM de perdas de acionamento.

No modelo utilizado como referência foram consideradas as perdas por fricção dos cilindros, devido ao fluxo laminar de fluido que é considerado e chamado de  $P_{perd}$ .

$$P_{perd} = T_t \psi = 1,328 \frac{\pi n p \omega_c^3 d^4 (R - R_0)}{16 \eta \text{Re}^{1/2}} \quad (3.15)$$

onde  $\text{Re}$  é o número de Reynolds (com um valor baixo, devido à suposição de fluxo laminar), pois a geometria levada em conta foi a de uma placa plana para simplificação das equações,  $n$  é o  $\eta$  é o rendimento elétrico do motor, com o valor de 50%.

Assim a potência total é dada pela equação

$$P_M = P_{mec} - P_{per} - P_{aci} \quad (3.16)$$

O coeficiente de potência da turbina Magnus é calculado por

$$C_p = n \cdot \frac{(T_L - T_D) \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3} \quad (3.17)$$

A equação de *tip speed ratio* da turbina Magnus está relacionada com a velocidade angular da turbina ( $\omega$ ), o raio ( $R$ ) e a velocidade do vento  $V$  que é exatamente a mesma equação usada para as turbinas convencionais.

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (3.18)$$

A equação para rotação dos cilindros segue o mesmo comportamento da equação de *tip speed ratio*, mas relacionada à velocidade dos cilindros ( $\psi$ ) e é mostrada na equação 3.4.

A Figura 3.4 mostra o comportamento do coeficiente de potência para turbina Magnus em relação a rotação dos cilindros  $\psi$  e a *tip speed ratio*  $\lambda$ . É possível notar que a rotação da turbina é baixa, atingindo seus máximos em aproximadamente 3 rad/s e rotação dos cilindros



entre 110 e 160 rad/s. Também o modelo descrito é para valores dentro dos limites desta curva.

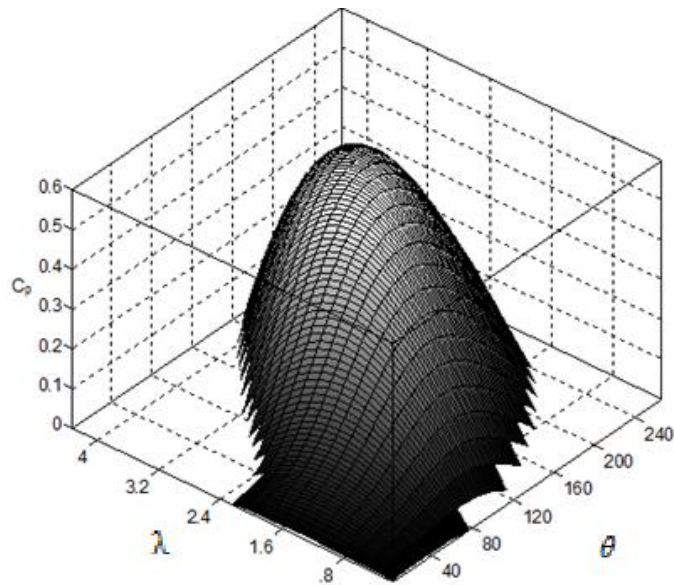


Figura 3.4 - Coeficiente de potência da turbina Magnus em relação a rotação dos cilindros e *tip speed ratio*.

A Figura 3.5 mostra um gráfico da máxima potência para turbina Magnus utilizando a rotação fixa dos cilindros como utilizado no modelo convencional. Nesta figura ainda pode ser vista a linha de tendência ligando os pontos de máxima potência para cada velocidade de vento.

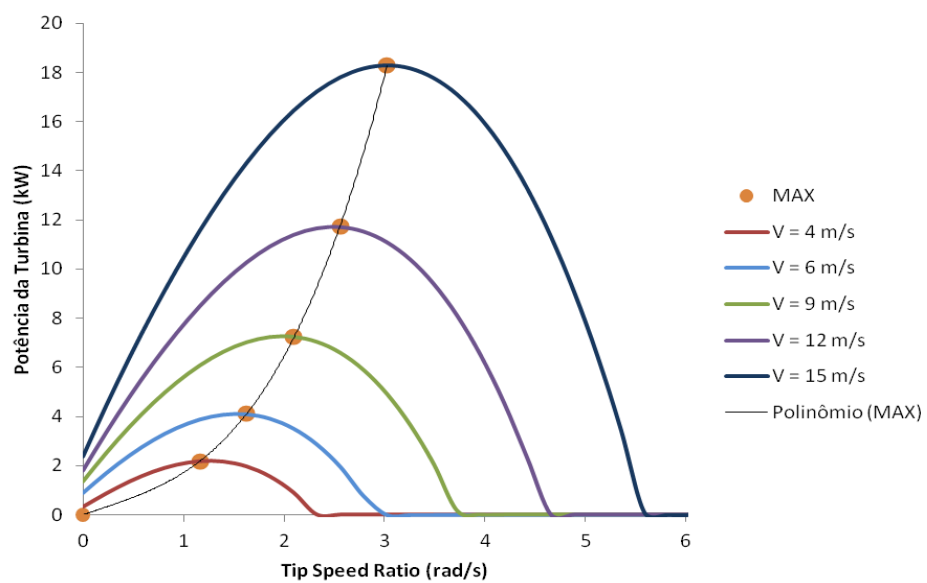


Figura 3.5 - Curva  $P \times$  TSR para turbina Magnus com cilindro fixo em 100 rad/s.

A curva que liga os pontos de máxima potência tem seu polinômio dado pela Equação 3.18, advinda da linha de tendência (Excel) e o coeficiente de correlação  $R^2 = 1$ , mostrando uma relação linear perfeita.

$$y = 611,12x^3 - 328,96x^2 + 1438,1x - 2,6264 \quad (3.18)$$

Ao analisar a Figura 3.5 garante-se a existência de um ponto de máxima potência para cada velocidade de vento. Propõe-se então a variação da velocidade dos cilindros para otimizar a potência da turbina.

O modelo de turbina Magnus usado nesta dissertação como referência foi desenvolvido supondo-se uma velocidade fixa dos cilindros, em  $100 \text{ rad/s}$ . O modelo proposto considerará a variação da velocidade dos cilindros até  $250 \text{ rad/s}$  e discute um MPPT baseado na rotação dos cilindros. As equações descritas neste capítulo foram colocadas no software de simulação de circuitos elétricos Power Sim, PSIM<sup>®</sup> e proposto um método de rastreamento do ponto de máxima potência para turbina Magnus que está descrito no capítulo 4.

### 3.2 Resumo do capítulo

Este capítulo apresentou a turbina Magnus, com suas equações características e diagramas de forças. Também é mostrada a curva do coeficiente de potência da turbina Magnus em relação à rotação dos cilindros e à *tip speed ratio* da turbina, com os valores de acordo com o disponível no modelo encontrado na literatura. Ainda estão disponíveis no anexo A as equações para o torque total do modelo da turbina, as quais são colocadas no software PSIM<sup>®</sup> para os resultados das simulações.

## CAPÍTULO 4

### **RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA**

#### 4.1 Método *Hill Climbing Search* (HCS)

A máxima potência que uma turbina eólica pode gerar depende dos valores ótimos da velocidade em que o eixo gira. Extrair a máxima potência disponível no vento é muito importante, pois garantirá seu funcionamento em altos níveis de eficiência para extrair toda energia disponível na natureza. (THONGAM et al., 2009)

As instalações eólicas de geração de energia elétrica têm custos muito altos, e a disponibilidade da energia alternativa é de natureza intermitente, o que tende a restringir bastante sua eficiência. É de vital importância otimizar a eficiência da potência elétrica transferida, até mesmo para ganhos relativamente pequenos de forma a permitir o retorno dos custos de instalação no menor tempo possível.

Como se sabe, o modo heurístico de achar o ponto de máximo valor de uma curva qualquer é baseado basicamente na seguinte regra: “Se a última mudança na variável de entrada  $x$  causa um incremento na variável de saída  $y$ , então o movimento da variável de entrada segue na mesma direção; se esta variação causa um decaimento na variável de saída, move-se a variável de entrada na direção oposta.” (SIMÕES; FARRET, 2008)

Assim sendo, o método HCS (*Hill Climbing Search*) deve estar continuamente procurando pelo ponto de máxima potência, neste caso, as potências de saída da turbina eólica e do gerador. O algoritmo depende da localização do ponto de operação na curva característica e da relação entre as mudanças na potência de saída e velocidade do rotor. Este método computa o valor ótimo do sinal para levar o sistema a operar no ponto de máxima potência. (WANG; CHANG, 2004)

Além disso, o HCS tem uma grande vantagem em relação aos demais, pois não é necessário conhecer-se o modelo da turbina ou qualquer outro dado e nem as alterações que ele sofre ao longo do tempo de uso. Para tal, existem diversas formas de aplicação do método HCS. O método HCS de passo fixo é explicado neste capítulo, pois foi usado para maximizar a potência da turbina Magnus simultaneamente com a potência do gerador. Por ser feito o uso de dois rastreamentos ao mesmo tempo optou-se pelo HCS de passo fixo por sua simplicidade e eficácia.

O HCS com passo fixo é o método mais direto para alcançar o ponto de máxima potência. A lógica deste algoritmo é baseada na potência de saída que é medida em cada novo incremento (ou decremento) da variável de controle. No caso da turbina Magnus, a rotação dos cilindros,  $\Delta\theta$  e no caso do gerador, a taxa de trabalho da chave  $\Delta d_k$  (que é apresentada no decorrer deste capítulo).

Se a mudança na potência  $\Delta P$  for positiva, com a última variação  $+\Delta x_k$ , a procura pelo MGP continua na mesma direção; se  $+\Delta x_k$  causar  $-\Delta P$  a direção da procura deve ser invertida. (SIMÕES; FARRET, 2008)

Nesta dissertação, um MPPT para turbina Magnus é proposto baseado na rotação dos cilindros, quando então o máximo possível do coeficiente de potência é obtido para qualquer valor de TSR pelo controle da rotação dos cilindros e mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

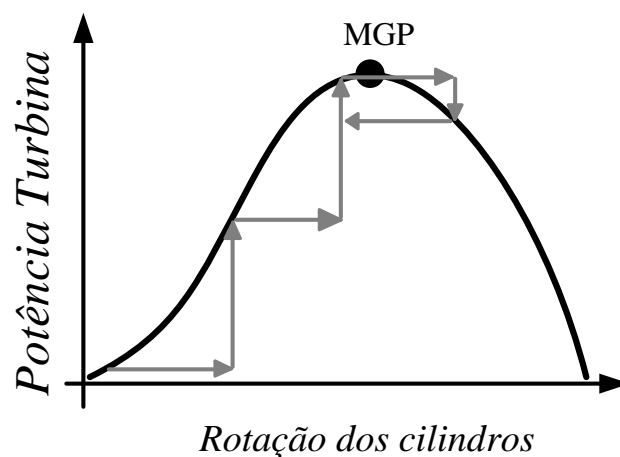


Figura 4.1 - HCS para turbina Magnus.

Também para o gerador é proposto um MPPT baseado na taxa de trabalho da chave do conversor *buck*, (Figura 4.2) e o HCS rastreia a máxima potência através deste chaveamento, está descrito em mais detalhes na seção 4.3.

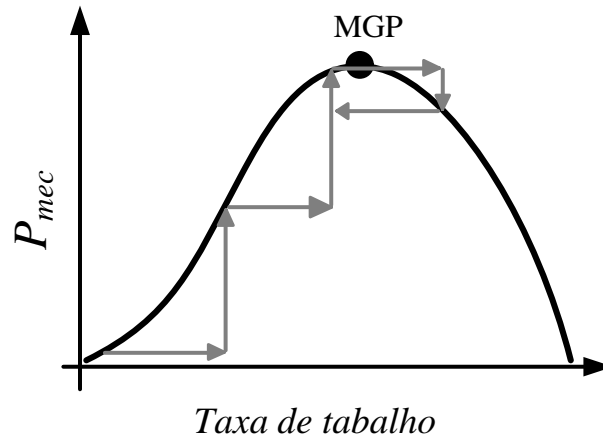


Figura 4.2 - HCS para o gerador.

#### 4.2 MPPT proposto para Turbina Magnus

O MPPT para a turbina Magnus proposto neste trabalho é baseado na otimização da rotação dos cilindros definida neste trabalho como  $\theta$  e isto permite alcançar os máximos valores de  $C_p$  e conseqüentemente da potência, para dados valores de *tip speed ratio* ( $\lambda$ ).

O fluxograma do MPPT proposto é mostrado na Figura 4.3. Nesta proposta, usa-se a potência da turbina como sendo a potência de referência e a velocidade dos cilindros como a variável de controle.

Uma comparação entre a potência instantânea gerada e seu valor no passo anterior vai determinar as ações que o controle terá que tomar. Se a potência da turbina segue a mesma tendência, o controle não altera o passo nem a velocidade de rotação dos cilindros. O HCS mudará a direção do passo do controle se a potência da turbina for menor que a medida antes e irá incrementar se a potência for maior que a medida anteriormente. Analogamente, a variável de controle  $\psi$  é aumentada de um passo quando a potência gerada aumentar, e se a potência diminuir, a rotação dos cilindros também será reduzida. Neste modelo, as perdas também são levadas em conta.

As perdas são um limitante no aumento da rotação, pois haverá um momento em que as perdas pelo aumento da rotação dos cilindros serão muito maiores do que o incremento que ela proporciona, como já descrito no capítulo 3. Além disso, a leitura da potência é feita apenas na simulação, pois na prática não pode ser medida devido à falta de um protótipo, os resultados apresentados experimentalmente foram obtidos por um emulador de turbina.

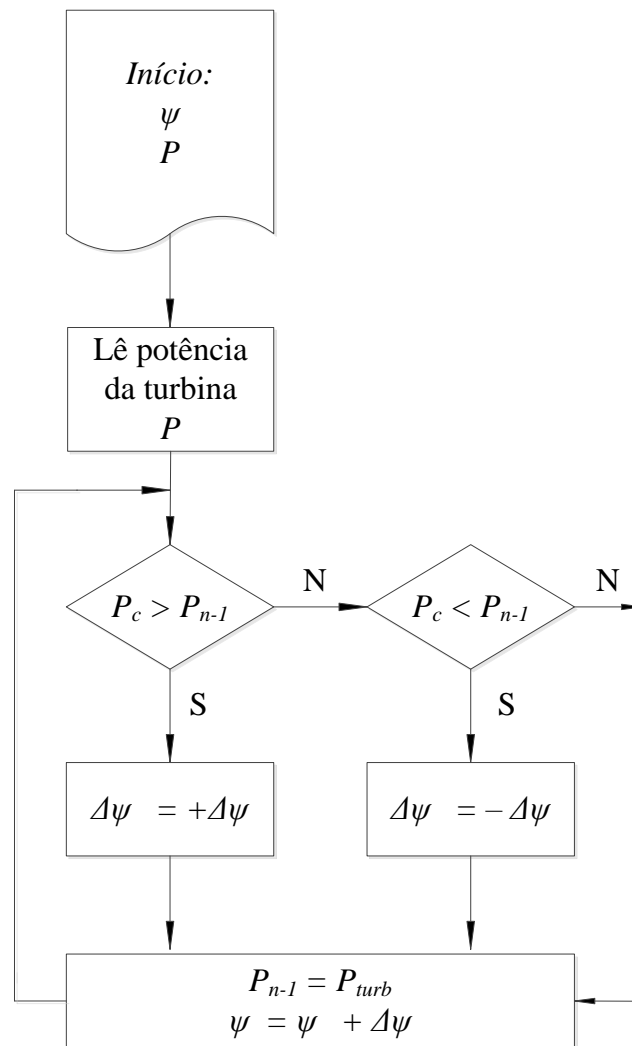


Figura 4.3 - Fluxograma para o MPPT da turbina Magnus.

#### 4.3 MPPT para o Gerador Elétrico

Da mesma forma que foi usado o HCS para a rotação dos cilindros e da turbina, o método utilizado nesta dissertação para garantir que o gerador funcione em MPPT, também será o HCS de passo fixo, como descrito na seção 4.1.

O funcionamento do HCS para o gerador é mostrado no fluxograma da Figura 4.4 e funciona fazendo a leitura da tensão ( $V_c$ ) e a corrente na carga ( $i_c$ ) que são multiplicados para obtenção da potência na carga ( $P_c$ ). A potência na carga é a variável de entrada e a razão cíclica ( $d$ ) é a variável de controle, que faz o acionamento da chave do conversor.

Uma comparação entre a potência instantânea da carga e a potência do passo anterior determina a ação que o controle vai tomar de forma análoga ao método utilizado na turbina Magnus. Se a potência da carga é maior que o valor do passo anterior ( $P_{n-1}$ ) a variável de controle seguirá na mesma direção, se a potência na carga for menor que o valor medido no passo anterior, a variável de controle seguirá na direção oposta.

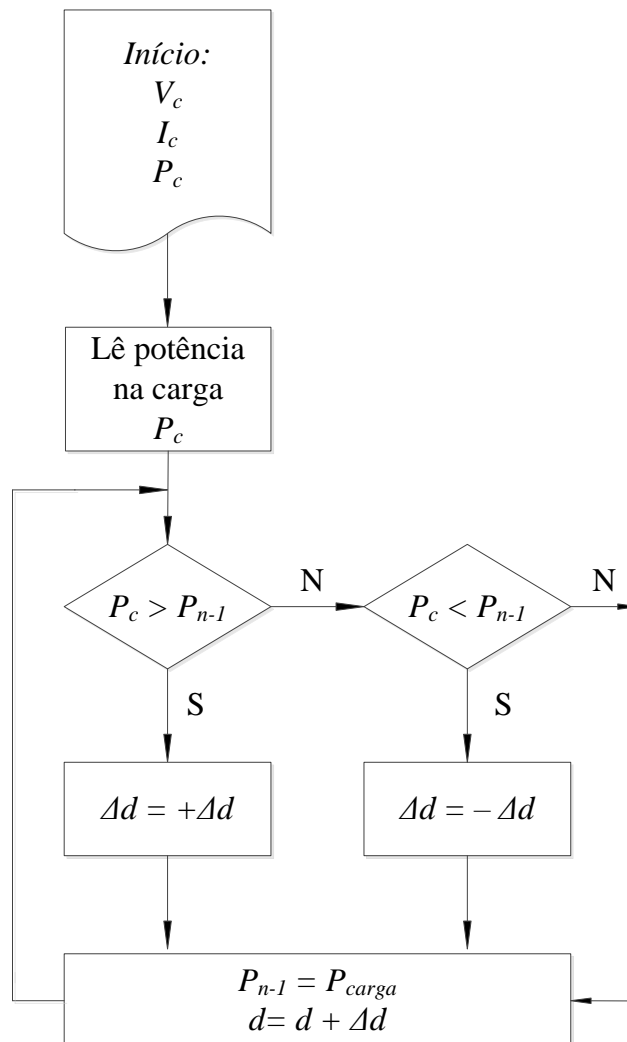


Figura 4.4 - Fluxograma para o MPPT do Gerador.

#### 4.4 Topologia do conversor de potência para implementação do MPPT do PMSG

A topologia do conversor de potência proposta neste trabalho para que o gerador síncrono a imã permanente trabalhe em MPPT e atenda a carga simultaneamente consiste na turbina Magnus acoplada a um PMSG, com um retificador não controlado e associado a um conversor CC-CC do tipo rebaixador de tensão, tal como ilustrado na Figura 4.5.

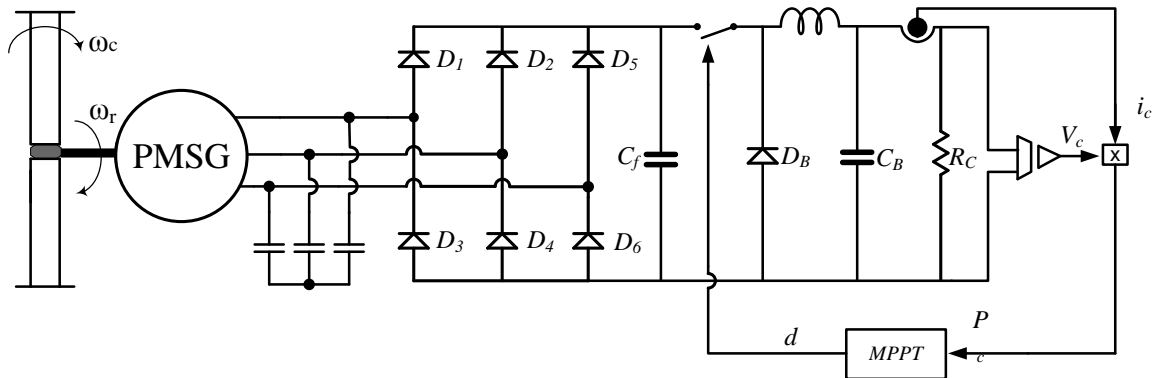


Figura 4.5 - Topologia proposta para o MPPT do gerador síncrono a imã permanente.

O retificador trifásico não controlado a diodos recebe energia CA do gerador de indução e a converte para CC para alimentar a carga. Os diodos  $D_1$  e  $D_4$ ,  $D_3$  e  $D_6$ ,  $D_5$  e  $D_2$  não podem conduzir simultaneamente assim como  $D_3$ ,  $D_6$ ,  $D_5$  e  $D_2$  também não conduzem ao mesmo tempo. Os diodos conduzem aos pares (6,1), (1,2), (2,3), (3,4), (4,5), (5,6), (6,1), fazendo assim a varredura de toda a senoide e produzindo uma tensão CC. O capacitor  $C_f$  funciona como filtro, e é utilizado para reduzir a variação na tensão de saída, fazendo com que ela tenha uma ondulação reduzida. (HART, 2012)

A partir da chave controlada pelo MPPT tem-se a configuração de um conversor CC-CC abaixador de tensão (conhecido como *buck*), onde a tensão de saída é menor ou igual à tensão de entrada. O indutor e o capacitor  $C_B$  compõem o filtro passa baixa do conversor para obter uma tensão CC mais pura. O diodo  $D_B$  proporciona um caminho para a corrente no indutor quando a chave é aberta e é polarizada reversamente quando a chave é fechada.



#### 4.5 Resumo do capítulo

Este capítulo discute o rastreamento do ponto de máxima potência. O método apresentado foi o HCS, o qual foi utilizado no MPPT dos cilindros da turbina Magnus e também no gerador de indução. Com isto tem-se a rotação tanto do cilindro como do aerogerador que melhor atende a máxima eficiência e máxima potência de saída. São apresentados neste capítulo os fluxogramas do MPPT para turbina e para o gerador.

O MPPT da turbina é baseado na variação da rotação dos cilindros, usada como variável de controle, já que na literatura apenas é apresentada esta turbina com os cilindros em uma rotação fixa. A medição é feita através da potência de saída e então é escolhida qual ação que o controle irá tomar.

Também é apresentada a topologia do conversor de potência proposta para esta dissertação. O conversor é um abaixador de tensão e o controle do ciclo de trabalho da sua chave é a variável de controle para rastreamento de máxima potência.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS

Os resultados de simulação apresentados neste capítulo mostram a turbina Magnus acoplada a um gerador síncrono a imã permanente. O gerador é mostrado funcionando com MPPT, assim como a turbina.

Para obtenção dos resultados práticos da turbina Magnus foi utilizado um emulador de turbina disponível no trabalho de Corrêa (2014). O emulador possui o modelo da turbina e fornece um valor de torque para o gerador conforme o programa, reproduzindo assim o comportamento da turbina.

O PMSG disponível no laboratório é um gerador de 6 pólos, com resistência do estator de  $0,208 \Omega$ , a indutância de eixo direto é  $0,1465 \text{ m H}$  e a de eixo de quadratura de  $0,728 \text{ m H}$ .

Na Figura 5.1 mostra-se o esquema a ser usado para obtenção dos resultados práticos. O PMSG é conectado a um retificador. Este retificador fornece uma tensão contínua para um conversor abaixador (*buck*) para que seja ajustado o MPPT controlado por um PIC 16F877A, fazendo com que a turbina e o gerador operem com MPPT.

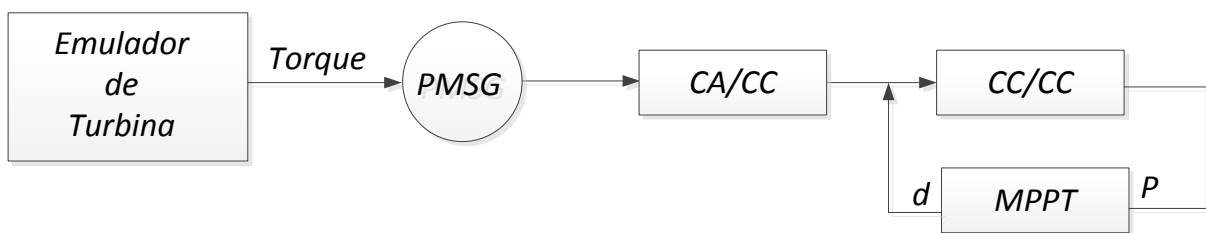


Figura 5.1 - Esquemático para obtenção dos resultados práticos.

## 5.1 Resultados de simulação e experimentais

Os resultados de simulação e experimentais serão mostrados para turbina Magnus operando com MPPT dos cilindros e com a turbina Magnus operando com os cilindros fixos em 100 rad/s. O PMSG em ambos os casos opera com MPPT. Os resultados experimentais foram obtidos através da configuração da Figura 5.1.

Serão apresentados os resultados de simulação e logo abaixo os resultados experimentais. Os resultados de simulação mostram a corrente e tensão na carga CC e a respectiva potência, já que é utilizada uma carga puramente resistiva, para valores de velocidade de vento entre 3 e 5 m/s.

Os resultados experimentais apresentados são para tensão e corrente na carga CC e também corrente no motor CC (acionado pelo emulador de turbina). Os valores da corrente e tensão da carga CC das figuras experimentais são retirados da instrumentação, devendo então ser multiplicados pelos respectivos ganhos para obtenção dos valores reais. A carga é puramente resistiva de aproximadamente  $1 \Omega$ .

### 5.1.1 Resultados de simulação e experimentais da turbina Magnus operando com cilindros fixos

As figuras desta seção mostram os resultados para a turbina Magnus com os cilindros operando com velocidade fixa de 100 rad/s, ou seja, sem MPPT e o PMSG operando com MPPT.

A Figura 5.2 mostra os resultados de simulação para velocidade de vento de 3 m/s. Na Figura 5.2 (a) é mostrada a potência na carga CC de 2,23 W, a Figura 5.2 (b) mostra a corrente na carga CC que é de 1,36 A e a Figura 5.2 (c) mostra a tensão na carga CC que é de 1,64 V.

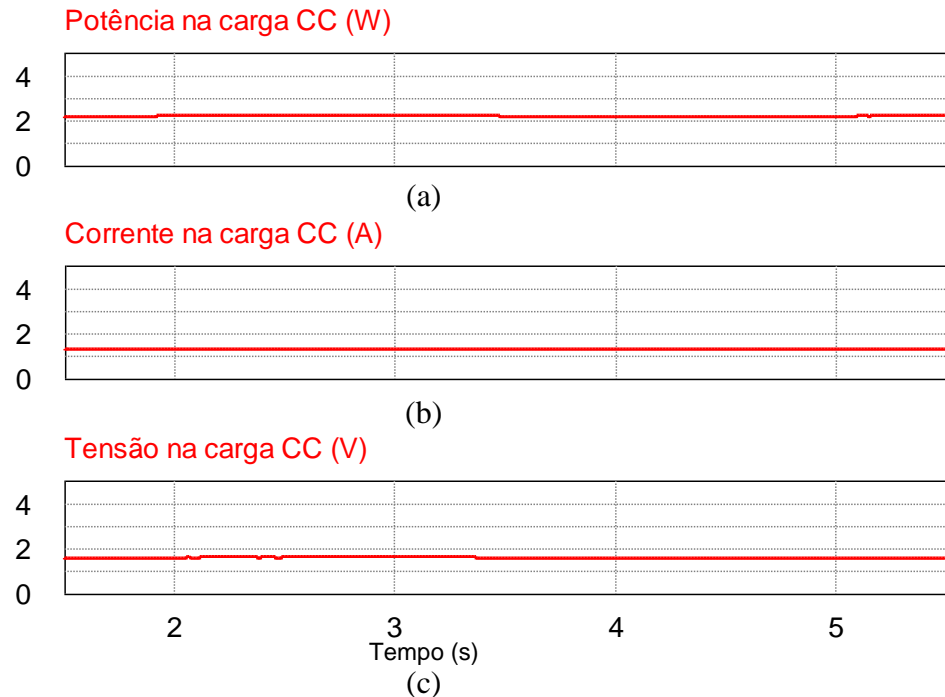


Figura 5.2 - Resultados de simulação para vento de 3 m/s e cilindros fixos. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC e (c) Tensão na carga CC.

A Figura 5.3 mostra os resultados experimentais para a corrente na carga CC no CH 1, a tensão na carga CC no CH 2 e a corrente no motor no CH4 para um vento de 3 m/s e cilindros com valor fixo de 100 rad/s.

A carga é puramente resistiva e a corrente na carga CC é 1,66 A e a tensão é de 2,2 V, portanto a potência na carga é de 3,52 W. A rotação da turbina extraída do emulador é de 5 RPM.

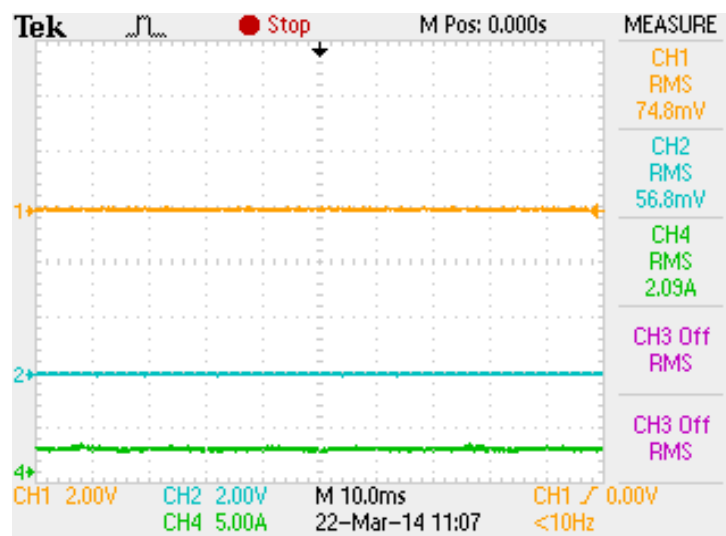


Figura 5.3 - Resultados para vento de 3 m/s e cilindro fixo. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga, CH4 – corrente do motor CC.

A Figura 5.4 mostra os resultados de simulação para vento aplicado de 3,5 m/s. A Figura 5.4(a) mostra a potência na carga que fica em torno de 35 W, na Figura 5.4(b) é mostrada a corrente na carga CC é aproximadamente 5 A e a Figura 5.4(c) é apresentada a tensão na carga CC é aproximadamente 7 V.

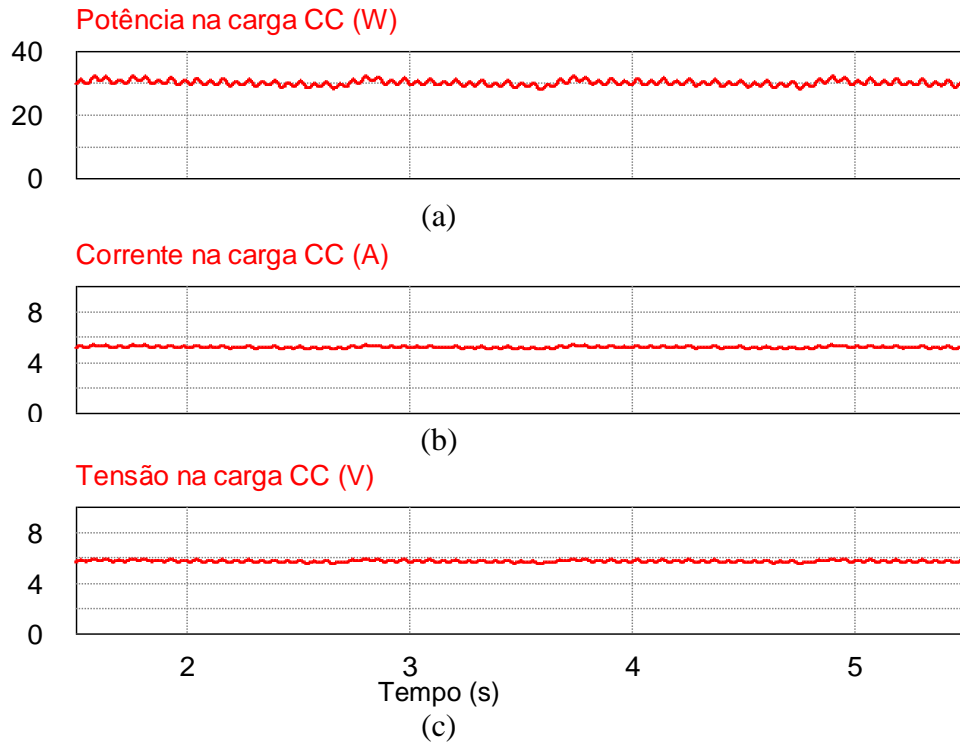


Figura 5.4 - Resultados de simulação para vento de 3,5 m/s e cilindros fixos. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC e (c) Tensão na carga CC.

A Figura 5.5 mostra os resultados para um vento de 3,5 m/s, a corrente na carga CC é 5,09 A e a tensão é 6,7 V, portanto a potência na carga é de 34,10 W. A rotação da turbina extraída do emulador é de 10 RPM.

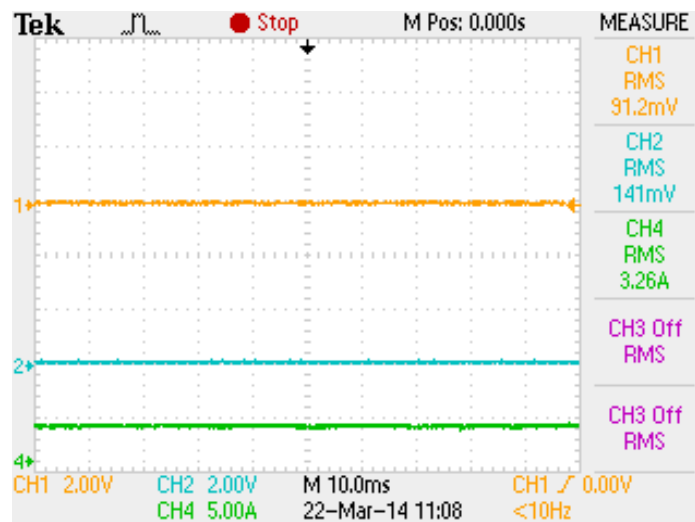


Figura 5.5 - Resultados para vento de 3,5 m/s e cilindro fixo. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga, CH4 – corrente do motor CC.

A Figura 5.6 mostra os resultados de simulação para a velocidade de vento de 4 m/s. A potência na carga apresentada na Figura 5.6 (a) é em torno de 90,85 W, a corrente na carga CC mostrada na Figura 5.6 (b) é de 7,9 A e a Figura 5.6 (c) mostra a tensão na carga CC é 11,5 V.

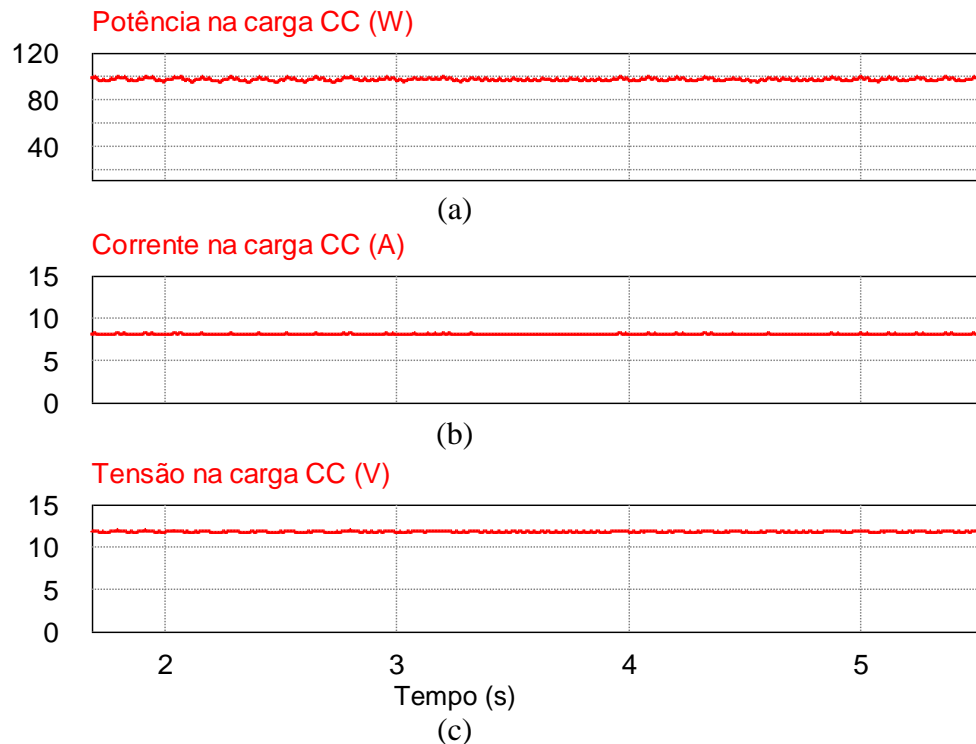


Figura 5.6 - Resultados de simulação para vento de 4 m/s e cilindros fixos. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC e (c) Tensão na carga CC.

A Figura 5.7 mostra os resultados para um vento de 4 m/s, a corrente na carga CC é 8,3 A e a tensão é 11 V, portanto a potência na carga é de 91,3 W. A rotação da turbina extraída do emulador é de 14,4 RPM.

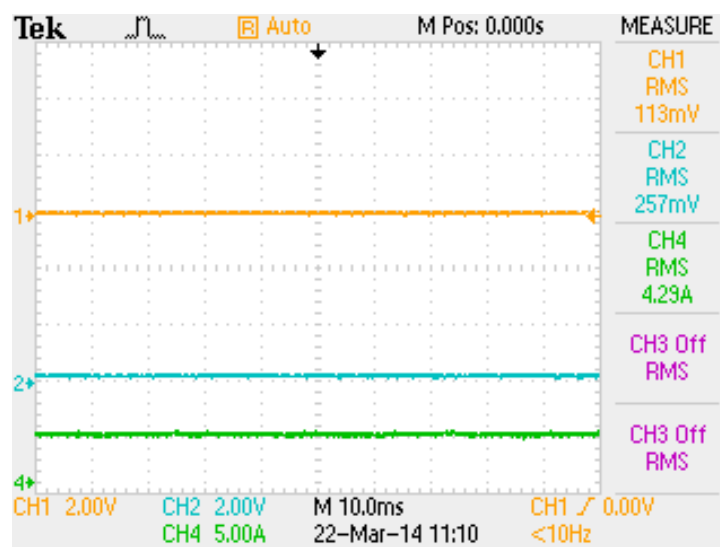


Figura 5.7 - Resultados para vento de 4 m/s e cilindro fixo. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga, CH4 – corrente do motor CC.

A Figura 5.8 mostra os resultados de simulação para velocidade de vento aplicada de 4,5 m/s. A Figura 5.8 (a) mostra os resultados para a potência na carga CC de 178 W, a Figura 5.8 (b) mostra a corrente na carga CC de 10,5 A e a Figura 5.8 (c) mostra a tensão na carga CC de 17 V.

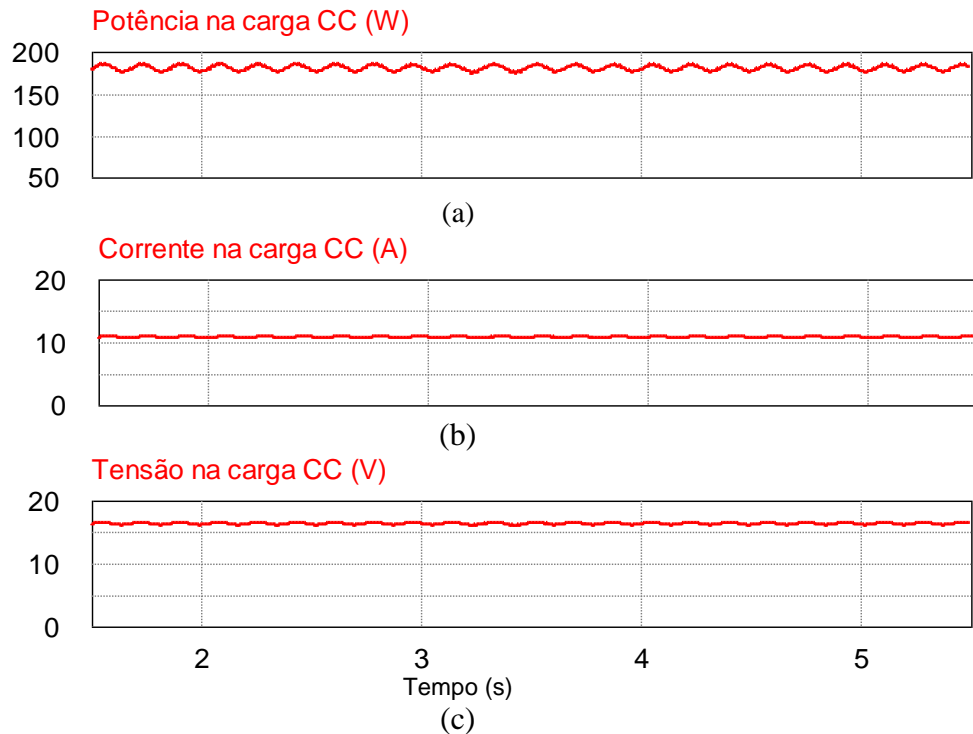


Figura 5.8 - Resultados de simulação para vento de 4,5 m/s e cilindros fixos. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC e (c) Tensão na carga CC.

A Figura 5.9 mostra os resultados para um vento de 4,5 m/s, a corrente na carga CC é 11,76 A e a tensão é 15,4 V, portanto a potência na carga é de 181,10 W. A rotação da turbina extraída do emulador é de 19,95 RPM.

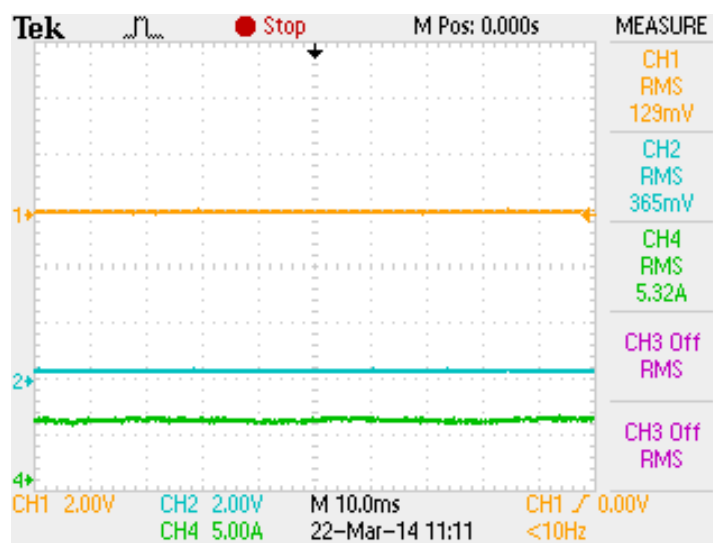


Figura 5.9 - Resultados para vento de 4,5 m/s e cilindro fixo. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga, CH4 – corrente do motor CC.

A Figura 5.10 mostra os resultados de simulação para a velocidade de vento de 5 m/s. A Figura 5.10 (a) mostra a potência na carga CC que fica em torno de 315 W, a Figura 5.10 (b) mostra a corrente na carga CC em torno de 15 A e a Figura 5.10 (c) apresenta a tensão na carga CC em torno de 21 V.

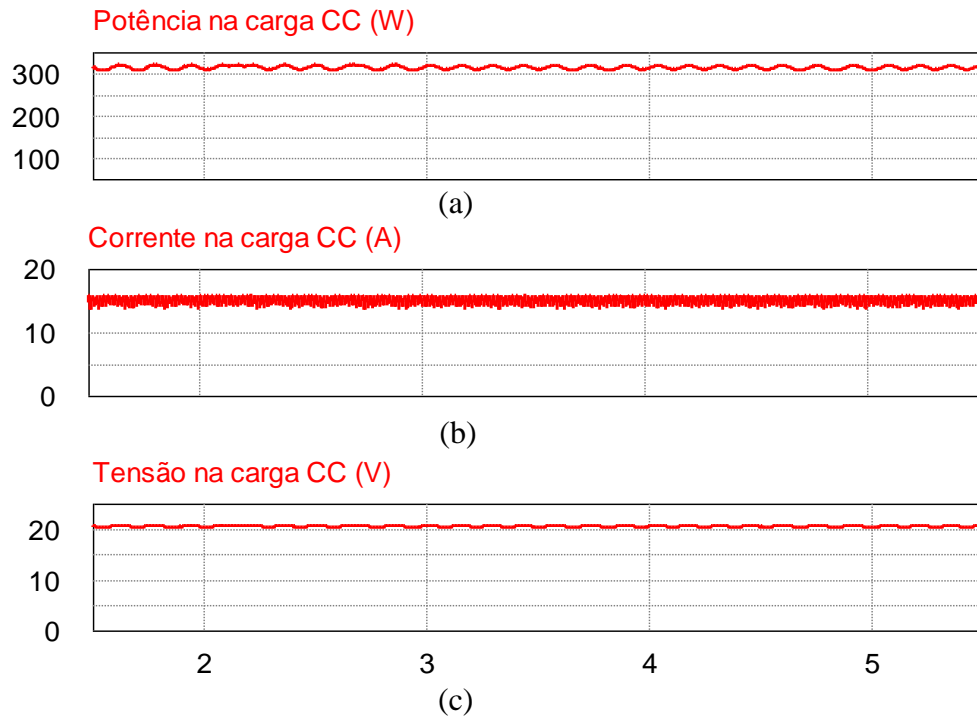


Figura 5.10 - Resultados de simulação para vento de 5 m/s e cilindros fixos. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC e (c) Tensão na carga CC.

A Figura 5.11 mostra os resultados na instrumentação para um vento de 5 m/s, a corrente na carga CC é 15,6 A e a tensão é 20,3 V, portanto a potência na carga é de 316,68 W. A rotação da turbina extraída do emulador é de 24,8 RPM.

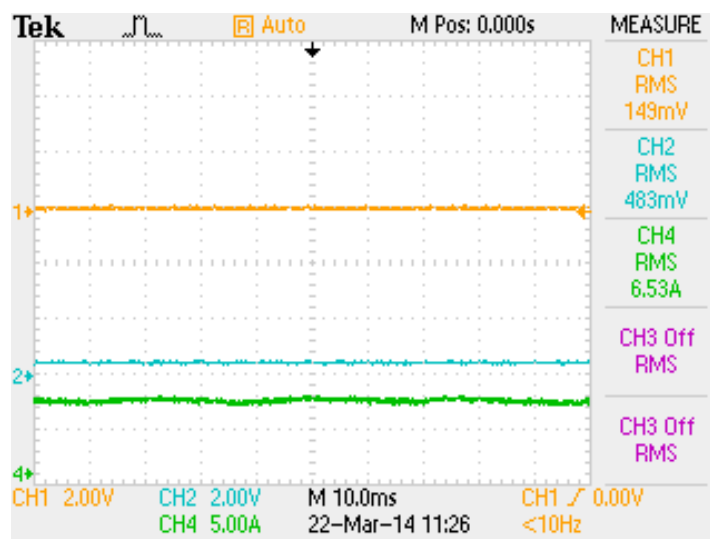


Figura 5.11 - Resultados para vento de 5 m/s e cilindro fixo. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga, CH4 – corrente do motor CC.



### 5.1.2 Resultados de simulação e experimentais para turbina Magnus e gerador síncrono a imã permanente com MPPT

As figuras desta seção mostram os resultados para a turbina Magnus operando com MPPT dos cilindros, buscando sempre a velocidade ótima dos cilindros para cada velocidade de vento. As figuras de simulação mostram os resultados de tensão, corrente e potência na carga CC e ainda a rotação dos cilindros que opera com MPPT. As figuras experimentais mostram no CH 1 a corrente na carga CC e no CH2 a tensão na carga CC, e a rotação dos cilindros é retirada do emulador de turbina. A carga é puramente resistiva de aproximadamente  $1 \Omega$ .

A Figura 5.12 mostra os resultados de simulação para velocidade de vento de 3 m/s e cilindros operando com MPPT. A Figura 5.12 (a) mostra a potência na carga CC de 5,60 W, a Figura 5.12 (b) apresenta a corrente na carga CC em torno de 2,19 A, a Figura 5.12 (c) mostra a tensão na carga CC de 2,55 V e a Figura 5.12 (d) mostra a rotação dos cilindros que é aproximadamente 106 rad/s.

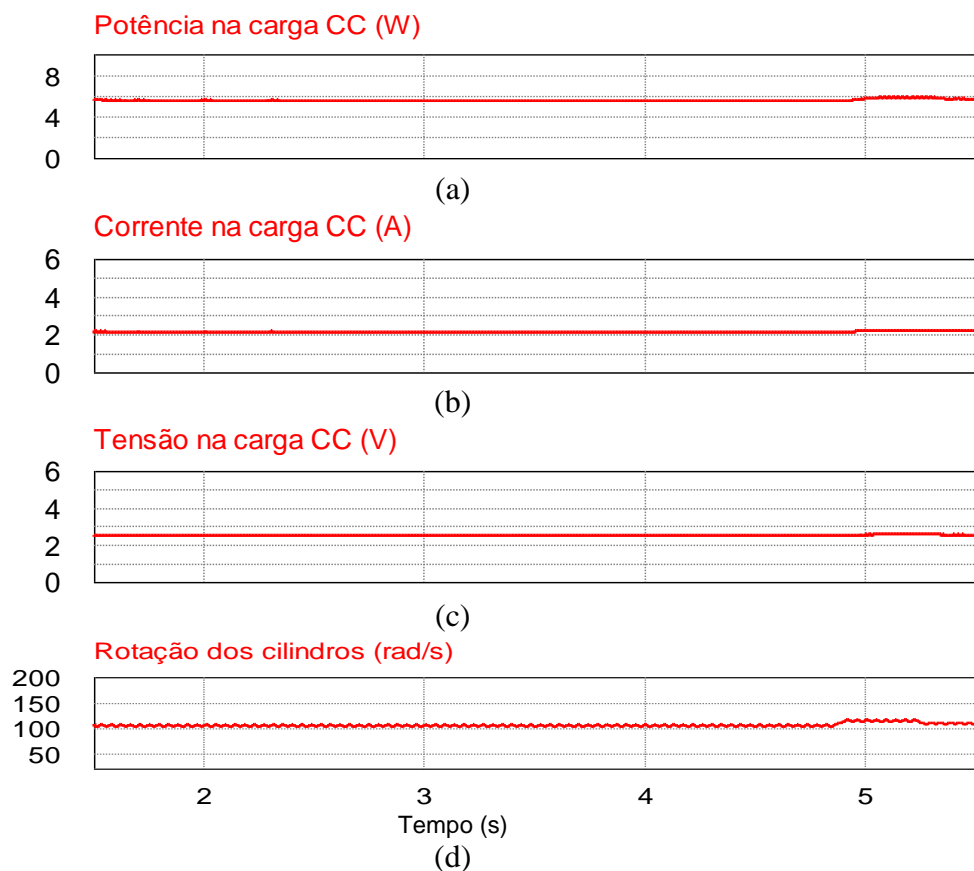


Figura 5.12 - Resultados de simulação para vento de 3 m/s e cilindros com MPPT. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC, (c) Tensão na carga CC e (d) Rotação dos cilindros.

A Figura 5.13 mostra os resultados experimentais de corrente e tensão para a velocidade de vento de 3 m/s, a corrente na carga CC é de 2,8 A e a tensão na carga CC é de 2,2 V, a potência na carga é de 6,16 W. Rotação da turbina é de 5 RPM, assim como a rotação dos cilindros que opera na procura do máximo ponto de potência é de 100 rad/s, ambos os resultados retirados do emulador.

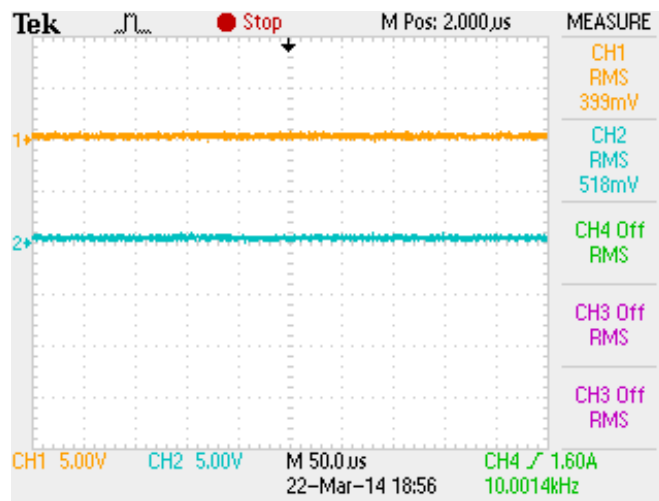


Figura 5.13 - Resultados para vento de 3 m/s e cilindros com MPPT. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga.

Os resultados de simulação para velocidade de vento de 3,5 m/s são apresentados na Figura 5.14. A potência apresentada na Figura 5.14 (a) é de 51 W, a corrente na carga CC apresentada na Figura 5.14 (b) é de 6,8 A, a tensão na carga CC de 7,5 V é mostrada na Figura 5.14 (c) e a rotação dos cilindros de 116 rad/s é mostrada na Figura 5.14 (d).

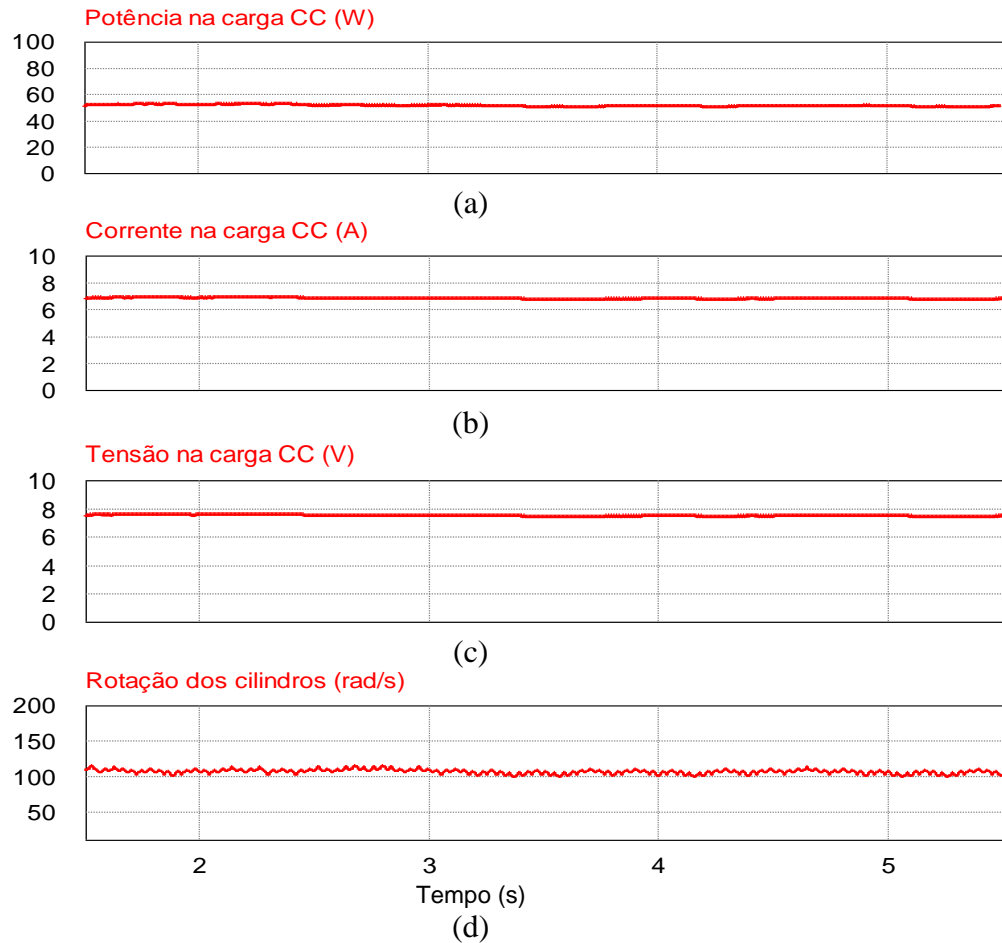


Figura 5.14 - Resultados de simulação para vento de 3,5 m/s e cilindros com MPPT. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC, (c) Tensão na carga CC e (d) Rotação dos cilindros.

A Figura 5.15 mostra os resultados experimentais de corrente e tensão para a velocidade de vento de 3,5 m/s, a corrente na carga CC é de 7,09 A e a tensão na carga CC é de 7 V, a potência na carga é de 49,63 W. Rotação da turbina é de 10,1 RPM, a rotação dos cilindros é de 120 rad/s, ambos os resultados retirados do emulador.

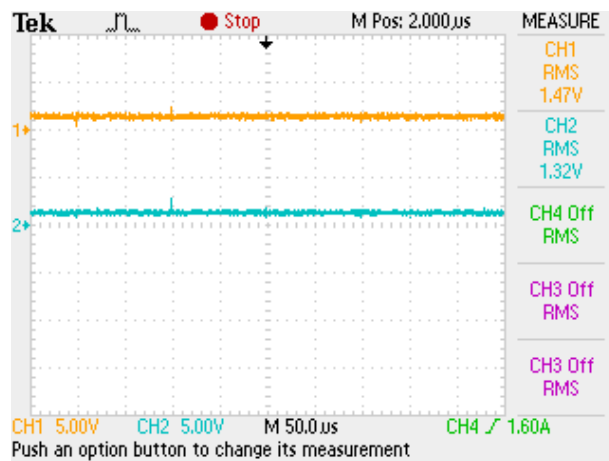


Figura 5.15 - Resultados para vento de 3,5 m/s e cilindros com MPPT. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga.

A Figura 5.16 mostra os resultados de simulação para velocidade de vento de 4 m/s. A Figura 5.16 (a) apresenta o resultados para potência na carga CC de 145,47 W, a corrente na carga é mostrada na Figura 5.16 (b) de 11,5 A, a Figura 5.16 (c) mostra a tensão na carga de 12,65 V e a Figura 5.16 (d) apresenta a rotação dos cilindro de 136 rad/s.

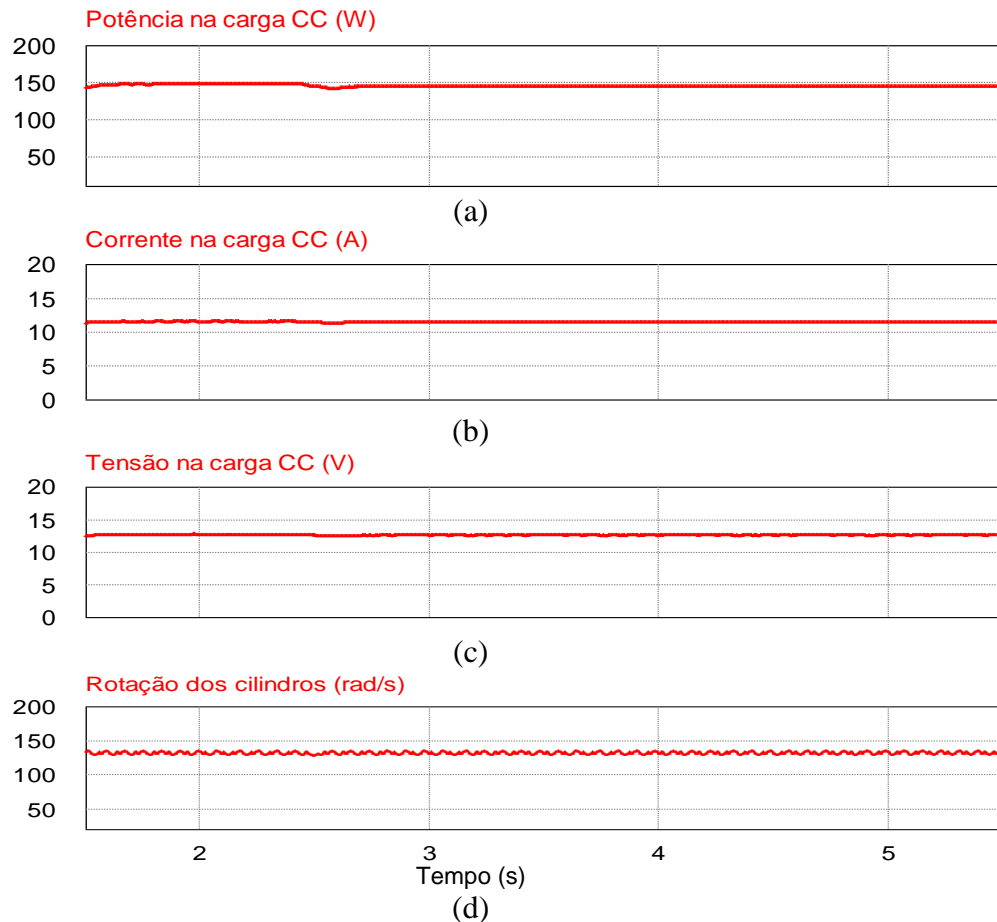


Figura 5.16 - Resultados de simulação para vento de 4 m/s e cilindros com MPPT. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC, (c) Tensão na carga CC e (d) Rotação dos cilindros.

É então aplicada uma velocidade de vento de 4 m/s no emulador e os resultados da Figura 5.17 mostram a corrente na carga CC de 11,6 A e a tensão na carga CC de 12,2 V e a potência é de 141,52 W. A rotação da turbina é de 16,36 RPM e a rotação dos cilindros fica em 130 rad/s.

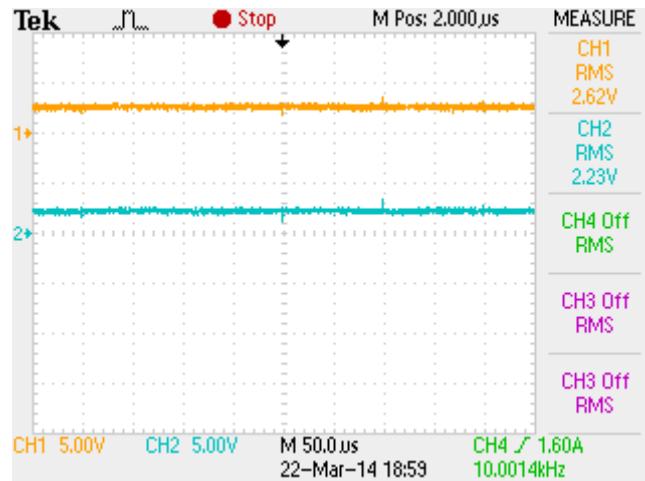


Figura 5.17 - Resultados para vento de 4 m/s e cilindros com MPPT. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga.

A Figura 5.18 apresenta os resultados de simulação para vento de 4,5 m/s. A potência na carga CC de 283 W é mostrada na Figura 5.18(a), a corrente na carga de 16,08 A é mostrada na Figura 5.18(b), a Figura 5.18(c) mostra a tensão na carga CC de 17,6 V e a Figura 5.18 (d) mostra a rotação dos cilindros de 143 rad/s.

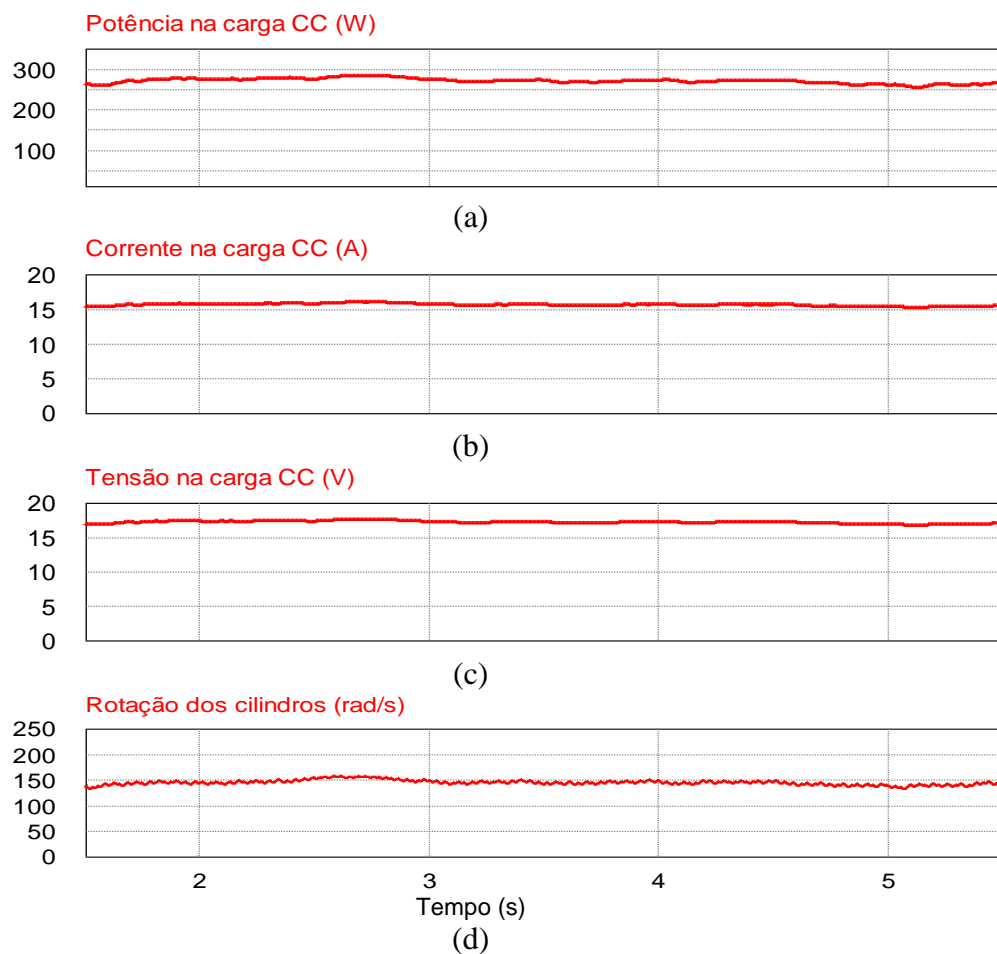


Figura 5.18 - Resultados de simulação para vento de 4,5 m/s e cilindros com MPPT. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC, (c) Tensão na carga CC e (d) Rotação dos cilindros.

A Figura 5.19 mostra os resultados para uma velocidade de vento de 4,5 m/s. A corrente CC mostrada no CH1 é de 16,5 A e a tensão na carga CC é de 17,6 V, portanto a potência na carga é de 290,4 W. A rotação da turbina é de 23,8 RPM e a rotação dos cilindros operando em MPPT é de 140 rad/s.

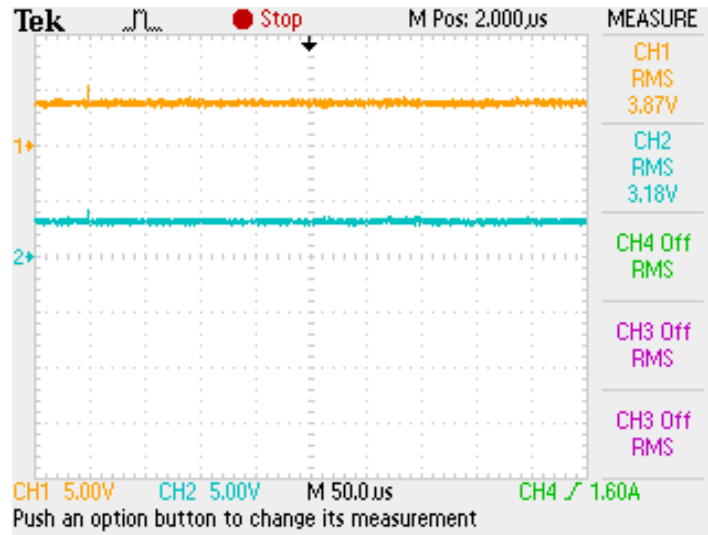


Figura 5.19 - Resultados para vento de 4,5 m/s e cilindros com MPPT. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga.

Os resultados de simulação para velocidade de vento de 5 m/s são mostrados na Figura 5.20. A potência na carga CC é apresentada pela Figura 5.20 (a) e tem valor de aproximadamente 480 W, na Figura 5.20 (b) é apresentada a corrente na carga CC de 21 A e a Figura 5.20(c) apresenta a tensão na carga CC com valor de 22,8 V e a rotação dos cilindros mostrada na Figura 5.20 (d) fica em torno de 150 rad/s.

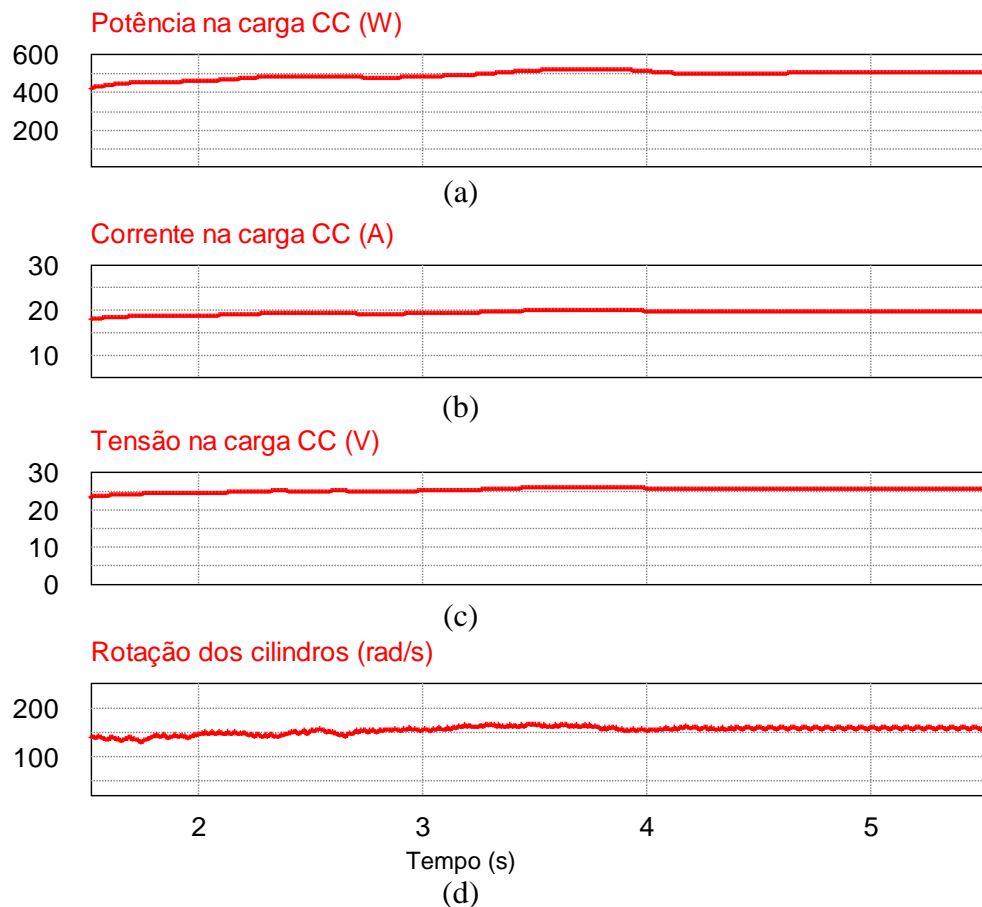


Figura 5.20 - Resultados de simulação para vento de 5 m/s e cilindros com MPPT. (a) Potência na carga CC, (b) Corrente na carga CC, (c) Tensão na carga CC e (d) Rotação dos cilindros.

A Figura 5.21 mostra os resultados para uma velocidade de vento de 5 m/s, a corrente na carga CC é de 21,4 A e a tensão na carga CC é de 23,34 V, assim a potência na carga é de 500 W. A rotação da turbina é de 31,65 RPM e a rotação dos cilindros é de 150 rad/s.

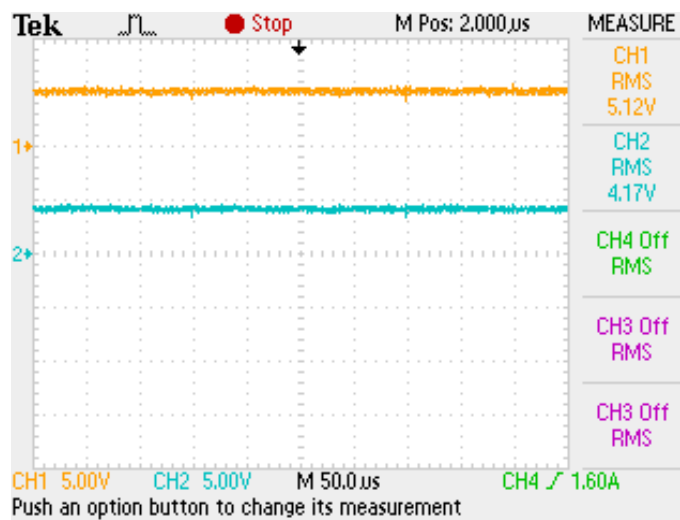


Figura 5.21 - Resultados para vento de 5 m/s e cilindros com MPPT. CH1 – corrente na carga, CH2 – tensão na carga.

Analisando os resultados experimentais para a Turbina Magnus com MPPT dos cilindros e sem MPPT dos cilindros têm-se os resultados da Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Análise dos resultados experimentais.

<b>Velocidade do vento (m/s)</b>	<b>Potência na Carga com cilindros fixos (100 rad/s)</b>	<b>Potência na Carga com cilindros em MPPT</b>	<b>Aumento de Potência</b>
<b>3</b>	3,52 W	6,16 W	75%
<b>3,5</b>	34,10 W	49,63 W	45%
<b>4</b>	91,3 W	141,52 W	55%
<b>4,5</b>	181,10 W	290,4 W	60%
<b>5</b>	316,68 W	500 W	57%

A tabela acima comprova o aumento de potência da turbina Magnus quando ela opera com os cilindros em MPPT. A média do aumento de potência é de aproximadamente 60%, para velocidades de vento consideradas baixas para turbinas eólicas convencionais.

## 5.2 Resumo do capítulo

Os resultados tanto de simulação como experimentais demonstram que quando a turbina Magnus opera com MPPT ocorre, conforme o esperado, o aumento da potência. Também os resultados de simulação vão de encontro aos resultados experimentais para tensão e corrente na carga CC, assim como a potência na carga CC. Quando operando com os resultados para rotação dos cilindros os resultados de simulação e os experimentais são bem próximos.

Quando a turbina foi submetida à rotação fixa dos cilindros de 100 rad/s, para a mesma velocidade de vento é possível notar a diminuição da potência significativamente, nos resultados de simulação e nos experimentais, como mostrado na Tabela 5.1.



## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

Este trabalho trouxe contribuições à análise da turbina eólica de efeito Magnus, considerada uma turbina eólica não convencional. O modelo utilizado nesta dissertação é o encontrado na literatura com o diferencial de explorar um método de rastreamento do ponto de máxima potência baseado na variação da rotação dos cilindros.

Nesta dissertação procurou-se avaliar a turbina Magnus como alternativa para geração de energia eólica. Mostrou-se que o funcionamento desta turbina assim como o rastreamento do ponto de máxima potência através da variação da rotação dos cilindros e do rotor pode trazer um grande aumento na potência como mostram os resultados do capítulo 5. Destaca-se que este rastreamento de máxima potência ainda não havia sido descrito na literatura.

A análise experimental da turbina Magnus acoplada a um gerador síncrono a imã permanente demonstrou uma boa resposta mesmo submetido à baixas velocidade de vento e por consequência, baixa rotação da turbina. Também operando com MPPT estabelecido pelo chaveamento de um conversor *buck*, se mostrou compatível com os resultados simulados apresentados e operou sempre no ponto de máxima potência.

Por fim, o rastreamento da máxima potência da turbina Magnus e do gerador a ela conectado funcionou conforme o esperado, pois conforme as velocidades de vento ao qual o emulador da turbina estava sujeito, a velocidade dos cilindros era procurada para que a operação da turbina fosse no máximo ponto de potência, como mostrado nos resultados práticos.

Os resultados de maximização desenvolvidos para esta dissertação demonstram um aumento da potência de saída do emulador e do gerador quando ambos operam com MPPT.

## 6.1 Objetivos atingidos nesta dissertação

Esta dissertação contribui com os seguintes itens para o conhecimento da turbina Magnus:

- 1) A teoria desenvolvida no capítulo 3 possibilitou a modelagem em um emulador genérico de turbinas para que sejam feitos testes de desempenho;
- 2) O algoritmo de controle para estabelecer tanto o ponto de máxima potência mecânica gerada pela rotação dos cilindros da turbina Magnus, como o nível de potência do conversor que controla o MPPT do gerador elétrico.

## 6.2 Trabalhos futuros

Algumas propostas para os trabalhos futuros são:

1. Construção da turbina Magnus, visando aperfeiçoar o comportamento do modelo.
2. Comparar o protótipo da turbina Magnus com e sem o rastreamento do ponto de máxima potência para acrescentar melhorias no método proposto nesta dissertação.
3. Acoplar a turbina Magnus a outros tipos de geradores como o GI.
4. Acoplar a turbina Magnus a um gerador de indução acoplado a um STATCOM.
5. Analisar os dois geradores acoplados ao protótipo para se obter a melhor configuração para esta turbina.

## BIBLIOGRAFIA

- AHMED, T.; NORO, O.; MATSUO, K.; SHINDO, Y. Minimum Excitation Capacitance Requirements for Wind Turbine Coupled Stand- Alone Self-Excited Induction Generator with Voltage Regulation Based on SVC. Telecommunications Energy Conference, INTELEC. p. 396–403, 2003.
- ALTINO, L. M. Máquinas Síncronas: teoria e aplicações. Universidade Federal de Pernambuco. Editora Universitária, Recife, 1984, pp 426.
- AMARANTE, O. A. C. DO.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. DE. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro .p. 1- 45, Brasília, 2011.
- ANAYA-LARA, O.; JENKINS, N.; EKANAYAKE, J.; CARTWRIGHT, P.; HUGHES, M. Wind Energy Generation: modelling and control. First Edition, Ed. John Wiley & Sons Ltd, 2009.
- BAPU, B. R. R.; KARTHIKEYAN, J.; REDDY, K. V. K. Hydrogen Storage in Wind Turbine Tower – A Review. Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering (FAME), p. 308–312, 2010.
- BARBERO, A.; GARCÍA-MATOS, J.A.; CANTIZANO, A.; ARENAS, A. Numerical tool for the optimization of wind turbines based on Magnus effect. 9th World Wind Energy Conference and Exhibition (WWEC 2010). Istanbul, Turquia: 2010.
- BOROWY, B; SALAMEH, Z. Dynamic response of a stand-alone wind energy conversion system with battery energy storage to a wind gust. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1997, Vol. 12, pp 73-78.
- BURTON, T.; JENKINS, N.; SHARPE, D.; BOSSANYI, E. Wind Energy Handbook. First Edition, 2001. Ed. John Wiley & Sons, Ltd.
- BYCHKOV, N. M.; DOVGAL, A. V.; SOROKIN, A. M. Parametric Optimization of the Magnus Wind Turbine. International Conference on Methods of Aerophysical Research (ICMAR), 2008.
- BYCHKOV, N. M.; DOVGAL, A V; KOZLOV, V. V. Magnus wind turbines as an alternative to the blade ones. Journal of Physics: Conference Series, v. 75, p. 012004-1-7, 2007.
- CORRÊA, L. C. Emulação dos Regimes Permanente e Transitório de Turbinas de eixo Horizontal incluindo o Modelo Estático da Turbina Magnus. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2014.
- CHINCHILLA, M; ARNALTES, S; BURGOS, J. Control of Permanent-Magnet Generators Applied to Variable-Speed Wind Energy Systems Connected to the Grid. 2006, pp 130-135.

DAI, T.; SONG, B.; SHU, S.-W. Study on the wind energy resources assessment in wind power generation. 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), 2011.

ELTAMALY, A. M. New formula to determine the minimum capacitance required for self-excited induction generator. IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings, v. 1, p. 106–110, 2002.

FARRET, F. A. Aproveitamento de pequenas fontes de energia. 2. ed. Editora da UFSM, 2010. p. 244

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. Máquinas Elétricas: Conversão Eletromecânica da Energia, Processos, Dispositivos e Sistemas. McGraw-Hill, 1975.

FLEMING, P. D.; PROBEN, S. D. The Evolution of Wind-Turbines : An Historical Review. Applied Energy, v. 18, p. 163–177, 1984.

GOŇO, R.; RUSEK, S.; HRABČÍK, M. Wind Turbine Cylinders with Spiral Fins. Czech Science Foundation., 2009.

HANSEN, M. O. L. Aerodynamics of wind turbines / Martin O. L. Hansen - 2nd ed. p.181 Earthscan, 2008.

HANSON, T. F. Magnus Air Turbine System, US4366386, 1982.

KIM, H; KIM, S; KO, H. Modeling and control of PMSG based variable-speed Wind turbine. Electric Power Systems Research, 2010. Vol.80, p-p 46-52.

LUO, D.; HUANG, D.; WU, G. Analytical solution on Magnus wind turbine power performance based on the blade element momentum theory. Journal of Renewable and Sustainable Energy, v. 3, n. 3, p. 033104, 2011.

MATOS, J. Á. G. ESTUDIO Y DISEÑO DE UN AEROGENERADOR BASADO EN EL EFECTO MAGNUS. Trabalho de conclusão de curso, Universidad Pontificia Comillas - Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Madrid, 2009.

MURAKANI, A. N.; JUN ITO, A. Magnus Type Wind Power Generator, US20070046029A1, 2007.

NAIDU, M.; WALTERS, J. A 4-kW 42-V Induction-Machine-Based Automotive Power Generation System With a Diode Bridge Rectifier and a PWM Inverter. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 39, n. 5, p. 1287–1293, 2003.

NAYAR, C; ISLAM, S; DEHBONEI, H; TAN, K; SHARMA, H. Power Electronics for Renewable Energy Sources. Power Electronics Handbook, 2006, pp 673-716.

NELSON, V. Wind energy: renewable energy and the environment / Vaughn Nelson. p. 298, CRC Press, 2009.

ÖRS, M. Voltage Control of a Self-Excited Induction Generator. IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics (AQRT), v. 3, p. 281-286, 2008.

SALLES, M. Modelagem e análise de geradores eólicos de velocidade variável conectados em sistemas de energia elétrica. Tese de doutorado, 2009, Departamento de Engenharia de Energia e Automação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SEYOUM, D. The dynamic and control of a self-excited induction generator driven by a wind turbine. Tese de pós-doutorado, University of New South Wales - School of Electrical Engineering and Telecommunications, 2003.

SHIGETOMI, A.; MURAI, Y.; TASAKA, Y.; TAKEDA, Y. Interactive flow field around two Savonius turbines. *Renewable Energy*, v. 36, n. 2, p. 536–545, fev. 2011.

SIMÕES, M. G.; FARRET, F. A. Alternative energy system: design and analysis with induction generators / M. Godoy Simões and Felix A. Farret. 2nd ed. p. 433, CRC Press, 2008.

SUGIARTO, S.; ISLAM, S.; ABU-SIADA, A. Power transfer capability improvement of an induction generator wind energy conversion system. TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference, p. 1–6, nov. 2009.

SYRKIN, V. V.; SHALAEV, V. S.; DRANITSIN, V. V. Selecting the design parameters for wind-power systems. *Russian Engineering Research*, v. 29, n. 9, p. 916–919, 10 out. 2009.

TAN, K; ISLAM, S. Optimum Control Strategies in Energy Conversion of PMSG Wind Turbine System without mechanical sensors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, Vol 19, pp 392-399.

THAKUR, R. K.; JHA, N. K. Impact of Transients Due to Drive Train in Variable Speed Wind Energy Conversion System. IEEE Third International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), p. 402–408, 2012.

THONGAM, J. S.; BOUCHARD, P.; EZZAIDI, H.; OUHROUCHE, M. Wind speed sensorless maximum power point tracking control of variable speed wind energy conversion systems. *Electric Machines and Drives Conference*, 2009.

THONGAM, J. S.; OUHROUCHE, M. MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems. *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, Chapter 15, p. 339-360, 2011.

TRAPP, J. G. Gerador de Indução com Excitação Estática, Filtro Ativo e Armazenamento de Energia para Sistemas Eólicos Isolados. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

WANG, Q.; CHANG, L. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 19, p. 1242–1249, 2004.

WILD, T. *Electrical Machines, Drives and Power Systems*. Third Edition, Prentice-Hall, 1997, pp 814.

WU, J.-C. AC / DC power conversion interface for self-excited induction generator. IET Renewable Power Generation, v. 3, n. August 2007, p. 144–151, 2009.

YU ZOU; ELBULUK, M. E.; SOZER, Y. Stability Analysis of Maximum Power Point Tracking ( MPPT ) Method in Wind Power Systems. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 49, n. 3, p. 1129–1136, 2013.

ZHAO, J.; HOU, Q.; JIN, H.; ZHU, Y.; LI, G. CFD analysis of ducted-fan UAV based on Magnus effect. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, p. 1722–1726, 2012.

ZINGMAN, A. Optimization of a Savonius Rotor Vertical-Axis Wind Turbine for Use in Water Pumping Systems in Rural Honduras. Trabalho de conclusão de curso - Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2007.

ZUO, Y.; LIU, H. Evaluation on comprehensive benefit of wind power generation and utilization of wind energy. IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, p. 635-638, 2012.

## ANEXO

### Equações de Torque da Turbina Magnus

As equações para o torque gerado pela força de sustentação e pela força de arrasto para turbina Magnus são mostradas neste anexo e estão disponíveis em Matos (2009). Estas equações foram colocadas no software PSIM e assim foi possível obter um modelo para esta turbina ainda não disponível no software utilizado.

As constantes  $C_{L1,2..n}$  e  $C_{D1,2..n}$  nas Equações A1 e A2 foram obtidas por aproximação com as curvas disponíveis na literatura conforme o modelo de (MATOS, 2009), e discutido no capítulo 3. A Tabela AN.0.1 mostra estes valores.

Tabela AN.0.1 - Coeficientes para equações de torque da turbina Magnus.

Coeficientes de Sustentação	Coeficiente de Arrasto
CL0 = 0	CD0 = 0
CL1 = 6.0768	CD1 = 4.0584
CL2 = -7.5814	CD2 = -4.7506
CL3 = 5.3345	CD3 = 2.5358
CL4 = -1.7843	CD4 = -0.67174
CL5 = 0.30458	CD5 = 0.09464
CL6 = -0.025843	CD6 = -0.0068258
CL7 = 0.00086638	CD7 = 0.0009872

As equações são as integrais do torque em relação a todo o comprimento do cilindro, onde  $M_L$  é o torque produzido pela força de sustentação (*lift*) e  $M_D$  é o torque produzido pela força de arrasto (*drag*).

A primeira equação é a Equação A1 que representa o torque produzido pela força de sustentação.

$$\begin{aligned}
T_L &= \int_0^{T_L} dT_L = \frac{1}{2} \rho V d \int_{R_0}^R C_l \sqrt{V^2 + \omega^2 r^2} r dr = \\
&C_{L0} \frac{1}{2} \rho V d \omega \left[ \frac{\left( R^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2 \right)^{3/2} - \left( R_0^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2 \right)^{3/2}}{3} \right] + C_{L1} \frac{1}{4} \rho V d^2 \psi \left[ \frac{R^2 - R_0^2}{2} \right] + \\
&C_{L2} \frac{1}{8} \rho V d^3 \frac{\psi^2}{\omega} \left[ \sqrt{R^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2} - \sqrt{R_0^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2} \right] + \\
&C_{L3} \frac{1}{32} \rho V d^4 \frac{\psi^3}{\omega^2} \ln \left( \frac{R^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2}{R_0^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2} \right) + \\
&C_{L4} \frac{1}{32} \rho V d^5 \frac{\psi^4}{\omega^3} \left( \frac{1}{\sqrt{R_0^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2}} \right) + \\
&C_{L5} \frac{1}{128} \rho V d^6 \frac{\psi^5}{\omega^4} \left( \frac{1}{R_0^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2} - \frac{1}{R^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2} \right) + \\
&C_{L6} \frac{1}{384} \rho V d^7 \frac{\psi^6}{\omega^5} \left[ \frac{1}{\left( R_0^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2 \right)^{3/2}} - \frac{1}{\left( R^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2 \right)^{3/2}} \right] + \\
&C_{L7} \frac{1}{1024} \rho V d^8 \frac{\psi^7}{\omega^6} \left[ \frac{1}{\left( R_0^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2 \right)^2} - \frac{1}{\left( R^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2 \right)^2} \right]
\end{aligned}$$

Equação A1



A Equação A2 mostra o torque produzido pela força de arrasto.

$$\begin{aligned}
 T_D &= \int_0^{T_D} dT_D = \frac{1}{2} \rho \omega d \int_{R_0}^R C_d \sqrt{\omega^2 r^2 + V^2} r^2 dr = \\
 &C_{D0} \frac{1}{2} \rho d \omega^2 \left[ \frac{R \left( R^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2 \right)^{3/2} - R_0 \left( R_0^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2 \right)^{3/2}}{4} + \right. \\
 &\left. + \frac{\left( \frac{V}{\omega} \right)^2 \left( R_0 \sqrt{R_0^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2} - R \sqrt{R^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2} \right)}{8} + \frac{\left( \frac{V}{\omega} \right)^4}{8} \ln \left( \frac{R_0 + \sqrt{R_0^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2}}{R + \sqrt{R^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2}} \right) \right] + \\
 &C_{D1} \frac{1}{4} \rho d^2 \omega \psi \left[ \frac{R^3 - R_0^3}{3} \right] + C_{D2} \frac{1}{8} \rho d^3 \psi^2 \left[ \frac{R \sqrt{R^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2} - R_0 \sqrt{R_0^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2}}{2} + \right. \\
 &\left. + \frac{\left( \frac{V}{\omega} \right)^4}{2} \ln \left( \frac{R_0 + \sqrt{R_0^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2}}{R + \sqrt{R^2 + \left( \frac{V}{\omega} \right)^2}} \right) \right] + \\
 &C_{D3} \frac{1}{16} \rho d^4 \frac{\psi^3}{\omega} \left[ R - R_0 + \frac{V}{\omega} \left( \arctg \left( \frac{R_0}{\frac{V}{\omega}} \right) - \arctg \left( \frac{R}{\frac{V}{\omega}} \right) \right) \right] +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& C_{D4} \frac{1}{32} \rho d^5 \frac{\psi^4}{\omega^2} \left[ \frac{R_0}{\sqrt{R_0^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2}} - \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2}} + \ln \left( \frac{R + \sqrt{R^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2}}{R_0 + \sqrt{R_0^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2}} \right) \right] + \\
& C_{L5} \frac{1}{128} \rho d^6 \frac{\psi^5}{\omega^3} \left[ \frac{R_0}{R_0^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2} - \frac{R}{R^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2} + \frac{1}{V} \left( \operatorname{arctg} \left( \frac{R_0}{\frac{V}{\omega}} \right) - \operatorname{arctg} \left( \frac{R}{\frac{V}{\omega}} \right) \right) \right] + \\
& C_{D6} \frac{1}{384} \rho d^7 \frac{\psi^6}{\omega^4} \left[ \frac{1}{\left(\frac{V}{\omega}\right)^2} \left( \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2}} - \frac{R_0}{\sqrt{R_0^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2}} \right) + \frac{R_0}{\left(R_0^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2\right)^{3/2}} - \frac{R}{\left(R^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2\right)^{3/2}} \right] + \\
& C_{D7} \frac{1}{1024} \rho d^8 \frac{\psi^7}{\omega^5} \left[ \frac{R}{2\left(\frac{V}{\omega}\right)^2 \left(R^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2\right)} - \frac{R_0}{2\left(\frac{V}{\omega}\right)^2 \left(R_0^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2\right)} + \right. \\
& \left. + \frac{1}{2\left(\frac{V}{\omega}\right)^3} \left( \operatorname{arctg} \left( \frac{R_0}{\frac{V}{\omega}} \right) - \operatorname{arctg} \left( \frac{R}{\frac{V}{\omega}} \right) \right) + \frac{R_0}{\left(R_0^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2\right)^2} - \frac{R}{\left(R^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2\right)^2} \right]
\end{aligned}$$

Equação A2