

PROJETO DE GRADUAÇÃO

MODELAGEM DINÂMICA DE CAIXA MULTIPLICADORA DE VELOCIDADES DE AEROGERADORES

Por,
Cássia Resende Silva Vitorino

Brasília, 27 de Junho de 2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

MODELAGEM DINÂMICA DE CAIXA MULTIPLICADORA DE VELOCIDADES DE AEROGERADORES

POR,

Cássia Resende Silva Vitorino

Relatório submetido como requisito para obtenção
do grau de Engenheira Mecânica.

Banca Examinadora

Prof. Alberto Carlos Guimarães Castro Diniz, UnB/ ENM
(Orientador)

Prof. Marcus Vinicius Girão de Moraes, UnB/ ENM
(Co-orientador)

Prof. Antônio Manoel Dias Henriques, UnB/ ENM

Prof. Fernando Jorge Rodrigues Neves, UnB/ ENM

Brasília, 27 de Junho de 2012

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pelas oportunidades e aos meus pais, por não medirem esforços para me dar uma ótima educação. Agradeço aos meus familiares e amigos, pelo companheirismo na caminhada da vida. Agradeço ao meu namorado, pelo incentivo para a realização deste projeto, à paciência e à compreensão no decorrer dos dias. Agradeço ao meu orientador Alberto Carlos Guimarães Castro Diniz, pelo suporte técnico, pelas sugestões e críticas, pela paciência e apoio. Sou muito grata ao professor Marcus Vinícius Girão Moraes, pelo apoio indispensável para conclusão deste trabalho, pelos conhecimentos técnicos e pelo incentivo e motivação durante a realização do projeto. Agradeço também ao engenheiro Marco Paulo Guimarães, pelo tempo cedido para ajudar na qualificação dos resultados.

Cássia Resende Silva Vitorino

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a modelagem de uma caixa multiplicadora de velocidades de um aerogerador, de modo a subsidiar a construção de um modelo completo. Além da inércia da caixa de engrenagens, são consideradas as inércias de dois componentes na turbina eólica: o rotor e o gerador. Primeiramente, é apresentada uma básica teoria sobre a turbina eólica, desde seus componentes até equações importantes para a sua modelagem, seguindo a literatura. Depois é apresentado o modelo computacional desenvolvido em Simulink, junto com a verificação e a aplicação. Esta aplicação complementa o foco deste projeto de graduação, com a simplificação dos modelos de Três-Massas em modelos de Uma-Massa seguindo a equivalência de modelos propostos por Iov *et al.* (2004).

ABSTRACT

This work focus on the modeling of a gear box of a wind turbine in order to subsidize the construction of a complete model. In addition to the inertia of the gear box, are considered the two inertia components in the wind turbine, the rotor and the generator. First, is presented a basic theory of the wind turbine, from components to relevant equations to their modeling, following the literature. After, is presented the computational model developed in Simulink, its verification and application. This application complements the goal of this graduation project, with the simplification of the models of Three-Masses in models of One-Mass equivalence following the models proposed by IOV *et al.* (2004).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 AEROGERADORES.....	3
2.1.1 Rotores de eixo vertical.....	4
2.1.2 Rotores de eixo horizontal	5
2.2 A CAIXA MULTIPLICADORA DE VELOCIDADES	6
2.2.1 Engrenagens Cilíndricas Helicoidais	6
2.2.2 Trem Epicicloidal ou Planetário	9
2.3 MODELAGEM DO SISTEMA MULTIPLICADOR DE VELOCIDADES.....	11
2.3.1 Modelo de Peeters (2006).....	12
2.3.1.1 Modelo puramente Torsional.....	16
2.3.1.2 Modelos de Multi-Corpos Rígidos com Elementos Flexíveis Discretos	16
2.3.2 Modelo do Laboratório RISO (Iov <i>et al.</i> , 2004)	17
2.3.3 Modelo de Wang <i>et al.</i> , (2009)	20
2.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS ESTUDADOS.....	22
2.5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO.....	23
2.5.1 Componentes de uma modelagem	23
2.5.1.1 Fontes	23
2.5.1.2 Diagrama de blocos	24
2.5.1.3 Saídas	24
2.5.2 Como funciona o Simulink	24
2.5.2.1 Iniciando o Simulink.....	24
3. MODELOS COMPUTACIONAIS DESENVOLVIDOS	26
3.1 CARACTERÍSTICAS PARA OS MODELOS	26
3.2 MODELO DE TRÊS-MASSAS	30
3.3 MODELO DE DUAS-MASSAS	35
3.4 MODELO DE UMA-MASSA	38
4. RESULTADOS.....	40
4.1 VERIFICAÇÃO PARA O MODELO DE INMAN (2011).....	40
4.2 VERIFICAÇÃO PARA O MODELO DE FRISWELL <i>ET AL.</i> (2011).....	48
4.3 VERIFICAÇÃO DO MODELO DO LABORATÓRIO RISO	50
5. CONCLUSÕES	57
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	58
7. ANEXOS	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Crescimento da potência dos aerogeradores nos últimos anos (Molly <i>et al.</i> , 2001)	3
Figura 2. Tipos de rotores à eixo vertical (extraído e adaptado de http://alvaro.lima.vieira.50megs.com/aerogeradoresusinaseolicas.html)	4
Figura 3. Componentes de um aerogerador (adaptado de http://www.renovables-energia.com/)	5
Figura 4. Nomenclatura de engrenagens helicoidais (Shigley <i>et al.</i> , 2005)	7
Figura 5. Ângulo de ação ou pressão (α) de duas engrenagens acopladas.....	8
Figura 6. Forças entre dentes atuando sobre uma engrenagem cilíndrica de hélice destra (Shigley <i>et al.</i> , 2005).....	9
Figura 7. Componentes de um trem epicicloidal.....	10
Figura 8. Esquema de uma turbina eólica (adaptado de Wang <i>et al.</i> , 2009)	12
Figura 9. Projeto da transmissão da turbina eólica (adaptado de Peeters, 2006).....	13
Figura 10. Caixa de engrenagens para uma turbina eólica de classe de 1 MW, com um estágio de planetário de engrenagens (1º estágio) e dois estágios de engrenagens helicoidais paralelas (2º e 3º estágio (adaptado de Peeters, 2006)	14
Figura 11. Definição da rigidez da engrenagem no plano normal a duas engrenagens em contato (adaptado de Peeters, 2006)	15
Figura 12. Modelo torsional para força de contato dos dentes entre o pinhão e a coroa (Peeters, 2006)	16
Figura 13. Representação do vetor força de contato nos dentes como uma mola linear para duas engrenagens helicoidais em contato (Peeters, 2006).....	17
Figura 14. - Modelo Três-Massas da caixa multiplicadora da turbina eólica (adaptado de Iov <i>et al.</i> , 2004).....	18
Figura 15. Diagrama equivalente da transmissão da turbina eólica no lado do gerador (Adaptado de Iov <i>et al.</i> , 2004)	19
Figura 16. Deformação do trem planetário (Wang <i>et al.</i> , 2009)	21
Figura 17. Deformação padrão da engrenagem 1 e da engrenagem 2 (Wang <i>et al.</i> , 2009)	22
Figura 18. Esquema do modelo de Três-Massas. (a) Modelo de Três-Massas. (b) Sistema de Três-Massas transformado.	30
Figura 19. Modelo Três-Massas Simulink	31
Figura 20. (a) Bloco Inércia (Inertia); (b) Caixa de diálogo desse bloco	32
Figura 21. (a) Bloco <i>Torsional Spring-Damper</i> ; (b) Caixa de diálogo desse bloco	32
Figura 22. Blocos e descrições dos blocos <i>Torque Actuator</i> e <i>Motion Sensor</i>	33
Figura 23. Caixa de diálogo dos blocos <i>Torque Actuator</i> e <i>Motion Sensor</i>	33

Figura 24. (a) Bloco <i>Simple Gear</i> ; (b) Caixa de diálogo do bloco <i>Simple Gear</i>	34
Figura 25. Subsistema Energia para o modelo de Três-Massas	35
Figura 26. Esquema básico do sistema de Duas-Massas	35
Figura 27. Modelo Duas-Massas Simulink	36
Figura 28. Subsistema Energia para o modelo de Duas-Massas	37
Figura 29. Modelo Uma-Massa Simulink.....	39
Figura 30. Modelo proposto por Inman (2001)	40
Figura 31. Modelo em Simulink do caso de Inman (2001).....	44
Figura 32. Subsistema Conj_1 para o modelo de Inman (2001).....	44
Figura 33. Resposta do componente 1 da Figura 30 a um impulso, ilustrando os efeitos da rotação de um corpo rígido.	45
Figura 34. Resposta do componente 2 da Figura 30 a um impulso, ilustrando os efeitos da rotação de um corpo rígido.....	45
Figura 35. Resposta do componente 3 da Figura 30 a um impulso, ilustrando os efeitos da rotação de um corpo rígido.	46
Figura 36. Resposta do componente 1 da Figura 30 a um impulso com efeito da vibração	46
Figura 37. Resposta do componente 2 da Figura 30 a um impulso com efeito da vibração	47
Figura 38. Resposta do componente 3 da Figura 30 a um impulso com efeito da vibração	47
Figura 39. Modelo em Simulink para o modelo de Friswell et al. (2011).....	49
Figura 40. Subsistema Energia para o modelo de Três-Massas	50
Figura 41. Gráfico da Energia Total do sistema em função da Velocidade Angular para modelo de Três-Massas	51
Figura 42. Modelo Friswell para Duas-Massas.....	52
Figura 43. Subsistema Energia para o modelo de Duas-Massas	52
Figura 44. Gráfico da Energia Total do sistema em função da Velocidade Angular para modelo de Duas-Massas	53
Figura 45. Modelo Friswell para Uma-Massa.....	54
Figura 46. Subsistema Energia para o modelo de Uma-Massa	55
Figura 47. Gráfico da Energia Total do sistema em função da Velocidade Angular para modelo de Uma-Massa	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características da turbina eólica do modelo de Freitas (2008)	27
Tabela 2. Momentos de inércia dos rotores de turbinas com diferentes raios (Freitas, 2008)	27
Tabela 3. Parâmetros estimados para o modelo de Três-Massas (Todorov, 2010)	28
Tabela 4. Dados disponibilizados por Iov <i>et al.</i> (2004).....	28
Tabela 5. Dados disponíveis no modelo de Friswell <i>et al.</i> (2011).....	29
Tabela 6. Parâmetros para a simulação do modelo.....	37
Tabela 7. Dados para o modelo de Uma-Massa.....	39
Tabela 8. Dados do caso de Inman (2001).....	41
Tabela 9. Autovalores do trabalho de Inman (2001).....	42
Tabela 10. Solução desacoplada do estudo de caso Inman (2001)	43
Tabela 11. Dados da caixa de engrenagens (Friswell <i>et al.</i> , 2011)	48
Tabela 12. Frequências naturais obtidas do trabalho de Friswell <i>et al.</i> (2011).....	48
Tabela 13. Frequência natural do sistema de Duas-Massas	53

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área	$[m^2]$
C_p	Coefficiente de força	
D, d	Diâmetro da engrenagem	$[mm]$
F	Força	$[kN]$
F_c	Força de contato do dente na engrenagem	$[kN]$
G	Constante da gravidade	$[m/s^2]$
h	Altitude acima do mar	$[m]$
H	Potência	$[kW]$
J	Momento de inércia	$[kg.m^2]$
k	Constante de mola indicando a rigidez torcional	
K	Flexibilidade torsional	
n	Velocidade angular	$[rpm]$
P	Pressão atmosférica padrão no nível do mar	$[kg/m^3]$
p_n	Passo circular normal	$[mm]$
p_t	Passo circular transversal	$[mm]$
p_x	Passo axial	$[mm]$
r	Raio da base do círculo primitivo da engrenagem	$[mm]$
R	Constante específica do gás para o ar	$[J/K.mol]$
T	Torque	$[kN.m]$
$Temp$	Temperatura	$[K]$
u	Deformação de rotação	$[rpm]$
V	Velocidade tangencial	$[m/s]$
X	Relação de velocidade na ponta da pá	
W	Força atuante no dente	$[kN]$
Z	Número de dentes da engrenagem	

Símbolos Gregos

α	Ângulo de pressão	$[^\circ]$
α_n	Ângulo de pressão na direção normal	$[^\circ]$
α_t	Ângulo de pressão na direção transversal	$[^\circ]$
β	Ângulo de hélice	$[^\circ]$
δ	Deformação	
ε	Razão-Base	
η	Eficiência	
ρ	Densidade	$[m^3/kg]$
φ	Ângulo de rotação	$[^\circ]$

Subscritos

a	direção axial
$Beltz$	referente à proposta de Beltz
bn	tangente ao círculo base (b) e normal para o perfil da envolvente (n)
c	referente ao suporte de planetas
e	referente ao eixo

<i>gb</i>	referente à caixa de engrenagens
<i>gear,g</i>	referente à engrenagem
<i>gen</i>	referente ao gerador
<i>i</i>	referente às engrenagens planetas
<i>in</i>	entrada
<i>m</i>	referente ao mancal
<i>máx</i>	máxima
<i>motor</i>	referente ao motor
<i>n</i>	direção normal
<i>out</i>	saída
<i>pa</i>	plano de ação
<i>pc</i>	referente ao suporte de planetas
<i>ponta pá</i>	referente à ponta da pá
<i>r</i>	referente à direção radial
<i>res</i>	resultante
<i>rpm</i>	rotações por minuto
<i>rw</i>	referente à engrenagem anular
<i>se</i>	rigidez equivalente
<i>sgen</i>	referente ao eixo do gerador
<i>shaft</i>	referente ao eixo
<i>sun</i>	referente à engrenagem solar
<i>swtr</i>	referente ao eixo da turbina eólica
<i>t</i>	direção transversal
<i>vento</i>	referente ao vento
<i>wtr</i>	referente ao rotor da turbina eólica

Sobrescritos

` Equivalente

Siglas

BC	Círculo Base
LTI	Modelos linearmente invariantes no tempo
PG1	Projeto de graduação 1
PG2	Projeto de graduação 2
RISO	Laboratório Nacional de Energia Sustentável da Universidade de Aalborg Dinamarca

1. INTRODUÇÃO

Uma turbina eólica, também chamada de aerogerador, é um mecanismo que converte a energia cinética do vento em energia elétrica pela rotação de suas pás.

A energia cinética dos ventos é utilizada desde a antiguidade para a moagem de grãos e a irrigação. Contudo foi após a crise do petróleo de 1970 que se buscou alternativas limpas para a geração de eletricidade.

Segundo o Fórum capixaba de mudanças climáticas e uso racional da água (FCMC) (2011), a energia eólica pode garantir 10% das necessidades mundiais de eletricidade até 2020, criar 1,7 milhões de novos empregos e reduzir a emissão global de dióxido de carbono na atmosfera em mais de 10 bilhões de toneladas.

Ainda segundo FCMC (2011), no âmbito nacional, o estado do Ceará destaca-se por ter sido um dos primeiros locais a realizar um programa de levantamento do potencial eólico, que já é consumido por cerca de 160 mil pessoas. Outras medições foram feitas também no Paraná, Santa Catarina, Minas Gerais, litoral do Rio de Janeiro e de Pernambuco e na Ilha de Marajó. A capacidade instalada no Brasil é de 20,3 MW, com turbinas eólicas de médio e grande porte conectadas à rede elétrica.

O desenvolvimento de vários modelos de pequeno porte de turbinas eólicas começou no início da década de 1980 (Peeters, 2006) e continua até os dias de hoje na busca do seu melhor aproveitamento. As turbinas eólicas tem se popularizado rapidamente devido ao fato de a energia elétrica produzida por elas ser ecologicamente sustentável. Mas para que esse tipo de energia seja classificada como uma das fontes essenciais de energia elétrica, são necessários aprimoramentos para que ela seja economicamente viável.

Para tanto, faz-se necessário o estudo dos diferentes componentes dos aerogeradores, suas formas e modelos bem como os diferentes modelos propostos na literatura para o estudo dinâmico. Este projeto de graduação se concentra apenas na modelagem da caixa multiplicadora de velocidades. Tem como objetivo modelar a caixa multiplicadora de um aerogerador, para subsidiar a construção de um modelo completo.

De acordo com os objetivos propostos, a fase inicial do trabalho foi dedicada à compreensão do funcionamento dos aerogeradores e da caixa multiplicadora de velocidades e à construção de um modelo dinâmico representativo desse componente.

Posteriormente foi realizado o estudo do comportamento dinâmico do modelo da caixa multiplicadora, utilizando a literatura existente e testes de modelos em Simulink. Este estudo teve dois objetivos: por um lado servir de verificação do modelo construído, através da confrontação dos seus

resultados obtidos com os resultados da literatura existente; e aprimorar o uso do Simulink, para gerar um modelo eficiente e correto.

A última parte do trabalho contém a elaboração dos modelos computacionais e teste em aplicações simples.

A estrutura do relatório reproduz fielmente o desenvolvimento do trabalho conforme acabou de ser apresentado. Assim, após este capítulo introdutório, o relatório inclui quatro capítulos adicionais com o seguinte conteúdo:

- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: apresenta a teoria que foi utilizada para o entendimento do problema e a criação das soluções;
- Capítulo 3 – Modelos Computacionais Desenvolvidos: explica e desenvolve os modelos desenvolvidos, as estratégias adotadas e os próprios modelos;
- Capítulo 4 – Resultados: apresenta os resultados obtidos para os modelos usando verificações simples de trabalhos encontrados na literatura;
- Capítulo 5 – Conclusão: síntese dos resultados alcançados e indicação de trabalhos futuros complementares e suplementares.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AEROGERADORES

Um aerogerador é um dispositivo destinado a converter a energia cinética do vento em energia elétrica. A quantidade de energia gerada depende da velocidade do vento, do diâmetro do rotor e do rendimento total do sistema.

Os primeiros aerogeradores foram construídos na Alemanha no início dos anos 50 pelo construtor Allgaier, com o intuito de fornecer energia para fazendas. Eles eram de baixa potência, cerca de 7 kW e de pequeno porte, cerca de 10 metros de diâmetro (Pavinatto, 2005).

Nos anos 60, o baixo preço dos combustíveis fósseis, principalmente o petróleo, tornou as tecnologias eólicas economicamente desinteressantes (Heier, 1998). Já nos anos 70, com a crise do petróleo, aumentaram incentivos às pesquisas e ao desenvolvimento nesta área. Ainda sim, na década de 80, a potência instalada de energia eólica era muito pequena.

Somente na década de 90, o dinamarquês Riisager projetou e construiu um aerogerador de 22 kW, usando peças de automóveis e tratores, tornando o projeto de baixo custo. Com isso, foi possível uma produção em massa de aerogeradores. A busca pela melhor eficiência fez com que fossem desenvolvidas máquinas com potências entre 500 e 1500 kW (Hansen *et al.*, 2001). Assim, desde então, a produção de aerogeradores vem crescendo na potência dos equipamentos e na quantidade produzida, como mostra a Figura 1.

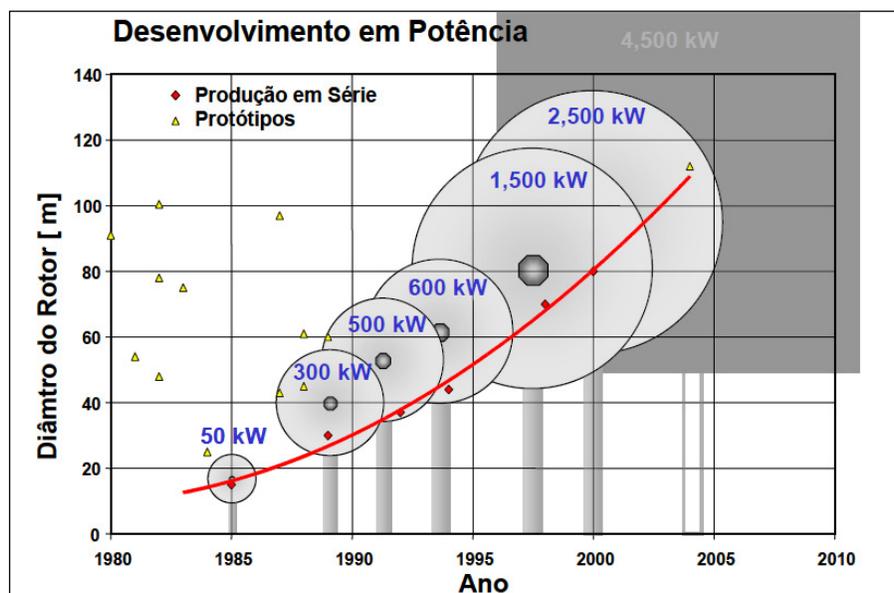


Figura 1. Crescimento da potência dos aerogeradores nos últimos anos (Molly *et al.*, 2001)

Os aerogeradores disponíveis no mercado são classificados em dois grupos em função da direção do eixo de rotação de seu rotor: vertical e horizontal, ou seja, transversal e paralelo à direção do vento. Os aerogeradores verticais operam com velocidade de rotação aproximadamente constante, ou seja, utilizam o conceito Dinamarquês (Marques *et al.*, 2002). Este é um conceito em que a turbina eólica funciona com a velocidade de rotação constante conectada a um gerador assíncrono de corrente alternada. Neste caso, o gerador é diretamente acoplado a rede elétrica utilizando somente um *soft-starter* para limitar a corrente durante a etapa de conexão. Um *soft-starter* é um equipamento eletrônico destinado ao controle da partida de motores elétricos de corrente alternada. Já os aerogeradores horizontais operam com velocidade de rotação variável, ou seja, seus rotores podem girar em qualquer velocidade dentro da faixa de operação admitida. Isto é possível graças à inclusão de inversores eletrônicos de potência para acoplamento do gerador elétrico com a rede elétrica, melhorando o rendimento na conversão da energia dos ventos (Carlin *et al.*, 2001).

Os rotores diferem em seu custo relativo de produção, eficiência, e na velocidade do vento em que têm sua maior eficiência.

Os rotores de eixo vertical são geralmente mais baratos que os de eixo horizontal, pois apenas o rotor gira enquanto o gerador fica fixo. No entanto, os rotores verticais são menos eficientes que os horizontais (Oliveira, 2008).

2.1.1 Rotores de eixo vertical

Os rotores de eixo vertical são aqueles cujo eixo de rotação é perpendicular à direção do vento incidente e, portanto, à superfície da terra. A principal vantagem reside na sua capacidade de funcionar seja qual for a direção do vento, não sendo necessário mecanismos de orientação que onerem o custo do equipamento.

Os tipos de rotores de eixo vertical são Savonius, Darrieus e H e são apresentados na Figura 2.

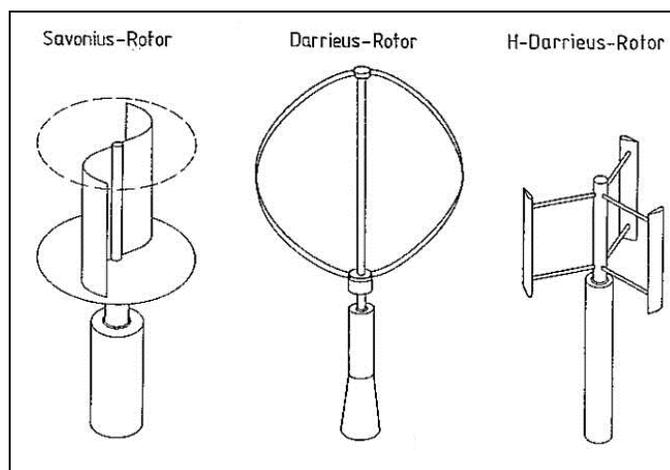


Figura 2. Tipos de rotores à eixo vertical (extraído e adaptado de <http://alvaro.lima.vieira.50megs.com/aerogeradoresusinaeolicas.html>)

O rotor do tipo Savonius, um dos que tem a concepção mais simples é movido principalmente pela força de arrasto do ar, sua maior eficiência se dá em ventos fracos e pode chegar a 20%.

O rotor do tipo Darrieus é constituído por 2 ou 3 pás. Funciona pela força de sustentação tendo assim uma eficiência melhor que a do rotor Savonius, podendo chegar a 40% em ventos fortes.

O rotor do tipo H é o modelo de turbinas eólicas com rotores de eixo vertical mais simples. Este modelo tem duas ou três pás retas.

2.1.2 Rotores de eixo horizontal

Os rotores de eixo horizontal são aqueles cujo eixo de rotação é paralelo à direção dos ventos, ou seja, são paralelos à superfície da terra. São utilizados em aplicações de baixa e alta potência e operam com maior potência por unidade de área de captação do vento, tendo ainda, normalmente, melhor rendimento que os rotores de eixo vertical. Isso os torna excelente para aplicações que requeiram altas velocidades de rotação, como a geração de energia elétrica.

Um sistema eólico deste tipo é constituído de um mastro para a sustentação do conjunto, um rotor e suas pás, um multiplicador de velocidades e um gerador elétrico.

O rotor é constituído pelas **pás** e por um eixo. O vento passa pelas pás, que transformam a energia cinética do vento em energia cinética de rotação do **eixo**. Este, por sua vez, é conectado a um **multiplicador de velocidades**. Do multiplicador, a energia mecânica é transmitida a um **gerador** elétrico, que a transforma em energia elétrica para posterior injeção na rede elétrica. Tais componentes são melhores descritos a seguir e apresentados na Figura 3.

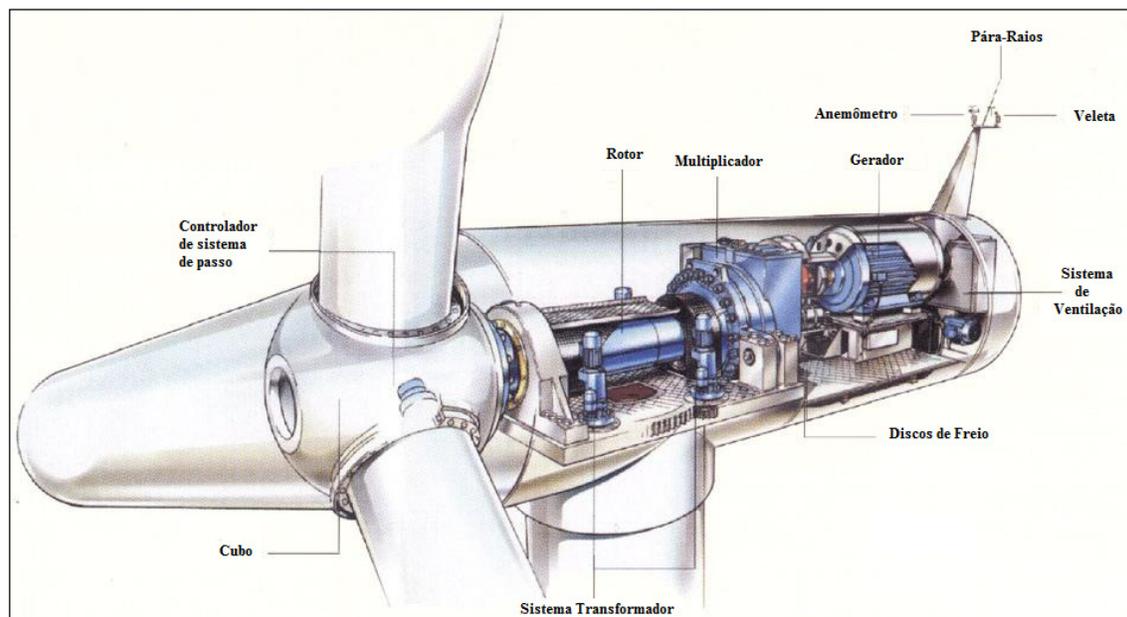


Figura 3. Componentes de um aerogerador (adaptado de <http://www.renovables-energia.com/>)

Pás do rotor: transformam a energia do vento em energia rotacional no eixo;

Eixo: o eixo da turbina eólica é conectado ao cubo do rotor. Quando o rotor gira, o eixo gira junto. Desse modo, o rotor transfere sua energia mecânica rotacional para o eixo, que está conectado a um gerador elétrico na outra extremidade;

Caixa Multiplicadora: Responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o gerador. Alguns geradores não utilizam este componente, então a transmissão de energia se dá pelo eixo do rotor que é acoplado diretamente ao gerador; e

Gerador: Responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica.

Mundialmente, existem dezenas de fabricantes de turbinas eólicas. Entre eles pode-se citar: Enercon (Alemanha), Neg Micon (Alemanha), Vestas (Dinamarca), Nordex (Alemanha), Jacobs (Alemanha), Bergey Windpower (Estados Unidos), Zond (Estados Unidos), Wobben Windpower (Brasil).

Existe uma subsidiária brasileira da Wobben WindPower - Enercon (empresa alemã) instalada na cidade de Sorocaba - SP. Inicialmente, esta fábrica dedicou-se apenas à produção das pás para aerogeradores de grande porte, visando essencialmente à exportação. Em 2000, foram produzidos os primeiros aerogeradores brasileiros completos, tanto para exportação quanto para o mercado interno. Existe também a Enersud fabricante de turbinas de pequeno porte.

2.2 A CAIXA MULTIPLICADORA DE VELOCIDADES

A caixa multiplicadora dos aerogeradores é responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o gerador e necessária para que a velocidade de entrada seja multiplicada para se adequar à velocidade necessária para o gerador elétrico. Normalmente são constituídas por eixos, engrenagens de transmissão e acoplamentos.

As engrenagens de dentes retos e as helicoidais são usadas em caixas de engrenagem de aerogeradores para compor estágios de engrenagens paralelas ou estágios de engrenagens planetárias (Peeters, 2006).

2.2.1 Engrenagens Cilíndricas Helicoidais

As engrenagens helicoidais têm dentes inclinados em relação ao eixo de rotação (Shigley *et al.*, 2005). Podem ser utilizadas nas mesmas aplicações que as engrenagens de dentes retos, porém sem serem tão barulhentas quanto àquelas, devido ao engajamento mais gradual dos dentes durante o engranzamento.

A Figura 4 representa uma porção da vista do topo de uma cremalheira helicoidal, que apresenta os mesmos ângulos do dente de uma engrenagem helicoidal. As linhas *ab* e *cd* são as linhas de centro de dois dentes helicoidais adjacentes tomados sobre o mesmo plano primitivo.

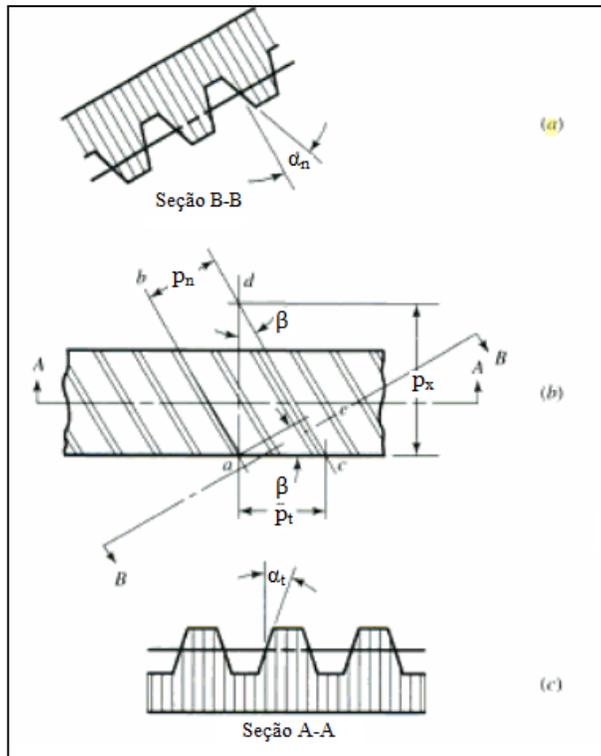


Figura 4. Nomenclatura de engrenagens helicoidais (Shigley *et al.*, 2005)

O ângulo β é o ângulo de hélice. A distância ac é o passo circular transversal p_t , no plano de rotação. A distância ae é o passo circular normal p_n e está relacionada com o passo circular transversal da seguinte forma. A distância ad é chamada de passo axial p_x .

$$p_t = \frac{\pi d}{Z} \quad (1)$$

$$p_n = p_t \cos \beta \quad (2)$$

$$p_x = \frac{p_t}{\tan \beta} \quad (3)$$

O ângulo de ação ou pressão (α) define a direção da força que a engrenagem motora exerce sobre a engrenagem movida. A Figura 5 mostra que o pinhão exerce uma força na coroa, formando um ângulo (α) com a tangente comum às circunferências primitivas (tracejadas na Figura 5).

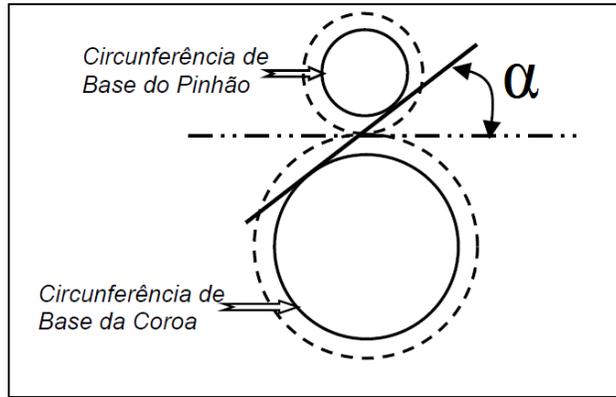


Figura 5. Ângulo de ação ou pressão (α) de duas engrenagens acopladas.

Este ângulo geralmente apresenta os valores de 20° ou 25° (Shigley *et al.*, 2005). O ângulo de pressão na direção normal, α_n , é diferente do ângulo de pressão na direção de rotação α_t (esses dois ângulos são mostrados na Figura 4), devido à angularidade dos dentes. Esses ângulos se relacionam por meio da equação:

$$\cos \beta = \frac{\tan \alpha_n}{\tan \alpha_t} \quad (4)$$

A Figura 6 consiste em uma visão tridimensional das forças atuantes contra um dente de uma engrenagem helicoidal. As três componentes da força total de dente W são:

$$W_r = W \sin \alpha_n \quad (5)$$

$$W_t = W \cos \alpha_n \cos \beta \quad (6)$$

$$W_a = W \cos \alpha_n \sin \beta \quad (7)$$

Onde W é a força no dente; W_r é a força no dente na direção radial; W_t é a força no dente na direção tangencial; e W_a é a força no dente na direção axial.

De outro ponto de vista, é possível representar essas equações em função da componente W_t . Assim, as equações (5) a (7) se tornam:

$$W_r = W_t \sin \alpha_n \quad (8)$$

$$W_a = W_t \tan \beta \quad (9)$$

$$W = \frac{W_t}{\cos \alpha_n \sin \beta} \quad (10)$$

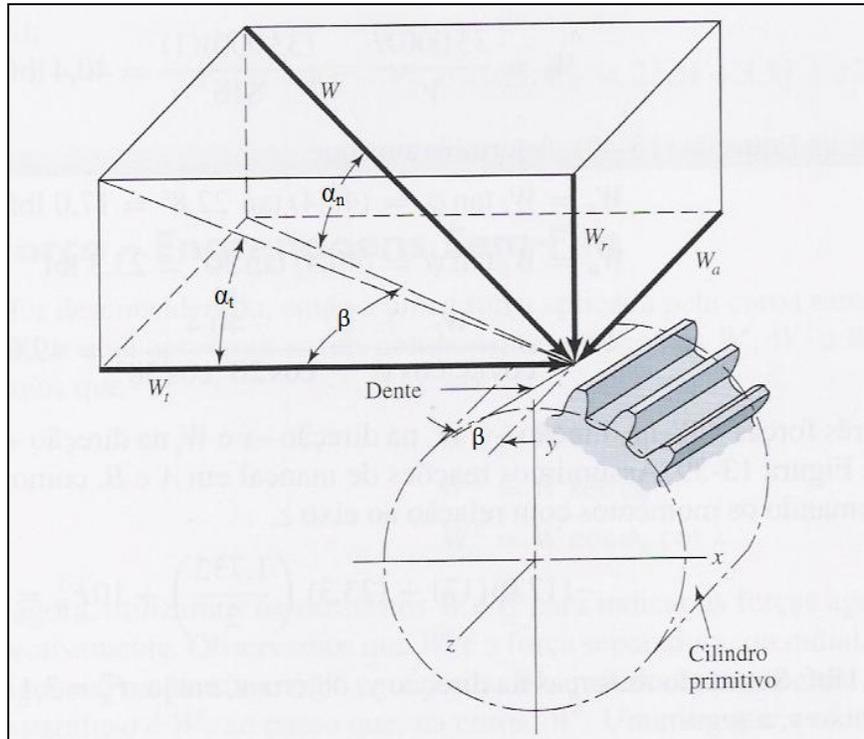


Figura 6. Forças entre dentes atuando sobre uma engrenagem cilíndrica de hélice direita (Shigley *et al.*, 2005)

As velocidades de deslocamento dos planos da engrenagem motora (1) e da movida (2) são:

$$V_1 = \Omega_1 r_1 \quad (11)$$

$$V_2 = \Omega_2 r_2 \quad (12)$$

$$V_1 \cos \beta_1 = V_2 \cos \beta_2 \quad (13)$$

$$\frac{\Omega_1}{\Omega_2} = \frac{r_2 \cos \beta_2}{r_1 \cos \beta_1} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (14)$$

Onde V é a velocidade tangencial; Ω é a velocidade angular; r é o raio do cilindro primitivo; β é o ângulo de hélice; Z é o número de dentes da engrenagem.

2.2.2 Trem Epicicloidal ou Planetário

O trem epicicloidal de engrenagens é um mecanismo constituído de engrenagens engranzadas (Albuquerque, 1980), onde há, pelo menos, um eixo suportado por um órgão animado de rotação. Ele é constituído principalmente por Porta Planetário ou Braço, Engrenagem Solar, Planetas e Engrenagem coroa ou anular que são apresentados na Figura 7.

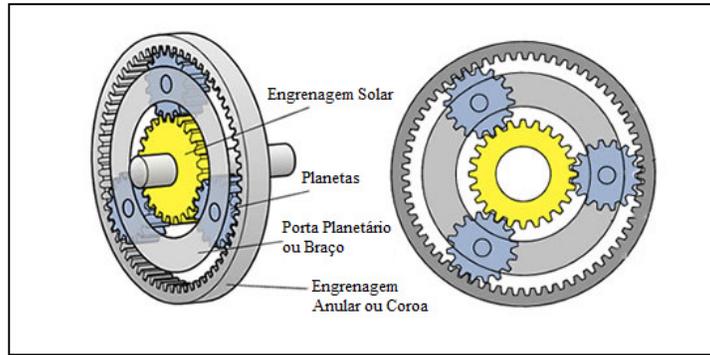


Figura 7. Componentes de um trem epicicloidal

Existem dois tipos de Trem Epicicloidal de Engrenagens, o Elementar e o Simples. No primeiro não existe a engrenagem anular ou a solar. Já no segundo o trem possui os quatro elementos.

Qualquer que seja o tipo de trem epicicloidal, a paralisação do suporte conduz à montagem comum de engrenagens (Albuquerque, 1980), isto é, aos trens de engrenagem simples ou compostos, uma vez que todas as engrenagens ficarão com suas árvores suportadas por peças imóveis.

O trem de engrenagens planetárias é muito usado em turbinas eólicas, porque ele transfere mais torque para a mesma quantidade de material necessário no projeto, em comparação com os estágios paralelos. Além de a redução de peso ser favorável para este uso, as cargas nos rolamentos são reduzidas e as engrenagens planetárias mais compactas.

O trem com suporte imobilizado é chamado trem-base e a sua razão ϵ , razão-base. ϵ é um valor algébrico, exigindo que se considere o sentido das rotações das engrenagens. Seu valor é calculado de acordo com a Equação (15). A razão-base será positiva quando, feita a hipótese de ser imobilizado o suporte, o produto do número de dentes das engrenagens motoras e o produto dos dentes das engrenagens movidas for maior que zero, ou seja, o sentido de rotação da engrenagem de entrada é o mesmo da engrenagem de saída. E assim, será negativa quando a razão-base for menor que zero, ou seja, o sentido de rotação de entrada é o oposto do da saída.

$$\epsilon = \frac{\text{produto do número de dentes de eng. motoras}}{\text{produto do número de dentes de eng. movidas}} \quad (15)$$

A velocidade angular e o rendimento deste sistema são calculados de acordo com as equações a seguir, considerando que não haja perdas entre o motor e o primeiro eixo.

$$\Omega_b = \Omega_a \frac{Z_a}{Z_b} \quad (16)$$

$$\eta_b = \eta_a \eta_{\text{componentes}} \quad (17)$$

Onde Ω_b é a velocidade angular na engrenagem b; Ω_a é a velocidade angular na engrenagem a; Z_a é o número de dentes na engrenagem a; Z_b é o número de dentes na engrenagem b; η_b é a eficiência de

transmissão de energia na engrenagem b; η_a é a eficiência de transmissão de energia na engrenagem a; e $\eta_{componentes}$ é a eficiência de transmissão de energia nos componentes do sistema.

E para o cálculo das potências, tem-se

$$H_a = \eta_a H_{motor} \quad (18)$$

Onde H_a é a potência na engrenagem a; e H_{motor} é a potência do motor.

O cálculo dos torques T é dado por

$$T_a = 9549,27 \frac{H_a}{\Omega_a} \quad (19)$$

2.3 MODELAGEM DO SISTEMA MULTIPLICADOR DE VELOCIDADES

Segundo Dutra (2008), a transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, possui a finalidade de transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o gerador. É composta por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos.

O projeto tradicional de uma turbina eólica consiste em colocar a caixa de transmissão mecânica entre o rotor e o gerador, de forma a adaptar a baixa velocidade do rotor à velocidade de rotação mais elevada dos geradores convencionais.

A velocidade angular dos rotores varia na faixa de 20 a 150 rpm, devido às restrições de velocidade na ponta da pá (*tip speed*). Entretanto, geradores (sobretudo geradores síncronos) trabalham em rotações muito mais elevadas (em geral, entre 1200 a 1800 rpm), tornando necessária a instalação de um sistema de multiplicação entre os eixos (CRESESB, 2008).

Mais recentemente, alguns fabricantes desenvolveram com sucesso aerogeradores sem a caixa multiplicadora e abandonaram a forma tradicional de construí-los. Assim, ao invés de utilizar a caixa de engrenagens com alta relação de transmissão, necessária para alcançar a elevada rotação dos geradores, utiliza-se geradores multipolos de baixa velocidade e grandes dimensões (CRESESB, 2008).

Os dois tipos de projetos possuem suas vantagens e desvantagens e a decisão em usar o multiplicador ou fabricar um aerogerador sem caixa de transmissão é, antes de tudo, uma questão de filosofia do fabricante. Neste trabalho a transmissão de energia contará com a caixa multiplicadora, por ser ainda mais comum. Com ela a transmissão do aerogerador terá menores dimensões, sendo sua instalação realizada de maneira mais simples, além de menor custo de fabricação e de menor peso.

Um esquema típico de uma turbina eólica de rotor de eixo horizontal é mostrado na Figura 8. A energia do vento com velocidade V_0 paralela com o eixo x é transformada para o rotor e para transmissão através do eixo de baixa velocidade em forma de torque. Na transmissão, o torque é

introduzido pelo suporte de planetas. A engrenagem solar se move em alta velocidade com a engrenagem anular, que é fixa. Então, o torque é transmitido através das engrenagens 1, 2, 3 e 4, como mostra a Figura 8, com uma velocidade cada vez maior até atingir a velocidade nominal do gerador. Todo o sistema é suportado por 8 rolamentos (B1, B2, ..., B8) (Wang *et al.*, 2009).

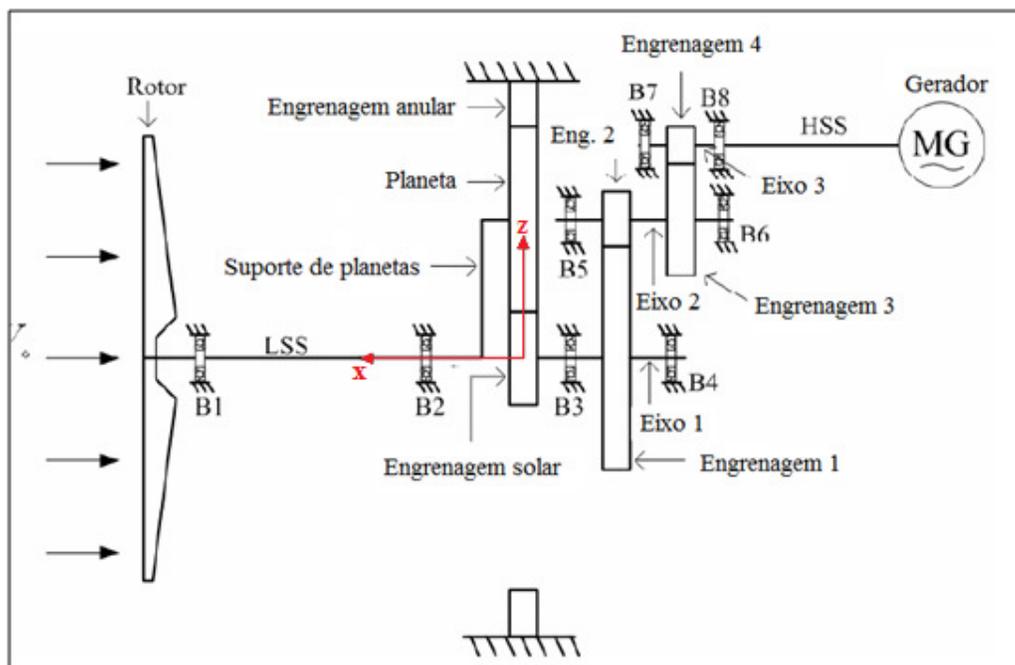


Figura 8. Esquema de uma turbina eólica (adaptado de Wang *et al.*, 2009)

O estudo dos aerogeradores é de grande relevância e é possível encontrar trabalhos publicados sobre as várias partes que compõe uma turbina eólica. Para o foco deste projeto, trabalhos existentes sobre modelagens de caixas multiplicadoras de velocidades em turbinas eólicas são apresentados a seguir.

2.3.1 Modelo de Peeters (2006)

Em sua tese, Peeters (2006) simula dinamicamente os carregamentos na transmissão de uma turbina eólica.

No sistema considerado por ele, o eixo principal da transmissão do aerogerador conecta o cubo do rotor com a caixa de engrenagens, como mostra a Figura 9. Esse eixo principal introduz torque a baixa velocidade dentro da caixa de engrenagens. Então, pela relação de transmissão das engrenagens, o torque de baixa velocidade é multiplicado e sai da caixa multiplicadora como torque de alta velocidade.

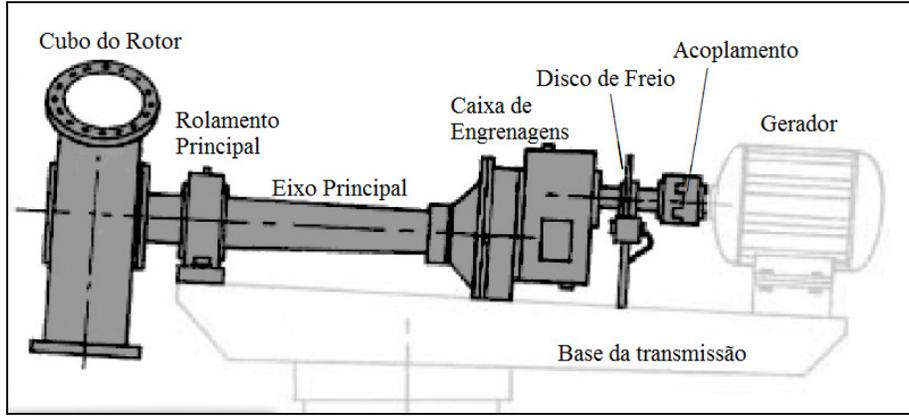


Figura 9. Projeto da transmissão da turbina eólica (adaptado de Peeters, 2006)

A Equação 20 descreve essa transformação.

$$T_{in}\Omega_{in} = T_{out}\Omega_{out}\eta_{gb} \quad (20)$$

Em que T_{in} é o torque de entrada; Ω_{in} é a velocidade angular na entrada; T_{out} é o torque de saída; Ω_{out} é a velocidade angular na saída; e η_{gb} é a eficiência da caixa de engrenagens.

A caixa de engrenagens transporta a reação do torque resultante que é a diferença de T_{in} e T_{out} .

$$T_{res} = T_{in} - T_{out}$$

$$T_{res} = T_{in} \left(1 - \frac{\Omega_{in}}{\Omega_{out}} \frac{1}{\eta_{gb}} \right) \quad (21)$$

$$T_{res} = T_{in} \left(1 - \frac{1}{k\eta_{gb}} \right)$$

Em que T_{res} é o torque resultante; k é a relação de transmissão das engrenagens.

Todas as engrenagens planetas são conectadas à engrenagem anular bem como à solar e a transferência de cargas resulta em um torque de saída (T_{sun}) e em uma reação do torque na engrenagem anular (T_{res}), esquema apresentado pela Figura 7. O suporte de engrenagens planetas é usado como entrada e a solar como saída, enquanto a anular é fixa (Peeters, 2006).

$$\Omega_{sun} = \Omega_{pc} \left(1 + \frac{Z_{rw}}{Z_{sun}} \right) \quad (22)$$

$$T_{out} = T_{sun} = \frac{T_{in}}{k} = \frac{T_{in}}{\left(1 + \frac{Z_{rw}}{Z_{sun}} \right)} \quad (23)$$

$$T_{res} = T_{rw} = T_{in} \left(1 - \frac{1}{k} \right) = T_{in} \frac{Z_{rw}}{Z_{sun} + Z_{rw}} \quad (24)$$

Em que Ω_{pc} é a velocidade angular na entrada (suporte de planetas); Ω_{sun} é a velocidade angular na saída (solar); Z_{rw} é o número de dentes na engrenagem anular; Z_{sun} é o número de dentes da engrenagem solar; T_{rw} é o torque na engrenagem anular.

O primeiro estágio tem engrenagens de dente reto e seu anular é fixo na caixa de engrenagens. O segundo estágio é de engrenagens paralelas helicoidais, em que sua coroa é impulsionada pela engrenagem solar da primeira fase e seu pinhão impulsiona a coroa do terceiro estágio, que é também de engrenagens helicoidais paralelas. O pinhão do último estágio é conectado ao gerador. Os estágios de engrenagens paralelas helicoidais causam uma mudança na direção da rotação, fazendo com que o gerador tenha a mesma direção de rotação do rotor. O sistema com os estágios é mostrado na Figura 10.

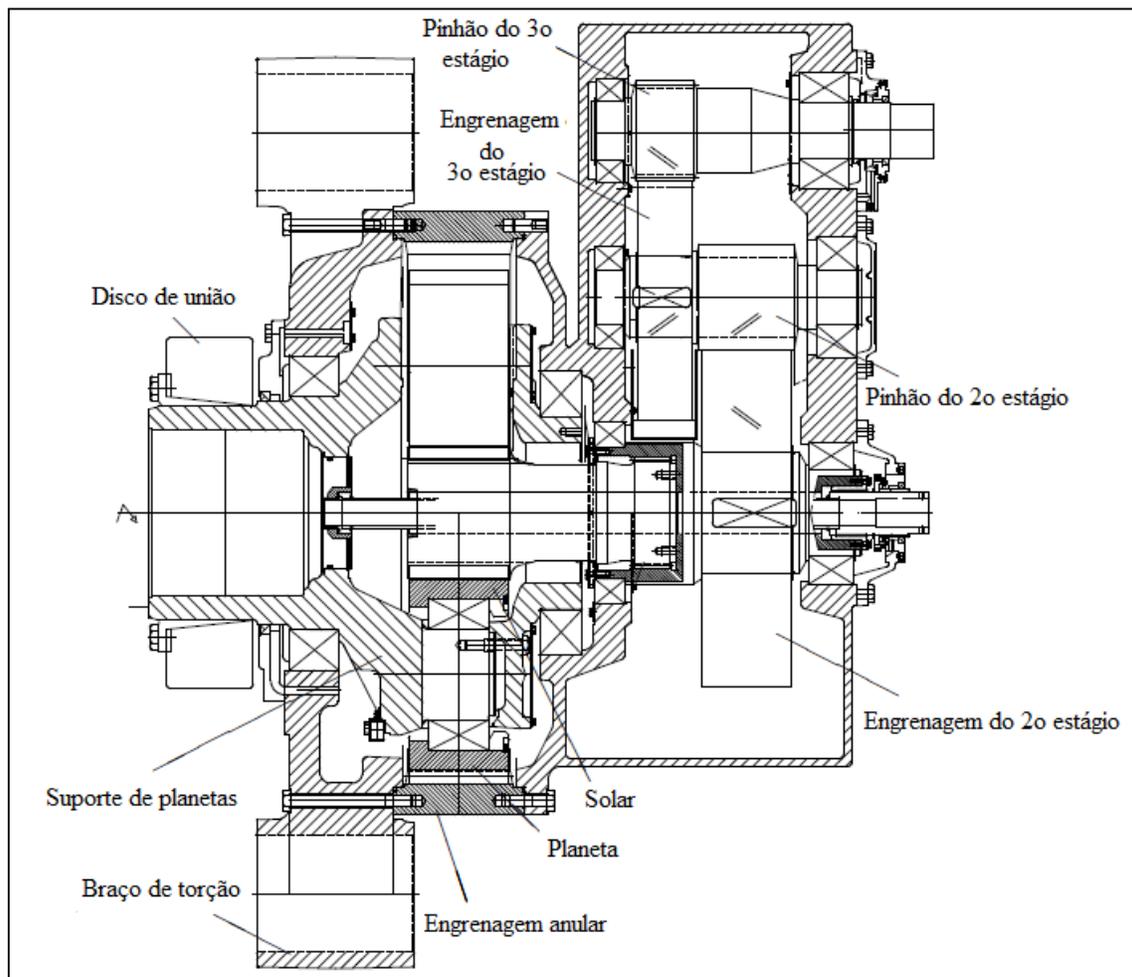


Figura 10. Caixa de engrenagens para uma turbina eólica de classe de 1 MW, com um estágio de planetário de engrenagens (1º estágio) e dois estágios de engrenagens helicoidais paralelas (2º e 3º estágio) (adaptado de Peeters, 2006)

As partes da caixa de engrenagens vão deformar de acordo com sua respectiva componente de carga, seja axial, torcional, cortante e de flexão.

A relação entre carga e deformação resultante corresponde à flexibilidade de cada parte que será discutido a seguir.

Flexibilidade dos dentes: o valor da rigidez é chamado de K_{gear} e é definido como a média da força normal distribuída dos dentes no plano normal causando deformação na envolvente dos dentes dos pares de engrenagem. Essa deformação é causada pela flexão do dente em contato com duas engrenagens, no qual uma é fixada e a outra é carregada.

$$F_{bn} = \delta K_{gear} \quad (25)$$

Onde F_{bn} é a força de contato no dente na respectiva engrenagem ao longo da linha de contato e, conseqüentemente, tangente à circunferência de base (b) e normal para o perfil de envolvente (n); δ é a deformação relativa de duas engrenagens.

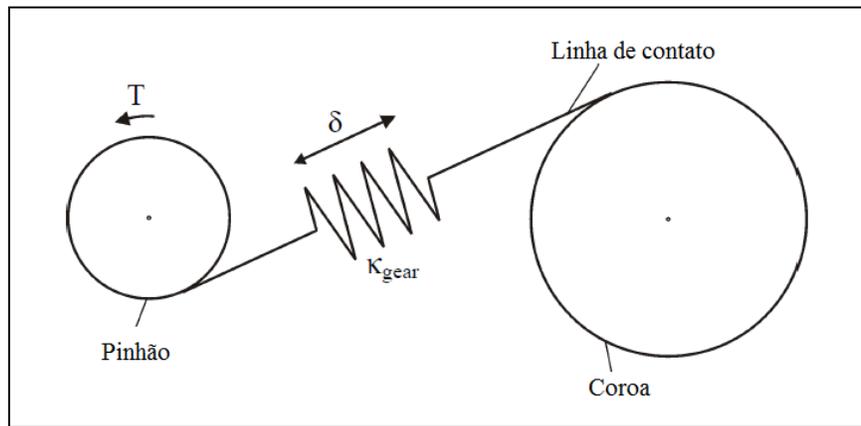


Figura 11. Definição da rigidez da engrenagem no plano normal a duas engrenagens em contato (adaptado de Peeters, 2006)

Flexibilidade dos rolamentos: a flexibilidade do rolamento é tipicamente representada por uma rigidez individual para cada diferente carregamento em cada componente, assim cada carga gera um tipo de deslocamento no rolamento.

Flexibilidade dos componentes: este representa a relação entre as cargas e as deformações correspondentes a todas as outras partes da caixa de engrenagens, como eixos, suporte de planetas, chavetas, entre outras.

O erro de transmissão é definido como a diferença entre a atual e a ideal posição da engrenagem, onde a situação ideal é determinada pela a relação de transmissão e uma ação conjugada de malha perfeitamente sem erros ou desvios.

2.3.1.1 Modelo puramente Torsional

Modelos torsionais podem ser usados para a análise dinâmica do torque na caixa de engrenagens. A flexibilidade torsional de um eixo (K_{shaft}) entre dois corpos está incluída na equação do torque como mostrado na Equação (62). O amortecimento material é desconsiderado neste modelo, que é melhor representado na Figura 12.

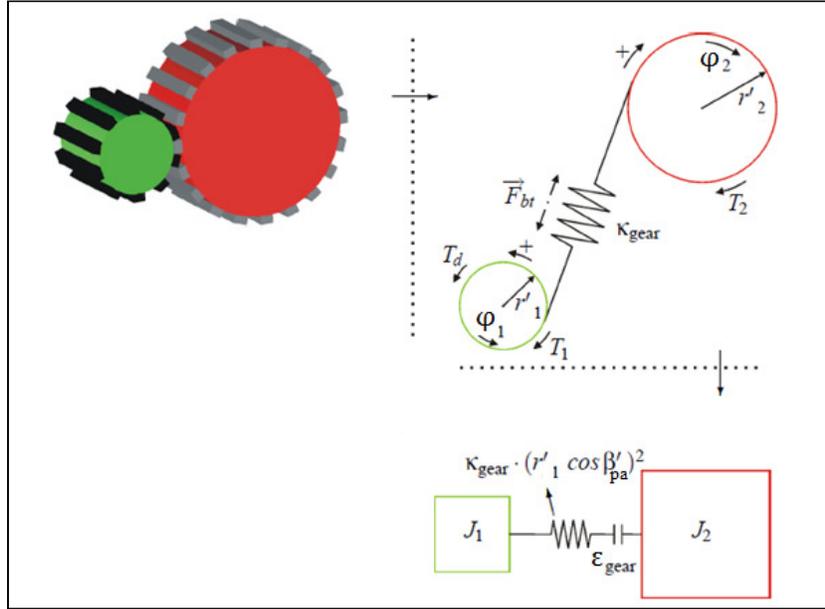


Figura 12. Modelo torsional para força de contato dos dentes entre o pinhão e a coroa (Peeters, 2006)

$$T_1 = -T_2 = K_{shaft}(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (26)$$

A deformação causada pela flexão do dente como função de 2 graus de liberdade é mostrada nas Equações (27) e (28).

$$\delta = (r_1\varphi_1 - r_2\varphi_2) \cos \beta_{pa} \quad (27)$$

$$\text{sen } \beta_{pa} = \text{sen } \beta \cos \alpha_n \quad (28)$$

Considerando a Equação (27), a componente transversal da força $\left(\begin{matrix} \rightarrow \\ F_{bn} \end{matrix} \right)$ pode ser escrita como:

$$F_{bt} = (r_1\varphi_1 - r_2\varphi_2)K_{gear} \cos^2 \beta_{pa} \quad (29)$$

2.3.1.2 Modelos de Multi-Corpos Rígidos com Elementos Flexíveis Discretos

Do modelo torsional ao modelo de Multi-Corpos rígidos, pode-se incluir a influência do rolamento na dinâmica da transmissão. Todos os componentes da transmissão são tratados como corpos rígidos, mas agora com seis graus de liberdade.

Para a modelagem da flexibilidade dos rolamentos, o amortecimento é desconsiderado e todos os rolamentos assumem um comportamento axissimétrico (simetria em relação ao eixo).

Para a modelagem das forças de contato dos dentes (F_{bn}), essas forças são representadas por molas lineares, que envolvem um acoplamento de doze graus de liberdade ao invés de dois. A Figura 13 mostra a representação do vetor força para um caso geral de duas engrenagens helicoidais em contato. T_d é a magnitude do torque aplicado na engrenagem 1.

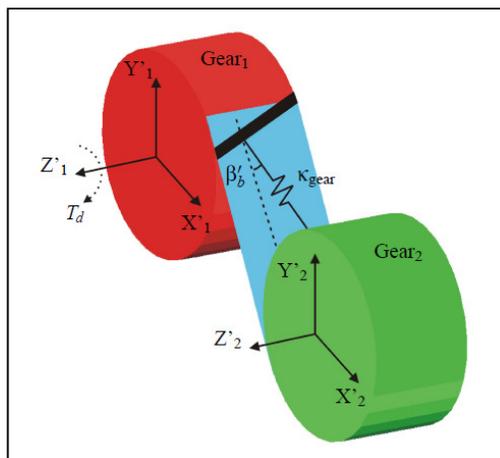


Figura 13. Representação do vetor força de contato nos dentes como uma mola linear para duas engrenagens helicoidais em contato (Peeters, 2006)

As suposições adotadas para esses modelos são descritas a seguir.

- O modelo de malha de engrenagem é um modelo LTI.
- Deslizamento de dentes em contato e forças de atrito correspondentes é negligenciado, bem como quaisquer outros possíveis amortecimentos no sistema.
- Ocorrência de separação de dente é considerada como inexistente e, conseqüentemente, a modelagem de folga na engrenagem não está incluída. Isso implica que a mola está sempre sob compressão.
- A aceleração de Coriolis das engrenagens que estão girando e, simultaneamente, transladando (planetas, por exemplo, em seu suporte de planetas) é negligenciada. Estas suposições são válidas para aplicações em turbinas eólicas, já que as etapas de engrenagens planetárias em turbinas eólicas são raramente usadas como etapas de alta velocidade.

2.3.2 Modelo do Laboratório RISO (Iov *et al.*, 2004)

O trabalho feito pelo laboratório RISO apresenta uma modelagem dinâmica bem próxima à proposta por este projeto de graduação. Iov *et al.* desenvolvem modelos de caixas multiplicadoras de velocidade com o auxílio do programa Simulink/MATLAB. O trabalho tem como título *Wind Turbine*

Blockset in MATLAB/Simulink: General Overview and Description of the Models e descreve a caixa multiplicadora em três possíveis modelos: Modelo de Três-Massas, de Duas-Massas e de Uma-Massa.

O primeiro modelo, mostrado na Figura 14, considera massas do rotor da turbina eólica, da caixa multiplicadora e do gerador de energia.

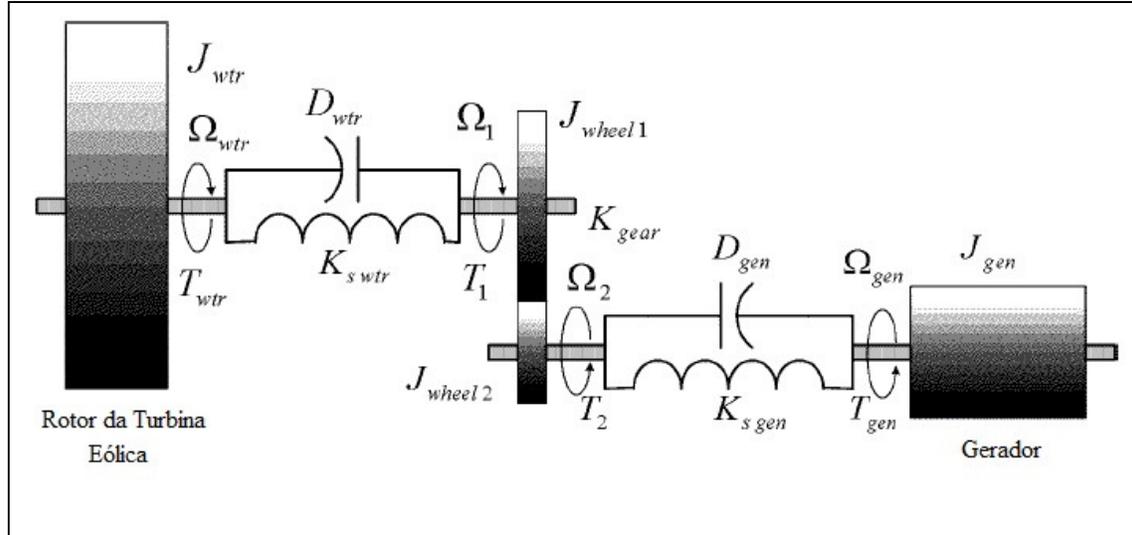


Figura 14. - Modelo Três-Massas da caixa multiplicadora da turbina eólica (adaptado de Iov *et al.*, 2004)

O modelo de Três – Massas, além das massas, leva em consideração os fatores de rigidez e amortecimento para os eixos.

As equações que regem o movimento dinâmico do modelo são apresentadas a seguir.

$$T_{wtr} = J_{wtr} \frac{d\Omega_{wtr}}{dt} + D_{wtr}\Omega_{wtr} + K_{swtr}(\theta_{wtr} - \theta_1) \quad (30)$$

$$T_1 = J_1 \frac{d\Omega_1}{dt} + D_{wtr}\Omega_1 + K_{swtr}(\theta_1 - \theta_{wtr}) \quad (31)$$

$$T_2 = J_2 \frac{d\Omega_2}{dt} + D_{gen} \frac{d\Omega_2}{dt} + K_{sgen}(\theta_2 - \theta_{gen}) \quad (32)$$

$$-T_{gen} = J_{gen} \frac{d\Omega_{gen}}{dt} + D_{gen}\Omega_{gen} + K_{sgen}(\theta_{gen} - \theta_2) \quad (33)$$

$$\frac{d\theta_{wtr}}{dt} = \Omega_{wtr} \quad (34)$$

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \Omega_1 \quad (35)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \Omega_2 \quad (36)$$

$$\frac{d\theta_{gen}}{dt} = \Omega_{gen} \quad (37)$$

Onde T_{wtr} é o torque a turbina eólica; J_{wtr} é o momento de inércia da turbina eólica; Ω_{wtr} é a velocidade de rotação da turbina; K_{swtr} é a constante da mola indicando rigidez torsional no eixo do rotor; T_{gen} é o torque no gerador; J_{gen} é o momento de inércia do gerador; Ω_{gen} é a velocidade de rotação do gerador; K_{sgen} é a constante da mola indicando a rigidez torsional do eixo no gerador; T_1 é o torque que entra na caixa multiplicadora de velocidades; T_2 é o torque que sai da caixa multiplicadora de velocidades.

O modelo de Duas – Massas é uma redução do modelo de Três – Massas. Ele considera as massas do rotor da turbina eólica e do gerador. A massa da caixa multiplicadora e tudo o que era ligado a ela são suprimidos, mas o modelo considera uma equivalência para os fatores de rigidez e amortecimento. Os momentos de inércia dos eixos e da caixa multiplicadora suprimidos são considerados pequenos quando comparados com os momentos de inércia do rotor da turbina eólica e do gerador.

O modelo de Duas - Massas conectadas por um eixo flexível é mostrado na Figura 15.

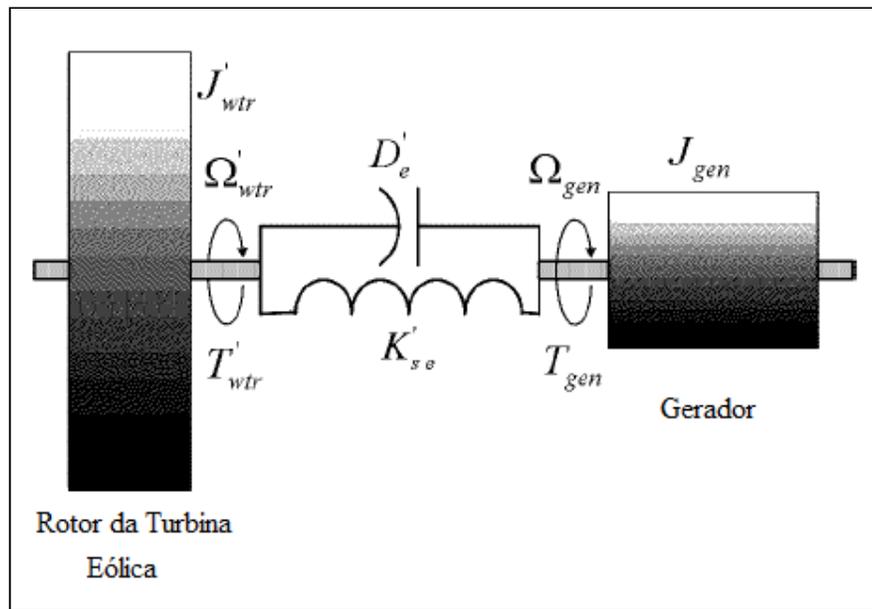


Figura 15. Diagrama equivalente da transmissão da turbina eólica no lado do gerador (Adaptado de Iov *et al.*, 2004)

As equações dinâmicas da transmissão para o modelo de Duas – Massas podem ser escritas como:

$$T'_{wtr} = J'_{wtr} \frac{d\Omega'_{wtr}}{dt} + D'_e (\Omega'_{wtr} - \Omega_{gen}) + K'_{se} (\theta'_{wtr} - \theta_{gen}) \quad (38)$$

$$\frac{1}{k'_{se}} = \frac{1}{K'_{wtr}} + \frac{1}{K_{gen}} \quad (39)$$

$$J'_{wtr} = \frac{1}{k_{gear}^2} J_{wtr} \quad (40)$$

$$\frac{d\theta'_{wtr}}{dt} = \Omega'_{wtr} \quad (41)$$

$$\frac{d\theta_{gen}}{dt} = \Omega_{gen} \quad (42)$$

$$-T_{gen} = J_{gen} \frac{d\Omega_{gen}}{dt} + D'_e(\Omega_{gen} - \Omega'_{wtr}) + K'_{se}(\theta_{gen} - \theta'_{wtr}) \quad (43)$$

Onde o sinal "'" representa a equivalência para o rotor da turbina eólica com influência do componente suprimido, a caixa multiplicadora, que também é influenciada pelo gerador. T_{wtr} é o torque a turbina eólica; J_{wtr} é o momento de inércia da turbina eólica; Ω_{wtr} é a velocidade de rotação da turbina; T_{gen} é o torque no gerador; J_{gen} é o momento de inércia do gerador; Ω_{gen} é a velocidade de rotação do gerador; K'_{se} é a rigidez equivalente; J'_{wtr} é o momento de inércia equivalente para o rotor; k_{gear} é a relação de transmissão das engrenagens na caixa multiplicadora.

O modelo de Uma – Massa não leva em consideração os fatores de rigidez e amortecimento. As equações que descrevem esse modelo podem ser descritas por:

$$T_{gen} - T'_{wtr} = J_{ech} \frac{d\Omega_{gen}}{dt} \quad (44)$$

$$J_{ech} = J_{gen} + \frac{J_{wtr}}{k_{gear}^2} \quad (45)$$

$$T'_{wtr} = \frac{T_{wtr}}{k_{gear}^2} \quad (46)$$

Onde T_{wtr} é o torque a turbina eólica; J_{wtr} é o momento de inércia da turbina eólica; T_{gen} é o torque no gerador; J_{gen} é o momento de inércia do gerador; Ω_{gen} é a velocidade de rotação do gerador; J_{ech} é o momento de inércia equivalente; k_{gear} é a relação de transmissão das engrenagens na caixa multiplicadora.

2.3.3 Modelo de Wang *et al.*, (2009)

Wang, Qin e Ding (2009) propõem outro modelo em que há mistura de corpos flexíveis e rígidos com subsistemas flexíveis e subsistemas rígidos com o objetivo de estudar o comportamento dinâmico de uma turbina eólica de rotor horizontal.

A transmissão é modelada pela teoria de Multi-corpos flexíveis que considera a elasticidade do contato dos dentes e dos rolamentos. Conta com uma caixa de engrenagens de multi-estágios: planetário e eixo de engrenagens com dois estágios de engrenagens cilíndricas de dentes retos. Todas as engrenagens dentro da transmissão são consideradas como corpo flexível e a deformação é atribuída para a elasticidade do dente (Wang *et al.*, 2009).

A deformação do trem planetário é mostrada na Figura 16. A translação da engrenagem solar é determinada por Δx_s , Δy_s e Δz_s e a deformação de rotação é denota por u_s . Δx_i , Δy_i e Δz_i são usados

para definir a translação dos planetas e u_i suas deformações de rotação. A engrenagem anular e o suporte de engrenagens têm apenas um grau de liberdade de rotação u_r e u_c , respectivamente. k_{si} e k_{ri} são malhas de rigidez dos planetas com a engrenagem solar e engrenagem anular, respectivamente.

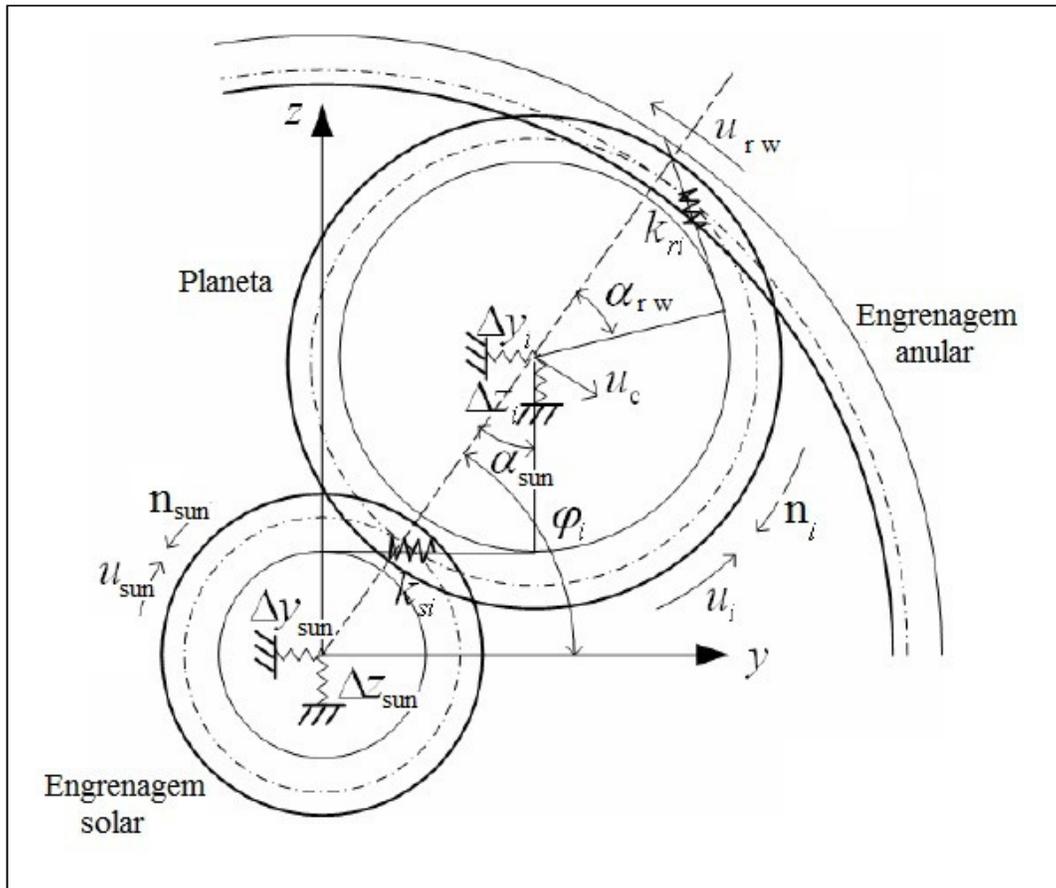


Figura 16. Deformação do trem planetário (Wang *et al.*, 2009)

A deformação padrão da transmissão é baseada na suposição que o contato entre os dentes sempre ocorre na linha de ação, assim o erro do contato dinâmico (ECD) no ponto de contato é obtido projetando a deformação da engrenagem solar, dos planetas e da anular na linha de ação.

$$\delta_{si} = -(\Delta y_{sun} + \Delta y_i) \text{sen}(\varphi_i - \alpha_{sun}) + (\Delta z_{sun} - \Delta z_i) \text{cos}(\varphi_i - \alpha_{sun}) + u_{sun} + u_i - u_c \text{cos} \alpha_{sun} \quad (47)$$

$$\delta_{si} = \Delta y_i \text{sen}(\varphi_i + \alpha_{rw}) - \Delta z_i \text{cos}(\varphi_i + \alpha_{rw}) + u_{rw} - u_i - u_c \text{cos} \alpha_{rw} \quad (48)$$

O erro do contato dinâmico entre a engrenagem 1 e a engrenagem 2 é mostrado na Figura 17 é dado pela Equação (49).

$$\delta_{g1g2} = (\Delta y_{g1} - \Delta y_{g2}) \text{sen} \alpha_g + (\Delta z_{g1} - \Delta z_{g2}) \text{cos} \alpha_g + u_{g1} + u_{g2} \quad (49)$$

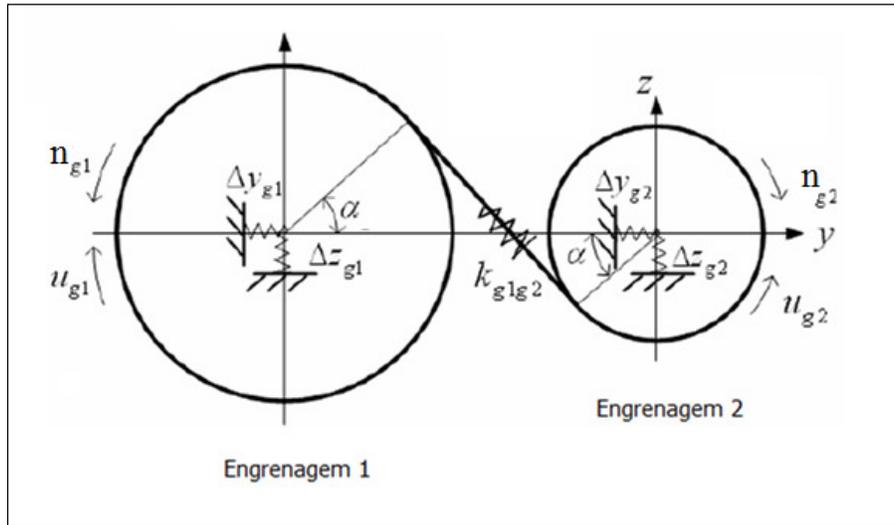


Figura 17. Deformação padrão da engrenagem 1 e da engrenagem 2 (Wang *et al.*, 2009)

A deformação dos eixos pode ser desconsiderada, tendo em vista as medidas cada vez mais compactas das turbinas eólicas. Assim, os eixos são considerados corpos rígidos. Por outro lado, os eixos são suportados pelos rolamentos que têm um importante recurso na área de vibrações em turbinas eólicas. Mas para o estudo de Wang *et al.* (2009) os modelos de mola linear são adotados para os rolamentos, a fim de simplificar o problema.

2.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS ESTUDADOS

Com os três trabalhos apresentados no item 2.3, é possível realizar ótimos trabalhos. Cada trabalho tem focos e graus de complexidade diferentes. Iov *et al.* (2004), do Laboratório RISO, realizam a análise com foco na inércia. Consideram em três tipos de modelos: de Três-Massas, Duas-Massas e Uma-Massa. O modelo de Uma-Massa é uma simplificação do modelo de Duas-Massas, que por sua vez, é uma simplificação do modelo de Três-Massas. Eles afirmam que usando as equações de equivalência apresentadas no item 2.3.2, é possível simplificar o modelo da turbina eólica de Três-Massas ao modelo de Uma-Massa, sem grandes perdas. Wang *et al.* (2009) considera a elasticidade dos dentes e dos rolamentos em uma caixa de engrenagens. Peeters (2001) também considera as flexibilidades dos dentes e dos rolamentos, além de outros componentes como eixos, suporte de planetas, chavetas, entre outros.

Para este projeto, tomou-se como base o trabalho de Iov *et al.* (2004). É de grande interesse o foco de tornar um modelo complexo em um modelo mais simples para a modelagem de aerogeradores. Para constatar se o modelo Riso é adequado, foi construído o modelo de Três-Massas em Simulink e os outros seguindo o modo como Iov *et al.* (2004) os simplifica. Para a verificação, foram utilizados dados encontrados na literatura, melhor definidos no item 3.1. No capítulo 4 são apresentados os resultados para a simulação do modelo desenvolvido.

2.5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

A modelagem deste projeto utiliza o programa MATLAB. Este é um *software* interativo de alto desempenho voltado para o cálculo numérico. O MATLAB integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar, em que problemas e soluções são expressos como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional.

Para a simulação do projeto, a ferramenta utilizada é o Simulink, que é uma extensão gráfica do MATLAB para a simulação dinâmica de sistemas.

O Simulink é uma ferramenta utilizada para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Pode ser aplicado a sistemas lineares e não lineares, discretos e contínuos no tempo (Beucher e Weeks, 2007).

O programa utiliza uma interface gráfica, representando o sistema por diagramas de blocos, em que cada bloco representa uma operação matemática de entrada e saída. Nos sistemas contínuos, estas relações são obtidas utilizando-se a transformada de Laplace nas equações. O Simulink é uma aplicação específica do MATLAB e não trabalha sem ele.

2.5.1 Componentes de uma modelagem

Um modelo no Simulink consiste em três componentes: Fontes, Diagrama de Blocos e Saídas, que são abordados a seguir.

2.5.1.1 Fontes

As fontes são as entradas do sistema e estão presentes na biblioteca de fontes (*sources*). As fontes mais comuns são:

Bloco Constante (*Constant*): produz um sinal uniforme. A magnitude pode ser escolhida com um duplo clique sobre o bloco.

Bloco Degrau (*Step*): produz uma função degrau. Pode-se configurar o instante em que se aplica o degrau, assim como sua magnitude antes e depois da transição.

Bloco de Onda Senoidal (*Sine Wave*): gera uma senóide, onde os parâmetros amplitude, fase e frequência da onda senoidal precisam ser configurados.

Gerador de Sinais (*Signal Generator*): produz ondas senoidais, quadradas, dente de serra ou sinais aleatórios.

Outros sinais: são gerados a partir de combinações dos blocos já apresentados.

2.5.1.2 Diagrama de blocos

O Diagrama de Blocos é a modelagem por meio de blocos utilizando-se a transformada de Laplace nas equações do sistema.

2.5.1.3 Saídas

Os dispositivos de saída são os blocos que permitem verificar o comportamento do sistema. Estes blocos são encontrados na biblioteca de dispositivos de saída (*Sinks*). Tais blocos são apresentados a seguir.

Scope: o osciloscópio produz gráficos a partir de dados do modelo. Não existem parâmetros a serem configurados.

XY Graph: o bloco de *XY Graph* produz um gráfico idêntico ao gráfico produzido pelo comando *plot* do MATLAB. Para isso, devem-se configurar os valores de mínimos e máximos, da horizontal e vertical.

Display: o bloco *Display* produz uma amostragem digital do valor de sua entrada.

To File: pode-se armazenar os dados em arquivos do MATLAB para usos posteriores. Deve-se definir o nome do arquivo a ser criado.

To Workspace: pode-se enviar os dados para a área de trabalho do MATLAB utilizando o bloco. Deve-se definir o nome da matriz.

Stop Simulation: o bloco de parada (*Stop Simulation*) causa a parada da simulação quando a sua entrada for diferente de zero.

2.5.2 Como funciona o Simulink

No Simulink, o diagrama em blocos é convertido numa estrutura mais apropriada à simulação. Primeiramente, cada um dos parâmetros dos blocos é calculado pelo MATLAB, trocando variáveis pelo valor numérico. Em seguida, os blocos são ordenados, desfeitos os agrupamentos de blocos e os *loops* algébricos são detectados. Finalmente, ele confere as ligações entre os blocos.

Terminada a conversão de estrutura, a simulação está pronta para ser iniciada. O sistema é então simulado via integração numérica e o modelo é tratado como uma função do tipo *S-function* que fornece as derivadas de todos os estados a cada passo. Essa função define as dinâmicas do modelo e se comporta operacionalmente como qualquer outra função MATLAB. Sabendo o valor das derivadas num instante, a integração determina qual o novo vetor de estado e assim por diante (Beucher e Weeks, 2007).

2.5.2.1 Iniciando o Simulink

Para iniciar o Simulink, é necessário seguir os seguintes passos:

1. Entrar com o comando *simulink* no *prompt* do MATLAB para abrir a biblioteca principal de blocos.
2. Clicar no menu *File* e selecionar *New*. O Simulink abre uma janela em branco como o nome "*Untitled*". Esse nome pode ser alterado na hora de salvar o arquivo.
3. Abrir uma ou mais bibliotecas e arrastar os blocos para a janela ativa.
4. Depois de alocar os blocos, desenhar linhas para ligar os blocos.
5. Abrir os blocos (dois cliques) e alterar seus parâmetros. Os parâmetros podem ser qualquer expressão válida do MATLAB.
6. Salvar o arquivo com o *Save* do menu *File*.
7. Executar a simulação selecionando *Start* no menu *Simulation*. Durante a simulação o menu *Start* é alterado para *Stop*. Ao selecioná-lo, volta a aparecer *Start*.
8. Alterar os parâmetros de simulação selecionando *Parameters* no menu *Simulation*.
9. Monitorar o comportamento do seu sistema com um osciloscópio (bloco *Scope*), ou usar o bloco *To Workspace* para enviar os dados para a área de trabalho do MATLAB e manipular os resultados com funções do MATLAB.

3. MODELOS COMPUTACIONAIS DESENVOLVIDOS

Para a montagem do modelo computacional em Simulink foram priorizadas três características: simplicidade, facilidade de utilização e de compreensão.

Os modelos foram montados de modo a ter como entrada a velocidade angular do rotor e como saída a velocidade angular do gerador. Neste projeto de graduação, os modelos não incluem nenhum tipo de limitador de velocidade, não sendo considerado, portanto, o problema das velocidades críticas das turbinas eólicas.

Para o desenvolvimento dos modelos foi seguida a proposta de Iov *et al.* (2004) que considera três casos distintos na modelagem do aerogerador. No primeiro caso, o aerogerador é representado por um modelo de Três-Massas. Esse modelo é simplificado nos casos dois e três, considerando apenas duas massas e uma só massa, respectivamente. Esses modelos são descritos a seguir.

Para cada modelo, foi adotada uma estratégia de montagem de sequência de blocos, de modo a facilitar o processo de desenvolvimento dos modelos. Para os três modelos foi utilizado o tópico Simscape do Simulink, em que temos as bibliotecas SimDriveline, SimElectronics, SimHydraulics, SimMechanics. Essas bibliotecas dispõem de blocos de simulação pré-definidos para especificação de momentos de inércia, engrenagens, amortecimento, rigidez, sensores, torques, entre outros.

Para a simulação de um aerogerador real (utilizado em parques eólicos no país ou no mundo) faz-se necessário informações sobre os componentes internos. No caso deste projeto, é necessário saber os valores de momentos de inércia do rotor da turbina, das engrenagens da caixa multiplicadora e do gerador, além da rigidez e do amortecimento dos eixos.

Considerando que essas informações não são normalmente disponibilizadas pelos fabricantes e que os parques eólicos, bem como os fabricantes, estão fisicamente distantes de Brasília, esses dados foram estimados. Para isso foi realizada uma pesquisa de trabalhos científicos publicados e os valores fornecidos são apresentados no item 3.1.

3.1 CARACTERÍSTICAS PARA OS MODELOS

Nesse item são apresentadas características de alguns modelos disponíveis em trabalhos científicos.

Freitas (2008) em sua publicação apresenta os dados da turbina eólica de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Características da turbina eólica do modelo de Freitas (2008)

Características adotadas no modelo de Freitas (2008)	
Potência nominal [kW]	100.0
Altura da torre [m]	30.0
Diâmetro do rotor [m]	19.3
Número de pás	3
Tipo de controle	Controle ativo de <i>pitch</i>
Mecanismo de variação de passo	Simultâneo para as três pás
Velocidade de rotação do rotor	Fixa
Tipo de gerador	Trifásico, assíncrono (de indução)
Ligação à rede	Direta

Para a relação de transmissão, ele sugere como ótimo a relação de rotação do eixo de entrada com a rotação do eixo de saída, assim tem-se $k = 23.57$. Para seu projeto, Freitas (2008) tem como base um raio máximo das pás de 9.66 [m]. Para determinar os momentos de inércia, ele considera turbinas já existentes mostradas na Tabela 2 e estima o momento de inércia do rotor do seu projeto.

Tabela 2. Momentos de inércia dos rotores de turbinas com diferentes raios (Freitas, 2008)

Raio máximo das pás [m]	Momento de inércia [kg*m²]	Fonte
9.66	25000	Valor adotado por Freitas,2008
11.60	54000	(Martins et al., 2007)
15.00	42762	(Billy Muhando et al., 2007)
17.50	129312	(Gnanasambandapillai Ramtharan, 2007)
37.50	4269	(Gnanasambandapillai Ramtharan, 2007)
37.50	630000	(Morren et al., 2006)

Já Todorov (2010) considera que as massas dos planetas no sistema planetário possuem massas idênticas. Não leva em consideração o amortecimento e as forças de fricção.

Os valores que Todorov (2010) apresenta estão na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros estimados para o modelo de Três-Massas (Todorov, 2010)

Três-Massas	
Momento de inércia do rotor [kg*m²]	1.57x10 ⁶
Momento de inércia da caixa multiplicadora [kg*m²]	34.654
Momento de inércia do gerador [kg*m²]	93.220
Rigidez do eixo [N.m/rad]	4.46x10 ⁷
Relação de transmissão das engrenagens	23.570

O trabalho do laboratório Riso, de Iov *et al.* (2004), apresenta alguns valores para a simulação de seus modelos. Esses valores são para o modelo de Duas-Massas e são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Dados disponibilizados por Iov *et al.* (2004)

Dados para o modelo de Duas-Massas	
Momento de inércia do rotor [kg*m²]	4x10 ⁶
Momento de inércia do gerador [kg*m²]	90
Rigidez do eixo [N.m/rad]	9x10 ⁷
Amortecimento no eixo [N.m.s/rad]	6x10 ⁵
Relação de transmissão das engrenagens	75

Iov *et al.* (2004) disponibiliza dados completos para o modelo de Duas-Massas. Para encontrar os valores faltosos para o modelo de Três-Massas, é preciso estimar o momento de inércia das engrenagens da caixa multiplicadora, fazendo com que o modelo fique longe de uma situação real.

Além dos dados dos modelos já apresentados, tem-se o modelo de Friswell *et al.* (2011). Seu trabalho é para um sistema de Três-Massas, rotor, caixa de engrenagens e gerador, sendo que a caixa de engrenagens apresenta duas inércias que são referentes às engrenagens. Os dados para este modelo são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Dados disponíveis no modelo de Friswell *et al.* (2011)

Dados	
Momento de inércia do rotor [kg*m ²]	7000
Momento de inércia da 1ª engrenagem [kg*m ²]	4000
Momento de inércia da 2ª engrenagem [kg*m ²]	13000
Momento de inércia do gerador [kg*m ²]	5000
Rigidez do 1º eixo [N.m/rad]	1.6*10 ⁹
Rigidez do 2º eixo [N.m/rad]	2.9*10 ⁸
Amortecimento no 1º eixo [N.m.s/rad]	k ₁ *0.00002
Amortecimento no 2º eixo [N.m.s/rad]	k ₂ *0.00002
Número de dentes da 1ª engrenagem	56
Número de dentes da 2ª engrenagem	111
Relação de Transmissão	0.5045

Fazendo a equivalência com base na energia cinética do sistema têm-se as equações a seguir.

$$E_c = \frac{1}{2}J_2\dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2}J_3\dot{\theta}_3^2 \quad (50)$$

$$\frac{1}{2}J_{eq}\dot{\theta}_1^2 = \frac{1}{2}J_2\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}J_3\dot{\theta}_1^2 k^2 \quad (51)$$

$$J_{eq} = J_2 + J_3k^2 \quad (52)$$

$$J_{eq} = 4000 + 13000 * 0.5045^2 \quad (53)$$

$$J_{eq} = 7308.76 \quad (54)$$

Os valores apresentados por Friswell *et al.* (2011) são exatamente os necessários para o modelo desenvolvido neste projeto de graduação. Portanto, esses dados serão a referência para o modelo de Três-Massas.

Para os modelos de Duas-Massas e Uma-Massa, os valores são baseados de acordo com as equações de equivalência apresentadas no trabalho de base deste projeto, o do laboratório RISO (Iov *et al.*, 2004).

3.2 MODELO DE TRÊS-MASSAS

O esquema básico do sistema de Três-Massas (massa do rotor, massa da caixa multiplicadora e massa do gerador) é mostrado na Figura 18.

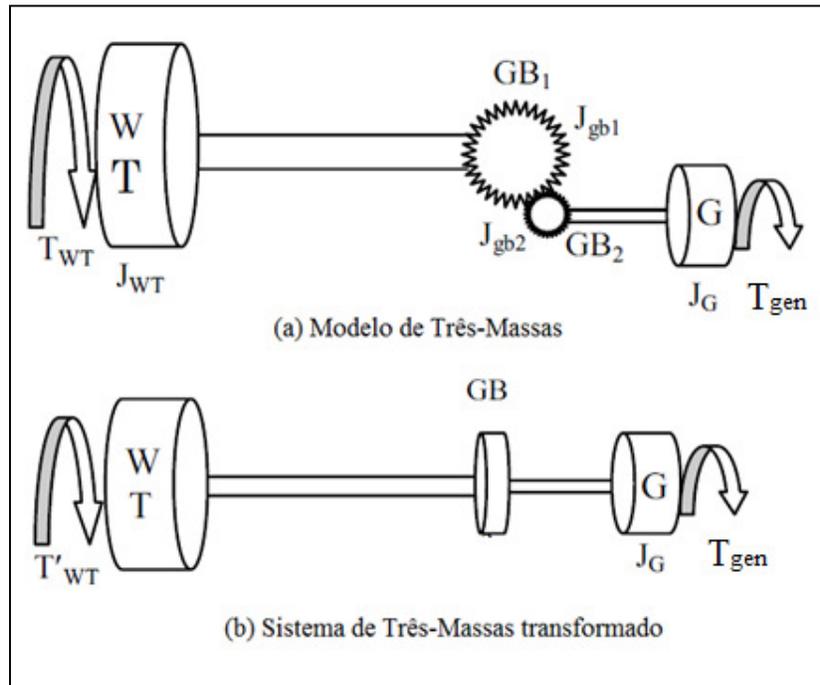


Figura 18. Esquema do modelo de Três-Massas. (a) Modelo de Três-Massas. (b) Sistema de Três-Massas transformado (adaptado de Mueen *et al.*, 2009)

O programa desenvolvido no Simulink do sistema com Três-Massas é mostrado na Figura 19. Ele apresenta o diagrama de blocos típico do Simulink, indicando as relações entre os diferentes componentes. Como forma de melhor visualização, os blocos de cor amarela são blocos de entrada, os verdes referem-se à saída de gráficos, os azuis claros aos momentos de inércia das massas e os azul-esverdeados referem-se às saídas do modelo apresentado. Essas cores valem para todos os modelos nas figuras seguintes.

O programa foi desenvolvido considerando as equações do movimento apresentadas no item 2.3.2.

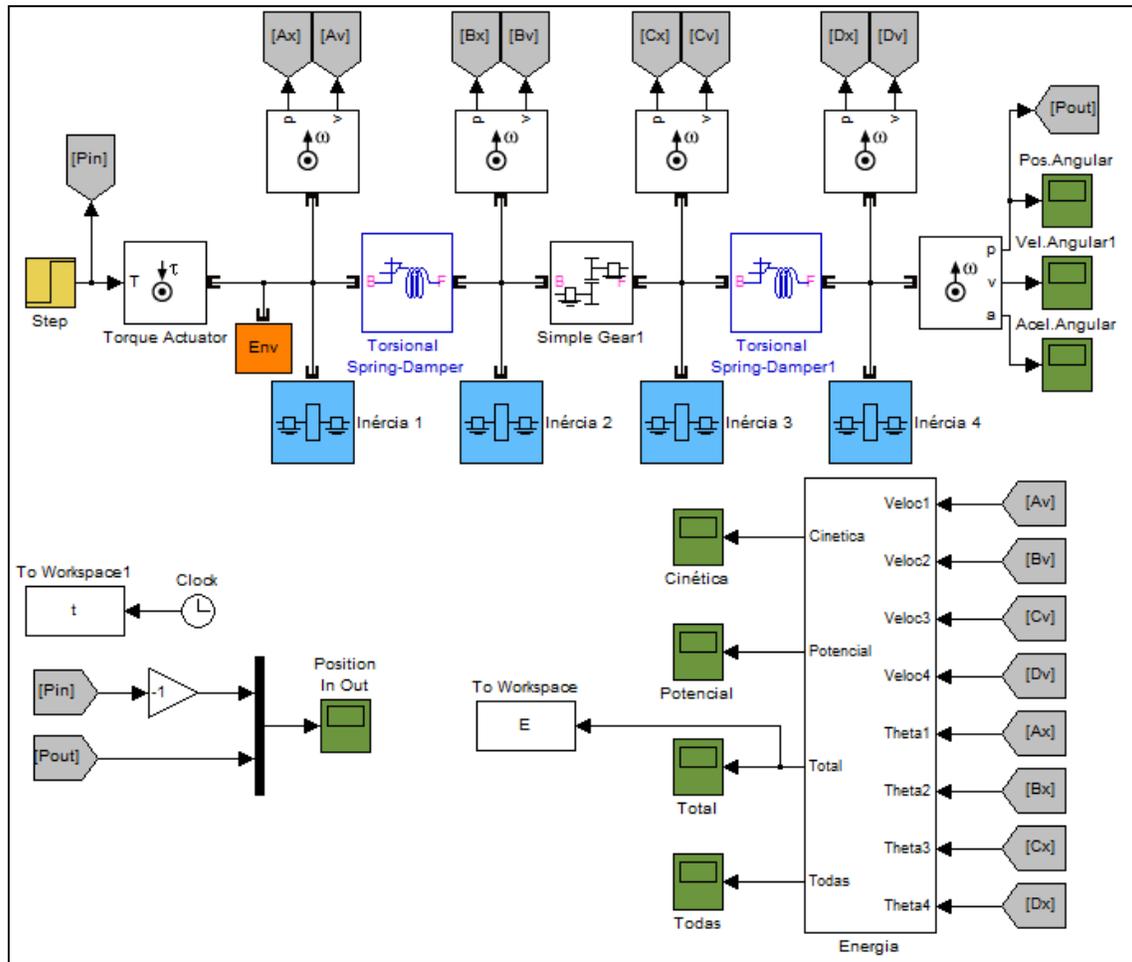


Figura 19. Modelo Três-Massas Simulink

Na Figura 19 tem-se o bloco *Inércia 1* que se refere ao momento de inércia do rotor da turbina eólica, o bloco *Inércia 2* e *Inércia 3* que se referem ao momento de inércia do grupo de engrenagens e o bloco *Inércia 4* se refere ao momento de inércia do gerador.

O Bloco inércia (*Inertia*), mostrado na Figura 20 (a), representa um corpo rígido em rotação. Ele gira conectado a um eixo motor. O corpo carrega um momento inercial de rotação em torno desse eixo. A entrada desse bloco é exatamente o momento de inércia do corpo e tem como unidade $[kg.m^2]$. A Figura 20 (b) mostra a caixa de diálogo que se abre ao clicar duas vezes no bloco *Inertia*.

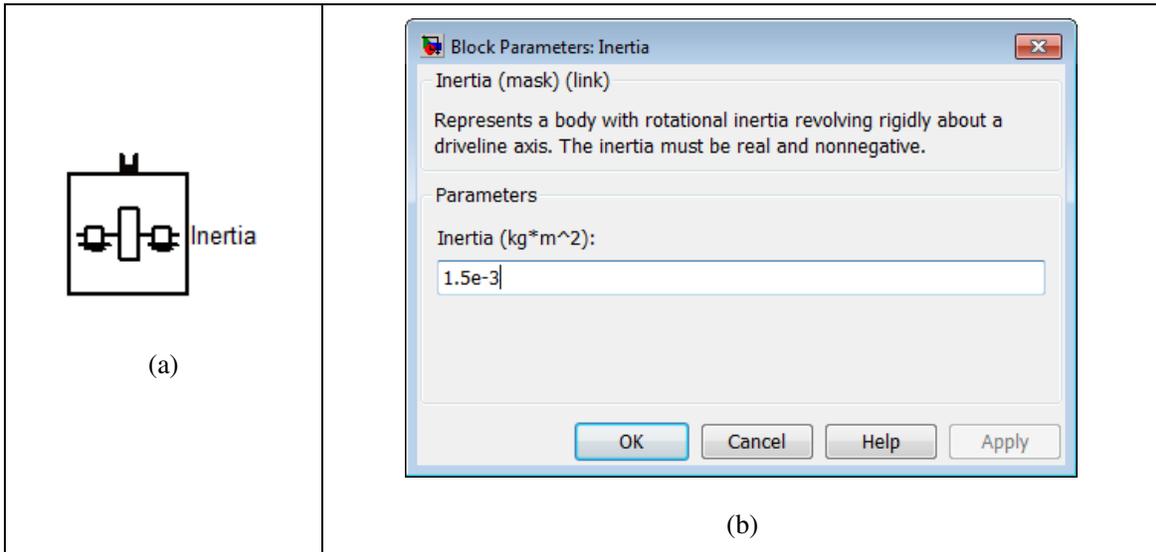


Figura 20. (a) Bloco Inércia (Inertia); (b) Caixa de diálogo desse bloco

O bloco *Torsional Spring-Damper*, mostrado na Figura 21 (a), define o amortecimento e a rigidez a que o eixo é submetido. Esse bloco se encontra sempre entre dois eixos e ao clicar duas vezes sobre ele, abre-se a caixa de diálogo, mostrada na Figura 21 (b), em que é possível inserir os parâmetros de rigidez (*stiffness*) [$N.m/rad$], amortecimento (*damping*) [$N.m.s/rad$], ângulo inicial (*initial offset*) [rad] e o *backlash* [rad].

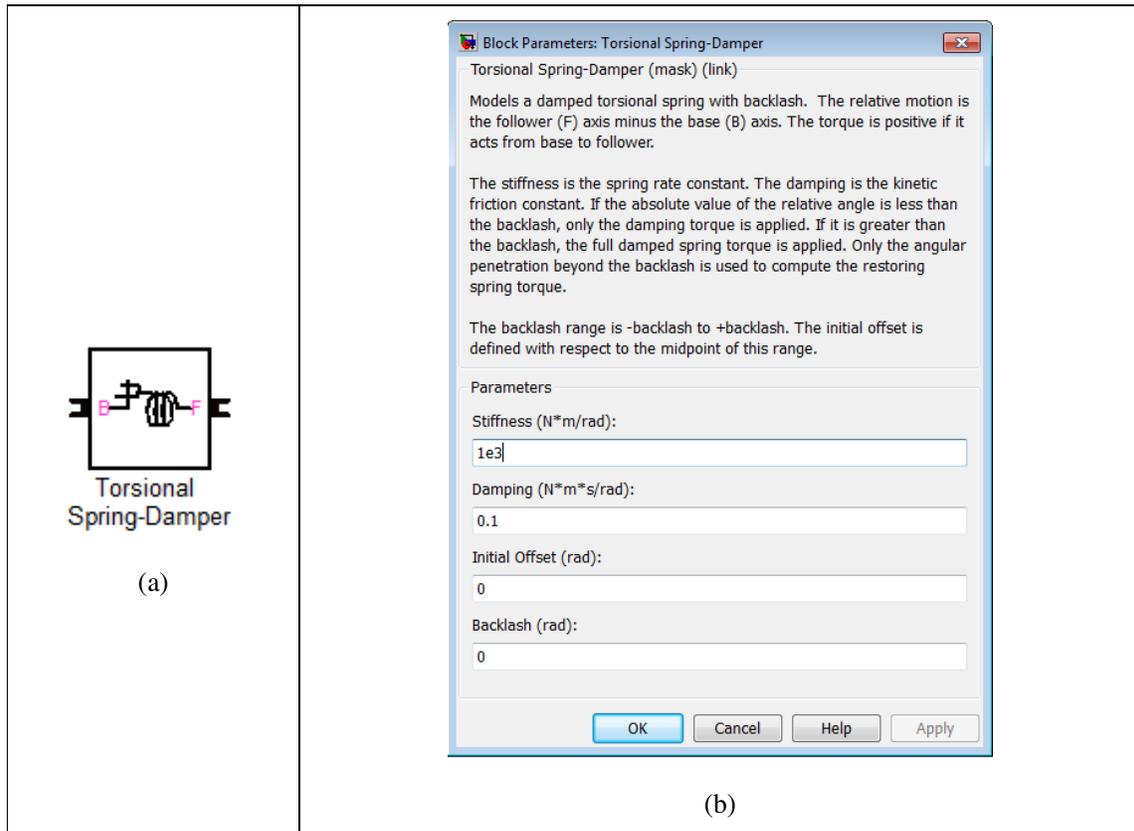


Figura 21. (a) Bloco *Torsional Spring-Damper*; (b) Caixa de diálogo desse bloco

Tem-se também no modelo apresentado blocos sensores e atuadores que transmitem e traduzem sinais de movimento. A Figura 22 mostra os dois blocos usados nos modelos e suas descrições: *Torque Actuator* e *Motion Sensor*.

<p>Torque Actuator</p>	<p>O bloco <i>Torque Actuator</i> aciona o eixo com um torque que pode ser especificado na caixa e diálogo. A unidade desse torque é [N.m].</p>
<p>Motion Sensor</p>	<p>O bloco <i>Motion Sensor</i> é sensível ao movimento de um eixo. Ele pode ter como saídas três sinais: ângulo (p), velocidade angular (v) e aceleração angular (a), em radianos, radianos/segundo e radianos/segundo², respectivamente. É possível selecionar qualquer combinação ou todos os sinais de saída.</p>

Figura 22. Blocos e descrições dos blocos *Torque Actuator* e *Motion Sensor*

As caixas de diálogo desses blocos também são mostradas na Figura 23. Sendo que no bloco *Motion Sensor* é possível colocar uma condição inicial para o ângulo (*Initial angle*), em radianos.

<p>Bloco <i>Torque Actuator</i></p>	
<p>Bloco <i>Motion Sensor</i></p>	

Figura 23. Caixa de diálogo dos blocos *Torque Actuator* e *Motion Sensor*

O bloco de engrenagens simples (*Simple Gear*), mostrado na Figura 24 (a), representa uma caixa de engrenagens retas simples que tem os dois eixos conectados ao bloco (base (B) e o seguidor (F)). Determina-se a relação de transmissão na caixa de diálogo, mostrada na Figura 24 (b).

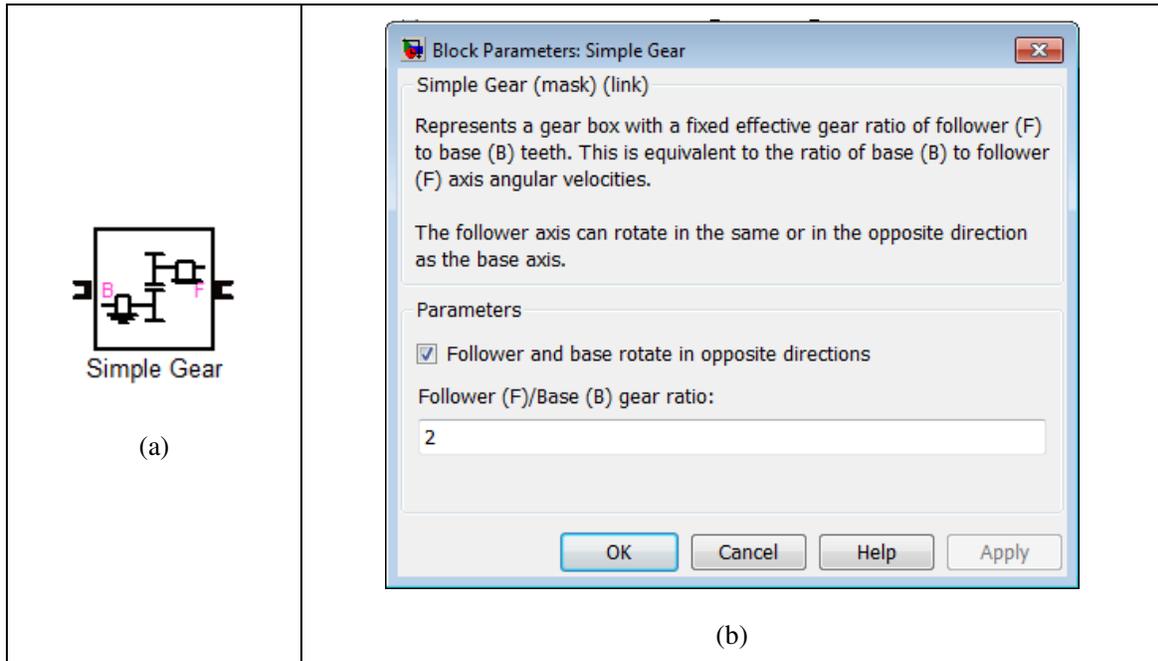


Figura 24. (a) Bloco *Simple Gear*; (b) Caixa de diálogo do bloco *Simple Gear*

Seja qual for o bloco de entrada no modelo, existe um subsistema que calcula a energia total do sistema. Este é chamado de Energia e está mostrado na Figura 25. A energia total do sistema foi escolhida como parâmetro para a comparação na dinâmica dos modelos desenvolvidos. No caso deste trabalho, é um parâmetro fácil de calcular, pois se trabalha com as inércias dos componentes.

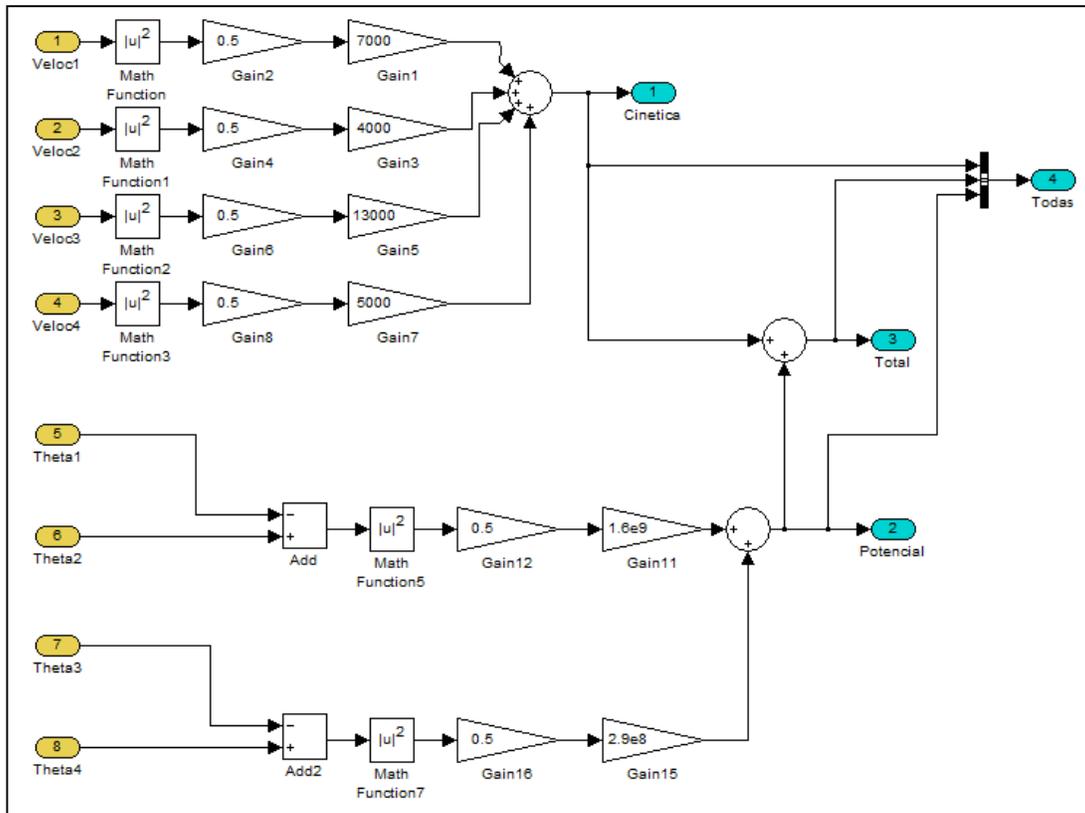


Figura 25. Subsistema Energia para o modelo de Três-Massas

3.3 MODELO DE DUAS-MASSAS

O esquema básico do modelo de Duas-Massas é mostrado na Figura 26 e o modelo em Simulink é mostrado na Figura 27. Pode-se notar que o esquema de cores usado no modelo de Três-Massas é adotado também para o de Duas-Massas. As equações do movimento para esse modelo são aquelas apresentadas no item 2.3.2.

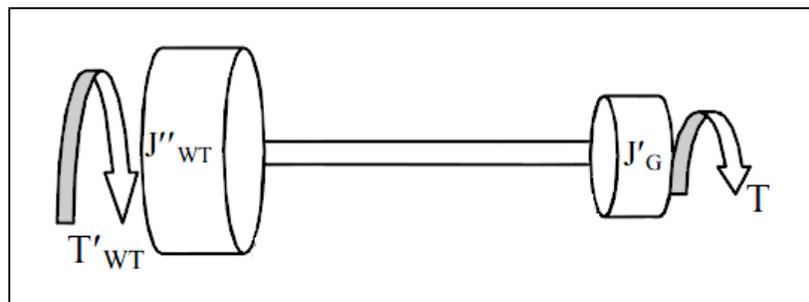


Figura 26. Esquema básico do sistema de Duas-Massas (adaptado de Muyeen *et al.*, 2009)

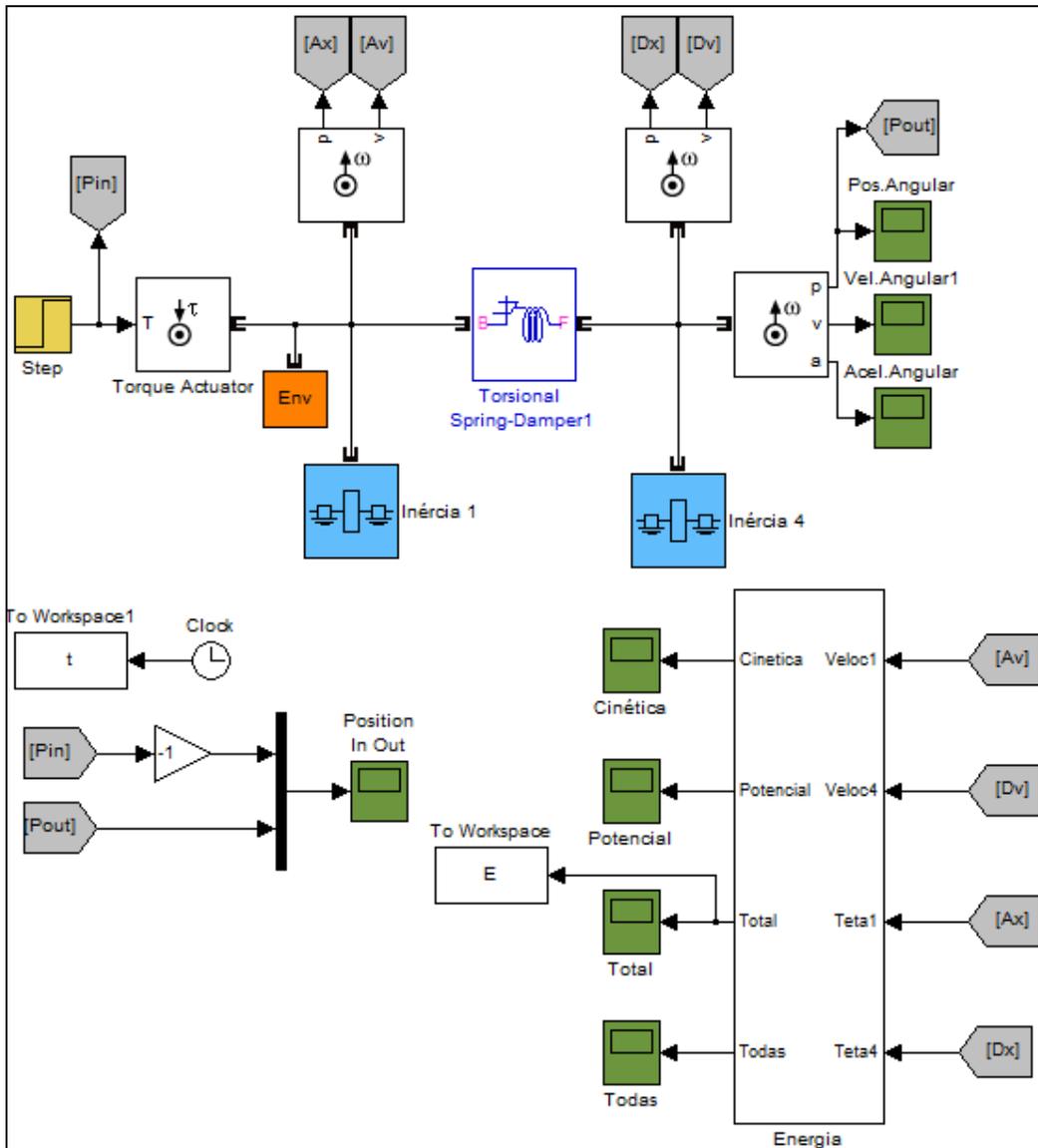


Figura 27. Modelo Duas-Massas Simulink

Na Figura 27 tem-se como entrada o torque no eixo do rotor da turbina eólica e como saídas a posição angular, a velocidade angular, a aceleração angular para o gerador. O momento de inércia equivalente do rotor da turbina eólica-caixa multiplicadora é apresentado no bloco Inércia 1. O bloco Inércia 4 se refere ao momento de inércia do gerador.

O subsistema Energia calcula a energia total do sistema e é mostrado na Figura 28.

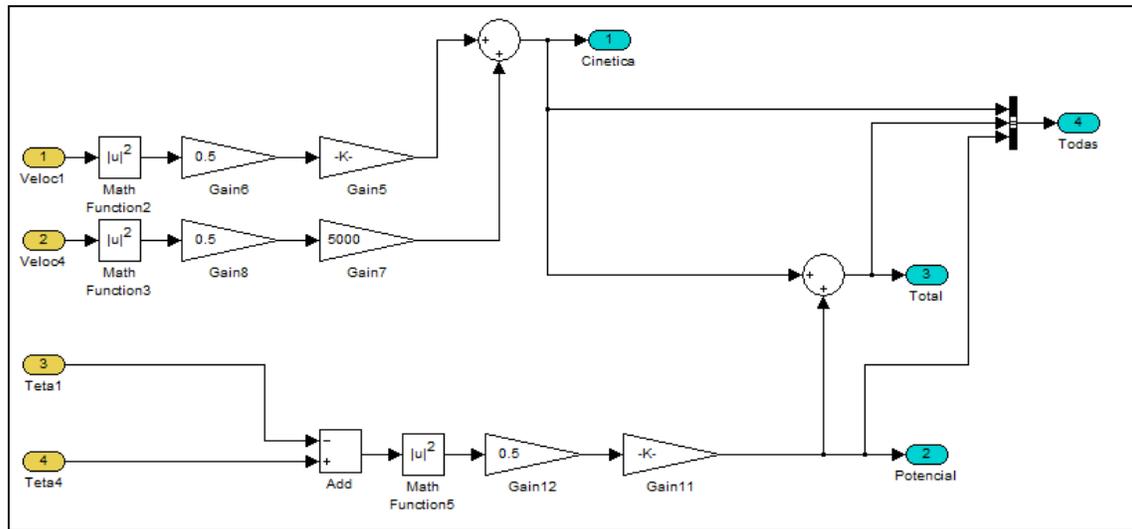


Figura 28. Subsistema Energia para o modelo de Duas-Massas

O modelo de Duas-Massas simplifica o modelo anterior, fazendo algumas considerações na rigidez mostrada pela Equação 39 e no momento de inércia mostrado pela Equação 40. Essas equações foram apresentadas no item 2.3.2.

$$\frac{1}{K_{se}'} = \frac{1}{\frac{K_{wtr}}{k_{gear}^2}} + \frac{1}{K_{gen}} \quad (39)$$

$$J_{wtr}' = \frac{1}{k_{gear}^2} J_{wtr} \quad (40)$$

Considerando os valores obtidos para o modelo de Três-Massas, os parâmetros para o de Duas-Massas são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros para a simulação do modelo

Três-Massas		Duas-Massas	
Momento de inércia do rotor [kg*m ²]	7000	Momento de inércia do rotor-caixa multiplicadora [kg*m ²]	27503
Momento de inércia da caixa multiplicadora [kg*m ²]	7308.76	Momento de inércia do gerador [kg*m ²]	5000
Momento de inércia do gerador [kg*m ²]	5000	Rigidez rotor-gerador [N.m/rad]	2.77x10 ⁸
Rigidez k ₁ [N.m/rad]	1.6x10 ⁹	Amortecimento rotor-gerador [N.m.s/rad]	5.54x10 ³
Rigidez k ₂ [N.m/rad]	2.9x10 ⁸	Relação de transmissão	0.5045
Amortecimento c ₁ [N.m.s/rad]	k ₁ x2x10 ⁻⁵
Amortecimento c ₂ [N.m.s/rad]	k ₂ x2x10 ⁻⁵
Relação de transmissão	0.5045

Com esses dados é possível calcular o momento de inércia, rigidez e amortecimento equivalentes. Para calcular essas equivalências, foi montado um programa no MATLAB Editor. O código de programação pode ser visualizado no Anexo I.

3.4 MODELO DE UMA-MASSA

O modelo de uma massa foi elaborado no Simulink Simscape do mesmo modo que os outros modelos.

Em questão da equivalência para os momentos de inércia, tem-se a Equação 45. Para o torque de entrada (torque do rotor da turbina eólica), tem-se a Equação 46. Essas equações foram apresentadas no item 2.3.2.

$$J_{ech} = J_{gen} + \frac{J_{wtr}}{k_{gear}^2} \quad (45)$$

$$T'_{wtr} = \frac{T_{wtr}}{k_{gear}^2} \quad (46)$$

O modelo de Uma-Massa em Simulink é mostrado na Figura 29. A entrada para este sistema é o torque do rotor da turbina eólica. Assim é possível ter como saída a posição angular, a velocidade angular e a aceleração angular. As equações de movimento são aquelas apresentadas no item 2.3.2.

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos modelos para Três-Massa, Duas-Massas e Uma-Massa usando verificações para o programa do Simulink e seus blocos.

Para verificação da metodologia de modelagem e dos modelos computacionais desenvolvidos, foi feita uma pesquisa na literatura de estudos de casos que possuíam dados completos para a reprodução fiel do modelo do trabalho e resultados claros para que fosse possível a comparação entre o trabalho e o modelo construído. Primeiramente, foi feito o modelo para o trabalho de Inman (2001) e em seguida o modelo para o trabalho de Friswell *et al.* (2011). Depois foi realizada a verificação do modelo de Iov *et al.* (2004), usando o modelo já verificado de Friswell *et al.* (2011) e as equações proposta por Iov *et al.* (2004). Dessa forma foi possível avaliar se as simplificações propostas pelo o trabalho Laboratório RISO (Iov *et al.*, 2004) são válidas.

4.1 VERIFICAÇÃO PARA O MODELO DE INMAN (2001)

O estudo de caso dele propõe uma máquina movida por correia com um eixo de acionamento, como a mostrada na Figura 30 (a). O modelo de vibração deste sistema é indicado na Figura 30 (b), com o diagrama de corpo livre da máquina.

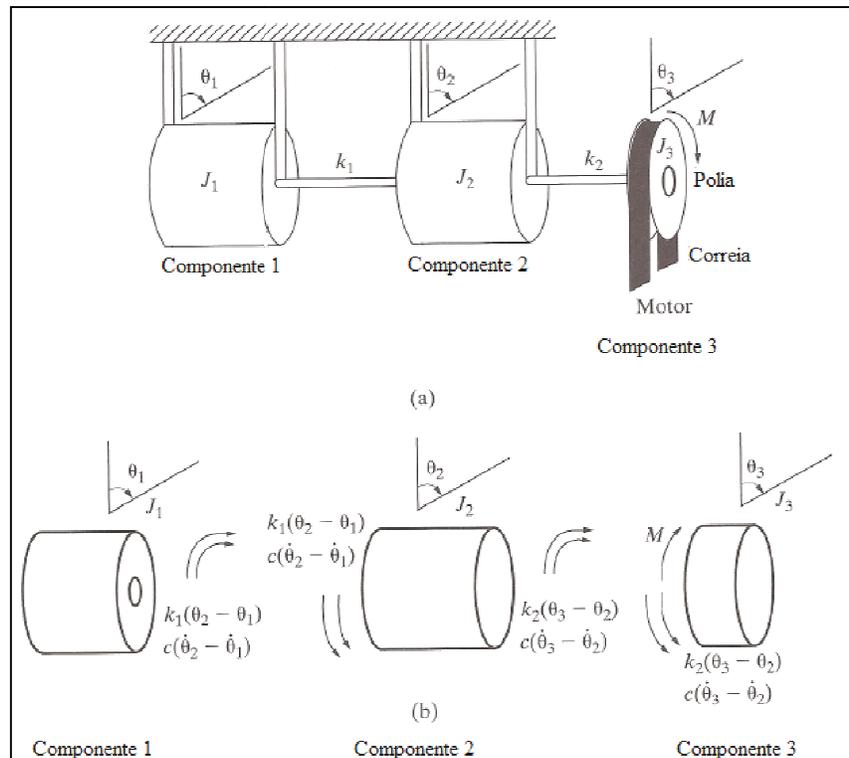


Figura 30. Modelo proposto por Inman (2001)

Os dados para esse caso são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8. Dados do caso de Inman (2001)

Dados	
Momento de inércia [kg*m ²]	$J_1 = J_2 = J_3 = J$ $J = 10$
Rigidez do eixo [N.m/rad]	$k_1 = k_2 = k$ $k = 10^3$
Amortecimento do eixo [N.m.s/rad]	$c = 2$

Onde J é o momento de inércia; k é a rigidez do eixo e; c é o amortecimento. Resolvendo analiticamente essa questão, têm-se as seguintes equações.

$$J_1 \ddot{\theta}_1 = k_1(\theta_2 - \theta_1) + c(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) \quad (55)$$

$$J_2 \ddot{\theta}_2 = k_2(\theta_3 - \theta_2) + c(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2) - k_1(\theta_2 - \theta_1) - c(\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) \quad (56)$$

$$J_3 \ddot{\theta}_3 = -k_2(\theta_3 - \theta_2) - c(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2) + \mu(t) \quad (57)$$

Que na forma matricial fica:

$$\begin{bmatrix} J_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 \\ 0 & 0 & J_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c & -c & 0 \\ -c & 2c & -c \\ 0 & -c & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mu(t) \end{bmatrix} \quad (58)$$

Onde $\ddot{\theta}$ é a aceleração angular; $\dot{\theta}$ é a velocidade angular; e θ é o movimento angular.

Substituindo os valores da Tabela 8 na Equação matricial (59) tem-se:

$$10I\ddot{\theta} + 2 \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \dot{\theta} + 10^3 \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \theta = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mu(t) \end{bmatrix} \quad (59)$$

Dividindo a equação acima pela massa $M = 10I$, ou matricialmente, multiplicando a expressão acima por $M^{-1} = 0,1I$, tem-se a Equação (60):

$$\ddot{\theta} + 0,2 \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \dot{\theta} + 10^2 \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \theta = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \delta(t) \end{bmatrix} \frac{1}{10} \quad (60)$$

E ainda, fazendo $\theta(t) = M^{-1/2}q(t)$ e multiplicando por $M^{-1/2}$, tem-se a Equação (61).

$$I\ddot{q} + \tilde{C}\dot{q} + \tilde{K}q = M^{-1/2}F(t) \quad (61)$$

Em que:

$$\tilde{C} = M^{-1/2}CM^{-1/2} \quad (62)$$

$$\tilde{K} = M^{-1/2}KM^{-1/2} \quad (63)$$

Ou seja, matricialmente, é dado pela Equação (64) e pela Equação (65).

$$\tilde{C} = 0,2 \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (64)$$

$$\tilde{K} = 100 \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (65)$$

Resolvendo as equações é possível extrair os autovalores deste sistema, que estão mostrados na Tabela 9.

Tabela 9. Autovalores do trabalho de Inman (2001)

Autovalores
$\lambda_1 = 0$
$\lambda_2 = 100$
$\lambda_3 = 300$

E também os autovetores:

$$P = \begin{bmatrix} 0,5774 & -0,7071 & 0,4082 \\ 0,5774 & 0 & -0,8165 \\ 0,5774 & 0,7071 & 0,4082 \end{bmatrix} \quad (66)$$

$$P^T M^{-1/2}F(t) = \begin{bmatrix} 0,1826 \\ 0,2236 \\ 0,1291 \end{bmatrix} \delta \quad (67)$$

$$P^T \tilde{C}P = \text{diag}\{0 \quad 0,2 \quad 0,6\} \quad (68)$$

$$P^T \tilde{K}P = \text{diag}\{0 \quad 100 \quad 300\} \quad (69)$$

Assim, a solução desacoplada desse estudo de caso é mostrada na Tabela 10.

Tabela 10. Solução desacoplada do estudo de caso Inman (2001)

Solução desacoplada
$\ddot{r}_1 = 0,1826\delta(t)$
$\ddot{r}_2 + 0,2\dot{r}_2 + 100k_2 = -0,2236\delta(t)$
$\ddot{r}_3 + 0,6\dot{r}_3 + 300k_3 = 0,1291\delta(t)$
$\Omega_1 = 0$
$\Omega_2 = 10 \text{ rad/s}$
$\Omega_3 = 17,3205 \text{ rad/s}$
$\xi_1 = 0$
$\xi_2 = 0,2/20 = 0,01$
$\xi_3 = 0,6/2 \cdot 17,3205 = 0,01732$
$\Omega_{d1} = \Omega_2 \sqrt{1 - \xi_2^2}$
$\Omega_{d1} = 9,9995$
$\Omega_{d2} = \Omega_1 \sqrt{1 - \xi_3^2}$
$\Omega_{d2} = 17,3179$

A solução total é mostrada a seguir.

$$\theta(t) = \begin{bmatrix} 0.0333t - 0.0050e^{-0.1t} \sin(9.9995t) + 0.0010e^{-0.2999t} \sin(17.3179t) \\ 0.0333t - 0.0019e^{-0.2999t} \sin(17.3179t) \\ 0.0333t - 0.0053e^{-0.1t} \sin(9.9995t) + 0.0010e^{-0.2999t} \sin(17.3179t) \end{bmatrix} \quad (70)$$

O modelo em Simulink do caso de Inman (2001) foi elaborado seguindo os mesmos processos realizados nos modelos apresentados no Capítulo 3 e é mostrado na Figura 31.

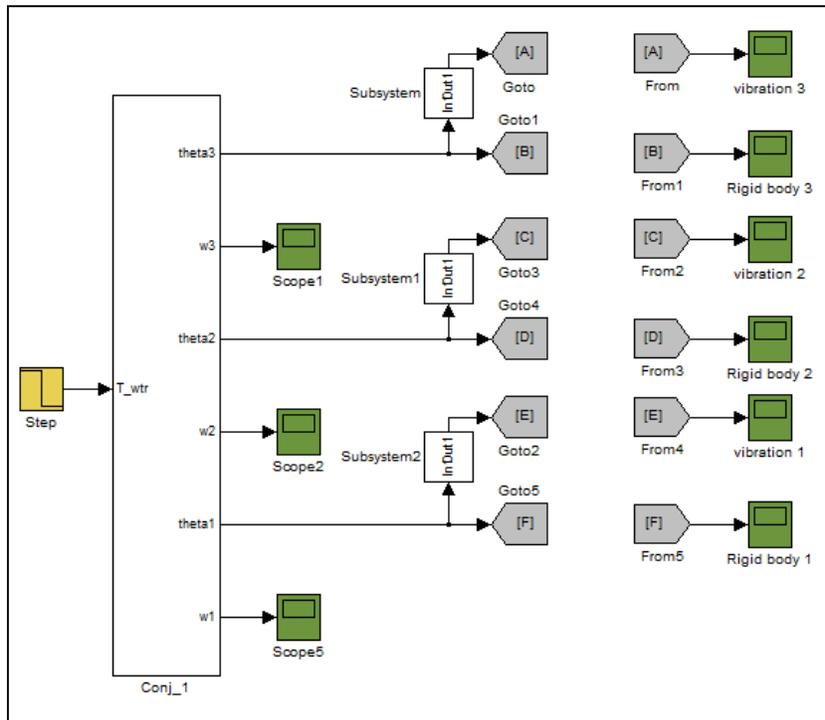


Figura 31. Modelo em Simulink do caso de Inman (2001)

A entrada é um pulso unitário de torque. O subsistema Conj_1 é mostrado na Figura 32.

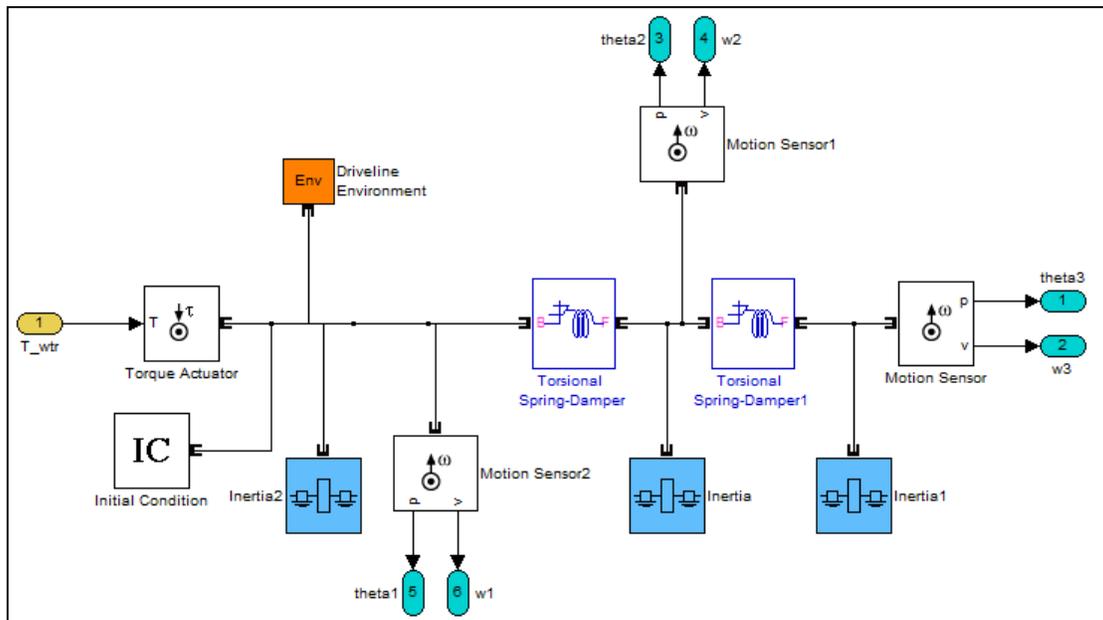


Figura 32. Subsistema Conj_1 para o modelo de Inman (2001)

Para calcular os resultados de Inman (2001) e do modelo em Simulink foi desenvolvido um programa em Editor MATLAB que está no Anexo II. Para uma melhor verificação, plotou-se os resultados apresentados por Inman (2001) junto com os valores obtidos com o modelo desenvolvido

em Simulink. Os resultados para os componentes 1, 2 e 3 sob os efeitos da rotação de um corpo rígido são mostrados na Figura 33, Figura 34 e Figura 35, respectivamente. No gráfico, a curva pontilhada em vermelho se refere aos resultados de Inman (2001) e a curva contínua em azul se refere aos resultados do modelo desenvolvido.

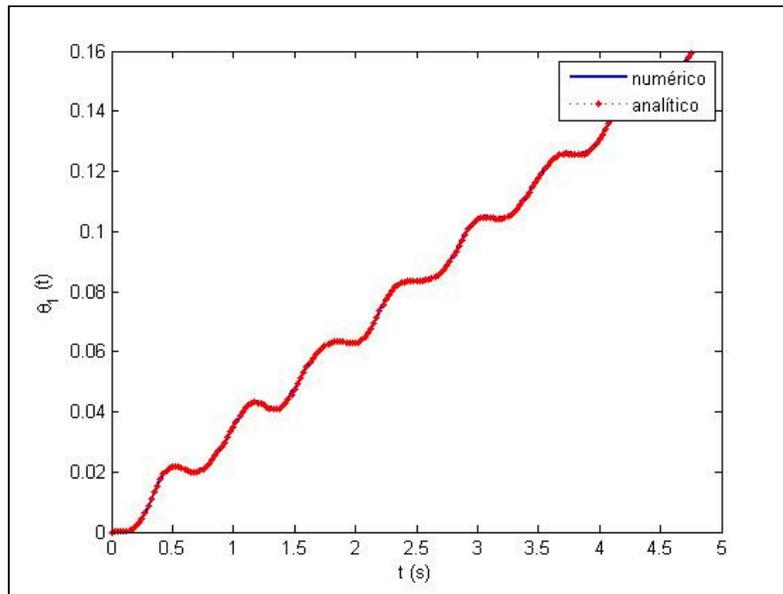


Figura 33. Resposta do componente 1 da Figura 30 a um impulso, ilustrando os efeitos da rotação de um corpo rígido.

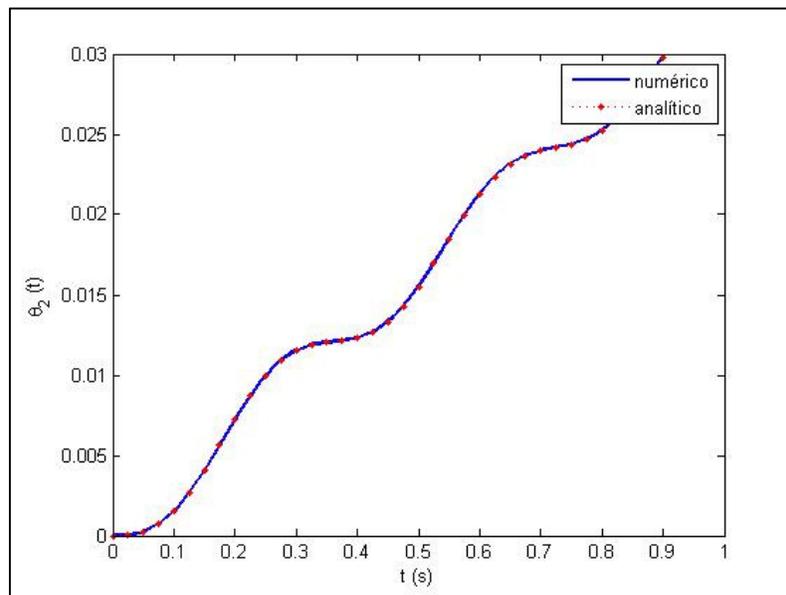


Figura 34. Resposta do componente 2 da Figura 30 a um impulso, ilustrando os efeitos da rotação de um corpo rígido.

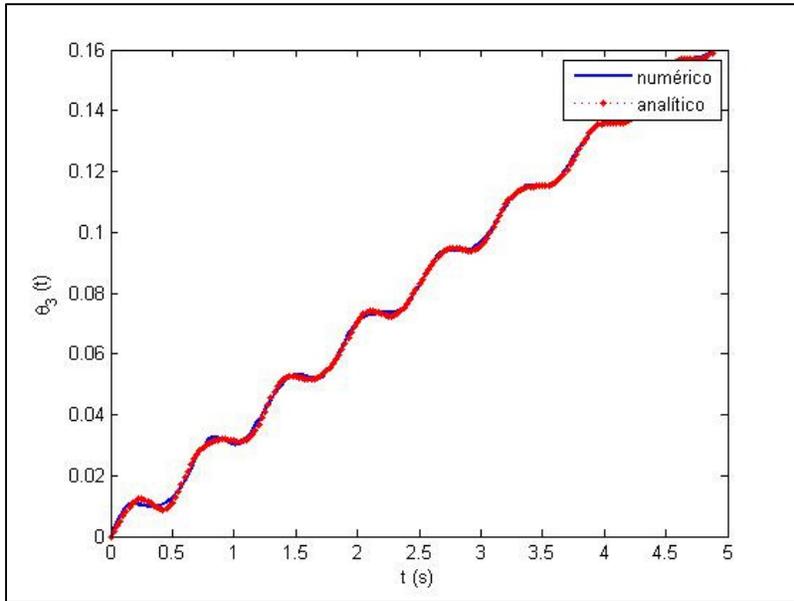


Figura 35. Resposta do componente 3 da Figura 30 a um impulso, ilustrando os efeitos da rotação de um corpo rígido.

Os resultados para os componentes 1, 2 e 3 sob os efeitos da vibração, sem o efeito de corpo rígido, são mostrados na Figura 36, Figura 37 e Figura 38, respectivamente.

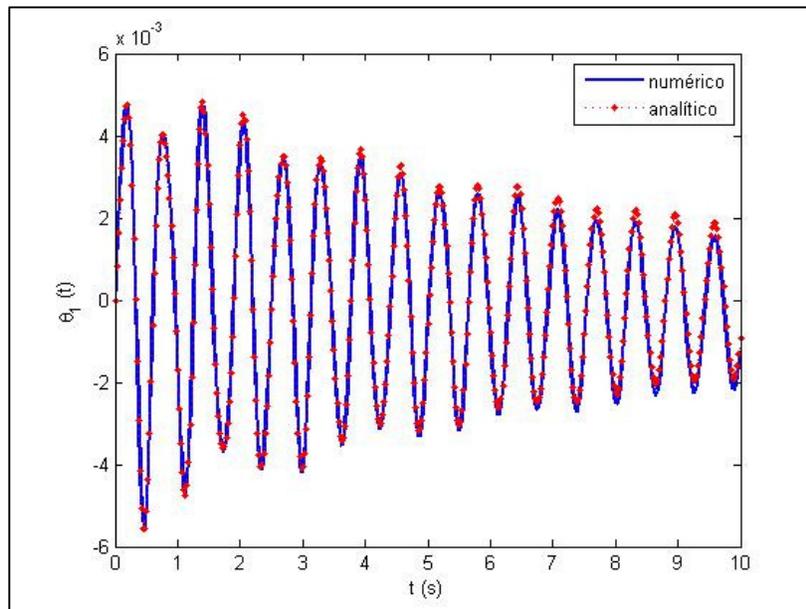


Figura 36. Resposta do componente 1 da Figura 30 a um impulso com efeito da vibração

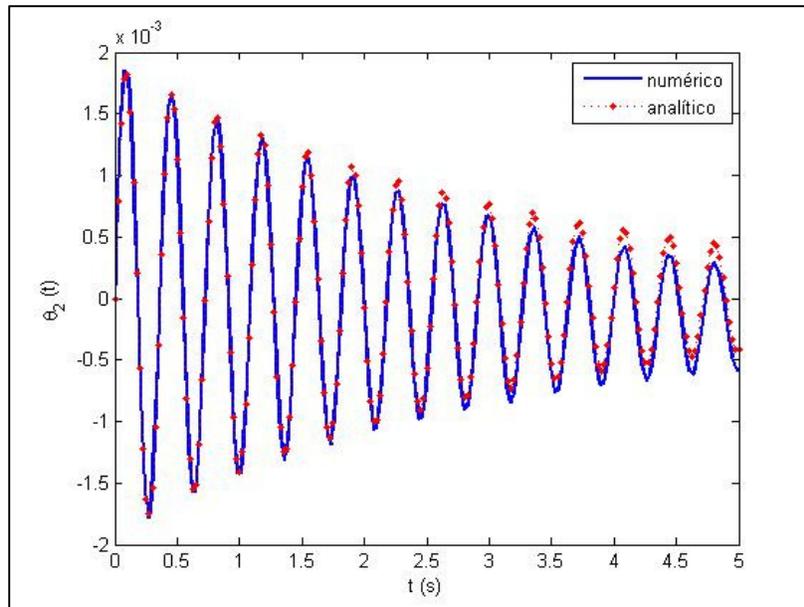


Figura 37. Resposta do componente 2 da Figura 30 a um impulso com efeito da vibração

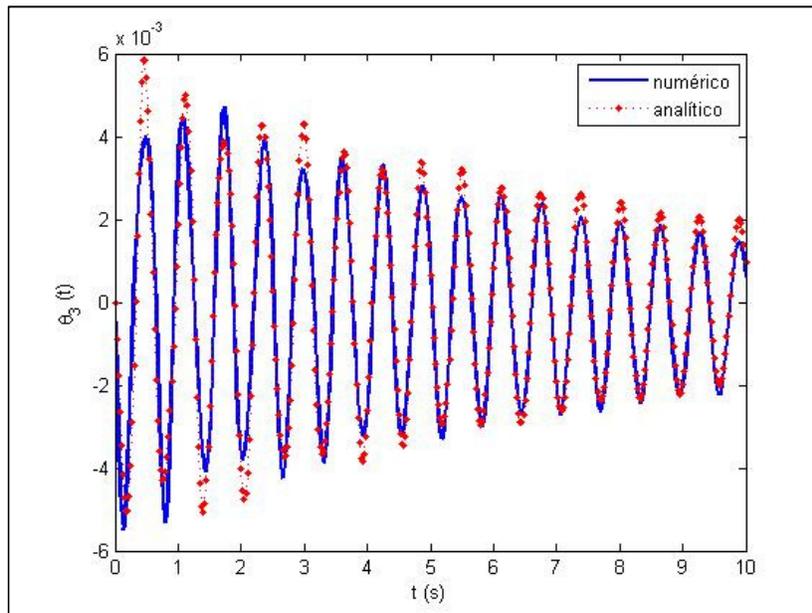


Figura 38. Resposta do componente 3 da Figura 30 a um impulso com efeito da vibração

É possível notar que os modelos são compatíveis e que o resultado gerado está dentro das expectativas, uma vez que as curvas geradas nos gráficos acima se sobrepõem. Isto significa que os resultados obtidos pelo modelo em Simulink equivalem aos obtidos por Inman (2001). Dessa forma, é possível afirmar que a metodologia de modelagem usando o Simulink é confiável para as simulações deste Projeto de Graduação.

4.2 VERIFICAÇÃO PARA O MODELO DE FRISWELL *ET AL.* (2011)

Friswell *et al.* (2011) publicou a modelagem da vibração de máquinas com engrenagens. Seu trabalho foi aplicado como forma de comparação de resultados e fornecimentos de dados para a simulação dos modelos desenvolvidos. Na Tabela 11, são apresentados os dados do programa de Friswell *et al.* (2011).

Tabela 11. Dados da caixa de engrenagens (Friswell *et al.*, 2011)

Dados	
Momento de inércia do rotor [kg/m ²]	7000
Momento de inércia da 1 ^a engrenagem [kg/m ²]	4000
Momento de inércia da 2 ^a engrenagem [kg/m ²]	13000
Momento de inércia do gerador [kg/m ²]	5000
Rigidez do 1 ^o eixo [N.m/rad]	1.6*10 ⁹
Rigidez do 2 ^o eixo [N.m/rad]	2.9*10 ⁸
Amortecimento no 1 ^o eixo [N.m.s/rad]	k ₁ *0.00002
Amortecimento no 2 ^o eixo [N.m.s/rad]	k ₂ *0.00002
Número de dentes da 1 ^a engrenagem	56
Número de dentes da 2 ^a engrenagem	111
Relação de Transmissão	0.5045

Para a comparação, são calculadas as frequências naturais do sistema no MATLAB Editor (Anexo II). As frequências calculadas por Friswell *et al.* (2011) e com o MATLAB são mostradas na Tabela 12.

Tabela 12. Frequências naturais obtidas do trabalho de Friswell *et al.* (2011)

Frequências naturais do sistema [rad/s]			
Friswell (2011)	$\omega_1 = 0$	$\omega_2 = 249.72$	$\omega_3 = 673.22$
MATLAB	$\omega_1 = 0$	$\omega_2 = 249.72$	$\omega_3 = 673.22$

A análise da Tabela 12 mostra que as equações e programas conferem com o que é fornecido pelo trabalho de Friswell *et al.* (2011).

Foi desenvolvido o programa para o trabalho do Friswell *et al.* (2011) em Simulink, seguindo as mesmas condições e estratégias adotadas para os modelos desenvolvidos de Três-Massas, Duas-Massas e Uma-massa.

A entrada é um bloco *Sine Wave* de torque que produz uma onda senoidal a uma frequência determinada. A amplitude do sinal é de 10^5 e a frequência é w . O programa é mostrado na Figura 39 e a frequência é dada de acordo com o programa elaborado no Editor do MATLAB, mostrado no Anexo II.

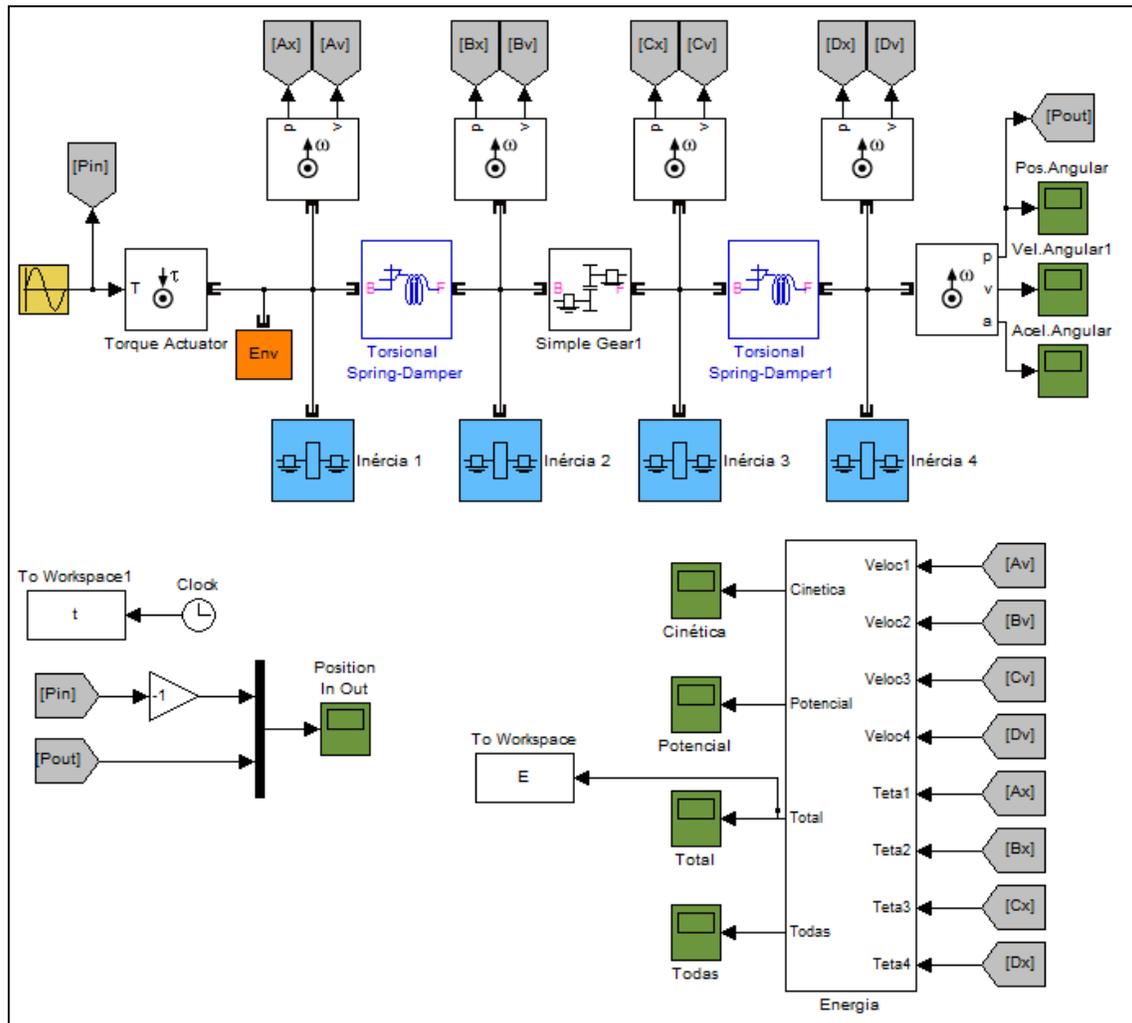


Figura 39. Modelo em Simulink para o modelo de Friswell et al. (2011)

O programa gera como resultados a aceleração angular, a velocidade angular e a posição angular do último componente (gerador). Porém o foco do estudo de Friswell *et al.* (2011) é a energia total do sistema. Foi desenvolvido um subsistema Energia para calcular as energias totais do sistema. Esse subsistema é apresentado na Figura 40. Nele é possível ver o somatório de energia cinética e energia potencial. As saídas são dadas pelos blocos *Scope* (em verde) na Figura 39.

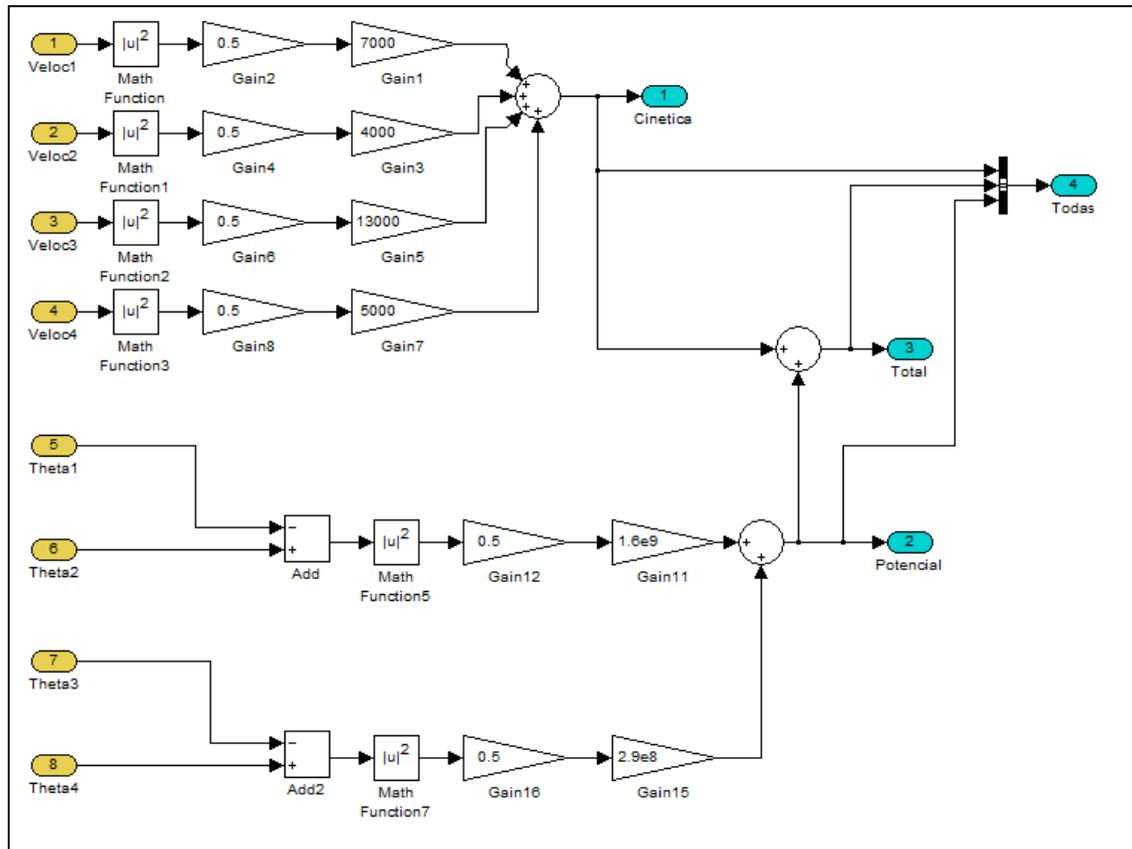


Figura 40. Subsistema Energia para o modelo de Três-Massas

4.3 VERIFICAÇÃO DO MODELO DO LABORATÓRIO RISO

O foco deste projeto de graduação é a verificação do modelo proposto pelo Laboratório Riso. Em seu trabalho, Iov *et al.* (2004) descreve que o modelo de Uma-Massa para turbinas eólicas resulta em valores satisfatórios em comparação com o modelo de Três-Massas. Segundo ele, o modelo de Três-Massas tem um custo de processamento maior e apresenta os mesmos resultados que o de Uma-Massa.

Para verificar essa equivalência entre os modelos, tomou-se os dados de Friswell *et al.* (2011), usando as equivalências e simplificações que o Laboratório Riso propõe.

Considerando o modelo de Três-Massas (Figura 39) e os parâmetros propostos por Friswell *et al.* (2011) obtêm-se, usando o modelo Computacional desenvolvido neste projeto de graduação, o resultado mostrado na Figura 41. Esta figura apresenta a variação da energia total do sistema em função da velocidade angular.

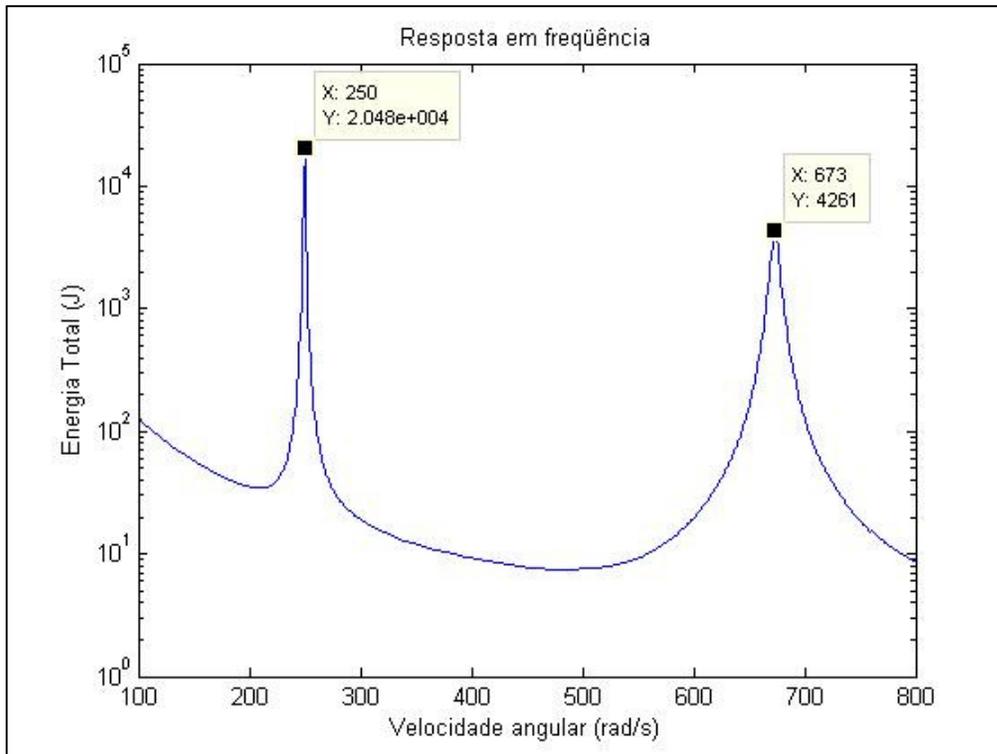


Figura 41. Gráfico da energia total do sistema em função da velocidade angular para modelo de Três-Massas

Os dois picos de energia na figura acima são devidos às frequências naturais do sistema. É possível notar que os pontos de pico coincidem com os descritos na Tabela 12. Nestes pontos ocorre o fenômeno da ressonância. Os dois picos são esperados já que o modelo possui três graus de liberdade.

Para o modelo de Duas-Massas é esperado somente um pico uma vez que o modelo é simplificado para um eixo com rigidez e amortecimento. O programa para Duas-Massas é mostrado na Figura 42.

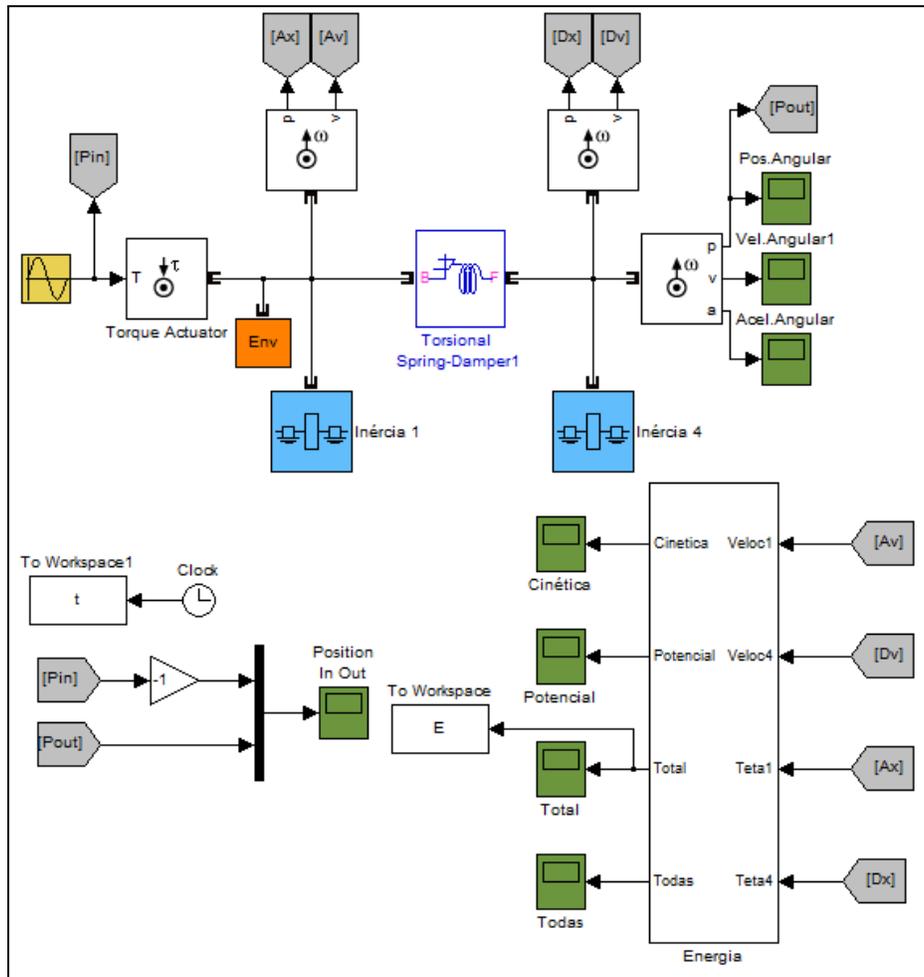


Figura 42. Modelo Friswell para Duas-Massas

O subsistema Energia é mostrado na Figura 43.

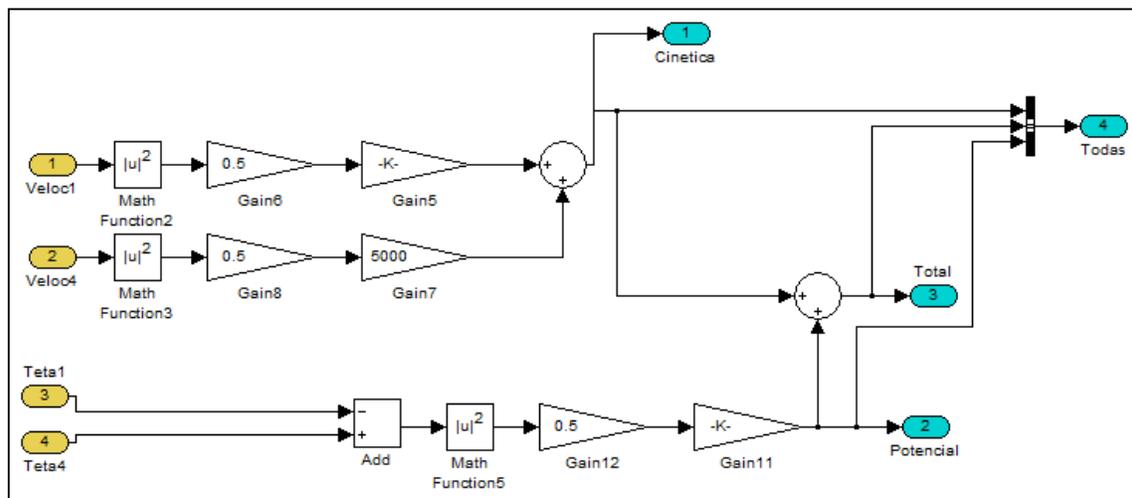


Figura 43. Subsistema Energia para o modelo de Duas-Massas

A energia total do sistema em função da velocidade angular para o modelo de Duas-Massas é mostrado na Figura 44. O pico de energia ocorre novamente no ponto da frequência natural, que é dada por:

$$\omega_n = \sqrt{k_{eq}/J_{eq}} \quad (71)$$

Para se calcular as equivalências necessárias têm-se as equações:

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{i^2 k_2} = 70.557 * 10^6 N.m/rad \quad (72)$$

$$\frac{1}{J_{eq}} = \frac{1}{J_1} + \frac{1}{i^2 J_2} = 1076.85 kg.m^2 \quad (73)$$

Assim, resulta que a frequência natural para o modelo de Duas-Massas de Friswell et al. (2011) é dada na Tabela 13. E é neste ponto que ocorre a ressonância no gráfico da Figura 44.

Tabela 13. Frequência natural do sistema de Duas-Massas

Frequência natural do sistema [rad/s]	
0	255.97 \cong 256

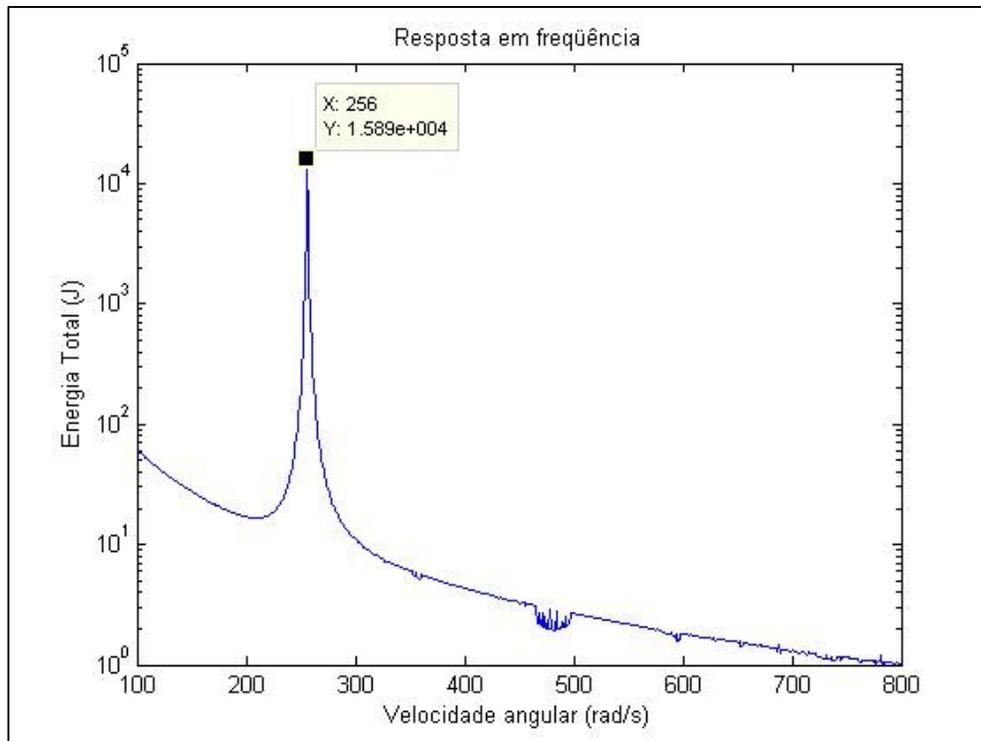


Figura 44. Gráfico da energia total do sistema em função da velocidade angular para modelo de Duas-Massas

No gráfico acima, entre 400 e 500 rad/s, a curva apresenta oscilações por erros numéricos no cálculo do programa. Tais erros são considerados pequenos e não afetam o resultado para a modelagem de Duas-Massas.

Já no modelo de Uma-Massa é esperado que o gráfico não tenha picos, pois o laboratório Riso desconsidera o amortecimento e a rigidez do eixo. O programa desenvolvido para o modelo de Uma-Massa é mostrado na Figura 45.

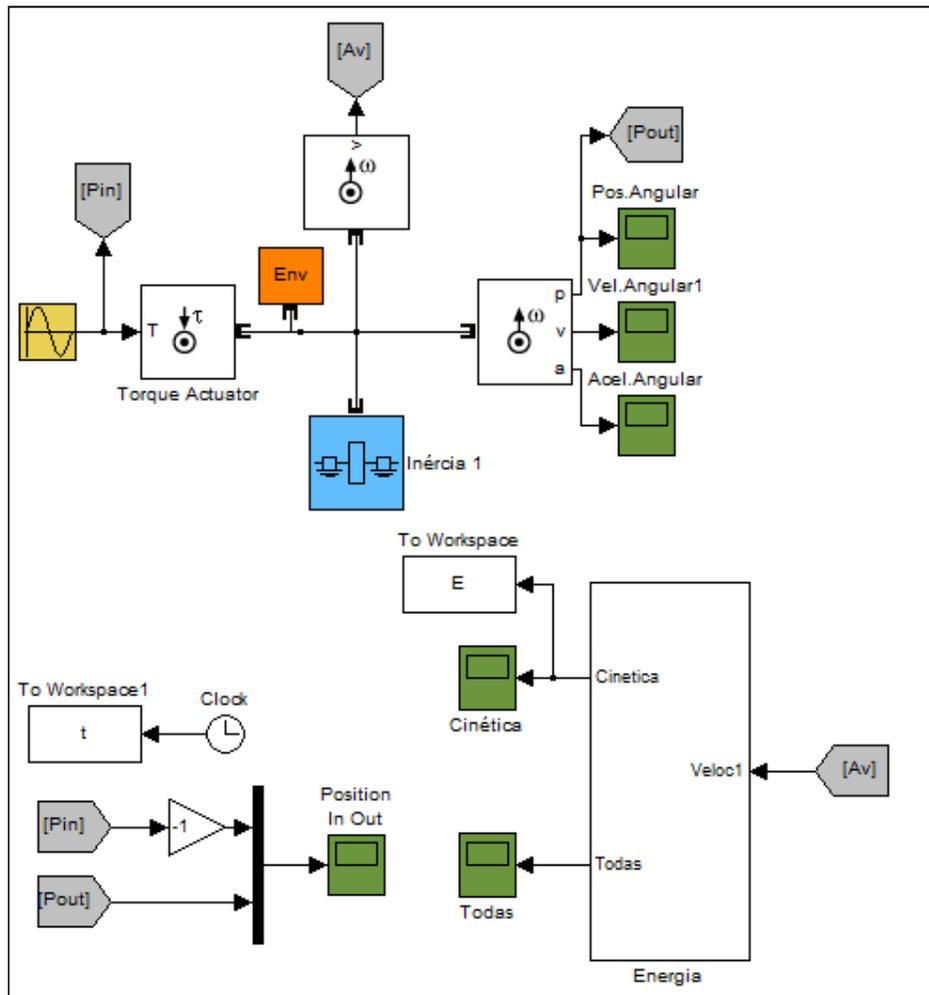


Figura 45. Modelo Friswell para Uma-Massa

O subsistema Energia é mostrado na Figura 46. Para o modelo de Uma-Massa, a energia total é igual à energia cinética do único momento de inércia do sistema. Não há energia potencial, pois não há rigidez no eixo.

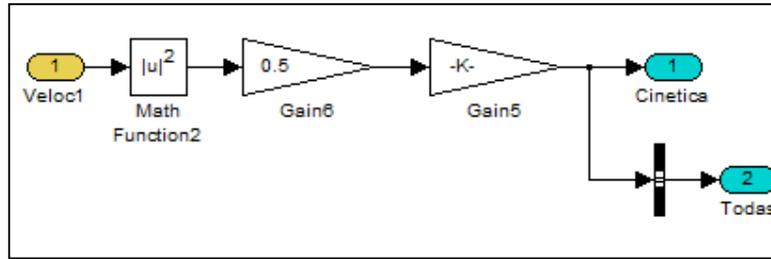


Figura 46. Subsistema Energia para o modelo de Uma-Massa

A Figura 47 apresenta a energia total do sistema como o esperado: uma curva sem picos.

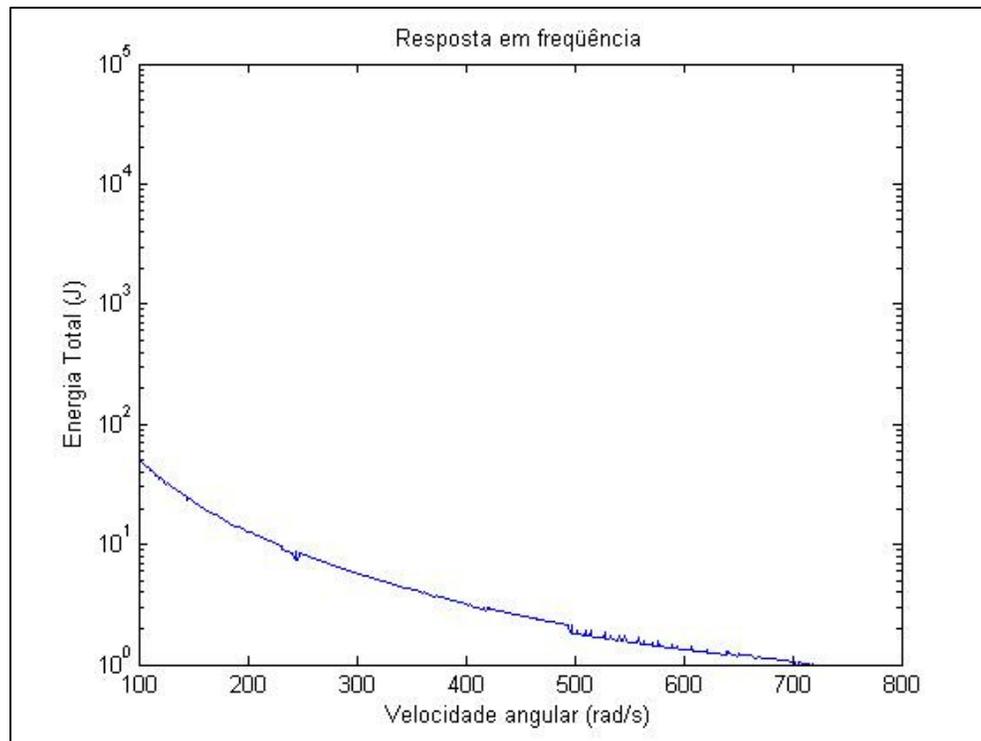


Figura 47. Gráfico da energia total do sistema em função da velocidade angular para modelo de Uma-Massa

O laboratório Riso afirma que é possível trocar o modelo de Três-Massas pelo modelo de Uma-Massa sem perda de eficiência ou qualquer perda nos resultados. Após montagem, a modelagem dos sistemas desenvolvidos e as verificações com a literatura disponível é oportuno afirmar que o modelo do laboratório Riso é aceitável para baixas frequências. Na Figura 48 é possível ver que até a frequência (~200 rad/s), os modelos são parecidos, não havendo picos de ressonância. Então, para análise de aerogeradores, pode-se simplificar o modelo de Três-Massas para o modelo de Uma-Massa em baixas frequências.

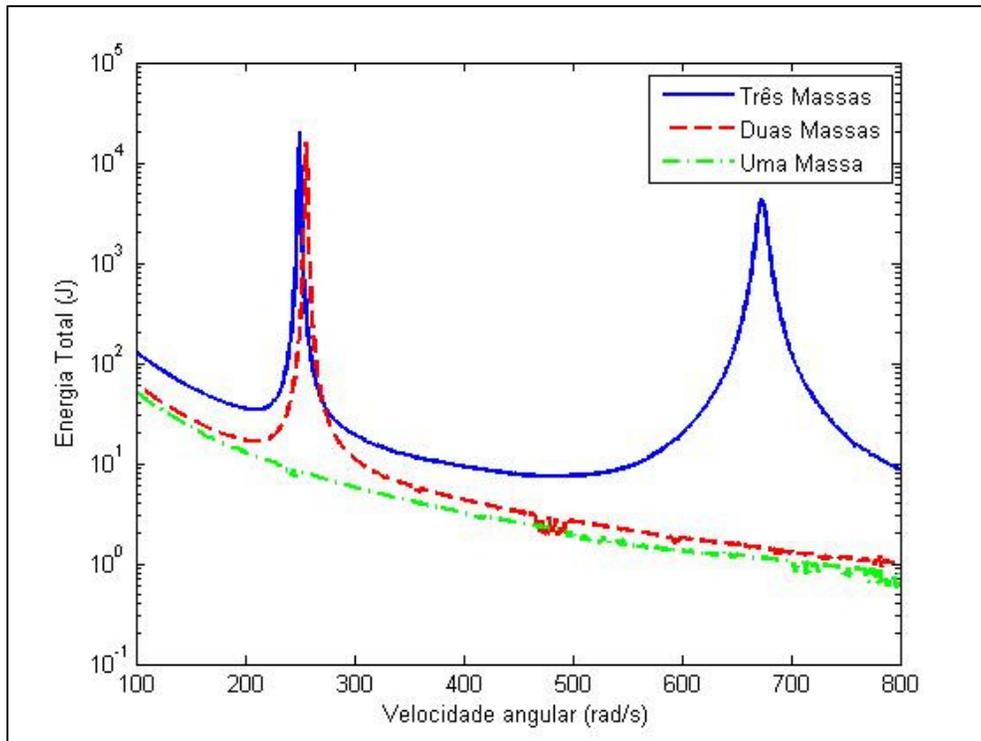


Figura 48. Gráfico da energia total do sistema em função da velocidade angular para os Três Modelos

5. CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta uma breve explanação dos resultados obtidos e sugere trabalhos a serem desenvolvidos.

Neste trabalho foram desenvolvidos modelos em Simulink para turbinas eólicas. Nesses modelos foram verificados, de acordo com trabalhos técnicos já existentes, os resultados simulados com os disponíveis na literatura. Foi possível verificar que as simulações realizadas geraram resultados satisfatórios.

Os modelos foram desenvolvidos para a modelagem de caixas multiplicadoras de velocidades, mas compreendem também o rotor e o gerador. São simples e versáteis, pois podem ser utilizados para qualquer sistema que tenha como foco a inércia e que tenha uma caixa de engrenagens. Para o caso da Universidade de Brasília, esse projeto de graduação pode ser útil no projeto de aerogeradores para aproveitamento de energia eólica e no projeto de turbinas hidrocínéticas, para aproveitamento da energia cinética de rios, sendo necessária apenas a modificação dos parâmetros dos modelos, conforme o caso estudado.

No caso da verificação do trabalho proposto por Iov *et al.* (2004), os modelos de equivalência são aceitáveis para a simulação real de um sistema de turbinas eólicas. Os resultados obtidos foram analisados e aprovados após análise dos gráficos gerados.

Conclui-se, portanto que os objetivos deste projeto de graduação foram alcançados, que a metodologia adotada permitiu a obtenção dos produtos esperados, a saber os modelos computacionais desenvolvidos em MATLAB/Simulink, e que os resultados foram satisfatórios.

Como sugestões para trabalhos futuros e aperfeiçoamento dos modelos desenvolvidos, indicam-se os pontos seguintes:

O primeiro ponto a ser considerado diz respeito à modelagem do sistema de transmissão considerando a velocidade crítica do rotor e dos componentes do aerogerador.

Futuros modelos devem também incluir os efeitos dos sistemas de frenagem e atuadores na velocidade de rotação do rotor, dos eixos e dos demais componentes girantes.

Especial atenção também deve ser dada à modelagem do gerador elétrico, de forma a incluir características deste que possam influenciar na qualidade da eletricidade gerada.

Por fim um refinamento da pesquisa pode incluir estudo para modelagem dos ventos e seus efeitos aleatórios sob o comportamento dinâmico do conjunto aerogerador. Isto é importante porque o sinal de entrada nos modelos desenvolvidos é fundamental para a obtenção de resultados considerados confiáveis. Contudo, para a obtenção dessas informações é necessária a coleta de dados dos mais diversos lugares em que as turbinas eólicas estão ou serão instaladas.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ackermann, T., SoÈ der, L., 2000, **Wind Energy Technology and Current Status: A Review**, Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia Royal , Estolcomo - Suíça.
- Albuquerque, O. A. L. P., 1980, **Elementos de Máquinas**, 1ª Ed., Guanabara Dois, Rio de Janeiro – RJ.
- Betz A. **Windenergie e ihre Ausnutzung durch Windmhlen**. Editora: Vandenhoeck e Ruprecht, 1982 1926 (Reimpresso por OÈ ko-Verlag Kassel, Alemanha 1982).
- Beucher, O., Weeks, M., 2007, **Introduction to MATLAB and Simulink: A Project Approach**, 3ª Ed. Infinity Science Press.
- Carlin, P. W., Laxson, A. S., Muljadi, E. B., 2001, **The history and Stade of the Art of Variable-Speed Wind Turbines Technology**, NREL.
- CRESESB, 2008, **Energia Eólica: Princípios e Aplicações**.
- Dutra, R., 2008, **Energia Eólica: Princípios e Tecnologias**, CRESESB.
- Fórum Capixaba de mudanças Climáticas e uso Racional da água (FCMC), **Energia Eólica**, em Portal do Governo do Estado do Espírito Santo, Disponível em: < http://www.fcmc.es.gov.br/download/energia_eolica.pdf >. Acesso em: 5/11/2011.
- Freitas, A. W., 2008, **Controlo de Passo de Aerogeradores de Baixa Potência**, Faculdade de Engenharia do Porto, Portugal.
- Friswell, M. I., Lees, A. W., Litak, G., 2011, **Controlo Torsional Vibration of Machines with Gear Errors**, 9th International Conference on Damage Assessment of Structures, Journal of Physics: Conference Series 305.
- Heier, S., 1998, **Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems**. 2ª Ed., John Wiley & Sons Ltda, Universidade de Kassel, Alemanha.
- Inman, D., J., 2001, **Engeneering Vibration**. 2ª Ed., Pearson Education Prentice Hall International, Inc., Upper Saddle River New Jersey, Estados Unidos.
- Iov, F., Hansen, A. D., Sorensen, P., Blaabjerg, F., 2004, **Wind Turbine Blockset in MATLAB/Simulink: General Overview and description of the models**, Aalborg University, Aalborg, Dinamarca.
- Marques, J., ET AL, 2002, **A Survey on Variable-Speed Wind Turbine System**, In: 6º Congresso Brasileiro de Eleytronica de potência – COBEP'02, v.1, pp. 732-738.
- Marsaglia, G., Tsang, W.W., 2000, **The Ziggurat Method for Generating Random Variables**, Journal of Statistical Software, vol. 5, no. 8, 7 pp.;
- Molly, J.P., et al, 2011, **Wind Energy in the World**, Wind Energy Seminar 2011, curso proferido pelo instituto Alemão de energia eólica – DEWI, Rio de janeiro, 23-28 de setembro.
- Muyeen, S. M., Tamura, J., Murata, T., 2009, **Stability Augmentation of a Grid-Connected Wind Farm**, 1ª Ed., Springer, Hokkaido – Japão.

- Oliveira, R. F., 2008, **Usinas**, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba – PR.
- Pavinatto, F. E., 2005, **Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica**. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro RJ.
- Peeters, J., 2006, **Simulation of Dynamic Drive Train Loads in a Wind Turbine**, Universidade Católica de Leuven – Bélgica.
- Planeta Neutro: Blog personal sobre las energias del futuro. **Energias Renovables**. Disponível em: <<http://www.renovables-energia.com/>>. Acesso em 28/10/2011.
- Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS). **Centro de Energia Eólica – CE-Eólica**. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/ce-eolica/index.htm>>. Acesso em: 8/11/2011.
- Shigley, J. E., Mischke, C. R., Budynas, R.G., 2005, **Projeto de Engenharia Mecânica**, 7ª Ed., Bookman, São Paulo – SP.
- Vieira, A. L., Aerogeradores – Usinas Eólicas. Disponível em: <<http://alvaro.lima.vieira.50megs.com/aerogeradoresusinaseolicas.html>>. Acesso em 13/02/2012.
- Todorov, M., Vukov, G., 2010, **Parametric Torsional Vibrations Of A Drive Train In Horizontal Axis Wind Turbine**, 1ª Conferência franco-sírio de Energias Renováveis, Damas, França.
- Wang, J., Qin, D. and Ding, Y., 2009, **Dynamic Behavior of Wind Turbine by a Mixed Flexible-Rigid Multi-Body Model**, Chongqing University.

7. ANEXOS

	Pág.
Anexo I Programas de pré-processamento	61
Anexo II Programas de pós-processamento	63

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%Projeto de Graduação 2%%%%%%%%
%%%%%%%%Modelagem Dinâmica de Componentes Mecânicos de Aerogeradores%%%%%%%%
%%%%%%%%Por Cássia Resende Silva Vitorino%%%%%%%%
%%%%%%%%2012%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%Torque de entrada%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
%Dados de entrada
```

```

J_1 = 40e5;
J = 34.654; %J equivalente da caixa multiplicadora
J_4 = 90;
k = 75;
alpha=3;

```

```

J_eq=J_1+J+J_4*k^2
T=alpha*J_eq

```

```

J_3=0.005; %Considerando que o momento de inércia na 1a engrenagem é 0.005
J_2=-J_3*(k^2)+J

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%Equivalência no modelo de Duas-Massas%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
%Dados de entrada
```

```

J_wtr = 40e5;
k_gear = 75;
K_wtr = 9e7;
K_gen = 9e7;
D_wtr = 6e5;
D_gen = 6e5;

```

```
%Fórmulas
```

```

J_wtr_eq = J_wtr/(k_gear^2)

K_se_eq = ((K_wtr/(k_gear^2))*K_gen)/((K_wtr/ k_gear^2)+K_gen)

D_se_eq = ((D_wtr/(k_gear^2))*D_gen)/((D_wtr/ k_gear^2)+D_gen)

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%Equivalência no modelo de Uma-Massa%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Datos de entrada
J_gen = 90;
J_wtr = 40e5;
k_gear = 75;

%Fórmulas
J_ech = (J_gen + J_wtr)/(k_gear^2)

T_ech_wtr = T_wtr / (k_gear^2)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```



```

plot(t_i, Theta_2_rb_i, 'r.:', 'MarkerSize', 10)
hold off
axis([0 1 0 30e-3])
xlabel('t (s)')
ylabel('\theta_2 (t)')
legend('numérico', 'analítico')
box on

figure(4)
hold on
plot(t, Theta_2_v, 'b-', 'LineWidth', 2)
plot(t_i, Theta_2_v_i, 'r.:', 'MarkerSize', 10)
hold off
axis([0 5 -2e-3 2e-3])
xlabel('t (s)')
ylabel('\theta_2 (t)')
legend('numérico', 'analítico')
box on

% Theta_1
Theta_1_v_i = +0.0050.*exp(-0.1.*t_i).*sin(9.9995.*t_i) ...
             -0.0010.*exp(-0.2999*t_i).*sin(17.3179*t_i);
Theta_1_rb_i = 0.0333.*t_i - Theta_1_v_i ;

figure(5)
hold on
plot(t, Theta_1_rb, 'b-', 'LineWidth', 2)
plot(t_i, Theta_1_rb_i, 'r.:', 'MarkerSize', 10)
hold off
axis([0 5 0 0.16])
xlabel('t (s)')
ylabel('\theta_1 (t)')
legend('numérico', 'analítico')
box on

figure(6)
hold on
plot(t, Theta_1_v, 'b-', 'LineWidth', 2)
plot(t_i, Theta_1_v_i, 'r.:', 'MarkerSize', 10)
hold off
axis([0 10 -6e-3 6e-3])
xlabel('t (s)')
ylabel('\theta_1 (t)')
legend('numérico', 'analítico')
box on

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Dados de entrada

% Problema Lees, Friswel & Litak (2011)
j1=7000; j2=4000; j3=13000; j4=5000;
N_2 = 56;
N_3 = 111;
k1 = 1.6e9;
k2 = 2.9e8;

```

```

c1 = 0.00002*k1;
c2 = 0.00002*k2;

i=N_2/N_3

%Matriz J
J=zeros(3,3);
J(1,1)=j1; J(2,2)=j2+(j3*(i^2)); J(3,3)=j4;
J

%Matriz K
K=zeros(3,3);
K = [ k1 -k1          0 ; ...
      -k1 (k1+((i^2)*k2)) i*k2 ; ...
       0          i*k2    k2 ];
K

%Matriz C
C=zeros(3,3);
C = [ c1 -c1          0 ; ...
      -c1 (c1+((i^2)*c2)) i*c2 ; ...
       0          i*c2    c2 ];
C

%Eigenvalue eigenvalue
Jr=sqrtm(J); Kt=inv(Jr)*K*inv(Jr);
[V,D]=eig(Kt);
V1=fliplr(V);

eignvalues=V1'*Kt*V1;
freq=abs(sqrtm(eignvalues))/(2*pi)

V1'*V1

%Resultados do Programa acima

i =

    0.5045

J =

    1.0e+003 *
    7.0000         0         0
         0    7.3088         0
         0         0    5.0000

K =

    1.0e+009 *
    1.6000   -1.6000         0
   -1.6000    1.6738    0.1463
         0     0.1463    0.2900

C =

```

```

1.0e+004 *

    3.2000   -3.2000         0
   -3.2000    3.3476    0.2926
         0     0.2926    0.5800

freq =

    107.1463    0.0000    0.0000
         0     39.7437    0.0000
         0     0.0000    0.0000

ans =

    1.0000   -0.0000    0.0000
   -0.0000    1.0000    0.0000
    0.0000    0.0000    1.0000

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%Variação das Frequências para o modelo de Friswell%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all;
clf; close all;
%_____Sweep_Frequency_____
NN=700+1;
EF=zeros(1,NN);
wv=linspace(100,800,NN);%frequencia
for i=1:NN
    w=wv(i);
    sim('spurgear_Friswell_Posicao', [0 15]); % 0 a 15 é o tempo
    compr=size(E);
        N0=round(compr/10); EFinalMaxima=max(E(end-N0:end));
        disp(['NN(numero do ponto=',num2str(i)]);
        disp('_____');
            disp(['    EFinalMaxima=',num2str(EFinalMaxima)])
            disp(['    w=',num2str(w)])
            EF(i)=EFinalMaxima;
end
figure(2);
semilogy(wv,EF);hold;
xlabel('Velocidade angular (rad/s)')
ylabel('Energia Total (J)')
title('Resposta em frequência')

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```