



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia de Energia

DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DE CALIBRAÇÃO DE MICRODINAMÔMETROS ELÉTRICOS

Autor: Rafael Castilho Faria Mendes
Orientador: Prof. Taygoara Felamingo de Oliveira

Brasília, DF
2013



Rafael Castilho Faria Mendes

DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DE CALIBRAÇÃO DE MICRODINAMÔMETROS ELÉTRICOS

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Taygoara Felamingo de Oliveira

Brasília, DF

2013

DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DE CALIBRAÇÃO DE MICRODINAMÔMETROS ELÉTRICOS/ Rafael Castilho Faria Mendes. – Brasília, DF, 2013-

59 p. : il.; 30 cm.

Orientador: Prof. Taygoara Felamingo de Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2013.

1. Microdinamômetros elétricos. 2. Turbina hidrocínética. 3. Bancada experimental. 4. Motor CC I. Universidade de Brasília. II. Faculdade UnB Gama. III. DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DE CALIBRAÇÃO DE MICRODINAMÔMETROS ELÉTRICOS

CDU 02:141:005.6



DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DE CALIBRAÇÃO DE MICRODINAMÔMETROS ELÉTRICOS

Rafael Castilho Faria Mendes

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 17 de julho de 2013:

Prof. Taygoara Felamingo de Oliveira
Orientador

Prof^a. Thais Maia Araújo
Convidado 1

Prof. Luciano Gonçalves Noletto
Convidado 2

Brasília, DF
2013

*Dedico este trabalho a meu Pai,
que sempre estará comigo.*

Agradecimentos

A Deus, por me proporcionar a vida que tenho.

A minha Mãe, por sempre me fazer ver o lado bom da vida.

A minha namorada, Luiza, por estar ao meu lado em todos os momentos.

A todos os professores da Universidade de Brasília, em especial a meu amigo, prof. Taygoara, pela paciência e por ser um grande exemplo pra mim.

Aos meus amigos e familiares, por me apoiarem sempre.

A empresa DOGA do Brasil, por ter doado os motores para construção da bancada de ensaios.

Resumo

O presente texto apresenta o desenvolvimento de um sensor de potência (microdinamômetro) para ser usado em ensaios de modelo reduzido de turbinas hidrocínéticas. Será usado como sensor um motor de corrente contínua, pois esse motor funciona como gerador e quando calibrado pode ser utilizado para medir a potência em um eixo por meio do sinal elétrico de sua saída. Neste trabalho é descrito toda a metodologia utilizada durante a calibração do microdinamômetro, desde a construção da bancada até os resultados finais. A calibração pode ser descrita como uma relação entre a potência elétrica de saída e a potência mecânica de entrada. São descritos duas metodologias distintas para obter a potência de eixo: uma utilizando uma medição direta da velocidade angular e torque no eixo; já a outra utilizada foi um método indireto de obtenção das potências por meio do cálculo dos torques parasitas. Este trabalho traz como um dos resultados as curvas de eficiência do microdinamômetro e uma comparação entre os métodos.

Palavras-chaves: microdinamômetro elétrico. Turbina hidrocínética. Bancada experimental. Motor CC.

Abstract

This paper presents the development of a power sensor (micro dynamometer) to be used in assays in reduced model of hydrokinetic turbines. It was used a DC motor as a sensor, because this motor works as a generator and when calibrated, it can be used to measure power on an axis by his electrical signal output. This work describes the methodology used during the entire micro dynamometer calibration, since the construction of the experimental bench until the final results. The calibration can be described as a relationship between the electric power output and mechanical power input. It is describe two different methodologies to obtain the shaft power: one using a direct measurement of the angular velocity and torque on the shaft; the other way, is using an indirect method of obtaining power by calculating the parasites torques. One of the results of this work is the micro dynamometer efficiency curves and a comparison between the methods.

Key-words: Electric micro dynamometer. Hydrokinetic turbine. Experimental bench. DC Motor.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Consumo de energia mundial	13
Figura 2 – Exemplo de turbina hidrocínética	15
Figura 3 – Previsão da capacidade hidrocínética	15
Figura 4 – Turbinas de eixo vertical	16
Figura 5 – Turbinas de eixo horizontal	16
Figura 6 – Exemplo das três posições de fixação de uma turbina hidrocínética . . .	17
Figura 7 – Difusor e estator de uma turbina hidrocínética	18
Figura 8 – Turbina hidrocínética Geração 1	19
Figura 9 – Turbina hidrocínética Geração 2	19
Figura 10 – Turbina hidrocínética Geração 3	20
Figura 11 – Projeto turbina hidrocínética de grande porte	21
Figura 12 – Modelo Reduzido da turbina hidrocínética de grande porte(mm)	22
Figura 13 – Projeto da bancada de ensaio de microdinamômetros	27
Figura 14 – Dimensões do projeto da bancada(mm)	27
Figura 15 – Foto do suporte da bancada de ensaio	28
Figura 16 – Foto do motor utilizado	28
Figura 17 – Foto do acoplamento de teflon e da correia de couro	29
Figura 18 – Circuito do obtenção dos dados elétricos	29
Figura 19 – Circuito do sensor de velocidade	30
Figura 20 – Exemplo da configuração do freio de Prony	30
Figura 21 – Configuração do freio de Prony	31
Figura 22 – Sensores utilizados para medição da potência	32
Figura 23 – Diagrama elétrico para ensaio do gerador	32
Figura 24 – Diagrama elétrico para o ensaio de perdas do motor	33
Figura 25 – Diagrama de blocos do sistema Motor/Gerador	39
Figura 26 – Simulação numérica do rendimento	40
Figura 27 – Simulação do comportamento do rendimento em função da carga . . .	40
Figura 28 – Ensaio utilizando o Freio de Prony	42
Figura 29 – Curva experimental do fator de atrito	43
Figura 30 – Ensaio utilizando o Fator de atrito	44
Figura 31 – Comparação dos métodos	46

Lista de tabelas

Tabela 1 – Curvas de rendimento com o método do freio de Prony	42
Tabela 2 – Curvas de rendimento com o método do fator de atrito	44
Tabela 3 – Método com freio de Prony - Dados	50
Tabela 4 – Fator de atrito - Motor - Dados de velocidade	55
Tabela 5 – Fator de atrito - Motor - Dados de corrente	55
Tabela 6 – Fator de atrito - Dados de geração	58

Lista de símbolos

Símbolos Latinos

D	Diâmetro	[m]
F	Força	[N]
i	Corrente elétrica	[A]
P	Potência	[W]
r	Raio	[m]
R	Resistência elétrica	[Ω]
T	Torque	[N.m]
U	Velocidade do escoamento	[m/s]
V	Tensão elétrica	[V]
f	Fator de atrito	

Símbolos Gregos

ω	Velocidade angular	[rps]
δ	Erro associado	
η	Rendimento	
λ	Velocidade de ponta de pá	

Sobrescritos

—	Valor Medido
---	--------------

Subscritos

mr	Modelo reduzido
------	-----------------

P	Protótipo
-----	-----------

Siglas

IEA	International Energy Agency
-----	-----------------------------

UnB	Universidade de Brasília
-----	--------------------------

SIN	Sistema Interligado Nacional
-----	------------------------------

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	ASPECTOS GERAIS	13
1.1.1	Situação energética do Brasil	14
1.2	ENERGIA HIDROKINÉTICA	14
1.2.1	Componentes de uma turbina hidrocínética	16
1.2.2	Evolução da turbina hidrocínética na Universidade de Brasília	18
1.3	DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE GERAÇÃO HIDROKINÉTICA DE GRANDE PORTE: O PROJETO TUCUNARÉ	20
1.3.1	A turbina hidrocínética	21
1.3.2	Modelo reduzido	21
1.4	OBJETIVOS	22
1.4.1	Objetivos Gerais	22
1.4.2	Objetivos Específicos	22
2	TÉCNICAS DE ENSAIO EM MODELO REDUZIDO	23
2.1	TEORIA DE SIMILARIDADE	23
2.2	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO	24
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	26
3.1	CONCEPÇÃO DA BANCADA DE CALIBRAÇÃO DE MICRODINAMÔMETROS	26
3.2	DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DA BANCADA	27
3.2.1	Suporte	27
3.2.2	Motores de Corrente Contínua	28
3.2.3	Acoplamento	28
3.2.4	Instrumentação	29
3.3	MEDIDA DIRETA DA POTÊNCIA DE EIXO – FREIO DE PRONY	31
3.4	MEDIDA INDIRETA DA POTÊNCIA DE EIXO – MODELO SIMPLIFICADO DO GERADOR	32
3.5	ESTUDO DE PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS	34
3.6	PROTOCOLOS EXPERIMENTAIS	36
3.6.1	Ensaio com o freio de Prony	36
3.6.2	Ensaio utilizando o fator de atrito	37
4	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO MICRODINAMÔMETRO	39

5	RESULTADOS	41
5.1	GENERALIDADES DOS ENSAIOS	41
5.2	ENSAIOS COM A UTILIZAÇÃO DO FREIO DE PRONY	41
5.3	ENSAIOS COM A UTILIZAÇÃO DO FATOR DE ATRITO	43
5.4	COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS	45
6	CONCLUSÃO	47
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
ANEXO A	Dados do método do freio de Prony	50
ANEXO B	Dados do método do fator de atrito	55

1 Introdução

1.1 ASPECTOS GERAIS

No mundo atual é visível a enorme dependência do homem por diversas fontes de energia, podendo ser elas: elétrica, térmica, hidráulica, química, entre outras. Pode-se notar que devido ao crescimento global, tanto econômico quanto populacional, a demanda do consumo de energia tem aumentado constantemente. Segundo Güney & Kaygusuz (2010), a projeção para o consumo no ano de 2030 é mais do dobro da quantidade de energia consumida no ano de 1980, como observado nos dados da Fig.(1).

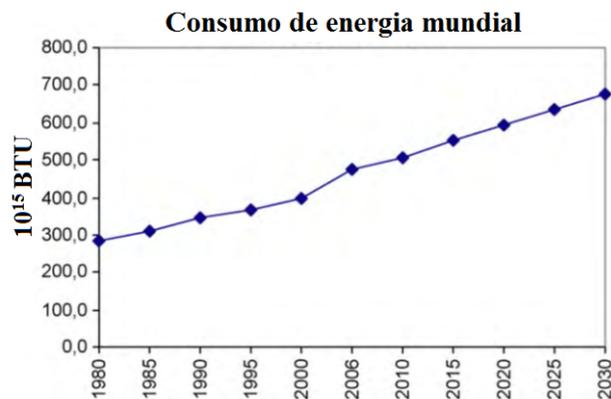


Figura 1: Consumo de energia mundial

Em vista desse cenário de crescimento, é evidente que a quantidade de pólos produtores de energia tenham que aumentar e que suas produções expandam para suprir a crescente demanda. Para ampliar de maneira significativa a produção de energia é importante que aconteçam melhorias na tecnologia utilizada na geração e transmissão. É necessário investir em opções energéticas menos exploradas, o que já vem acontecendo com algumas fontes. O principal exemplo é a evolução da exploração da energia eólica, que vem, nos últimos anos, aumentando significativamente sua proporção na matriz energética mundial.

Hoje o uso de fontes tradicionais ainda é muito elevado, segundo a International Energy Agency (IEA), em 2009, a oferta de energia foi composta por 80,9% proveniente de combustíveis fósseis. Sendo que a maior parte da produção dessa energia é feita por meio da queima, liberando assim uma quantidade muito grande de poluentes.

Porém hoje em dia é importante que o crescimento energético venha de maneira “limpa”, ou seja, tentando minimizar os danos causados ao meio ambiente. A busca por energias renováveis é um dos principais estímulos que pesquisadores têm para continuar

seus trabalhos em busca de um mundo mais sustentável.

1.1.1 Situação energética do Brasil

O Brasil é um destaque em matéria de produção de energia renovável, pois a maior fatia de sua matriz energética é proveniente de hidrelétricas. Também pode-se destacar no Brasil, o seu pioneirismo no uso de biocombustíveis e seu crescente investimento em energia eólica, que ainda ocupa uma baixa porcentagem da matriz energética. Entretanto, há também outras fontes não renováveis presentes em sua matriz. Dentre todas as outras, destaca-se a utilização da energia oriunda de termelétricas, responsável por suprir o sistema brasileiro em caso de falta de energia. Ela também é responsável por levar energia onde não se tem a presença do Sistema Interligado Nacional (SIN), que é o sistema brasileiro de transmissão de energia (ANEEL,2008).

Uma grande dificuldade que o Brasil tem em seu sistema elétrico atual é a localização das geradoras de energia, pois hoje é usual construir grandes geradoras em locais afastados dos centros de consumo. Esse fato acarreta em um desperdício enorme, em razão das longas distâncias percorridas pela transmissão da energia gerada.

Uma opção para minimizar o impacto ambiental é a utilização da geração distribuída, que é uma ideia um pouco diferente do modelo adotado no Brasil. Na geração distribuída não se tem grandes produtores de energia, e sim várias pequenas usinas geradoras localizadas mais próximas ao consumidor final (Coutinho,P.H.M,2007).

Atualmente essa ideia de geração distribuída é aplicada no Brasil em regiões onde o SIN não está presente. Estas regiões não contam com o fornecimento de eletricidade e são obrigadas a recorrerem a outros meios para utilizar energia elétrica. Muitas das vezes, as comunidades isoladas utilizam geradores diesel, que é uma maneira muito prática de resolver o problema, entretanto esse tipo de geração utiliza a combustão de combustível fóssil para gerar eletricidade trazendo uma série de problemas, desde a logística da distribuição do diesel até a poluição causada devido à queima.

Existem alguns projetos no Brasil para poder substituir essa dependência de geradores a diesel por fontes renováveis. Tendo como possibilidade a utilização de: biomassa, turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, hidrelétricas de pequeno porte e também a utilização de energia hidrocinética.

1.2 ENERGIA HIDROKINÉTICA

Segundo Khan, Bhuyan, Iqbal, & Qualicoe (2009), a energia hidrocinética é a energia cinética contida em qualquer fluxo de água, podendo ser de origem da movimentação de mares ou até mesmo da correnteza normal de um rio.

Diferente das hidroelétricas convencionais o processo de utilização da energia hidrocinética não necessita da construção de uma barragem. Sendo necessária a utilização de uma turbina submersa capaz de converter a energia cinética contida na corrente de água em trabalho de eixo capaz de acionar o gerador, possibilitando a conversão em energia elétrica.

A Figura(2) traz um exemplo da turbina desenvolvida por Harwood, que foi uma das primeiras turbinas hidrocinéticas desenvolvidas no Brasil. A figura mostra o desenho de duas vistas da turbina detalhando os principais componentes de uma instalação de geração hidrocinética e representando o sentido da correnteza (Tiago Fo, G,2003).

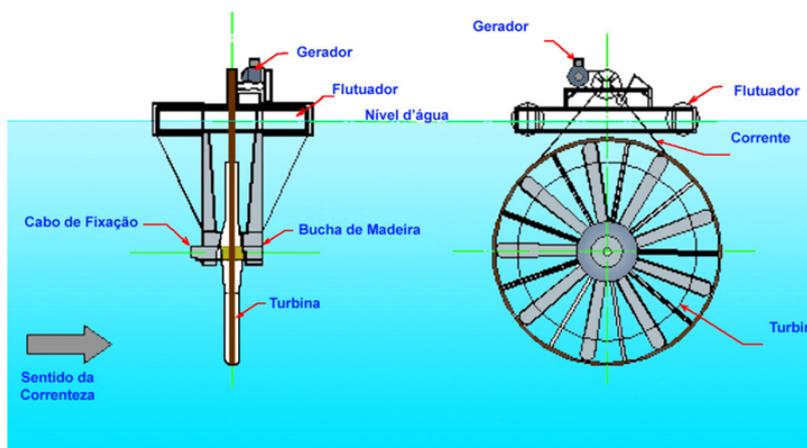


Figura 2: Exemplo de turbina hidrocinética

Por se tratar de uma tecnologia relativamente nova, ainda não é comum o uso de energia hidrocinética. Porém é previsto um aumento muito grande por ser considerada de uma energia limpa e de fácil instalação em comparação a uma hidroelétrica.

Segundo Güney & Kaygusuz (2010), hoje em dia a soma de todas as unidades produtoras de energia hidrocinética ainda não é capaz de ultrapassar 1 GW, mas há uma previsão muito otimista para o futuro, como observado nos dados da Fig.(3), sendo estimado aproximadamente 14 GW de capacidade no ano de 2016.

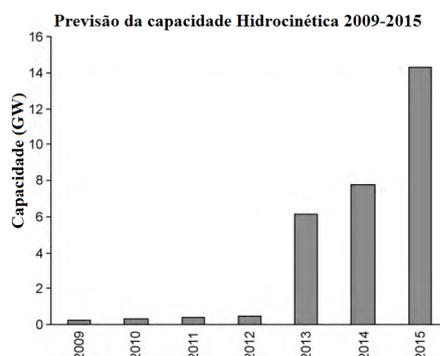


Figura 3: Previsão da capacidade hidrocinética

1.2.1 Componentes de uma turbina hidrocínética

Toda turbina hidrocínética tem uma série de componentes essenciais para seu funcionamento. O princípio de funcionamento de uma turbina hidrocínética é bastante semelhante a uma turbina eólica. Essa semelhança acontece devido à característica do escoamento do rio ser parecida com o escoamento de ar, fazendo com que ambas as turbinas trabalhem com uma velocidade angular baixa.

i. Rotor

O rotor é a parte móvel da turbina e é onde acontece o processo de conversão da potência hidrocínética da água do rio para potência de eixo. Devido à semelhança dos escoamentos, o rotor de uma turbina hidrocínética é proveniente dos rotores utilizados em turbinas eólicas. Existem dois tipos de configurações para a posição do eixo do rotor de uma turbina hidrocínética: vertical e horizontal.

As Figuras(4) e (5) mostram diferentes configurações de turbinas de eixo vertical e horizontal, respectivamente. A configuração varia de acordo com o projeto e o local onde irá se instalar a turbinas.

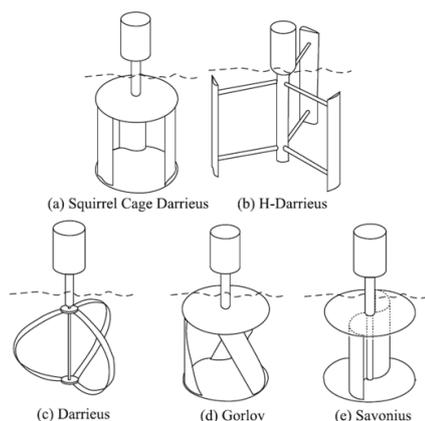


Figura 4: Turbinas de eixo vertical

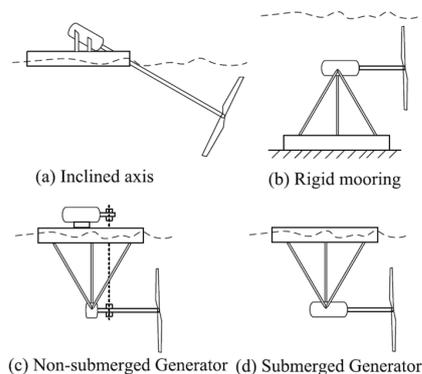


Figura 5: Turbinas de eixo horizontal

Além da posição do rotor, é importante ressaltar que cada projeto de turbina hidrocínética tem um dimensionamento de pás específico, pois o projeto das pás envolvem alguns subitens cruciais para o desempenho da turbina.

ii. Gerador

O gerador é responsável por converter a potência de eixo em energia elétrica, que é o produto final esperado de uma turbina. Para cada turbina, um gerador é projetado e existe uma variedade muito grande de modelos disponíveis. Os principais parâmetros para dimensionar o gerador de um projeto são: a potência que se pretende gerar e o nível de tensão que se pretende trabalhar.

Em relação a posição do gerador existem duas opções de instalações possíveis:

instalado na superfície, como mostrado na Fig.(5(c)), ou instalado imerso, mostrado na Fig.(5(d)).

iii. Caixa multiplicadora

A caixa multiplicadora é responsável pela transmissão de potência entre o eixo das pás e o eixo do gerador. Como o próprio nome diz, a caixa multiplica a velocidade entre os eixos do gerador e da turbina, pois normalmente o eixo da turbina gira a uma velocidade muito baixa e o gerador necessita de uma velocidade maior para conseguir gerar eletricidade em condições adequadas.

iv. Fixação ou suporte

A fixação de uma turbina é uma parte importante, pois ela determina o local do rio onde a turbina ficará e qual parte do escoamento passará pelo rotor. Existem três possibilidades para a fixação: suporte flutuante (I), fixado no fundo do rio (II) e fixação com braço mecânico (III), que são identificados no desenho apresentado na Fig.(6).

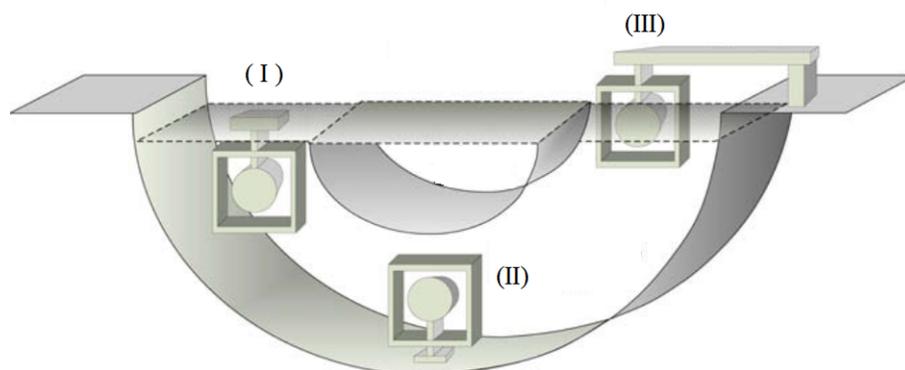


Figura 6: Exemplo das três posições de fixação de uma turbina hidrocíntrica

v. Tubo de sucção e estator

Estas partes não estão presentes em todas as turbinas, porém em muitos casos pode ser útil a presença desses elementos. O tubo de sucção, também chamado de difusor, é instalado na saída da turbina com o objetivo de aumentar o rendimento da máquina aumentando a pressão do escoamento. Já o estator direciona o escoamento para o rotor melhorando, em alguns casos, o rendimento da turbina. A Fig. (7) mostra o tubo de sucção e estator de uma turbina.

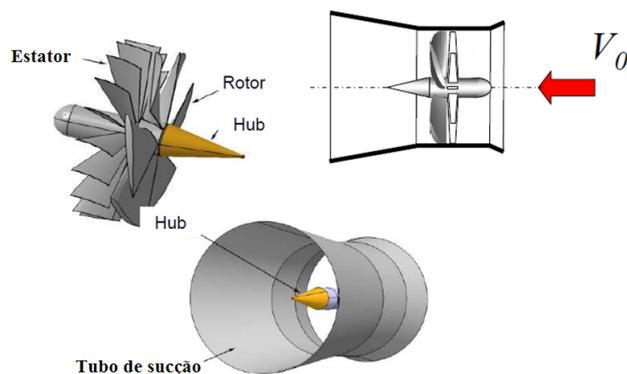


Figura 7: Difusor e estator de uma turbina hidrocínética

1.2.2 Evolução da turbina hidrocínética na Universidade de Brasília

No ano de 1986 iniciou-se o estudo e o primeiro projeto hidrocínético da Universidade de Brasília (UnB) para construção de uma turbina hidrocínética, projeto realizado pelo Departamento de Engenharia Mecânica. O projeto tinha como principal objetivo construir uma máquina capaz de gerar energia utilizando o potencial da corrente do rio, para manter um posto médico e uma residência em uma comunidade próxima à cidade de Correntina localizada no estado da Bahia, Brasil.

A primeira máquina foi instalada em julho de 1995 e foi chamada de Geração 1. As fotos da turbina são mostradas na Fig.(8). A primeira geração da turbina hidrocínética é composta por: um rotor axial de 2 pás; uma grade de proteção, para que nenhum grande corpo sólido entre em contato com o rotor, evitando danos nas pás; uma braço de sustentação pivotado; e um gerador.

O sistema de transmissão, entre o rotor e o gerador, é feito por meio de engrenagens e coroas. A turbina tem capacidade de 1,5 kW, com o fornecimento de energia a 110 ou 220 volts em corrente alternada e ainda encontra-se instalada na comunidade.

Após estudos, alguns aprimoramentos na Geração 1 foram realizados por Van Els (2003). Foi instalado um estator na entrada da turbina com o intuito de direcionar o fluxo do rio diretamente ao rotor, melhorando com isso a eficiência da conversão hidráulica; E um tubo de sucção foi colocado na saída da máquina para melhorar a recuperação da pressão e com isso melhorar o rendimento da turbina. Para a Geração 1 os melhores resultados foram obtidos com a velocidade da correnteza do rio igual a 2 m/s, com um rotor de seis pás e 800 mm de diâmetro.

Utilizando os mesmos princípios das melhorias realizadas na geração 1, foi construída a turbina de Geração 2, mostrada na Fig.(9), que utiliza um difusor cônico maior em sua saída com a finalidade de melhorar a performance hidrodinâmica do escoamento de dentro da turbina e assim aumentar o coeficiente de potência da máquina.

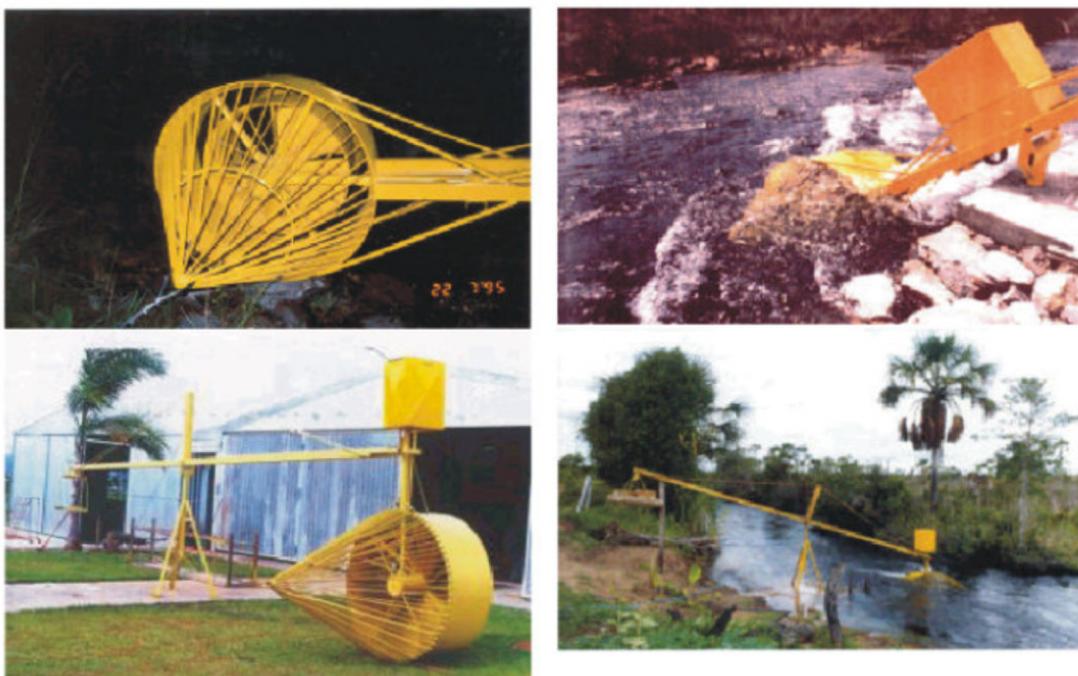


Figura 8: Turbina hidrocínética Geração 1

Foram instaladas duas turbinas da Geração 2, uma em Correntina, no estado da Bahia no ano de 2005 e outra no ano de 2006 no rio Maracá, localizado no Amapá, Brasil.

Com todas as melhorias aplicadas a Geração 2, conseguiu-se melhorar sua produção em 0,5 kW em relação a sua antecessora, sendo assim capaz de gerar 2 kW de energia elétrica.



Figura 9: Turbina hidrocínética Geração 2

Continuando a evolução das turbinas hidrocínética, a Geração 3 foi criada pelo Departamento de Engenharia Mecânica em parceria com a ELETRONORTE e com a École Nationale d' et Metiers (ENSAM) de Paris, França. (Brasil Jr, Lula, Maruzewski-Gaud, Nogera, & Salomon, 2006)

As principais alterações na Geração 3, Fig.(10), foram: a sua nova geometria, o seu tamanho reduzido, o gerador integrado ao núcleo da turbina, fazendo com que as perdas na transmissão entre o rotor e o gerador diminuam, e o difusor mais curto. Este tipo de difusor permite que o escoamento externo da turbina passe pelo espaço entre a carcaça e o difusor, levando a um controle da camada limite na superfície interna do difusor. Este controle acontece devido ao aumento da velocidade do escoamento, na superfície interna do difusor, pelo escoamento externo, impedindo o descolamento da camada limite. Dessa maneira, diminui-se a intensidade de fenômenos indesejáveis como a recirculação.

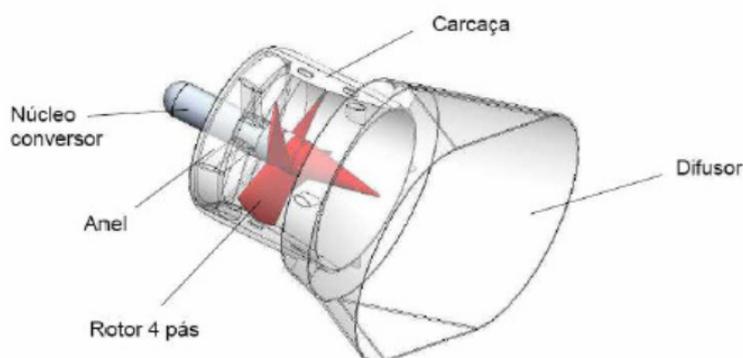


Figura 10: Turbina hidrocínética Geração 3

1.3 DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE GERAÇÃO HIDROCINÉTICA DE GRANDE PORTE: O PROJETO TUCUNARÉ

Dando continuidade à evolução da tecnologia aplicada na geração hidrocínética, a UnB, em parceria com a ELETRONORTE e com outras universidades, está trabalhando no projeto Tucunaré, que tem como meta desenvolver a tecnologia para construção de uma turbina hidrocínética de grande porte (edital P&D 01/2009 Eletronorte).

Os principais objetivos do projeto Tucunaré são:

- Desenvolvimento de projeto de turbina hidrocínética com potência entre 500kW-1MW, com rotores de 3-4 pás com eixo horizontal e conjunto gerador-transmissão embarcado no bulbo. A tecnologia envolverá o uso de gerador operando em rotação variável e com a hidrodinâmica projetada com efeito de amplificação do coeficiente de potência com difusor traseiro;
- Construção e ensaio de uma unidade piloto de 1 MW a ser instalada no Rio Tocantins na saída do reservatório de jusante da UHE-Tucuruí, contemplando a execução de

obra civil simplificada (pilares de sustentação) e infraestrutura de despacho da carga gerada;

- Estabelecimento de estratégia e projeto básico para a instalação para 5MW firmes, partindo da unidade instalada;
- Desenvolvimento de estudo do uso sustentável da unidade de 5MW, prevendo a rede de distribuição de energia para atendimento à comunidade local.

O desenvolvimento de uma turbina hidrocínética passa por muitas fases diferentes. Sendo elas: concepção, projeto hidrodinâmico e eletromecânico, o estudo em modelos reduzidos e a simulação numérica. Sendo o resultado final dessas fases um protótipo ideal para o projeto.

1.3.1 A turbina hidrocínética

A Figura (11) mostra a primeira concepção da turbina hidrocínética do projeto Tucunaré. Diferentemente das outras gerações, a turbina não consta de um difusor e tem as dimensões muito maiores. Esse protótipo foi desenvolvido para ter um rotor de 10 metros. Com ele pretende gerar 500kW, trabalhando com uma velocidade de correnteza de 2,5 m/s.

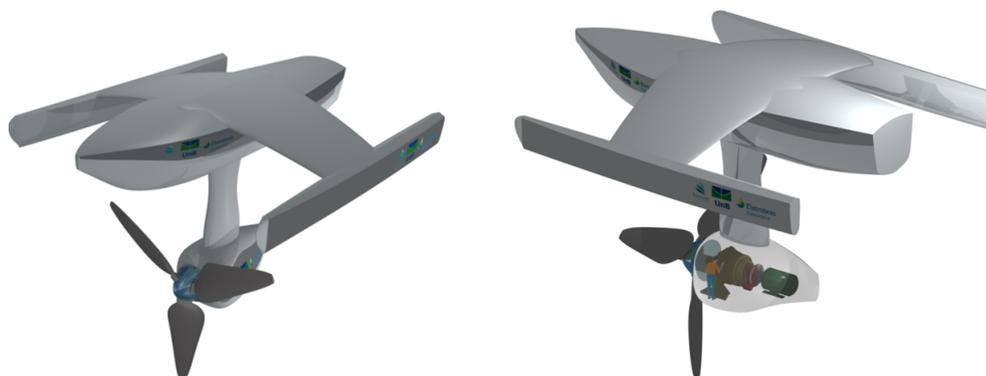


Figura 11: Projeto turbina hidrocínética de grande porte

1.3.2 Modelo reduzido

Por se tratar de uma máquina complexa e muito grande é importante o estudo em modelo reduzido. Com ele pode-se prever fenômenos que irão acontecer durante o funcionamento da turbina, evitando assim, possíveis falhas. O estudo em modelo também é usado para encontrar as melhores condições de trabalho do protótipo. Para o projeto Tucunaré, o estudo em modelo reduzido será desenvolvido em túnel de vento. O modelo reduzido da turbina, que será desenvolvida, é mostrado na Fig.(12).

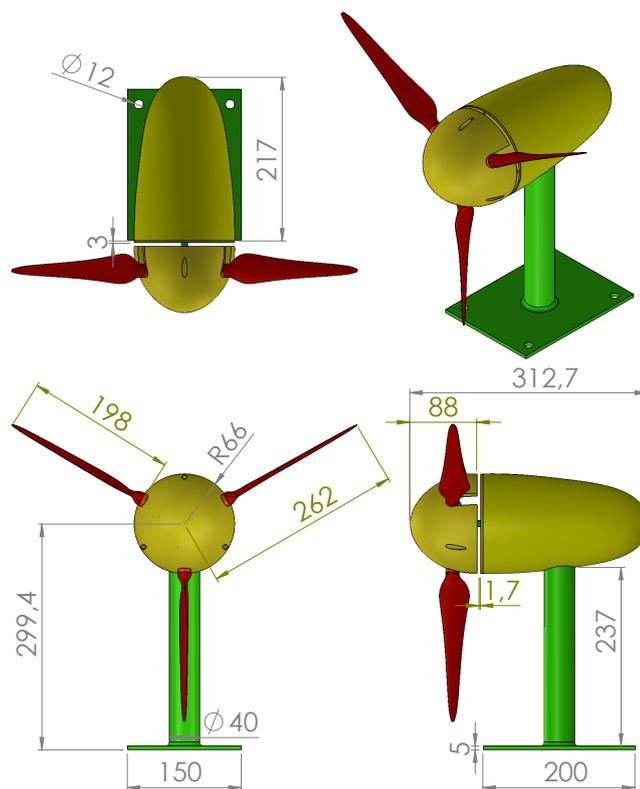


Figura 12: Modelo Reduzido da turbina hidrocínética de grande porte(mm)

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivos Gerais

Adaptar um motor de corrente contínua para funcionar como dinamômetro elétrico e desenvolver bancada de calibração para esse dinamômetro a fim de realizar ensaio em modelo reduzido da turbina hidrocínética do projeto Tucunaré.

O dinamômetro deve ser capaz de operar em diferentes rotações e fornecer a curva de potência mecânica da turbina descontados os torques parasitas associados ao próprio dinamômetro.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Concepção e construção de uma bancada de ensaios de dinamômetro elétrico.
- Desenvolvimento de um protocolo de ensaio para determinação do torque parasita em diferentes rotações.
- Realização de ensaios para determinação de curva de calibração do dinamômetro. (rendimento em função da velocidade angular, $\eta \times \omega$).

2 Técnicas de ensaio em modelo reduzido

Para a construção de qualquer modelo em escala é importante seguir a teoria de similaridade. Essa teoria garante que o protótipo e o modelo terão suas características semelhantes, validando assim o ensaio.

2.1 TEORIA DE SIMILARIDADE

A teoria de similaridade diz que uma máquina somente terá o comportamento similar ao seu modelo se forem respeitados os três tipos possíveis de homogeneidades: dimensional, cinemática e dinâmica.

Homogeneidade dimensional (Semelhança geométrica)

Um modelo e um protótipo são geometricamente semelhantes se e somente se todas as dimensões do corpo nas três coordenadas tiverem a mesma razão de escala linear. (White, 2011)

Para manter a semelhança geométrica é necessário replicar todas as dimensões do corpo, até as microscópicas. O que torna difícil a fabricação do modelo, pois é quase impossível manter todas as razões do protótipo. Características físicas do modelo como rugosidade específica, folgas e espessuras são, em geral, as razões entre modelo e o protótipo, gerando assim uma influência no rendimento do modelo. Pode-se denominar esse efeito como fator de escala.

Homogeneidade cinemática

A semelhança cinemática requer que o modelo e o protótipo tenham a mesma razão de escala de comprimento e de tempo. O resultado é que a relação de escala de velocidade será a mesma para ambos. (White, 2011)

Nas máquinas de fluxo, pode-se chegar à associação que o modelo e protótipo serão cinematicamente semelhantes se os triângulos de velocidades forem semelhantes.

Para manter a semelhança dos triângulos de velocidade é necessário que o modelo preserve a Razão de Velocidade de Ponta de Pá¹ do protótipo. Essa razão é um adimensional calculado pela razão entre a velocidade tangencial na extremidade da pá e a velocidade do escoamento, como mostrado na Eq.(2.1),

$$\lambda = \frac{\omega r}{U}, \quad (2.1)$$

¹ Tip speed ratio.

Em que λ é a razão de velocidade de ponta de pá, ω é a velocidade angular, r é o raio do rotor e U é a velocidade tangencial na extremidade da pá.

Para preservar a homogeneidade cinemática, o modelo e o protótipo devem respeitar a relação mostrada na Eq.(2.2),

$$\lambda_{modelo} = \lambda_{protótipo}. \quad (2.2)$$

Homogeneidade dinâmica

Existe a semelhança dinâmica quando o modelo e o protótipo têm as mesmas razões de escala de comprimento, escala de tempo e escala de força. (White, 2011)

Com a homogeneidade dinâmica pode-se chegar a uma relação de potências entre o modelo e o protótipo. Essa relação pode ser representada pelo coeficiente de potência (C_p), que é dado pela Eq.(2.3),

$$C_p = \frac{P_{gerada}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3}, \quad (2.3)$$

Em que P_{gerada} é a potência gerada pela da turbina, ρ é a massa específica do fluido utilizado, A é a área da turbina e U é a velocidade do escoamento. Em termos gerais, o coeficiente de potência é uma representação da potência que a turbina consegue retirar do escoamento.

Para preservar a homogeneidade dinâmica, o modelo e o protótipo devem respeitar a relação mostrada na Eq.(2.4),

$$C_{p_{modelo}} = C_{p_{protótipo}}. \quad (2.4)$$

2.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO

Como apresentando anteriormente, os parâmetros do modelo devem respeitar as teorias de similaridade. A primeira ação necessária para a definição desses parâmetros é determinar em quais condições o protótipo irá trabalhar.

As condições definidas para o projeto Tucunaré são:

- O protótipo funcionará em um rio de correnteza 2,5 m/s.
- O protótipo terá o diâmetro de 10 m.
- A velocidade angular de trabalho da turbina projetada é de 15 rpm.

- Pretende-se produzir 500kW.

A partir dos parâmetros definidos, pode-se calcular o coeficiente de potência e a razão de velocidade de ponta de pá, mostrado nas Eq.(2.5) e Eq.(2.6),

$$\lambda_p = 3,14, \quad (2.5)$$

$$C_p = 0,4. \quad (2.6)$$

Deseja-se construir um modelo com o diâmetro de 30 cm e ensaiá-lo em túnel de vento. Considerando um túnel de vento convencional, capaz de produzir escoamentos com velocidades de ordem de 5 m/s, é possível estimar ordem de grandeza da velocidade angular em que o modelo irá trabalhar. Pela Eq.(2.2), sabe-se que a razão de velocidade de ponta de pá deve permanecer a mesma, pode-se achar que a velocidade angular do modelo é da ordem de:

$$\omega_{mr} \approx 1000rpm. \quad (2.7)$$

Realizando a mesma analogia para o Coeficiente de potência, pode-se encontrar a ordem de magnitude da potência do modelo que será de:

$$C_p \approx 1W. \quad (2.8)$$

3 Metodologia Experimental

3.1 CONCEPÇÃO DA BANCADA DE CALIBRAÇÃO DE MICRODINAMÔMETROS

Em geral, a calibração do microdinamômetro pode ser definida como um ensaio para obter as curvas de rendimento em função da velocidade angular. Para realizar esse tipo de ensaio é necessário uma bancada que seja capaz de excitar o dinamômetro e depois medir as potências de entrada e saída.

Para a elaboração da bancada, a primeira escolha a se fazer é a definição do microdinamômetro que será ensaiado. Para esse trabalho, será utilizado um motor de corrente contínua, funcionando como gerador.

Como o microdinamômetro será utilizado no ensaio do modelo reduzido da turbina hidrocínética, ele deve operar na mesma faixa de velocidade e potência do modelo. Utilizando as relações do coeficiente de potência (C_p) e da razão de velocidade de ponta de pá (λ) calculados anteriormente, sabe-se que a velocidade e a potência do modelo serão da ordem de 1000rpm e 1 W, portanto foi definido o motor da marca DOGA, com rotação nominal de 1000rpm e torque nominal de 0,75 N.m.

Após definir o microdinamômetro a ser ensaiado, é necessário escolher uma maneira de excitá-lo. A melhor maneira encontrada foi utilizar um motor acoplado ao eixo do gerador, deixando a bancada com dois motores acoplados, um para acionar o eixo do sistema e outro para funcionar como microdinamômetro.

A última definição necessária para a concepção da bancada é o sistema de medição para determinar as potências de entrada e saída. Este trabalho utiliza dois métodos distintos de medição de potência mecânica do eixo. No primeiro, a potência é medida diretamente no eixo, por meio de um freio de Prony e um sensor de rotação. Já o segundo, a potência é calculada por meio de um modelo simplificado do gerador. Nesse método assume-se que a potência mecânica é proveniente da potência elétrica de saída somada com algumas perdas. Sendo o cálculo das perdas no gerador realizado por meio de um experimento que relaciona as perdas do mesmo gerador operando como motor, necessitando assim, de um ensaio funcionando como motor e outro como gerador.

A mesma bancada deve ser capaz de medir o rendimento no gerador em ambos os ensaios.

O resultado do projeto da concepção da bancada é mostrado nas Figs.(13) e (14). A bancada é composta por dois motores, (1) e (2), por um freio de Prony, (3), por um

acoplamento , (4),e por um suporte,(5).

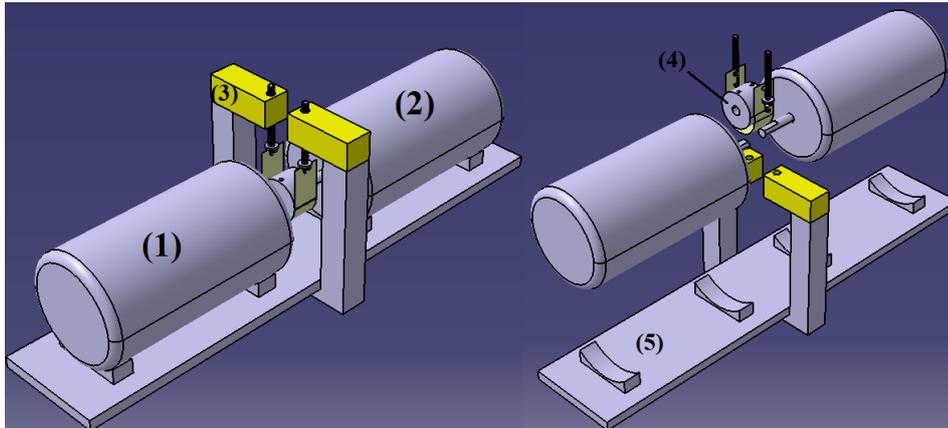


Figura 13: Projeto da bancada de ensaio de microdinamômetros

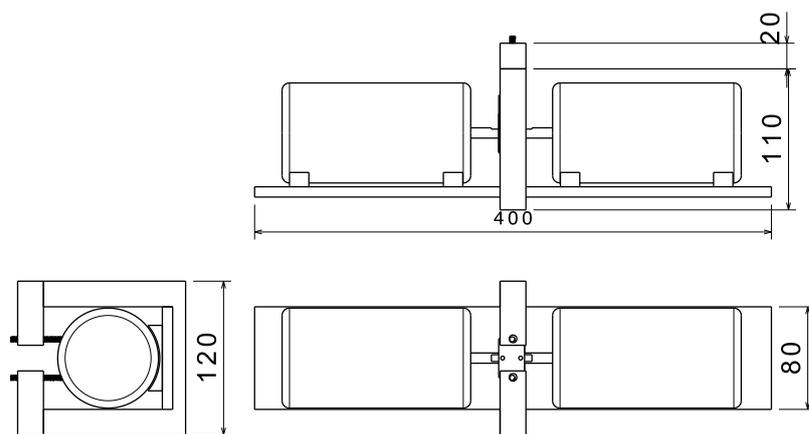


Figura 14: Dimensões do projeto da bancada(mm)

3.2 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DA BANCADA

A bancada para ensaio de microdinamômetros foi construída de acordo com o projeto especificado anteriormente. Ela é composta por: um suporte, dois motores DC, um acoplamento e pela instrumentação necessária para realização dos ensaios.

3.2.1 Suporte

O suporte é formado por uma placa de nylon feita para fixar e alinhar os motores. Na estrutura do suporte existem duas placas de alumínio para fixar os motores e evitar

que eles fiquem girando durante o ensaio. A Fig.(15) traz a foto do suporte utilizado na bancada.

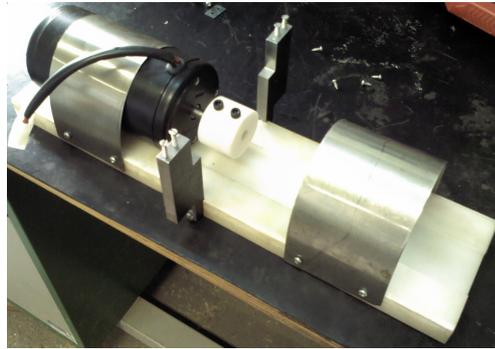


Figura 15: Foto do suporte da bancada de ensaio

3.2.2 Motores de Corrente Contínua

Foram usados dois motores idênticos na bancada, um para funcionar como dinamômetro e outro para funcionar como motor de fato e assim excitar o eixo do sistema. Os motores utilizados foram da marca DOGA e modelo 168.4111.30.00, com rotação nominal de 1000rpm e torque de 0,75 N.m, cuja a foto é mostrada na Fig.(16).



Figura 16: Foto do motor utilizado

A variação da velocidade do motor é feita pela variação da tensão de alimentação do motor. Sendo que a tensão é controlada por uma fonte variável de corrente contínua da marca Agilent, modelo E3633A e com capacidade 0-20 V e 0-10 A.

3.2.3 Acoplamento

Para poder conectar os eixos dos dois motores foi construído um acoplamento em teflon, esse acoplamento também se faz necessário no ensaio com o freio de Prony, pois é nele que o freio irá atuar. O acoplamento possui o diâmetro de 40 mm. Juntamente com o acoplamento, foi utilizada uma correia de couro para formar o freio de Prony.



Figura 17: Foto do acoplamento de teflon e da correia de couro

3.2.4 Instrumentação

i. Sensor de corrente elétrica

A potência elétrica é determinada pela medição da corrente que passa em uma resistência fixa. Para a medição da corrente utilizou-se um multímetro da marca Minipa do modelo 2615a e foi conectado de acordo com o circuito demonstrado na Fig.(18).

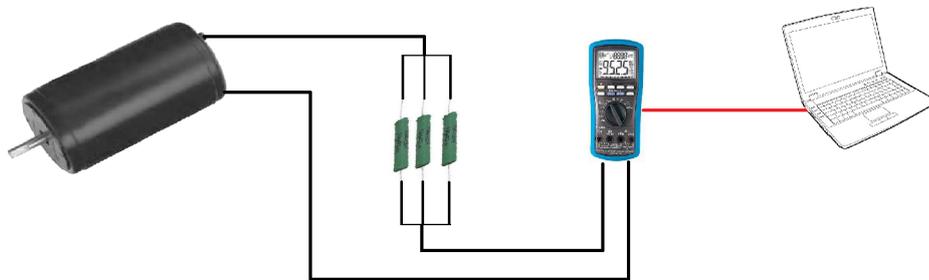


Figura 18: Circuito do obtenção dos dados elétricos

A Figura(18) mostra a ligação realizada entre o motor, as resistências, o multímetro e o computador. O fio preto representa a conexão do circuito de saída do gerador e o fio vermelho representa o cabo USB de conexão lógica, que permite a comunicação entre o multímetro e o computador para a captação de dados.

A função de amperímetro desse multímetro possui resolução de 0,01 miliamperes e fundo de escala de 10 amperes.

ii. Sensor de rotação

Foi utilizado um sensor de proximidade indutivo para medir a rotação. Esse sensor é um dispositivo eletrônico capaz de detectar a presença ou aproximação de elementos metálicos diversos. Para esse sensor conseguir medir a rotação foi colocada uma pequena peça metálica no eixo do gerador, assim toda a vez que a peça passa pelo sensor ele envia um pulso. O resultado da frequência entre os pulsos é a medida da velocidade angular.

A Figura(19) representa o circuito do sensor de indução utilizado, nesse circuito há uma fonte de corrente contínua conectada ao sensor e um osciloscópio para medir os pulsos que o sensor emite. No modelo utilizado cada pulso representa uma rotação completa do eixo do motor, fazendo com que a frequência da onda do osciloscópio seja a mesma frequência de rotação do eixo. Na bancada foi utilizado um sensor indutivo da

marca *Telemecanique* e modelo *xs4p18ab110*, com alimentação em corrente contínua de três fios e capacidade de realizar medições a uma distância de até 8 mm.

O sistema de medição criado tem resolução de 0,01 rps.

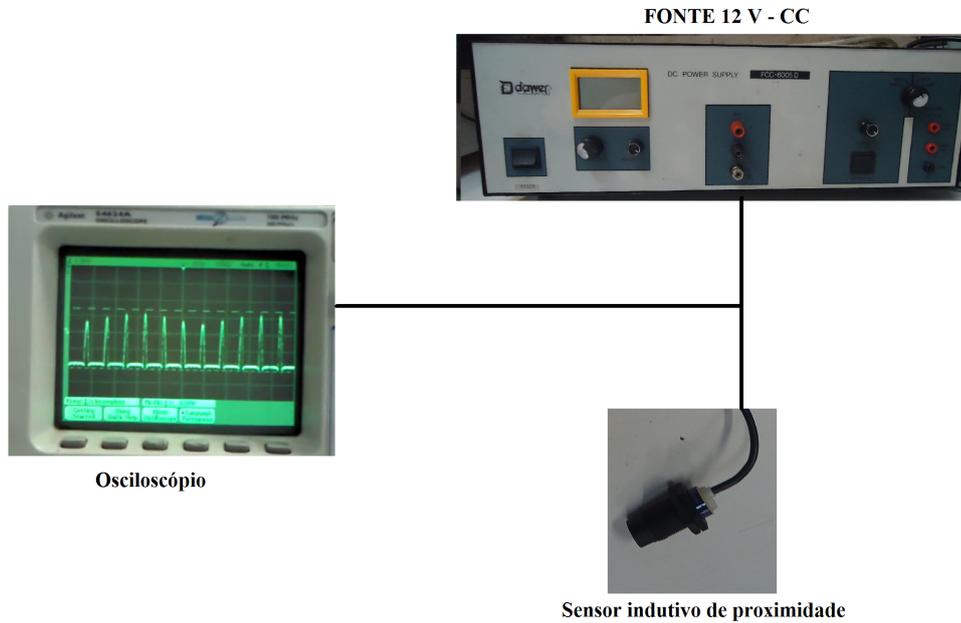


Figura 19: Circuito do sensor de velocidade

A fonte utilizada é da marca Dawer, modelo FCC-6005D e ela ficou fixa em 12 V.

iii. Sensor de torque

O sistema de medição do torque nessa bancada será um freio de Prony, dispositivo formado por dois sensores de força e uma correia, sendo a configuração mostrada na Fig.(20).

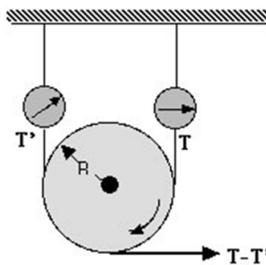


Figura 20: Exemplo da configuração do freio de Prony

No freio de Prony, o torque é resultado entre a diferença da medição dos dois sensores de força multiplicado pelo o raio do disco. Nessa bancada o acoplamento realiza a função do disco.

Serão utilizadas como sensores de força duas células de carga, instrumento composto por um elastômetro que quando sofre carga deforma-se gerando um sinal elétrico compatível com a carga aplicada.

A Figura(21) mostra o freio de Prony utilizado na bancada. O freio é composto por duas células de carga, um acoplamento e uma correia. Para medir corretamente o torque, é importante que as células de carga fiquem posicionadas na tangente do disco e que sejam paralelas entre si.

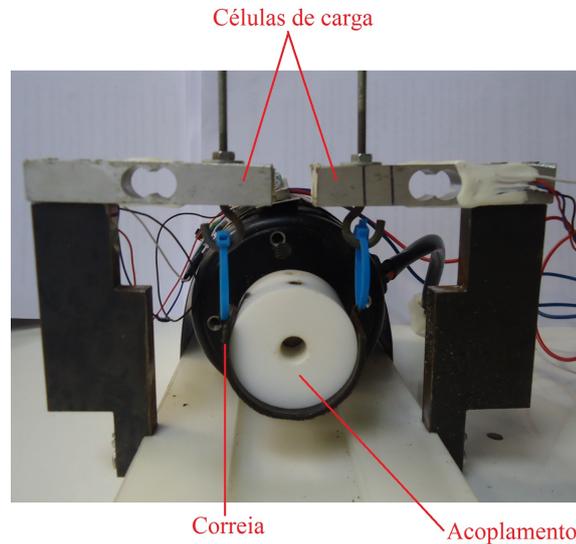


Figura 21: Configuração do freio de Prony

3.3 MEDIDA DIRETA DA POTÊNCIA DE EIXO – FREIO DE PRONY

Este ensaio basicamente trata de um motor gerando potência e o gerador convertendo esta potência mecânica em potência elétrica. O principal objetivo desse procedimento é medir as potências no eixo e elétrica.

Nesse procedimento o cálculo da potência é dada pela Eq.(3.1), sendo T o torque e ω a velocidade angular.

$$P_{eixo} = \omega T. \quad (3.1)$$

Já a potência elétrica do circuito pode ser representada em função da corrente(i) e da resistência (R) presentes no circuito de saída do gerador, como mostrado na Eq.(3.2),

$$P_{elétrica} = i^2 \cdot R. \quad (3.2)$$

Com o resultado das potências elétrica e mecânica, é possível fazer uma curva relacionando ambas, juntamente com uma curva de rendimento do gerador (η), que é dado pela divisão da potência elétrica pela potência de eixo.

$$\eta = \frac{P_{elétrica}}{P_{eixo}}. \quad (3.3)$$

A Figura (22) mostra a configuração experimental dos sensores utilizados para medição da potência de eixo.

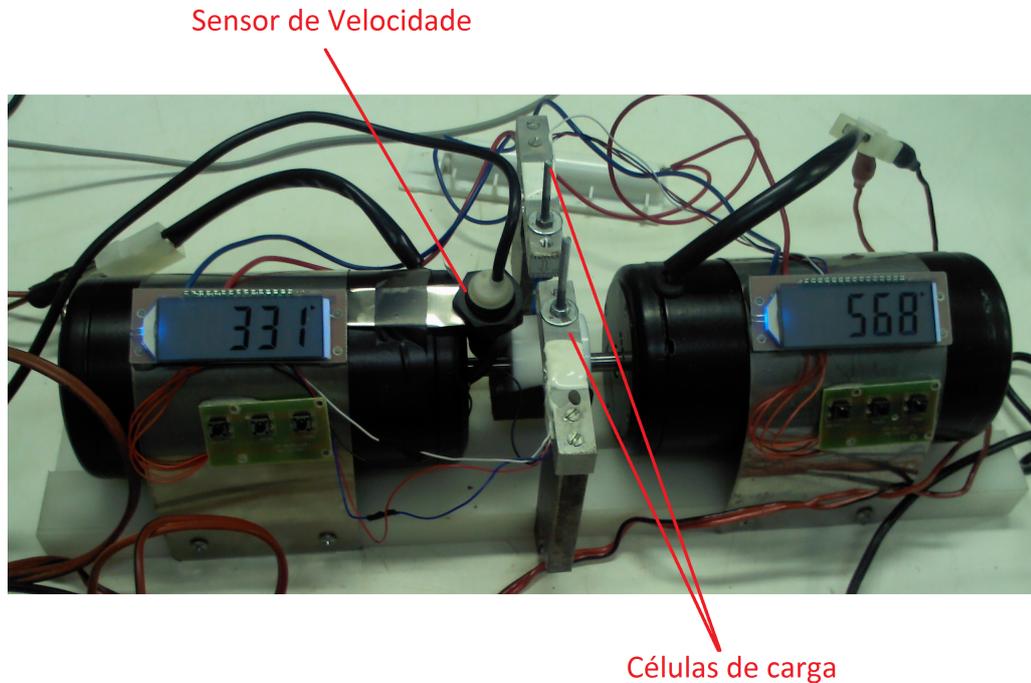


Figura 22: Sensores utilizados para medição da potência

A potência elétrica foi medida com um multímetro, utilizando a função ohmímetro e a função amperímetro. Como a resistência possui um valor fixo, é preciso medi-la somente uma vez antes do ensaio. Durante o ensaio o multímetro foi colocado na função amperímetro. O diagrama da montagem do circuito de ensaio está representado na Fig.(3.14).

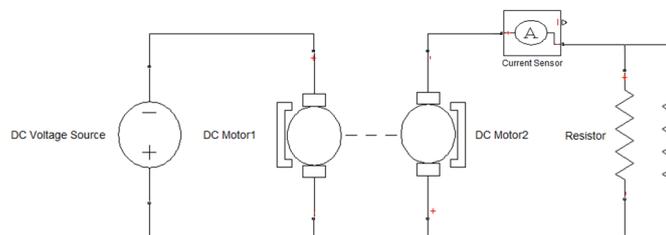


Figura 23: Diagrama elétrico para ensaio do gerador

3.4 MEDIDA INDIRETA DA POTÊNCIA DE EIXO – MODELO SIMPLIFICADO DO GERADOR

Este ensaio visa encontrar o rendimento do gerador utilizando um modelo matemático para o cálculo das perdas no mesmo. O modelo estabelece um fator que relaciona

as perdas do gerador, funcionando como gerador, com as perdas do mesmo gerador funcionando como motor, método proposto por Oliveira, T.F. (2006).

O primeiro passo desse método é encontrar as perdas do gerador funcionando como motor. Sendo que a potência mecânica do eixo do motor é igual à potência elétrica consumida subtraída das perdas por efeito Joule e perdas por atrito,

$$P_{eixo} = V \cdot I - R_m \cdot I^2 - f \cdot \omega^2, \quad (3.4)$$

Em que a potência elétrica fornecida ao motor é dada pelo produto entre a tensão (V) e corrente (I), $R_m I^2$ é a energia dissipada pelo efeito Joule, R_m e f são características específicas do motor e devem ser determinados por diferentes experimentos.

O parâmetro R_m é a medida da resistência interna do motor, parâmetro que será determinado com um ohmímetro. Vale ressaltar que este parâmetro depende da temperatura, ou seja, somente é possível associar o fator de atrito do motor ao do gerador quando ambos estiverem na mesma temperatura de trabalho. A temperatura pode variar de acordo com o tempo de funcionamento no motor, porém a tendência é que ela se estabilize depois de um determinado período.

O parâmetro f é denominado como fator de atrito, e é determinado em um ensaio do motor a vazio (sem carga). Como o ensaio será em vazio, a potência no eixo é igual à zero. Substituindo o zero na Eq.(3.4) e isolando o fator de atrito é possível encontrar a formula para tal, como descrito na Eq.(3.5).

$$f = \frac{V \cdot I - R_m \cdot I^2}{\omega^2}. \quad (3.5)$$

Para a medição dos parâmetros descritos na Eq.(3.5), utiliza-se um circuito elétrico composto por um voltímetro, um amperímetro e uma fonte de tensão contínua como mostrado no diagrama elétrico da Fig(24).

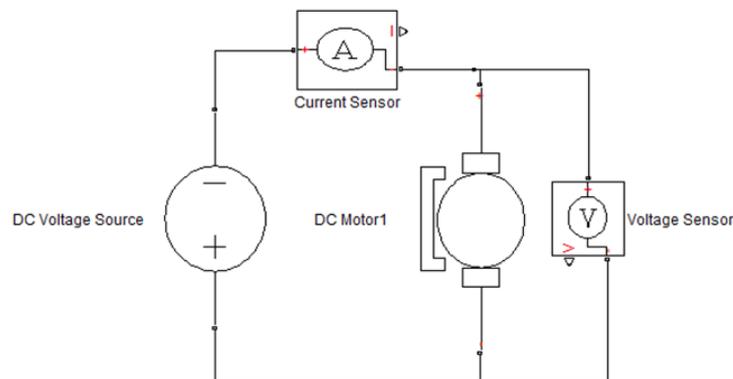


Figura 24: Diagrama elétrico para o ensaio de perdas do motor

Com o cálculo do fator de atrito para diferentes valores de tensão e corrente fornecidos é possível traçar um gráfico do fator de atrito em função da velocidade angular. A partir desse gráfico temos o comportamento do fator de atrito do motor elétrico conforme sua rotação varia em função da rotação.

Ao contrário do motor, no gerador a potência no eixo é igual à soma da potência de elétrica com as perdas. Considerando que o valor do fator de atrito (f) é igual ao fator do motor. Sendo a potência de eixo para o gerador demonstra na Eq.(3.6).

$$P_{eixo} = \frac{V^2}{R} + R_m \cdot I^2 + f \cdot \omega^2. \quad (3.6)$$

E igualmente ao outro ensaio, o rendimento é dado pela Eq.(3.3).

3.5 ESTUDO DE PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS

Como este é um projeto experimental é importante identificar todas as incertezas presentes, com a finalidade de manter o controle sobre elas.

As incertezas desse trabalho são dadas pela soma das incertezas instrumental e aleatória. Como na bancada desse trabalho só consta de sensores digitais, as incertezas instrumentais são determinadas pelo valor da menor escala medida pelo sensor. Já as incertezas aleatórias foram definidas como sendo igual ao desvio padrão calculado sobre um conjunto de ensaios realizados nas mesmas condições.

Todas as incertezas dos ensaios podem ser escritas em função das incertezas dos seguintes sensores: célula de carga, sensor de velocidade, voltímetro, amperímetro e ohmímetro, fazendo com que todas as incertezas do trabalho sejam provenientes desses sensores.

A representação das medidas de todos os sensores é mostrada da Eq. (3.7) até a Eq.(3.11), sendo δ a parte referente à incerteza.

$$V = \bar{V} \pm \delta V, \quad (3.7)$$

$$I = \bar{I} \pm \delta I, \quad (3.8)$$

$$R_m = \bar{R}_m \pm \delta R_m, \quad (3.9)$$

$$\omega = \bar{\omega} \pm \delta \omega, \quad (3.10)$$

$$F = \bar{F} \pm \delta F, \quad (3.11)$$

Com as medidas e as incertezas associadas a cada sensor é possível propagar as incertezas substituindo as equações acima em todas as equações mencionadas no trabalho.

i) Incerteza do método do Freio de Prony

No primeiro ensaio proposto para dinamômetro elétrico são realizadas três medidas: o torque, a potência de eixo e a potência elétrica. Após análise da propagação da incerteza, foi possível encontrar as equações que representam as medidas do torque e das duas potências junto com suas respectivas incertezas.

$$\delta T = r(\delta F_1 + \delta F_2), \quad (3.12)$$

$$T = r(\overline{F}_1 - \overline{F}_2) \pm \delta T, \quad (3.13)$$

$$\delta P_{eixo} = (\overline{\omega} \cdot \delta T + \overline{T} \cdot \delta \omega), \quad (3.14)$$

$$P_{eixo} = \overline{\omega} \cdot \overline{T} \pm \delta P_{eixo}, \quad (3.15)$$

$$\delta P_{elétrica} = (\overline{V}^2 \cdot \delta R + \frac{1}{R} \cdot 2 \cdot \overline{V} \cdot \delta V), \quad (3.16)$$

$$P_{elétrica} = \frac{\overline{V}}{R} \pm \delta P_{elétrica}. \quad (3.17)$$

ii) Incerteza do método da medição indireta

Para encontrar a incerteza da potência desse método é necessário definir a incerteza do fator de atrito, sendo calculado pela Eq.(3.18), podendo então o fator de atrito ser definido pela Eq.(3.19).

$$\delta f = (V \cdot I - R_m \cdot I^2) \left(2 \cdot \overline{\omega} \cdot \delta \omega + \frac{1}{\omega^2} [(\overline{R}_m \cdot 2 \cdot \overline{I} \cdot \delta I + I^2 \cdot \delta R_m) + (\overline{V} \cdot \delta I + \overline{I} \cdot \delta V)] \right) \quad (3.18)$$

$$f = \frac{\overline{V} \cdot \overline{I} - \overline{R}_m \cdot \overline{I}^2}{\omega^2} \pm \delta f \quad (3.19)$$

E por fim, a potência de eixo do procedimento para ensaio das perdas internas é mostrado na Eq.(3.20), lembrado que a potência elétrica é igual para todos os procedimentos.

$$\delta P_{eixo} = (\bar{V} \cdot \delta I + \bar{I} \cdot \delta V) + (\bar{R}_m \cdot 2 \cdot \bar{I} \cdot \delta I + \bar{I}^2 \cdot \delta R_m) + (\bar{f} \cdot 2 \cdot \bar{\omega} \cdot \delta \omega + \bar{\omega}^2 \cdot \delta f) \quad (3.20)$$

$$P_{eixo} = \bar{V} \cdot \bar{I} - \bar{R}_m \cdot \bar{I}^2 - \bar{f} \cdot \bar{\omega}^2 \pm \delta P_{eixo} \quad (3.21)$$

iii) Incerteza relativa ao rendimento - válido para os dois métodos

Sabendo as incertezas das potência elétrica e mecânica, pode-se descrever a incerteza do rendimento pela Eq.(3.22).

$$\delta \eta = (P_{elétrica} \cdot \delta P_{eixo} + \frac{1}{P_{eixo}} \cdot \delta P_{elétrica}) \quad (3.22)$$

$$\eta = \frac{\overline{P_{elétrica}}}{\overline{P_{eixo}}} \pm \delta \eta \quad (3.23)$$

3.6 PROTOCOLOS EXPERIMENTAIS

Como este trabalho visa desenvolver ensaios utilizando duas metodologias distintas, foi necessário dividir os ensaios e criar um procedimento para cada método a ser ensaiado.

3.6.1 Ensaio com o freio de Prony

Para o ensaio com o freio de Prony foram executadas as seguintes etapas:

- Fixar os motores na bancada e realizar o acoplamento entre eles.
- Realizar a montagem do circuito do sensor de rotação. O fabricante do sensor escolhido orienta ligar o sensor na fonte e ligar uma resistência de 1k no circuito de saída do sinal, sendo a tensão de trabalho do sensor de 8V até 50V. A tensão utilizadas nos ensaios foi 12 V.
- Conectar o osciloscópio nos terminais da resistência de 1k do circuito do sensor de rotação.
- Conectar os cabos do motor na fonte variável DC.
- Conectar a saída do gerador no conjunto de resistência que será utilizado no ensaio.
- Conectar o amperímetro em série com o conjunto de resistência da saída do gerador.

- Ligar a célula de carga, este procedimento tem que ser realizado antes do aperto do freio de Prony para que a célula de carga possa medir a tração da correia. Sabendo que a célula de carga, usada nos ensaios, adota a referência do zero o somatório de todas as forças aplicadas no momento em que a célula é ligada.
- Ligar o amperímetro e o osciloscópio.
- Ligar à fonte do sensor de rotação a tensão de 12 V.
- Ligar a fonte variável do motor na tensão 0 V e ir variando a tensão até chegar à 20 V. A fonte variável de corrente contínua é a maneira escolhida para variar os pontos de ensaio do gerador, sendo que quanto maior a tensão aplicada maior será a potência aplicada no sistema, variando assim a rotação do eixo.
- Coletar os dados de rotação (rps), das células de carga (gramas) e do amperímetro (miliAmperes).
- Repetir ensaios para poder pegar uma amostra suficiente de pontos.
- Mudar a resistência da saída do gerador e repetir os ensaios.

3.6.2 Ensaio utilizando o fator de atrito

Para o ensaio com o fator de atrito foram executadas as seguintes etapas:

- Fixar o gerador na bancada. Nesta etapa é necessário que o gerador encontre-se desacoplado, pois serão realizadas as medidas para o cálculo do fator de atrito.
- Ligar a fonte de corrente contínua variável diretamente no gerador, para que o mesmo funcione como motor.
- Conectar o amperímetro em série com a fonte e o gerador.
- Ligar o sistema do sensor de rotação, de acordo com os procedimentos descritos anteriormente no ensaio com o freio de Prony.
- Ligar a fonte variável e ir variando de 0 a 20 V.
- Coletar dados de corrente (amperes), tensão (volts) e velocidade angular (rps).
- Medir a resistência interna do motor (ohms) após ensaio. Esse passo é feito somente uma vez, pois a resistência interna do motor não varia significativamente com a temperatura.
- Repetir ensaios para poder pegar uma amostra suficiente de pontos.

- Após realizar o ensaio do gerador funcionando é necessário desligar todo sistema para começar o ensaio do gerador acoplado ao motor.
- Acoplar o motor ao gerador.
- Conectar o motor a fonte variável.
- Conectar a saída do gerador no conjunto de resistência que será utilizado no ensaio.
- Conectar o amperímetro em série com o conjunto de resistência da saída do gerador.
- Ligar o sensor de rotação.
- Coletar dados de corrente (amperes) e velocidade angular (rps).
- Repetir ensaios para poder pegar uma amostra suficiente de pontos.
- Mudar a resistência da saída do gerador e repetir os ensaios.

4 Simulação numérica do microdinamômetro

A simulação foi realizada para analisar o comportamento da resposta do sistema eletromecânico do conjunto gerador/motor em relação à variação da carga na saída do gerador, sendo que a variação da carga é realizada com o aumento da resistência elétrica no circuito do gerador.

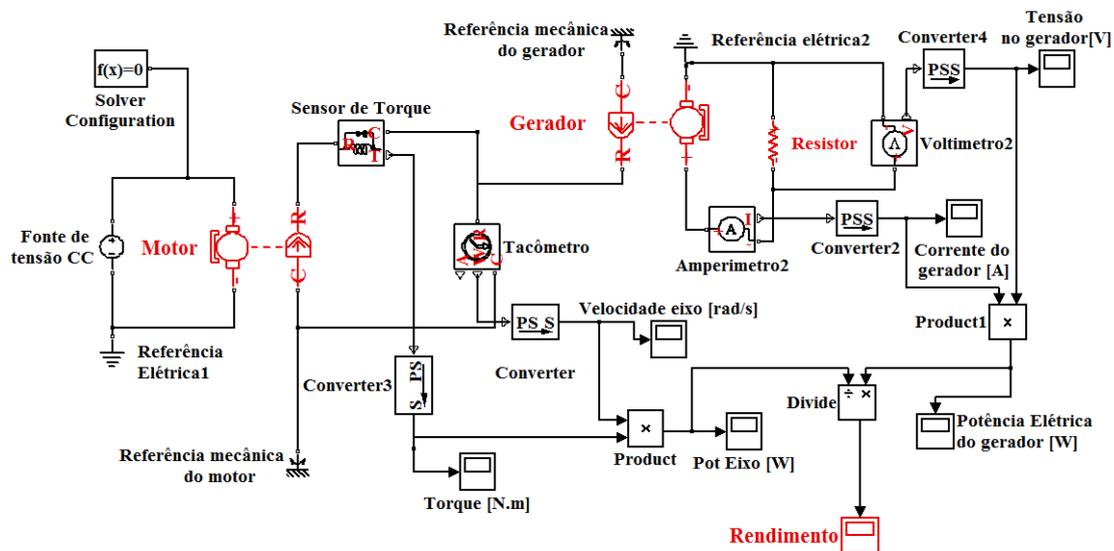


Figura 25: Diagrama de blocos do sistema Motor/Gerador

O diagrama mostrado na figura foi realizado via Simulink, ferramenta pertencente ao software Matlab. Este diagrama representa o sistema utilizado na bancada de ensaio de microdinamômetros, sendo representado tanto os componentes mecânicos como os componentes elétricos.

A potência elétrica é calculada pela tensão e corrente medidas na saída do gerador e a potência mecânica é calculada utilizando um sensor de torque e um Tacômetro (sensor de velocidade).

No diagrama mostrado, a saída do sistema é representada pelo visor “Rendimento”, que representa o rendimento do gerador, que é dado pela razão entre a potência elétrica e a potência mecânica.

A simulação foi realizada com a alimentação do motor a tensão constante, pois o importante dessa simulação é o comportamento da resposta em relação à variação de resistência.

O componente “Resistor” representa a resistência elétrica na saída do gerador. Na simulação, o valor da resistência foi variado em: 26,6 42, 84 e 150 ohms.

As curvas da Fig.(26) representam o rendimento de cada simulação utilizando

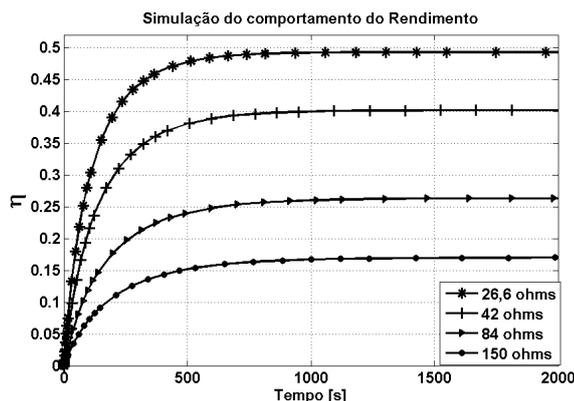


Figura 26: Simulação numérica do rendimento

resistências diferentes, as curvas partem do zero, pois no tempo zero o conjunto motor/gerador está parado. Depois elas demoram cerca de 1000 segundos para entrar em regime permanente, devido à inércia do conjunto motor e gerador.

Pode-se observar na resposta da simulação que a curva do rendimento sofre alteração de acordo com o tamanho da resistência presente no circuito do gerador. Nota-se que rendimento decresce com o aumento da resistência.

Utilizou-se os resultados obtidos em regime permanente para traçar o gráfico do comportamento do rendimento em função da carga na saída do gerador, que é apresentado na Fig(27).

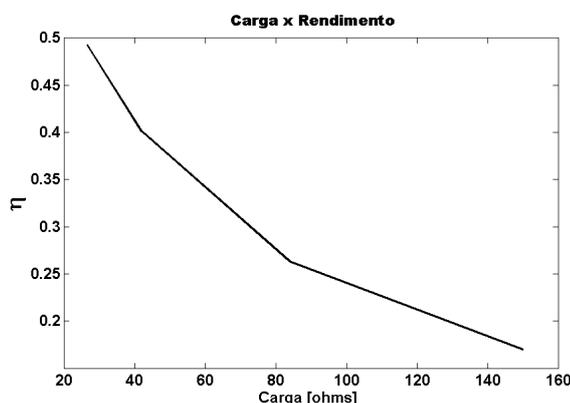


Figura 27: Simulação do comportamento do rendimento em função da carga

Na simulação, o rendimento utilizando a carga de 26,6 ohms é de aproximadamente 50%, enquanto para a carga de 150 ohms é de aproximadamente 17%, observando uma queda de 66% do rendimento.

Esta simulação não serve para achar o valor exato do rendimento, pois os parâmetros aplicados no motor e no gerador não estão de acordo com os parâmetros físicos reais, portanto a única conclusão que tira dessa simulação é que o rendimento do sistema real deve variar de acordo com a resistência aplicada em cada ensaio.

5 Resultados

5.1 GENERALIDADES DOS ENSAIOS

Cada curva de rendimento foi feita com 8 pontos de velocidade que foram obtidos por meio da variação da tensão do motor nos valores: 3 V, 5 V, 7, 10 V, 13 V, 15 V, 18 V e 20 V.

Para ambas as metodologias, foram utilizados 5 diferentes tipo de ensaios variando a carga no circuito do gerador, sendo as resistências utilizadas: 26,6 ohms, 42 ohms, 50 ohms, 68 ohms e 150 ohms.

Como este trabalho está analisando duas metodologias distintas de cálculo do rendimento, os ensaios foram feitos separadamente, e por isso serão apresentados primeiramente de maneira separada, para depois comparar os dois métodos, nos casos em que as resistências dos ensaios são iguais.

Em todas as curvas de rendimento a unidade da velocidade é rps (rotações por segundo).

Todos os pontos obtidos nos ensaios estão listados nos ANEXOS A e B.

5.2 ENSAIOS COM A UTILIZAÇÃO DO FREIO DE PRONY

Cada curva do gráfico da Fig.(28) representa uma série de ensaios realizados utilizando o método de cálculo da potência do eixo com a utilização do freio de Prony. Pode-se observar 5 curvas distintas, cada uma representa um ensaio realizado com uma resistência diferente definida no circuito do gerador.

Como o comportamento de todas as curvas é linear, para esse método, utilizou uma aproximação linear na linha de tendência de cada série, sendo as equações utilizadas nas aproximações definidas na Tab. (1).

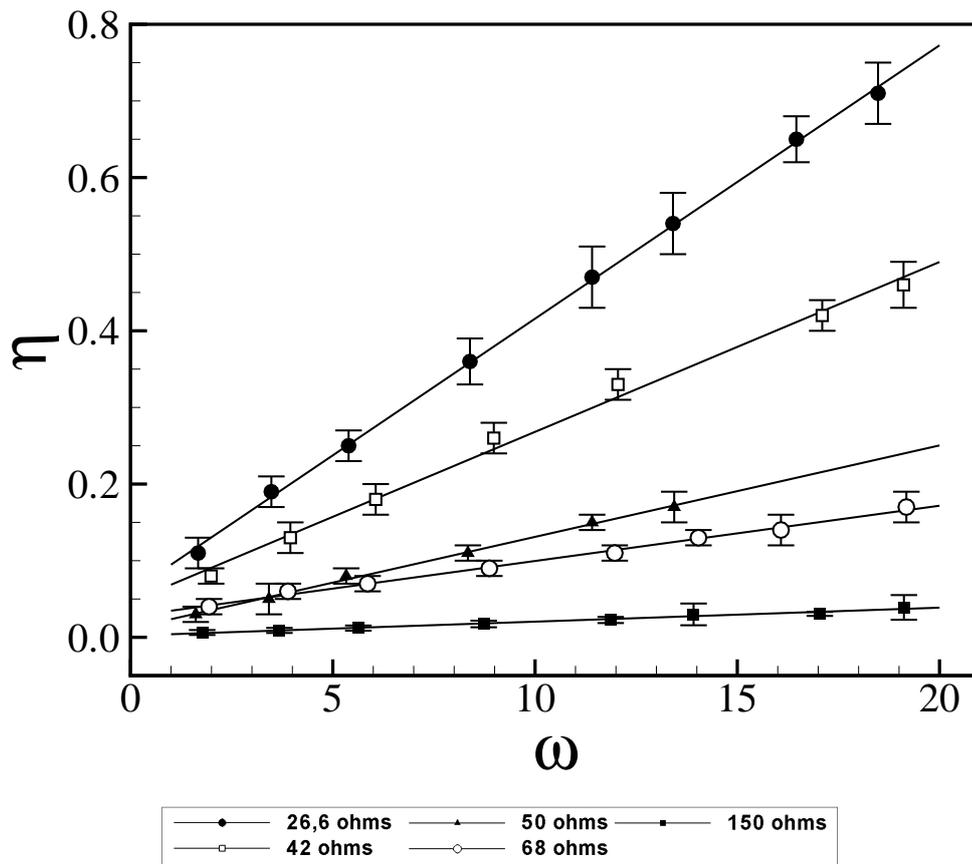


Figura 28: Ensaio utilizando o Freio de Prony

Tabela 1: Curvas de rendimento com o método do freio de Prony

Resistência	Equações do rendimento
26,6 ohms	$\eta = 0,0359\omega + 0,0563$
42 ohms	$\eta = 0,0223\omega + 0,0445$
50 ohms	$\eta = 0,0114\omega + 0,0141$
68 ohms	$\eta = 0,0075\omega + 0,0246$
150 ohms	$\eta = 0,0018\omega + 0,0022$

5.3 ENSAIOS COM A UTILIZAÇÃO DO FATOR DE ATRITO

Primeiramente, para este ensaio foi necessário encontrar a função para o fator de atrito, Ensaizando o motor em vazio e utilizando a Eq.(3.2). Os dados obtidos são apresentados no gráfico da Fig.(29).

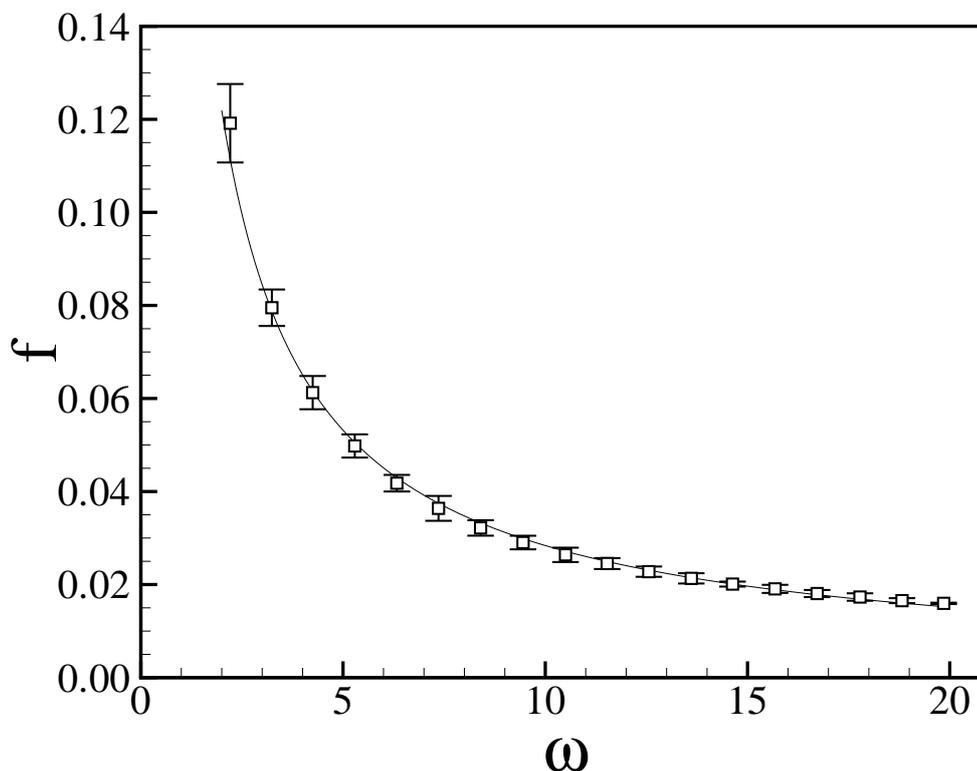


Figura 29: Curva experimental do fator de atrito

Na obtenção dessa curva, foram utilizados mais pontos que os outros ensaios, pois é por meio da equação do fator de atrito que será calculado a potência mecânica. Esses pontos são resultados do comportamento do fator de atrito em função da velocidade, sendo a variação da velocidade obtida pela variação da fonte ligada ao motor que foi variada de 1 em 1 volt entre 3 V até 20 V.

Como mostrado na Figura (29), a curva apresenta um comportamento de uma função de potência, logo a curva foi aproximada por uma função correspondente ao seu comportamento, resultando na Eq.(5.1),

$$f = 0,228 \cdot \omega^{-0,906}. \quad (5.1)$$

Após o cálculo do fator de atrito, pode-se chegar às curvas de rendimento, mostradas na Fig.(30).

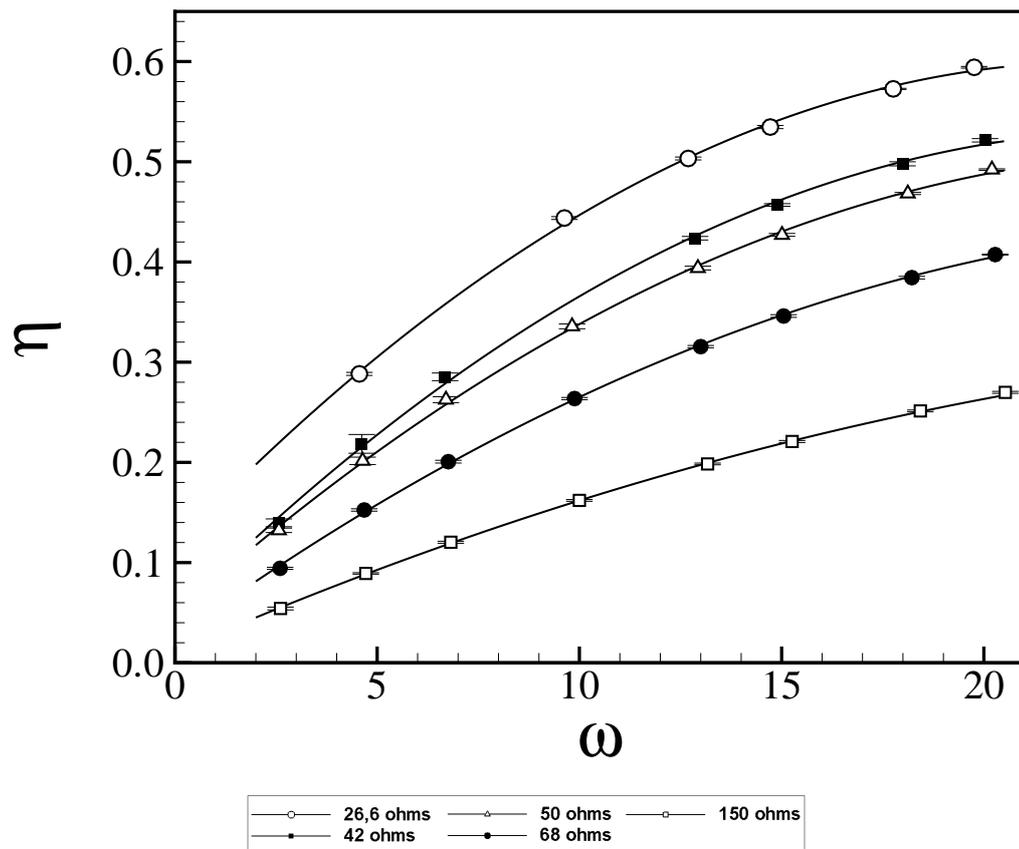


Figura 30: Ensaio utilizando o Fator de atrito

Diferentemente do ensaio com o freio de Prony, as curvas mostradas na Fig.(30) têm um comportamento de parábolas. Portanto foram utilizadas aproximações via um polinômio de segunda ordem para aproximar todas as curvas, que são apresentadas na Tab. (2).

Tabela 2: Curvas de rendimento com o método do fator de atrito

Resistência	Equações do rendimento
26,6 ohms	$\eta = -0,0009\omega^2 + 0,0421\omega + 0,1176$
42 ohms	$\eta = -0,0008\omega^2 + 0,0401\omega + 0,0479$
50 ohms	$\eta = -0,0007\omega^2 + 0,036\omega + 0,0484$
68 ohms	$\eta = -0,0005\omega^2 + 0,0291\omega + 0,025$
150 ohms	$\eta = -0,0002\omega^2 + 0,0173\omega + 0,0119$

5.4 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS

Na Fig.(31), foram plotados os resultados dos dois métodos de acordo com a carga utilizada. A primeira diferença aparente entre as curvas é o tipo de aproximação que foi utilizada, em seguida observa-se a diferença entre as magnitudes.

Utilizando as equações de aproximação das curvas, pode-se estimar uma porcentagem do erro médio entre as duas metodologias. Sendo:

$$Erro = \frac{1}{N} \cdot \sum \frac{\eta_{freio}}{\eta_{fa}} \cdot 100\%. \quad (5.2)$$

Em que:

N é igual ao número de pontos obtidos.

η_{freio} é o rendimento obtido via Freio de Prony.

η_{fa} é o rendimento obtido via Fator de atrito.

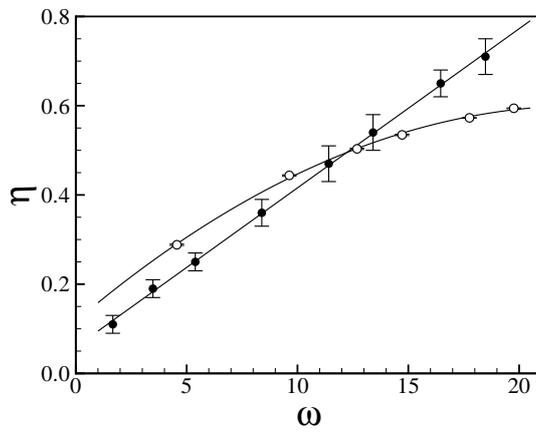
Utilizando a Eq.(5.2) para todas as resistências ensaiadas, pode-se chegar aos seguintes erros:

- $Erro_{26,6} = 5,69\%$;
- $Erro_{42} = 22,73\%$;
- $Erro_{50} = 60,96\%$;
- $Erro_{68} = 57,75\%$;
- $Erro_{150} = 87,18\%$;

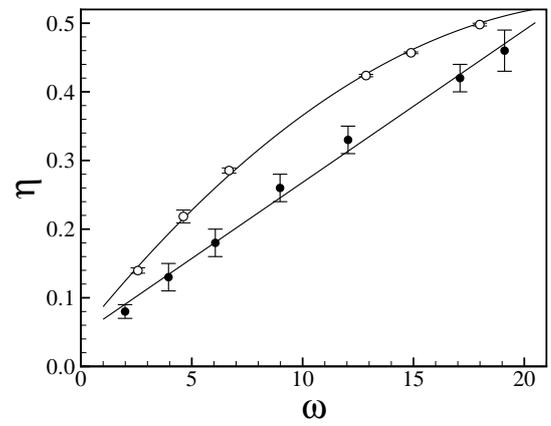
$$Erro_{150} > Erro_{50} > Erro_{68} > Erro_{42} > Erro_{26}. \quad (5.3)$$

Nota-se que em geral o erro entre os dois métodos aumenta de acordo com o aumento da carga, o que significa que com o aumento das cargas as curvas ficam mais distantes entre elas, como observado na Fig.(31).

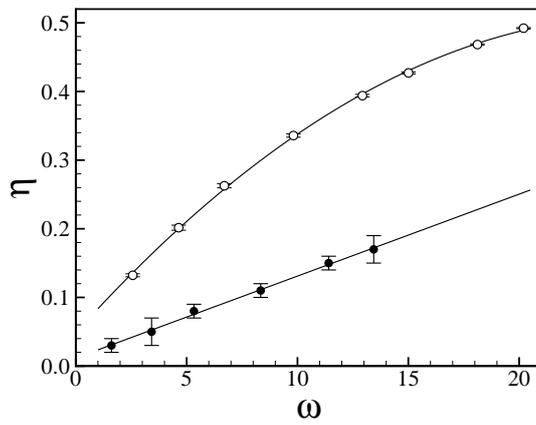
A diferença entre as curvas apresentadas nos gráficos da Fig.(31) é dada devido a diferença da forma de medição entre os dois métodos aplicados. No método do freio de Prony a medição da potência mecânica é feita de maneira direta, já o método do fator de atrito utiliza medidas indiretas e um modelo matemático para chegar ao resultado da mesma potência.



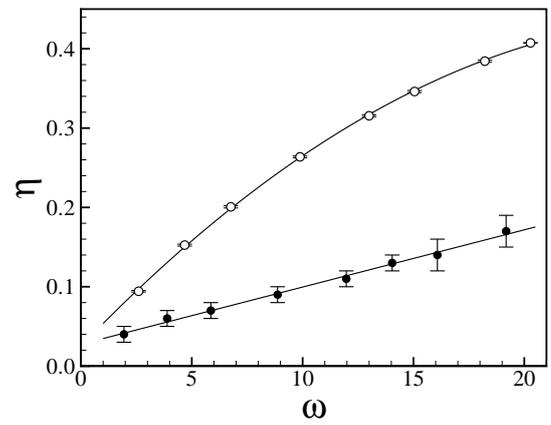
(a) 26,6 ohms



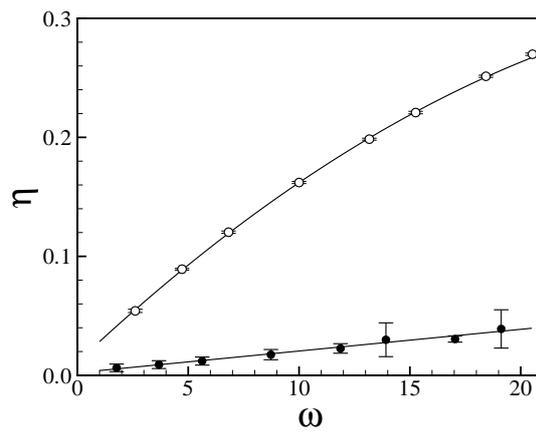
(b) 42 ohms



(c) 50 ohms



(d) 68 ohms



(e) 150 ohms

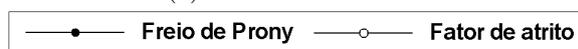


Figura 31: Comparação dos métodos

6 CONCLUSÃO

Com a variação da resistência na saída do gerador, notou-se que o rendimento do gerador diminuía de acordo com o aumento da carga, o que já era esperado de acordo com a simulação computacional realizada via Simulink.

Com a comparação dos dois métodos utilizados, pode-se observar que há uma discordância entre ambos, pois, em geral, a magnitude dos rendimentos encontrados com a utilização do fator de atrito é maior que os rendimentos obtidos com o freio de Prony.

Nota-se que para o circuito de 26,6 ohms as curvas se mantêm próxima, chegando até a se cruzarem, possibilitando assim alegar que para essa faixa de resistência os dois métodos possam ter certa equivalência, porém com o aumento da carga no gerador a diferença entre as curvas aumenta, descartando qualquer possibilidade de equivalência entre os dois métodos.

Como o método do fator de atrito é considerado um método de medição indireta é possível afirmar que a referência da magnitude do rendimento seja o valor encontrado com o método do freio de Prony.

Sabendo que no método do fator de atrito foi considerado que a dissipação de energia do gerador seria realizada somente por dois fenômenos: atrito e por efeito joule, e como o resultado não está de acordo com o resultado via medida direta, pode-se chegar à conclusão que há uma falha nessa teoria, necessitando de uma reformulação do sistema físico do dinamômetro, para o cálculo da potência mecânica. Como o rendimento está dando maior que o real é provável que no sistema físico esteja-se esquecendo de considerar alguma perda. Perda essa que aumenta significativamente com o aumento da carga, assim como demonstrado nos gráficos de comparação.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Outro tipo de ensaio que pode ser realizado para cálculo da potência de eixo é o ensaio em balanço do gerador. Esse ensaio seria uma outra boa maneira de comprovar que o método do cálculo da potência mecânica, via fator de atrito, está com seu modelo matemático incompleto.

O próximo passo para o ensaio da turbina hidrocínética é realizar o ensaio em modelo reduzido utilizando o microdinamômetro ensaiado nesse trabalho como sensor de potência.

7 Referências Bibliográficas

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2008). *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. 3ª edição.

Albertazzi Gonçalves Jr., A. (2008). *Fundamentos de metrologia científica e industrial*. Ed.Manole.

Batista da Silva, S. (2010). *Dimensionamento ótimo de sistemas híbridos, com geração fotovoltaica e célula a combustível, para atendimento a comunidades isoladas na amazônia*. UnB: Tese de doutorado.

Brasil Jr, A. C. (2009). *Micro-hydropower for remote communities*. IV International Bioenergy Congress.

Brasil Jr, A., & Rey, R. (2005). *Modeling losses on small DC electrical motors*. Nota técnica interna - UnB/ENSAM.

Brasil Jr, A., Lula, F., Maruzewski-Gaud, P., Nogra, R., & Salomon, L. (2006). *Experimental Study of a New Design of Hydrokinetic Turbine*. Recife-PE: IV CONEM.

Coutinho, P. H. M.(2007). *Análise de geração de energia em sistemas de eletrificação descentralizados*. UnB: Projeto final de graduação.

Dixon, S. (2005). *Fluid mechanics, thermodynamics of turbomachinery*. Ed. Butterworth-Heinemann.

Güney, M., & Kaygusuz, K. (2010). *Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 2996-3004.

Henn, É. (2006). *Máquinas de fluido*. Ed.UFSM.

International Energy Agency. (s.d.). Fonte: <http://www.iea.org/stats/pdfgraphs/29TPESPI.pdf>

Khan, M., Bhuyan, G., Iqbal, M.,& Qualicoe, J. (2009). *Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review*. *Applied Energy*, pp. 1823 - 1835.

Oliveira, T. F.(2006). *Estudo Experimental de um Modelo Reduzido de Turbina Hidrocínética*. UnB: Projeto final de graduação.

Rodrigues, A. P. (2007). *Parametrização e simulação numérica da turbina hidrocínética - Otimização via algoritmos genéricos*. UnB: Dissertação de Mestrado.

Tiago Fo, G. (2003). *The state of art of Hydrokinetic power in Brazil*. Waterpowe XIII.

van Els, R. H. (2008). *Sustentabilidade de projetos de implementação de aproveitamentos hidroenergéticos em comunidades tradicionais na Amazônia: Casos no Suriname e Amapá*. UnB: Tese de doutorado.

White, F. M.(2011).*Mecânica dos fluidos*. 6ª edição. Ed. Mc Graw Hill

ANEXO A – Dados do método do freio de Prony

Tabela 3: Método com freio de Prony - Dados

	50 ohms							
[V]	3	5	7	10	13	15	18	20
ω [rps]	2,174	4,16	6,13	9,15	12,22	14,2	17,27	19,31
cc1 [g]	406	276	249	222	195	177	165	150
cc2 [g]	747	579	608	608	615	625	627	636
I [ma]	44,91	85,9	124	185,8	247,6	287,5	350,3	390,5
ω [rps]	2,081	4,04	6,02	8,99	12,05	14,04	17,04	19,08
cc1 - g	283	251	226	194	172	163	150	146
cc2 - g	509	621	626	658	679	685	698	703
I [ma]	42,84	85,4	122,8	183,5	243,6	284,7	345,1	385
ω [rps]	1,967	3,899	5,91	8,99	12,05	14,12	17,18	19,19
cc1 - g	304	202	178	169	160	162	161	177
cc2 - g	749	627	652	648	662	657	671	693
I [ma]	40,73	81,5	118,6	180,5	243,5	285,8	347,9	389,5
ω [rps]	2,07	4,05	6,02	9,05	12,05	13,99	17,1	19,08
cc1 - g	231	248	234	203	187	169	147	137
cc2 - g	666	584	624	646	668	682	709	725
I [ma]	40,93	77,8	119	180,2	241,2	280,3	341	381,3
ω [rps]	1,792	3,69	5,72	8,85	11,92	13,97	17,04	19,08
cc1 - g	163	195	185	175	167	161	151	153
cc2 - g	549	768	742	729	720	731	738	747
I [ma]	35,39	75,2	112,5	175,4	237,9	280	342,9	383,7
ω [rps]	2,02	4,1	6,1	9,09	12,2	14,13	17,15	19,12
cc1 - g	361	256	240	218	192	183	144	138
cc2 - g	746	595	604	611	638	640	682	690
I [ma]	35,44	75,3	115,2	175,8	237,8	280,1	341	381,3
ω [rps]	2,049	4,07	7,04	9,05	12,12	4,04	17,1	19,08
cc1 - g	207	260	241	221	201	186	152	149
cc2 - g	501	598	606	627	646	661	717	724
I [ma]	35,08	77,02	132,4	174	237,2	278,5	339,3	380,3
ω [rps]	1,757	3,6	5,57	8,66	11,76	13,89	16,92	18,9

cc1 - g	398	289	204	201	197	194	178	165
cc2 - g	563	816	838	817	822	816	840	863
I [ma]	33,36	70,3	107,8	165,1	231,7	274,7	335,4	375,9
26,6 ohms								
v	3	5	7	10	13	15	18	20
ω [rps]	1,887	3,85	5,81	8,81	11,83	13,64	16,61	18,59
cc1 - g	535	379	340	312	261	227	202	185
cc2 - g	986	741	771	779	806	833	852	854
I [ma]	48,52	118,4	174,7	263,1	353,4	413	502,9	563,5
ω [rps]	1,603	3,425	5,33	8,3	11,44	13,55	16,67	18,76
cc1 - g	312	239	225	187	169	165	172	202
cc2 - g	828	910	938	977	972	952	926	930
I [ma]	-0,57	117,83	174,13	262,53	352,83	412,43	502,33	562,93
ω [rps]	1,689	3,56	5,43	8,46	11,56	13,61	16,74	18,59
cc1 - g	415	267	239	197	192	184	162	154
cc2 - g	896	824	884	913	912	917	962	988
I [ma]	0,31	118,14	174,44	262,84	353,14	412,74	502,64	563,24
ω [rps]	1,661	3,487	5,43	8,44	11,29	13,33	16,45	18,73
cc1 - g	430	293	265	230	215	176	168	218
cc2 - g	948	841	930	965	978	1041	1057	986
I [ma]	0,44	98,74	157,74	239,84	331,44	394,64	493,74	556,34
ω [rps]	1,692	3,65	5,36	8,4	11,44	13,44	16,39	18,21
cc1 - g	527	343	259	241	226	211	199	170
cc2 - g	996	850	936	949	952	959	978	1070
I [ma]	52,93	111,3	160,3	248,9	342,1	403,2	495,6	549,9
ω [rps]	1,522	3,279	5,19	8,06	11,08	13,09	16,21	18,32
cc1 - g	477	254	249	212	189	187	208	213
cc2 - g	1113	918	1000	1058	1074	1068	1024	1038
I [ma]	47,17	98,3	157,3	239,4	331	394,2	493,3	555,9
ω [rps]	1,689	3,509	5,45	8,55	11,56	13,51	16,47	18,45
cc1 - g	359	220	193	189	181	178	159	136
cc2 - g	623	705	798	773	801	802	859	921
I [ma]	50,63	97,2	159,3	252,8	346,5	408,6	496,4	555
ω [rps]	1,592	3,11	5,14	8,13	11,11	13,14	16,13	18,21
cc1 - g	226	230	208	178	174	169	164	161
cc2 - g	538	900	951	981	1006	1009	1027	1045
I [ma]	42,86	96,5	148,5	239,5	331,9	394,2	485,3	547,4
50 ohms								
v	3	5	7	10	13	15	18	20

ω [rps]	1,876	3,82	5,75	8,62	11,59	13,56	16,67	18,69
cc1 - g	386	318	313	251	232	208	198	198
cc2 - g	939	755	815	901	917	943	956	950
I [ma]	33,83	6,61	98,3	147,3	200	234,7	288,6	324,9
ω [rps]	1,473	3,226	5,1105	8,05	11,14	13,32	16,58	18,69
cc1 - g	416	226	198	159	149	162	175	191
cc2 - g	1136	925	1047	1132	1091	1024	973	943
I [ma]	27,42	51,7	85,9	137,7	192,7	231	288	326,1
ω [rps]	1,582	3,38	5,21	8,44	11,46	13,42	16,33	18,34
cc1 - g	272	267	211	215	210	179	160	159
cc2 - g	741	916	998	958	969	1035	1093	1099
I [ma]	29,7	49,34	93	144,1	198,7	231,6	282,9	321
ω [rps]	1,433	3,17	4,99	8,06	10,99	13,03	15,94	18,02
cc1 - g	298	295	209	188	172	163	155	160
cc2 - g	931	1115	1111	1136	1161	1203	1227	1251
I [ma]	26,96	72,1	92,4	138	188,7	223,1	275,9	312,1
ω [rps]	1,587	3,378	5,298	8,23	11,2	13,19	16,18	18,38
cc1 - g	557	360	336	294	256	231	215	222
cc2 - g	1132	1028	1071	1128	1065	1186	1194	1182
I [ma]	29,42	68,3	91,8	139,3	191,5	226,5	280,3	318,1
ω [rps]	1,431	3,14	4,98	7,89	11,17	13,2	16,31	18,32
cc1 - g	343	303	233	229	221	231	239	230
cc2 - g	1068	1023	1132	1116	1126	1125	1135	1173
I [ma]	26,38	76,6	92,9	145,9	199,8	236	288,2	318,4
ω [rps]	1,715	3,6	5,57	8,71	11,87	13,89	16	19,1
cc1 - g	577	341	318	303	293	286	279	231
cc2 - g	1058	919	915	906	905	897	900	1169
I [ma]	31,84	45,12	93	148,1	203,2	239,9	276	322,3
ω [rps]	1,779	3,683	5,73	8,75	11,83	13,89	17,01	19
cc1 - g	294	327	322	300	283	270	254	263
cc2 - g	537	866	868	889	912	907	906	891
I [ma]	31,46	83,8	99,1	149,5	203,5	239,9	293,5	330,9
68 ohms								
v	3	5	7	10	13	15	17	20
ω [rps]	2,203	4,22	6,25	9,26	12,27	14,29	16,33	19,4
cc1 - g	264	200	184	157	134	125	117	114
cc2 - g	541	423	447	478	512	526	528	531
I [ma]	27,89	51,25	77,3	114,7	151,1	176,8	202,2	240,3

ω [rps]	1,859	3,83	5,7	8,53	11,49	13,53	15,48	18,73
cc1 - g	589	406	333	283	246	222	197	202
cc2 - g	852	904	954	1014	1024	1047	1075	1019
I [ma]	24,88	48,4	71,2	105,3	143,2	168,1	193,3	235,8
ω [rps]	2,128	4,12	6,13	9,15	12,16	14,23	16,23	19,31
cc1 - g	183	217	198	176	160	152	145	143
cc2 - g	412	514	559	586	620	631	648	652
I [ma]	27,92	51,3	76,5	113,2	151,1	176,3	201,3	239,3
ω [rps]	1,867	3,77	6,01	8,73	11,94	14,04	16,08	19,16
cc1 - g	134	206	146	155	171	165	165	172
cc2 - g	604	723	750	781	744	743	747	766
I [ma]	26,1	49,2	73	107,5	147,6	174,1	199,9	237,6
ω [rps]	1,938	3,86	5,8	8,87	12,05	14,06	16,13	19,23
cc1 - g	341	271	181	178	168	158	155	148
cc2 - g	781	627	711	695	692	708	707	721
I [ma]	25,82	48,24	71,9	110,6	149,6	174,7	200,4	238,1
ω [rps]	1,773	3,63	5,66	8,79	11,98	14,12	16,21	19,27
cc1 - g	150	167	159	156	154	159	156	156
cc2 - g	460	728	771	754	741	716	705	720
I [ma]	24,12	47,6	71,3	108,6	148,1	174,6	200,4	240,7
ω [rps]	1,949	3,94	5,83	8,83	12,01	14,04	16,03	19,16
cc1 - g	220	249	202	193	182	170	162	159
cc2 - g	751	701	738	716	727	744	755	758
I [ma]	25,73	50,12	72,6	110,4	148,6	173,9	199,8	236,8
ω [rps]	1,736	3,61	5,67	8,77	11,87	13,99	16,13	19,16
cc1 - g	230	207	193	198	163	165	163	168
cc2 - g	501	738	808	798	798	778	766	766
I [ma]	23,07	43,36	71,2	108,3	146	172,1	199,2	237,2
150 ohms								
v	3	5	7	10	13	15	17	20
ω [rps]	1,969	3,93	5,88	8,99	12,12	14,08	17,18	19,21
cc1 - g	267	246	210	198	185	163	165	153
cc2 - g	450	703	735	730	763	800	830	868
I [ma]	12,66	25,16	36,36	54,43	73,2	85	103,9	113,8
ω [rps]	1,961	4,02	5,99	9,07	12,08	14,04	17,15	19,19
cc1 - g	235	297	269	247	206	190	179	178
cc2 - g	447	684	707	731	806	832	859	869
I [ma]	12,45	24,98	36,34	54,74	72,7	85	103,4	115,8
ω [rps]	2,053	4,03	6,04	9,13	12,23	14,16	17,21	19,16

cc1 - g	239	284	258	234	205	178	168	154
cc2 - g	535	631	657	692	735	779	798	837
I [ma]	12,17	24,29	36,64	54,92	73,3	85,1	103,5	115,9
ω [rps]	1,471	3,3	5,222	8,3	11,52	13,66	16,86	19,16
cc1 - g	152	197	194	175	184	184	184	191
cc2 - g	720	919	1001	1046	1029	1008	972	962
I [ma]	10,07	20,56	32,57	50,07	69,3	82,1	101,4	115,2
ω [rps]	1,414	3,18	5,05	8,32	11,4	13,48	16,53	18,55
cc1 - g	461	226	211	514	506	498	484	490
cc2 - g	1168	1094	1062	1027	1049	1105	1161	1148
I [ma]	9,91	19,96	31,81	49,39	68,7	81,2	99,3	112,2
ω [rps]	1,828	3,714	5,69	8,73	11,9	14,04	17,21	19,16
cc1 - g	259	232	213	107	171	186	166	160
cc2 - g	744	694	775	831	875	116	850	851
I [ma]	11,81	21,79	33,09	52,23	71,1	84,2	104,5	115,1
ω [rps]	1,773	3,67	5,62	8,71	11,98	14,12	17,18	19,34
cc1 - g	274	206	170	153	157	164	152	162
cc2 - g	702	711	759	794	787	776	800	790
I [ma]	10,63	23,18	34,63	52,19	71,5	84,6	103,2	116,3
ω [rps]	1,704	3,6	5,56	8,58	11,74	13,77	16,98	19,31
cc1 - g	425	274	258	227	215	205	198	206
cc2 - g	701	800	885	941	958	955	955	925
I [ma]	11,11	22,57	34,24	51,52	70,4	82,9	102,3	115

ANEXO B – Dados do método do fator de atrito

Tabela 4: Fator de atrito - Motor - Dados de velocidade

[V]	ω [rps]	ω [rps]	ω [rps]	ω [rps]	MEDIA	DESVIO
3,00	2,19	2,22	2,22	2,22	2,21	0,02
4,00	3,21	3,24	3,25	3,24	3,24	0,02
5,00	4,22	4,26	4,27	4,26	4,25	0,02
6,00	5,26	5,31	5,29	5,29	5,29	0,02
7,00	6,29	6,34	6,34	6,35	6,33	0,03
8,00	7,30	7,39	7,38	7,38	7,36	0,04
9,00	8,33	8,44	8,42	8,42	8,40	0,05
10,00	9,37	9,48	9,46	9,48	9,45	0,05
11,00	10,42	10,53	10,53	10,53	10,50	0,05
12,00	11,43	11,57	11,55	11,57	11,53	0,07
13,00	12,50	12,58	12,59	12,58	12,56	0,04
14,00	13,56	13,62	13,64	13,62	13,61	0,03
15,00	14,55	14,68	14,66	14,64	14,63	0,06
16,00	15,63	15,70	15,67	15,72	15,68	0,04
17,00	16,67	16,72	16,75	16,75	16,72	0,04
18,00	17,76	17,79	17,76	17,79	17,78	0,02
19,00	18,83	18,83	18,80	18,80	18,82	0,02
20,00	19,80	19,84	19,88	19,88	19,85	0,04

Tabela 5: Fator de atrito - Motor - Dados de corrente

[V]	I [mA]							
3,00	232,80	221,40	238,40	231,40	230,40	232,20	224,90	241,60
4,00	225,40	232,80	221,40	229,60	234,90	219,20	232,90	230,70
5,00	247,90	251,50	250,70	251,90	250,70	249,30	250,80	249,80
6,00	259,90	260,70	260,30	258,40	256,70	257,50	259,10	258,40
7,00	262,80	260,50	264,20	262,50	261,70	263,50	261,20	260,80
8,00	262,70	264,30	262,70	263,70	296,80	269,60	269,40	271,70
9,00	270,60	268,50	267,80	269,50	268,90	268,90	270,20	269,00
10,00	274,50	283,90	281,00	280,60	280,00	279,60	279,50	280,50
11,00	279,80	278,60	277,70	278,40	309,60	286,10	289,30	285,70

12,00	309,70	290,70	290,60	290,40	289,70	290,50	289,30	289,10
13,00	290,00	289,90	289,10	289,80	293,90	305,10	294,80	296,10
14,00	293,70	293,10	331,00	298,50	299,20	298,50	299,20	299,70
15,00	300,40	298,80	298,70	299,00	298,80	298,40	300,00	298,40
16,00	304,10	304,20	303,40	304,00	303,50	303,40	332,60	309,50
17,00	307,90	310,10	308,70	308,90	308,70	309,00	307,80	311,80
18,00	311,30	311,80	350,20	320,60	318,90	317,80	319,60	317,70
19,00	316,90	317,90	316,70	316,30	315,50	314,80	315,10	339,40
20,00	326,40	326,20	326,40	326,10	325,60	325,90	325,10	323,60
[V]	I [mA]							
3,00	223,60	233,60	233,10	226,90	240,20	221,90	232,90	231,00
4,00	244,40	240,40	241,80	241,90	240,10	241,00	242,00	238,90
5,00	251,30	249,70	250,00	249,20	250,80	250,60	248,80	251,60
6,00	257,20	258,10	254,70	256,00	257,70	260,10	259,40	258,10
7,00	262,90	261,80	260,40	261,90	261,40	261,30	263,00	261,90
8,00	269,10	272,00	270,70	270,90	270,20	271,10	269,90	271,00
9,00	276,80	276,70	276,30	274,40	276,30	275,30	275,50	277,30
10,00	279,70	279,40	279,70	279,30	279,40	280,40	281,60	281,30
11,00	285,40	284,40	285,60	284,80	285,10	284,20	284,90	284,90
12,00	289,70	289,20	290,50	290,00	289,80	289,30	289,90	290,30
13,00	296,00	296,20	296,00	296,50	296,10	295,40	296,70	295,60
14,00	299,00	298,40	298,20	299,70	299,30	298,20	298,80	300,30
15,00	298,20	299,00	298,90	299,60	299,30	299,90	299,60	306,90
16,00	310,00	309,90	308,90	308,10	307,40	307,40	307,30	309,00
17,00	314,80	313,30	312,50	313,20	313,70	312,30	313,40	315,40
18,00	318,80	316,80	317,10	316,50	316,60	316,80	317,10	318,70
19,00	322,50	322,20	321,80	322,00	321,60	323,40	322,10	320,90
20,00	326,20	325,40	324,40	323,90	325,50	324,60	326,00	324,80
[V]	I [mA]							
3,00	225,50	240,80	224,30	236,70	225,70	213,00	226,50	221,40
4,00	241,70	242,70	238,60	241,60	230,30	227,60	226,50	228,80
5,00	249,70	250,30	248,60	249,00	214,40	238,00	237,20	236,90
6,00	257,30	255,60	255,70	256,20	249,10	251,30	250,70	249,90
7,00	262,50	263,00	262,70	261,70	256,50	256,00	254,60	255,00
8,00	272,30	270,80	270,60	270,90	261,20	260,10	260,10	262,00
9,00	275,70	276,50	275,20	275,90	254,90	254,60	283,30	260,70
10,00	280,60	280,20	280,60	279,90	270,90	272,60	252,10	265,00
11,00	284,20	284,80	284,90	285,00	254,00	269,90	271,30	271,70
12,00	290,50	289,70	289,80	289,60	281,20	280,70	281,80	281,10

13,00	295,60	296,00	294,50	294,90	288,30	287,50	287,20	260,80
14,00	299,90	300,10	299,80	299,20	293,40	273,10	287,50	287,50
15,00	306,00	304,80	305,80	306,00	299,30	298,10	298,40	298,90
16,00	309,80	309,70	308,60	308,20	303,50	303,40	303,40	305,60
17,00	314,00	313,70	312,90	314,40	310,60	267,70	305,10	305,00
18,00	317,60	318,30	317,90	317,20	315,90	315,80	315,00	284,30
19,00	322,50	321,30	321,80	322,60	321,40	293,50	315,30	314,40
20,00	326,00	326,60	323,90	323,90	323,70	322,90	322,50	322,80
[V]	I [mA]							
3,00	223,40	220,70	212,50	225,70	217,30	211,80	225,20	221,50
4,00	228,80	230,00	230,00	228,70	228,20	228,50	229,00	227,70
5,00	236,70	237,00	236,70	238,10	237,10	238,00	238,80	237,10
6,00	243,50	244,40	244,50	244,30	243,30	243,30	243,50	242,90
7,00	248,10	249,50	249,80	249,40	250,70	249,90	249,60	249,60
8,00	253,90	254,60	254,50	255,00	256,20	255,10	253,30	255,00
9,00	259,90	259,60	259,90	260,10	261,00	260,10	259,10	260,50
10,00	264,60	265,40	265,70	267,00	266,00	264,80	266,30	266,00
11,00	270,70	270,90	270,20	270,90	270,70	270,60	270,00	270,80
12,00	278,10	276,00	276,20	275,40	276,70	276,40	276,60	277,00
13,00	282,10	283,10	281,50	282,30	281,90	281,00	282,20	283,00
14,00	286,60	287,40	287,90	288,00	288,00	287,80	288,40	288,60
15,00	282,70	294,10	293,60	294,30	294,00	295,00	294,00	294,20
16,00	299,50	300,00	298,20	299,00	299,70	300,40	298,90	299,00
17,00	303,60	305,80	304,00	304,60	305,70	304,80	305,60	304,30
18,00	310,50	310,40	310,80	309,50	309,70	310,00	309,00	310,30
19,00	315,20	316,50	315,30	316,00	315,60	316,30	315,90	316,10
20,00	323,30	322,60	323,40	322,00	322,60	322,50	323,40	322,40
[V]	I [mA]							
3,00	226,60	219,80	213,00	224,60	216,50	211,80	223,80	215,80
4,00	229,20	227,60	229,30	229,90	228,40	227,50	231,30	230,20
5,00	236,90	237,50	237,40	238,10	238,30	237,20	236,70	236,10
6,00	242,80	244,30	244,60	244,10	243,90	244,20	243,90	244,10
7,00	249,80	251,20	248,50	250,00	248,70	249,20	249,50	249,40
8,00	255,50	253,70	254,80	255,00	256,10	254,00	254,80	254,80
9,00	260,60	262,10	261,00	259,70	259,70	260,40	259,90	261,60
10,00	266,60	265,60	265,10	265,80	265,40	267,00	266,80	266,20
11,00	271,20	270,70	270,60	271,00	272,50	272,40	271,00	270,90
12,00	275,80	276,20	276,00	276,60	276,10	275,40	276,10	275,80
13,00	282,10	281,70	282,50	282,70	281,30	281,70	282,90	282,00

14,00	287,20	288,60	288,80	287,00	287,80	288,40	287,40	287,20
15,00	294,80	295,40	295,10	293,50	293,40	293,60	293,60	293,70
16,00	297,60	300,70	300,30	299,40	300,80	300,20	299,30	299,60
17,00	304,40	305,60	305,30	305,00	303,90	303,30	304,40	304,60
18,00	311,30	310,60	309,40	309,30	309,10	308,80	308,30	310,00
19,00	315,80	316,50	315,90	315,90	315,90	315,70	317,90	315,00
20,00	322,40	323,80	322,70	322,00	321,80	321,50	321,80	321,60

Tabela 6: Fator de atrito - Dados de geração

26,6 ohms								
ω [rps]	2,51	4,52	6,56	9,59	12,66	14,65	17,73	19,76
I [mA]	75,8	137,1	231,2	293,8	388,0	450,3	542,8	604,3
ω [rps]	2,53	4,56	7,59	9,62	12,69	14,71	17,76	19,76
I [mA]	75,9	137,4	231,8	293,8	387,9	449,6	542,8	604,6
ω [rps]	2,53	4,55	6,56	9,62	12,66	14,71	17,76	19,76
I [mA]	75,4	136,9	230,2	294,1	388,4	450,7	543,0	604,4
ω [rps]	2,25	4,56	6,60	9,66	12,72	14,75	17,76	19,76
I [mA]	76,1	136,9	231,5	293,6	387,6	450,7	542,6	603,8
42 ohms								
ω [rps]	2,56	4,61	6,71	9,71	12,86	14,87	17,99	20,04
I [mA]	49,0	87,6	131,7	195,3	259,1	301,5	363,7	405,4
ω [rps]	2,58	4,62	6,67	9,76	12,85	14,88	17,99	20,00
I [mA]	50,6	92,2	133,6	196,8	260,2	302,0	365,2	406,4
ω [rps]	2,57	4,62	6,67	7,71	12,86	14,93	17,99	20,04
I [mA]	50,3	91,9	133,3	196,5	260,0	302,0	365,1	406,7
50 ohms								
ω [rps]	2,56	4,62	6,69	9,80	12,92	14,99	18,12	20,20
I [mA]	44,7	79,8	115,1	169,1	223,8	260,5	314,1	350,9
ω [rps]	2,57	4,65	6,72	9,83	12,94	15,02	18,12	20,20
I [mA]	44,0	78,9	115,5	169,9	224,1	260,5	314,8	350,5
ω [rps]	2,58	4,64	6,69	9,83	12,94	15,02	18,12	20,20
I [mA]	44,3	78,1	114,1	168,6	223,0	259,8	314,4	350,5
68 ohms								
ω [rps]	2,60	4,68	6,76	9,85	12,99	15,04	18,25	20,28
I [mA]	31,7	57,4	83,1	122,0	161,3	187,5	226,3	251,6
ω [rps]	2,60	4,68	6,77	9,88	13,02	15,06	18,21	20,28
I [mA]	31,6	57,4	83,0	122,0	160,9	186,8	225,6	251,5
ω [rps]	2,60	4,67	6,76	9,90	12,99	15,06	18,21	20,28

I [mA]	31,5	57,1	82,6	121,9	160,9	187,1	225,9	251,6
150 ohms								
ω [rps]	2,61	4,73	6,83	10,00	13,18	15,27	18,42	20,53
I [mA]	15,6	28,6	41,2	60,6	79,6	92,3	111,4	124,0
ω [rps]	2,61	4,73	6,83	10,00	13,18	15,27	18,42	20,53
I [mA]	16,0	28,5	41,4	60,6	79,8	92,6	111,7	124,1
ω [rps]	2,61	4,71	6,81	10,00	13,16	15,24	18,45	20,53
I [mA]	15,8	28,6	41,2	60,4	79,6	92,3	111,5	124,4
